PUBLISHED BY
UNIVERSITY OF NEW MEXICO, NEUTROSOPHIC SCIENCE INTERNATIONAL ASSOCIATION AND LATIN AMERICAN ASSOCIATION OF NEUTROSOPHIC SCIENCES .

VOL. 41
2026

NEUTROSOPHIC COMPUTING AND MACHINE LEARNING

ISSN 2574-1101 (ONLINE)
ISSN 2574-1098 (PRINT)

Neutrosophic Computing Machine and Learning

Copyright Notice

The authors of the articles do hereby grant Neutrosophics Computing and Machine Learning non-exclusive, worldwide, royalty-free license to publish and distribute the articles in accordance with the Budapest Open Initiative: this means that electronic copying, distribution and printing of both full-size version of the journal and the individual can be made by any user without permission or charge. The authors of the articles published in Neutrosophic Computing and Machine Learning retain their rights to use this journal as a whole or any part of it in any other publications and in any way they see fit. Any part of Neutrosophic Computing and Machine Learning howsoever used in other publications must include an appropriate citation of this journal

Información para Autores y Suscriptores

"Neutrosophic Computing and Machine Learning" (NCML) es una revista académica que ha sido creada para publicaciones de estudios avanzados en neutrosofía, conjunto neutrosófico, lógica neutrosófica, probabilidad neutrosófica, estadística neutrosófica, enfoques neutrosóficos para el aprendizaje automático, etc. y sus aplicaciones en cualquier campo.

Todos los trabajos presentados deben ser profesionales, con un buen uso del idioma inglés o español, que contengan una breve reseña de un problema y los resultados obtenidos.

La neutrosofía es una nueva rama de la filosofía la cual estudia el origen, naturaleza y alcance de las neutralidades, así como sus interacciones con diferentes espectros ideacionales. La teoría considera que cualquier noción o idea <A> junto a su opuesto o negación <antiA> y el espectro de neutralidades <neutA> entre ellos(es decir nociones o idea que no soportan a ni a <A> ni a <antiA>). Las ideas <neuA> y <antiA> juntas son nombradas <noA>.

La neutrosofía es una generalización de la dialéctica de Hegel (Esta última es basada en <A> y <AntiA> solamente).

De acuerdo a esta teoría toda idea <A> tiende a ser neutralizada y balanceada por <antiA> y <noA>-como un estado de equilibrio.

En su forma clásica <A>, <neutA>, <antiA> son disjuntos dos por dos. Pero como en varios casos los límites entre conceptos son vagas a imprecisas, es posible que <A>, <neutA>, <antiA> (y <nonA> por supuesto) tengan partes comunes dos por dos también, o incluso los tres a la vez.

Los conjuntos neutrosóficos y la lógica neutrosófica son generalizaciones de los conjuntos difusos de la lógica difusa respectivamente (y especialmente de los conjuntos intuicionista y respectivamente de la lógica difusa intuicionista). En la lógica neutrosófica cada proposición tiene un grado de veracidad (T), un grado de indeterminación (I) y un grado de falsedad (F) donde T, I, F son subconjuntos estándar o no estándar de] -0, 1+ [,

La Probabilidad Neutrosófica es una generalización de las probabilidades clásicas e imprecisas.

La estadística neutrosófica es una generalización de las estadísticas clásicas e imprecisas.

Lo que distingue a la neutrosofía de otros campos es el <neutA>, que no significa ni <A> ni <antiA>.

<neutA> , el cual por supuesto depende de <A>, puede ser indeterminación, neutralidad, empate en un juego, desconocimiento, contradicción, ignorancia, imprecisión, etc.

Todos los envíos deben realizarse con el siguiente formato:

http://fs.unm.edu/NCML/NCML-paper-template.doc

http://fs.unm.edu/ScinceLibrary.htm

Para poner a consideración un trabajo, envíe el archivo por correo electrónico a los editores en jefe. Para solicitar problemas impresos, póngase en contacto con los editores. Esta revista es de acceso abierto, no comercial, edición académica. Es impreso para donaciones privadas.

Más información sobre la neutrosofía, así como un conjunto de libros y materiales en distintos idiomas se encuentran libremente disponibles en el sitio de la UNM: http://fs.unm.edu/neutrosophy.htm

La página principal de esta revista puede ser accedida en: http://fs.unm.edu/NCML/

A Quarterly International Journal in Information Science and Engineering

Editors-in-Chief

Prof. Florentin Smarandache, PhD, Postdoc, Mathematics Department, University of New Mexico, Gallup, NM 87301, USA. Email: smarand@unm.edu
Prof. Maikel Leyva-Vázquez PhD. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador E-mail: mleyvaz@gmail.com

Associated Editors:

José Felipe Ramírez Pérez, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.
Milton Maridueña Arroyave, Instituto Tecnológico Superior Vicente Rocafuerte, Guayaquil, Ecuador.
Karina Pérez-Teruel, Universidad Abierta para Adultos, Santiago de los Caballeros, República Dominicana.
Neilys González Benítez, Centro Meteorológico Provincial de Pinar del Río, Cuba.
Jesús Estupiñán Ricardo, Universidad Regional Autónoma de Los Andes, República de Ecuador.
Noel Batista Hernández, Universidad de Guayaquil, República de Ecuador.
Julio Barzola-Monteses, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

Editors

Rodolfo González Ortega, Universidad de Feevale Brasil.
Oiner Gómez Baryolo, Facultad de Sistemas Computacionales y Telecomunicaciones de la Universidad Tecnológica ECOTEC, Samborondón, Guayas, Ecuador.
Jesús Hechavarría Hernández, Universidad de Católica Santiago de Guayaquil Ecuador.
Salah Hasan Saleh, Universidad de las Ciencias Informáticas, Habana Cuba.
Milton Villegas Alava, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
Johanna Irene Escobar Jara, Asociación Latinoamericana de Ciencias Neutrosóficas, Guayaquil, Ecuador.
Ameirys Betancourt Vazquez, Polytechnic Institute of Technology and Science, Luanda, Angola.
Diego Silva Jiménez, Instituto de Investigación e Innovación en Salud, Universidad Central Santiago de Chile, República de Chile.
Lenin Villalobos Egaña, Centro de Educación Continua, Universidad Antofagasta, República de Chile.

INDICE

No.	Paginas	Titulo
1	1-30	Iterative MultiFuzzy Set, Iterative MultiNeutrosophic Set, Iterative Multisoft set, and MultiPlithogenic Sets
2	31-36	Atención A Educandos Con Bajos Resultados En El Aprendizaje: Desafío Para El Desempeño Profesional Docente
3	37-45	Gestión de riesgos en emprendimientos minoristas agro comerciales en Manabí mediante AHP–TOPSIS
4	46-70	Fuzzy Tolerance Hypergraphs and Fuzzy Tolerance Superhypergraphs
5	71-78	An´alisis de Estrategias de Mitigaci´on de Riesgos en el Sector Retail. Aplicacio´n de M´etodos AHP y TOPSIS
6	79-98	Análisis Neutrosófico de las Conductas Disruptivas en Niños de 6 a 8 Años y su Impacto en el Rendimiento Académico: Aplicación del Método de Hipótesis Plitogénica.
7	99-112	Fomento de la Comprensión Lectora en Cuarto Grado desde la Psicología Neutrosófica en Plata-formas Digitales
8	113-125	La Neutrosofía en la Inteligencia Artificial: Avances y Aplicaciones
9	126-142	Análisis del Riesgo Crediticio de Entidades Financieras Ecuatorianas: Un Enfoque Descriptivo y Predictivo Integrado con Machine Learning y Business Intelligence
10	143-171	Actor Hypernetworks and Urban Road Hypernetworks with Real-life Applications
11	172-190	Análisis de datos para identificar patrones operativos una terminal portuaria de Guayaquil: Estudio de caso (2024–2025).
12	191-212	Formalizing Contextual Truth Flips: Upside-Down Logic and Its Variants
13	213-220	La integración de perspectivas contradictorias en la filosofía latinoamericana: Un enfoque MultiAlisista.
14	221-232	Innovación en servicios públicos digitales en el GAD Municipal del Cantón Sucre.
15	233-243	Procesamiento de imágenes médicas mediante conjuntos neutrosóficos.
16	244-263	Priorización de Soluciones Tecnológicas para la Transformación Digital del SERCOP mediante AHP–TOPSIS
17	264-269	Implementación de una plataforma ciudadana digital para la gestión de trámites municipales en los cantones de la provincia de Esmeraldas.
18	270-281	Regresión múltiple para optimizar el aprovisionamiento hotelero: modelo con enfoque normativo, sostenible y digital.
19	282-304	Modelo de gobernanza digital basado en métodos multicriterio AHP–TOPSIS: una estrategia para optimizar la eficiencia administrativa en el GAD Municipal de San Pedro de Pelileo.
20	305-311	Priorización de Proyectos de Transformación Digital en el GAD Latacunga: Un Modelo Híbrido AHP-TOPSIS Basado en Inteligencia Colectiva
21	312-332	Aplicación de estrategias de gestión documental electrónica con

		técnicas multicriterio para historias clínicas del Centro de Salud Santa Rosa, Ambato.
22	333-343	Aplicaciones de la Lógica y Conjuntos Neurotróficos en el Diagnóstico Médico.
23	344-353	Plitogenia y Filosofías Indígenas Latinoamericanas: Una Exploración Comparativa.
24	354-362	Uso De Un Enfoque Híbrido Montecarlo-Neutrosófico Para Reducir Los Tiempos De Espera En La Atención Médica Rural
25	363-378	Mejora de Procesos Organizacionales bajo Indeterminación: Un Modelo Neutrosófico de Diagnóstico y Optimización basado en Causalidad Parcial
26	379-390	Modelado predictivo de la empleabilidad digital en Ecuador con datos de empleo 2022-2025
27	391-398	Sistema de recomendación neutrosófico multicriterio para personalización de cursos en entornos e-learning
28	399-427	Un marco AHP-TOPSIS neutrosófico para la selección de estrategias de ciberseguridad en infraestructuras en la nube: un enfoque de toma de decisiones con múltiples criterios.
29	428-446	Selección de Herramientas de Business Intelligence mediante AHP-TOPSIS Neutrosófico con Cadena de Expertos basada en Modelos de Lenguaje de Gran Escala
30	447-461	Modelo de Gestión Pública Integrado para el Acceso a Servicios en la Nube: Un Enfoque de Decisión Multicriterio

NCML

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. **40**, 2025

University of New Mexico

Iterative MultiFuzzy Set, Iterative MultiNeutrosophic Set, Iterative Multisoft set, and MultiPlithogenic Sets

Takaaki Fujita[1] * *and Arif Mehmood* [2]

[1] Independent Researcher, Tokyo, Japan. Takaaki.fujita060@gmail.com

[2] Department of Mathematics, Institute of Numerical Sciences, Gomal University, Dera Ismail Khan 29050, KPK, Pakistan (mehdaniyal@gmail.com)

*Correspondence: Takaaki.fujita060@gmail.com

Abstract. Concepts such as Fuzzy Sets [1, 2], Neutrosophic Sets [3, 4], and Plithogenic Sets [5] have been extensively studied as effective frameworks for handling uncertainty, with applications spanning various fields. As extensions of Fuzzy Sets and Neutrosophic Sets, MultiFuzzy Sets [6, 7] and MultiNeutrosophic Sets [8, 9] have been introduced in the literature. In this paper, we further extend these frameworks by introducing and defining new structures: Iterative MultiFuzzy Sets, Iterative MultiNeutrosophic Sets, Iterative MultiSoft Sets, Iterative MultiRough Sets, and MultiPlithogenic Sets.

Keywords: Plithogenic Set, MultiPlithogenic Set, Iterative MultiFuzzy Sets, Iterative MultiNeutrosophic Sets, Iterative MultiSoft Sets

1. **Preliminaries and Definitions**

This section introduces the fundamental concepts and definitions necessary for the discussions in this paper. Throughout this paper, we consider finite and undirected sets. For readers seeking a more comprehensive understanding of set theory, we recommend referring to [10].

1.1. *Multiset*

A multiset is a generalized set where elements can appear multiple times, defined by a base set and a multiplicity function (cf. [11–13]).

Definition 1.1 (Multiset)**.** (cf. [13, 14]) Let X be a nonempty set and let $\mathbb{N}_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$ denote the set of nonnegative integers. A *multiset* M on X is defined as a pair (A, m) where:

(1) A is a subset of X (called the *support* or *carrier set* of M);

(2) $m : A \to \mathbb{N}_0$ is a function, called the *multiplicity function*, which assigns to each element $a \in A$ its multiplicity $m(a)$.

For any $x \in X \setminus A$, we set $m(x) = 0$. We often denote the multiset by

$$\{a^{m(a)} : a \in A\},$$

or, when the support is understood, simply by A. This definition permits us to represent a multiset either as a pair (A, m) or as a collection in which each element a is repeated $m(a)$ times.

Example 1.2 (A Simple Multiset)**.** Let $X = \{a, b\}$. Consider the multiset M with support $A = \{a, b\}$ and multiplicity function m defined by

$$m(a) = 2 \quad \text{and} \quad m(b) = 1.$$

Then M may be represented by

$$\{a, a, b\}.$$

Alternatively, introducing indices to distinguish repeated elements, we may write

$$\{a^{(1)}, a^{(2)}, b^{(1)}\}.$$

1.2. *MultiFuzzy Set*

A Fuzzy Set assigns each element a single membership degree in $[0, 1]$ [2, 15, 16], whereas a *MultiFuzzy Set* assigns multiple membership values derived from different lattices [17–19]. As a related concept, the notion of *HyperFuzzy Sets* has also been studied [20, 21].

Definition 1.3 (Fuzzy Set)**.** [2] Let X be a nonempty set. A *fuzzy set* A on X is characterized by its membership function

$$\mu_A : X \to [0, 1].$$

That is, the fuzzy set A is defined as

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\},$$

where $\mu_A(x)$ represents the degree to which the element $x \in X$ belongs to the set A.

Definition 1.4 (Multi-Fuzzy Set)**.** [17] Let X be a nonempty set and let $\{L_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ be a family of complete lattices. A *multi-fuzzy set* A in X is an object of the form

$$A = \{(x, \mu_1(x), \mu_2(x), \mu_3(x), \dots) \mid x \in X\},$$

where, for each $i \in \mathbb{N}$, the function

$$\mu_i : X \to L_i$$

is called the i-th membership function of A.

If there exists a positive integer k such that only the first k membership functions are considered (i.e., the sequence has finite length k), then A is said to be a multi-fuzzy set of *dimension* k. In this case, A may be identified with a mapping

$$\mu_A : X \to \prod_{i=1}^{k} L_i,$$

and often one takes $L_i = [0, 1]$ for all $i = 1, 2, \ldots, k$.

Example 1.5 (A Multi-Fuzzy Set of Dimension 2)**.** Let $X = \{x_1, x_2\}$ and take $L_1 = L_2 = [0, 1]$. Define the membership functions

$$\mu_1(x_1) = 0.8, \quad \mu_2(x_1) = 0.2, \quad \mu_1(x_2) = 0.4, \quad \mu_2(x_2) = 0.5.$$

Then the multi-fuzzy set A is given by

$$A = \{(x_1,\, 0.8,\, 0.2),\ (x_2,\, 0.4,\, 0.5)\}.$$

This is a standard multi-fuzzy set of dimension 2.

1.3. *MultiNeutrosophic Set*

A Neutrosophic Set assigns to each element three independent membership degrees—truth (T), indeterminacy (I), and falsity (F)—each taking values in $[0, 1]$, thereby enabling flexible modeling of uncertainty [22–25]. The notion of *MultiNeutrosophic Sets* has been investigated in a growing body of work [26–29]. Owing to their scientific importance, a wide range of related applications has also been explored in recent studies [30–33]. In addition, related concepts such as the *HyperNeutrosophic Set* have been introduced and studied [34, 35].

Definition 1.6 (Neutrosophic Set)**.** [3, 36] Let X be a non-empty set. A *Neutrosophic Set (NS)* A on X is characterized by three membership functions:

$$T_A : X \to [0, 1], \quad I_A : X \to [0, 1], \quad F_A : X \to [0, 1],$$

where for each $x \in X$, the values $T_A(x)$, $I_A(x)$, and $F_A(x)$ represent the degrees of truth, indeterminacy, and falsity, respectively. These values satisfy the following condition:

$$0 \leq T_A(x) + I_A(x) + F_A(x) \leq 3.$$

Example 1.7 (Neutrosophic Set in Real Life: Medical Diagnosis)**.** Consider a doctor diagnosing a disease in a patient. Let X be the set of all possible diagnoses, and let A be a neutrosophic set representing the likelihood of a particular disease D being present in a patient.
For a given diagnosis $x \in X$, the doctor assigns three independent membership degrees:

- $T_A(x)$ (Truth degree): The degree of confidence that the patient has disease D based on lab results.

- $I_A(x)$ (Indeterminacy degree): The uncertainty due to insufficient or conflicting data.
- $F_A(x)$ (Falsity degree): The degree of confidence that the patient does not have disease D based on medical history.

For example, let $x = D$ represent a flu diagnosis, and assume:

$$T_A(D) = 0.7, \quad I_A(D) = 0.2, \quad F_A(D) = 0.1.$$

This means that the doctor believes with 70% confidence that the patient has the flu, there is 20% uncertainty, and a 10% chance that the patient does not have it.

Definition 1.8 (MultiNeutrosophic Set)**.** (cf. [26]) Let $\mathcal{U}$ be a universe of discourse, and let M be a subset of $\mathcal{U}$. A *MultiNeutrosophic Set (MNS)* M is defined as:

$$M = \{(x, \langle T_1, T_2, \ldots, T_p; I_1, I_2, \ldots, I_r; F_1, F_2, \ldots, F_s \rangle) \mid x \in \mathcal{U}\},$$

where:

- $p, r, s \geq 0$ with $p + r + s = n \geq 2$,
- At least one of p, r, s satisfies ≥ 2 to ensure the multiplicity of truth (T), indeterminacy (I), or falsehood (F),
- $T_1, T_2, \ldots, T_p; I_1, I_2, \ldots, I_r; F_1, F_2, \ldots, F_s \subseteq [0, 1]$,
- The following condition is satisfied:

$$0 \leq \sum_{j=1}^{p} \inf T_j + \sum_{k=1}^{r} \inf I_k + \sum_{l=1}^{s} \inf F_l \leq \sum_{j=1}^{p} \sup T_j + \sum_{k=1}^{r} \sup I_k + \sum_{l=1}^{s} \sup F_l \leq n.$$

Example 1.9 (MultiNeutrosophic Set in Real Life: Stock Market Analysis)**.** In financial decision-making, investors assess stocks based on multiple uncertain parameters. Let X be the set of all stocks under consideration, and let M be a multi-neutrosophic set representing the evaluation of a stock S based on various expert analyses.

For each stock $x \in X$, multiple experts provide their independent evaluations:

- $T_1(x), T_2(x), \ldots, T_p(x)$ represent the degrees of belief from different financial analysts that the stock will increase in value.
- $I_1(x), I_2(x), \ldots, I_r(x)$ represent the uncertainty due to market fluctuations and unpredictable external factors.
- $F_1(x), F_2(x), \ldots, F_s(x)$ represent the degrees of belief that the stock will decrease in value.

For instance, let $x = S$ be a particular stock, and assume:

$$T_1(S) = 0.6, \quad T_2(S) = 0.7, \quad I_1(S) = 0.3, \quad I_2(S) = 0.4, \quad F_1(S) = 0.1, \quad F_2(S) = 0.2.$$

Here, two experts predict the stock price increase with confidence levels of 60% and 70%, while the uncertainty levels are 30% and 40%, and the chances of price decline are 10% and 20%.

This model allows investors to make decisions considering multiple perspectives and uncertainties.

1.4. *Multisoft set*

A Soft Set is a parameterized family of subsets used to handle uncertainty, introduced by Molodtsov in 1999 for decision-making problems [37,38]. A Multisoft Set generalizes Soft Sets by handling multiple parameters, allowing more flexible and complex uncertainty modeling in decision-making and classification problems [39–41]. Related concepts such as the *HyperSoft Set* [42–44] and the *SuperHyperSoft Set* [45,46] have also been studied.

Definition 1.10 (Soft Set [38])**.** Let U be a universe set and E be a set of parameters. Let $A \subseteq E$ and denote by $\mathcal{P}(U)$ the power set of U. A pair (F, A) is called a *soft set* over U if

$$F : A \to \mathcal{P}(U).$$

For each parameter $\epsilon \in A$, the set $F(\epsilon)$ is called the ϵ-approximation of the soft set (F, A). In other words, a soft set over U is a parameterized family of subsets of U.

Example 1.11 (Soft Set in a Housing Decision Problem)**.** Let the universe be a set of houses

$$U = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\},$$

and let the set of parameters be

$$E = \{\text{Expensive}, \text{Modern}, \text{Spacious}\}.$$

Choose $A = E$. Define the soft set (F, A) by

$$F(\text{Expensive}) = \{h_1, h_2\}, \quad F(\text{Modern}) = \{h_2, h_3, h_4\}, \quad F(\text{Spacious}) = \{h_1, h_3, h_5\}.$$

This soft set represents the attractiveness of houses based on the given criteria.

Definition 1.12 (Multisoft Set)**.** [39–41] Let U be a universe set and E be a set of parameters. Let $A \subseteq E$ and let $\mathcal{P}(U)$ denote the power set of U. A pair (F, A) is called a *multisoft set* over U if

$$F : A \to \mathcal{P}(U).$$

That is, a multisoft set over U is a parameterized family of subsets of U. The term "multisoft set" is used to emphasize its role in handling multiple approximations or decision parameters, thereby generalizing the classical notion of a soft set.

Example 1.13 (Multi-Soft Set in a Car Selection Problem)**.** Let the universe be a set of cars

$$U = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\},$$

and let the set of parameters be

$$E = \{\text{Cheap}, \text{Fuel-Efficient}, \text{Reliable}\}.$$

Choose $A = E$. Define the multisoft set (F, A) by

$$F(\text{Cheap}) = \{c_1, c_3, c_5\}, \quad F(\text{Fuel-Efficient}) = \{c_1, c_2, c_4\}, \quad F(\text{Reliable}) = \{c_2, c_3, c_4, c_5\}.$$

This multisoft set is used to model multiple approximations for car selection based on cost, fuel efficiency, and reliability.

1.5. *Multirough Set*

A Rough Set approximates a subset using lower and upper bounds based on equivalence classes, capturing certainty and uncertainty in membership [47–49]. A Multirough Set is a generalization of a Rough Set [50]. The definitions are provided below.

Definition 1.14 (Rough Set Approximation)**.** [51] Let X be a non-empty universe of discourse, and let $R \subseteq X \times X$ be an equivalence relation (or indiscernibility relation) on X. The equivalence relation R partitions X into disjoint equivalence classes, denoted by $[x]_R$ for $x \in X$, where:

$$[x]_R = \{y \in X \mid (x, y) \in R\}.$$

For any subset $U \subseteq X$, the *lower approximation* $\underline{U}$ and the *upper approximation* $\overline{U}$ of U are defined as follows:

(1) *Lower Approximation* $\underline{U}$:

$$\underline{U} = \{x \in X \mid [x]_R \subseteq U\}.$$

The lower approximation $\underline{U}$ includes all elements of X whose equivalence classes are entirely contained within U. These are the elements that *definitely* belong to U.

(2) *Upper Approximation* $\overline{U}$:

$$\overline{U} = \{x \in X \mid [x]_R \cap U \neq \emptyset\}.$$

The upper approximation $\overline{U}$ contains all elements of X whose equivalence classes have a non-empty intersection with U. These are the elements that *possibly* belong to U.

The pair $(\underline{U}, \overline{U})$ forms the *rough set* representation of U, satisfying the relationship:

$$\underline{U} \subseteq U \subseteq \overline{U}.$$

Example 1.15 (Rough Set in a Housing Market)**.** Consider a universe $U = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6\}$ of houses. Define an equivalence relation R by neighborhood so that:

$$[h_1]_R = \{h_1, h_2\}, \quad [h_3]_R = \{h_3, h_4\}, \quad [h_5]_R = \{h_5, h_6\}.$$

Let $X = \{h_1, h_3, h_5\}$ be the set of houses with gardens. Then:

$$\underline{X} = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\} = \varnothing,$$

since in every equivalence class, at least one house is missing from X; and

$$\overline{X} = \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \varnothing\} = U.$$

Thus, the rough set approximation of X is $(\varnothing, U)$, capturing complete uncertainty.

Definition 1.16. [50] Let U be a universal set, and let $R_1, R_2, \ldots, R_n$ be equivalence relations (indiscernibility relations) on U. For any subset $X \subseteq U$, the *Multirough Set* of X is defined by the collection of lower and upper approximations with respect to each equivalence relation R_i.

For each $i = 1, 2, \ldots, n$, we define:

- The *Lower Approximation* of X with respect to R_i:

$$\underline{X}_i = \{x \in U \mid [x]_{R_i} \subseteq X\},$$

  where $[x]_{R_i}$ denotes the equivalence class of x under R_i.
- The *Upper Approximation* of X with respect to R_i:

$$\overline{X}_i = \{x \in U \mid [x]_{R_i} \cap X \neq \emptyset\}.$$

The *Multirough Set* of X is then the collection:

$$\mathcal{MR}(X) = \left\{ \left(\underline{X}_i, \overline{X}_i\right) \mid i = 1, 2, \ldots, n \right\}.$$

Example 1.17 (Multirough Set in a Housing Market with Two Criteria)**.** Using the same universe $U = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6\}$, consider two equivalence relations:

(1) R_1 (by neighborhood):

$$[h_1]_{R_1} = \{h_1, h_2\}, \quad [h_3]_{R_1} = \{h_3, h_4\}, \quad [h_5]_{R_1} = \{h_5, h_6\}.$$

(2) R_2 (by house type): Assume detached houses $D_1 = \{h_1, h_3, h_5\}$ and semi-detached houses $D_2 = \{h_2, h_4, h_6\}$.

Let $X = \{h_1, h_3, h_5\}$ (houses with gardens, coinciding with detached houses). Then for R_1:

$$\underline{X}_1 = \varnothing \quad \text{and} \quad \overline{X}_1 = U.$$

For R_2:

$$\underline{X}_2 = D_1 = \{h_1, h_3, h_5\} \quad \text{and} \quad \overline{X}_2 = D_1 = \{h_1, h_3, h_5\}.$$

The multirough set of X is

$$\mathcal{MR}(X) = \{(\underline{X}_1, \overline{X}_1), (\underline{X}_2, \overline{X}_2)\} = \{(\varnothing, U), (\{h_1, h_3, h_5\}, \{h_1, h_3, h_5\})\},$$

illustrating how different criteria yield distinct approximations.

1.6. *Plithogenic Set*

The Plithogenic Set is a mathematical framework designed to integrate multi-valued degrees of appurtenance and contradiction, making it particularly effective for addressing complex decision-making scenarios. Numerous studies have explored the properties and applications of Plithogenic Sets, as highlighted in works such as [52–55]. The formal definition is presented below.

Definition 1.18 (Plithogenic Set)**.** [56,57] Let S be a universal set, and $P \subseteq S$. A *Plithogenic Set* PS is defined as:

$$PS = (P, v, Pv, pdf, pCF)$$

where:

- v is an attribute.
- Pv is the range of possible values for the attribute v.
- $pdf : P \times Pv \to [0,1]^s$ is the *Degree of Appurtenance Function (DAF)*
- $pCF : Pv \times Pv \to [0,1]^t$ is the *Degree of Contradiction Function (DCF)*.

These functions satisfy the following axioms for all $a, b \in Pv$:

(1) *Reflexivity of Contradiction Function*:

$$pCF(a, a) = 0$$

(2) *Symmetry of Contradiction Function*:

$$pCF(a, b) = pCF(b, a)$$

Example 1.19 (Plithogenic Set — Laptop Selection under Conflicting Priorities)**.** Let the universe of laptops be $P = \{\ell_1, \ell_2, \ell_3\}$ and consider the single attribute $v =$ "priority objective" with value set

$$Pv = \{\text{lightweight},\ \text{performance},\ \text{battery}\}.$$

Degree of Appurtenance Function (DAF). Let $pdf : P \times Pv \to [0,1]$ be given by

	lightweight	performance	battery
ℓ_1	0.85	0.55	0.50
ℓ_2	0.60	0.85	0.40
ℓ_3	0.45	0.65	0.80

(Each entry is the membership degree of the laptop to the corresponding value of v.)

It is important to note that the definition of the Degree of Appurtenance Function varies across different papers. Some studies define this concept using the power set, while others simplify it by avoiding the use of the power set [58]. The author has consistently defined the Classical Plithogenic Set without employing the power set.

Degree of Contradiction Function (DCF). Let $pCF : Pv \times Pv \to [0,1]$ be symmetric with $pCF(a,a) = 0$:

$pCF =$

	lightweight	performance	battery
lightweight	0	0.60	0.30
performance	0.60	0	0.50
battery	0.30	0.50	0

(Heavier performance parts contradict lightweight more strongly, and high performance tends to contradict long battery life.)

A simple plithogenic aggregation (relative to a dominant value). Suppose the decision-maker's dominant value is $d =$ battery. Define compatibility weights $w(a \mid d) := 1 - pCF(a,d)$ for $a \in Pv$:

$$w(\text{lightweight} \mid d) = 1 - 0.30 = 0.70,$$

$$w(\text{performance} \mid d) = 1 - 0.50 = 0.50,$$

$$w(\text{battery} \mid d) = 1 - 0 = 1.00.$$

For $x \in P$, compute a (normalized) plithogenic score

$$S(x \mid d) \;:=\; \frac{\displaystyle\sum_{a \in Pv} w(a \mid d)\, pdf(x,a)}{\displaystyle\sum_{a \in Pv} w(a \mid d)} \quad \in [0,1].$$

Explicit calculations. The denominator is $0.70 + 0.50 + 1.00 = 2.20$.

$$\text{For } \ell_1: \quad \sum w\, pdf = 0.70 \cdot 0.85 \;+\; 0.50 \cdot 0.55 \;+\; 1.00 \cdot 0.50$$
$$= 0.595 + 0.275 + 0.500 \;=\; 1.370, \qquad S(\ell_1 \mid d) = \frac{1.370}{2.20} \approx 0.62.$$

$$\text{For } \ell_2: \quad \sum w\, pdf = 0.70 \cdot 0.60 \;+\; 0.50 \cdot 0.85 \;+\; 1.00 \cdot 0.40$$
$$= 0.420 + 0.425 + 0.400 \;=\; 1.245, \qquad S(\ell_2 \mid d) = \frac{1.245}{2.20} \approx 0.57.$$

$$\text{For } \ell_3: \quad \sum w\, pdf = 0.70 \cdot 0.45 \;+\; 0.50 \cdot 0.65 \;+\; 1.00 \cdot 0.80$$
$$= 0.315 + 0.325 + 0.800 \;=\; 1.440, \qquad S(\ell_3 \mid d) = \frac{1.440}{2.20} \approx 0.65.$$

Outcome. Ranking by $S(\cdot \mid \text{battery})$ gives ℓ_3 (≈ 0.65) $> \ell_1$ (≈ 0.62) $> \ell_2$ (≈ 0.57). This example shows how a Plithogenic Set uses the contradiction matrix pCF to attenuate/boost membership degrees relative to a chosen dominant value.

2. **Results of This Paper**

This section presents the results obtained in this paper.

2.1. *nth-Iterative Multiset*

We now generalize the notion of a multiset by allowing its elements to themselves be multisets, iteratively.

Definition 2.1 (nth-Iterative Multiset)**.** Let X be a nonempty set. We define the collection of nth-iterative multisets on X recursively as follows:

(1) For $n = 0$, define
$$\mathcal{M}^0(X) := X.$$

(2) For each integer $n \geq 1$, an *nth-iterative multiset* on X is a multiset whose elements are $(n-1)$th-iterative multisets. Formally, define
$$\mathcal{M}^n(X) := \Big\{ m \ : \ \mathcal{M}^{n-1}(X) \to \mathbb{N}_0 \ \Big| \ \text{supp}(m) \text{ is finite} \Big\},$$
where the *support* of m is given by
$$\text{supp}(m) := \{\, x \in \mathcal{M}^{n-1}(X) \mid m(x) \neq 0 \,\}.$$

An element of $\mathcal{M}^n(X)$ is called an *nth-iterative multiset* on X. In particular, $\mathcal{M}^1(X)$ is the set of all usual multisets on X.

Example 2.2 (1st-Iterative Multiset)**.** Let $X = \{a, b\}$. Then a 1st-iterative multiset on X is just a multiset on X. For instance, define $m : X \to \mathbb{N}_0$ by
$$m(a) = 2, \quad m(b) = 1.$$
Then $m \in \mathcal{M}^1(X)$ represents the multiset
$$\{a, a, b\}.$$

Example 2.3 (2nd-Iterative Multiset)**.** Let $X = \{a, b\}$. First, consider two distinct multisets in $\mathcal{M}^1(X)$:

- M_1 given by $m_1(a) = 2$ and $m_1(b) = 1$, so that $M_1 = \{a, a, b\}$;
- M_2 given by $m_2(a) = 1$ and $m_2(b) = 1$, so that $M_2 = \{a, b\}$.

Now, a 2nd-iterative multiset on X is a multiset whose elements are multisets from $\mathcal{M}^1(X)$. For example, define
$$m : \mathcal{M}^1(X) \to \mathbb{N}_0 \quad \text{with} \quad m(M_1) = 3, \quad m(M_2) = 2,$$
and $m(M) = 0$ for all other $M \in \mathcal{M}^1(X)$. Then m represents the 2nd-iterative multiset
$$\{M_1, M_1, M_1, M_2, M_2\},$$
which can be thought of as a multiset of multisets on X.

2.2. *Iterative Multi-Fuzzy Set*

We now generalize the concept of a multi-fuzzy set by allowing its membership values to themselves be multi-fuzzy sets. This leads to an iterative (or recursive) structure.

Definition 2.4 (Iterative Multi-Fuzzy Set)**.** Let X be a nonempty set and fix a positive integer k (the dimension). Define the *base level* as

$$\mathcal{F}_k^0 := \prod_{i=1}^{k} L_i,$$

where each L_i is a complete lattice (usually $L_i = [0,1]$). For each integer $n \geq 1$, define the collection of nth-iterative multi-fuzzy sets on X recursively by

$$\mathcal{F}_k^n(X) := \Big\{ M \ : \ X \to \mathcal{F}_k^{n-1} \Big\}.$$

An element $M \in \mathcal{F}_k^n(X)$ is called an *nth-iterative multi-fuzzy set* on X of dimension k. In particular, when $n = 1$ we have

$$\mathcal{F}_k^1(X) = \Big\{ M : X \to \mathcal{F}_k^0 \Big\} = \Big\{ M : X \to \prod_{i=1}^{k} L_i \Big\},$$

which is exactly the collection of standard multi-fuzzy sets of dimension k.

Example 2.5 (1st-Iterative Multi-Fuzzy Set (Standard Multi-Fuzzy Set))**.** Let $X = \{x_1, x_2\}$ and $k = 1$ with $L_1 = [0,1]$. Then a 1st-iterative multi-fuzzy set is a function

$$M : X \to [0,1].$$

For instance, define

$$M(x_1) = 0.7, \quad M(x_2) = 0.3.$$

This corresponds to the fuzzy set $\{(x_1, 0.7), (x_2, 0.3)\}$.

Example 2.6 (2nd-Iterative Multi-Fuzzy Set)**.** Let $X = \{x_1, x_2\}$ and $k = 1$ with $L_1 = [0,1]$. Then a 2nd-iterative multi-fuzzy set is a function

$$N : X \to \mathcal{F}_1^1(X),$$

so that for each $x \in X$, $N(x)$ is a fuzzy set on X. For example, define:

$$N(x_1) : X \to [0,1], \quad N(x_1)(x_1) = 0.8, \quad N(x_1)(x_2) = 0.2,$$

$$N(x_2) : X \to [0,1], \quad N(x_2)(x_1) = 0.4, \quad N(x_2)(x_2) = 0.6.$$

Thus, the 2nd-iterative multi-fuzzy set N assigns to x_1 the fuzzy set $\{(x_1, 0.8), (x_2, 0.2)\}$ and to x_2 the fuzzy set $\{(x_1, 0.4), (x_2, 0.6)\}$.

Theorem 2.7. *Let X be a nonempty set and let k be a fixed positive integer. Then every multi-fuzzy set A of dimension k on X is an element of $\mathcal{F}_k^1(X)$. In other words,*

$$\mathcal{F}_k^1(X) = \{\, A : X \to \prod_{i=1}^{k} L_i \,\}$$

coincides with the collection of all multi-fuzzy sets of dimension k on X.

Proof. By definition, a multi-fuzzy set A of dimension k is given by a mapping

$$\mu_A : X \to \prod_{i=1}^{k} L_i,$$

where for each $x \in X$, the tuple $\mu_A(x) = (\mu_1(x), \mu_2(x), \ldots, \mu_k(x))$ represents the membership degrees with respect to each lattice L_i. On the other hand, by the recursive definition of iterative multi-fuzzy sets, the collection $\mathcal{F}_k^1(X)$ is defined as

$$\mathcal{F}_k^1(X) = \{\, M : X \to \mathcal{F}_k^0 \,\},$$

with $\mathcal{F}_k^0 = \prod_{i=1}^{k} L_i$. Hence, every function

$$\mu_A : X \to \prod_{i=1}^{k} L_i$$

is an element of $\mathcal{F}_k^1(X)$. Therefore, the notion of a multi-fuzzy set of dimension k is recovered exactly as the first-iterative level of the iterative multi-fuzzy set hierarchy. □

Theorem 2.8 (Iterative Multi-Fuzzy Sets as Multi-Fuzzy Sets of Multi-Fuzzy Sets)**.** *Let X be a nonempty set and k a positive integer. Then for any $n \geq 1$, an nth-iterative multi-fuzzy set*

$$M \in \mathcal{F}_k^n(X) = \{\, F : X \to \mathcal{F}_k^{n-1}(X) \,\}$$

is a multi-fuzzy set whose membership values are $(n-1)$th-iterative multi-fuzzy sets. In particular, a 2nd-iterative multi-fuzzy set is a multi-fuzzy set of (standard) multi-fuzzy sets.

Proof. We prove by induction on n.
Base case ($n = 1$): By definition,

$$\mathcal{F}_k^1(X) = \{\, M : X \to \mathcal{F}_k^0 \,\} = \{\, M : X \to \prod_{i=1}^{k} L_i \,\},$$

which is exactly the collection of standard multi-fuzzy sets of dimension k.
Inductive step: Assume that for some $n \geq 1$, every element of $\mathcal{F}_k^n(X)$ is a multi-fuzzy set whose membership values are $(n-1)$th-iterative multi-fuzzy sets. Then by definition,

$$\mathcal{F}_k^{n+1}(X) = \{\, M : X \to \mathcal{F}_k^n(X) \,\}.$$

Since by the induction hypothesis each element of $\mathcal{F}_k^n(X)$ is itself a multi-fuzzy set, it follows that every function $M : X \to \mathcal{F}_k^n(X)$ is a multi-fuzzy set whose membership values are multi-fuzzy sets (namely, the $(n-1)$th-iterative ones). This completes the induction. □

2.3. *Iterative Multi-Neutrosophic Set*

Iterative Multi-Neutrosophic Sets extend Multi-Neutrosophic Sets by recursively applying multi-valued truth, indeterminacy, and falsity functions, capturing hierarchical uncertainty across multiple levels.

Definition 2.9 (Base Level for Multi-Neutrosophic Sets)**.** Fix nonnegative integers p, r, s with $p + r + s \geq 2$. Define the *base neutrosophic space* by

$$\mathcal{N}_{p,r,s}^0 := \Big(\prod_{j=1}^{p}[0,1]\Big) \times \Big(\prod_{k=1}^{r}[0,1]\Big) \times \Big(\prod_{l=1}^{s}[0,1]\Big).$$

An element of $\mathcal{N}_{p,r,s}^0$ is a tuple

$$\big(T_1, \ldots, T_p;\ I_1, \ldots, I_r;\ F_1, \ldots, F_s\big)$$

that represents the membership degrees in the truth, indeterminacy, and falsity components.

Definition 2.10 (Iterative Multi-Neutrosophic Set)**.** Let X be a nonempty set. For each integer $n \geq 1$, define the collection of *nth-iterative multi-neutrosophic sets* on X recursively as follows:

(1) For $n = 1$, set

$$\mathcal{N}_{p,r,s}^1(X) := \Big\{\, M : X \to \mathcal{N}_{p,r,s}^0 \,\Big\}.$$

That is, a 1st-iterative multi-neutrosophic set is exactly a multi-neutrosophic set on X with p truth-membership functions, r indeterminacy-membership functions, and s falsity-membership functions.

(2) For each integer $n \geq 2$, define

$$\mathcal{N}_{p,r,s}^n(X) := \Big\{\, M : X \to \mathcal{N}_{p,r,s}^{n-1}(X) \,\Big\}.$$

An element of $\mathcal{N}_{p,r,s}^n(X)$ is called an *nth-iterative multi-neutrosophic set* on X (of type (p, r, s)).

Example 2.11 (1st-Iterative Multi-Neutrosophic Set)**.** Let $X = \{x_1, x_2\}$ and choose $p = 2$, $r = 1$, $s = 1$ so that each element is characterized by two truth-membership values, one indeterminacy value, and one falsity value. Define $M \in \mathcal{N}_{2,1,1}^1(X)$ by:

$$M(x_1) = (0.7,\ 0.6;\ 0.2;\ 0.1), \quad M(x_2) = (0.4,\ 0.5;\ 0.3;\ 0.2).$$

Then

$$M = \{(x_1, (0.7, 0.6; 0.2; 0.1)),\ (x_2, (0.4, 0.5; 0.3; 0.2))\}$$

is a multi-neutrosophic set on X (the standard case).

Example 2.12 (2nd-Iterative Multi-Neutrosophic Set)**.** Let $X = \{x_1, x_2\}$ and consider the same parameters $p = 2$, $r = 1$, $s = 1$. A 2nd-iterative multi-neutrosophic set $N \in \mathcal{N}^2_{2,1,1}(X)$ is a function from X to $\mathcal{N}^1_{2,1,1}(X)$. For example, define:

$$N(x_1) \in \mathcal{N}^1_{2,1,1}(X) \quad \text{by} \quad \begin{cases} N(x_1)(x_1) = (0.8,\, 0.7;\, 0.1;\, 0.0), \\ N(x_1)(x_2) = (0.5,\, 0.4;\, 0.3;\, 0.2), \end{cases}$$

and

$$N(x_2) \in \mathcal{N}^1_{2,1,1}(X) \quad \text{by} \quad \begin{cases} N(x_2)(x_1) = (0.6,\, 0.5;\, 0.2;\, 0.1), \\ N(x_2)(x_2) = (0.3,\, 0.2;\, 0.4;\, 0.3). \end{cases}$$

Thus, N assigns to each $x \in X$ a multi-neutrosophic set on X, and hence N is a 2nd-iterative multi-neutrosophic set.

Theorem 2.13. *Let X be a nonempty set and let p, r, s be fixed nonnegative integers with $p + r + s \geq 2$. Then:*

(a) The collection $\mathcal{N}^1_{p,r,s}(X)$ of 1st-iterative multi-neutrosophic sets coincides with the collection of all multi-neutrosophic sets on X with p truth-, r indeterminacy-, and s falsity-membership functions.

(b) If we set $r = s = 0$ and $p = k$ (with $k \geq 1$), then $\mathcal{N}^1_{k,0,0}(X)$ is isomorphic to the collection of multi-fuzzy sets of dimension k on X. Consequently, the iterative multi-neutrosophic set framework generalizes both multi-neutrosophic sets and iterative multi-fuzzy sets.

Proof. (a) By definition, a 1st-iterative multi-neutrosophic set on X is a function

$$M : X \to \mathcal{N}^0_{p,r,s},$$

where $\mathcal{N}^0_{p,r,s} = \left(\prod_{j=1}^{p}[0,1]\right) \times \left(\prod_{k=1}^{r}[0,1]\right) \times \left(\prod_{l=1}^{s}[0,1]\right)$. This is exactly the structure of a multi-neutrosophic set as defined earlier.

(b) Suppose now that $r = s = 0$ and $p = k$. Then

$$\mathcal{N}^0_{k,0,0} = \prod_{j=1}^{k}[0,1],$$

and a 1st-iterative multi-neutrosophic set is a function

$$M : X \to \prod_{j=1}^{k}[0,1].$$

This is precisely the definition of a multi-fuzzy set of dimension k on X (see, e.g., the definition of multi-fuzzy sets). Hence, the framework of iterative multi-neutrosophic sets subsumes the classical notion of multi-fuzzy sets. □

Theorem 2.14 (Iterative Multi-Neutrosophic Sets as Multi-Neutrosophic Sets of Multi-Neutrosophic Sets)**.** *Let X be a nonempty set and let p, r, s be fixed nonnegative integers with $p + r + s \geq 2$. Then for any $n \geq 1$, an nth-iterative multi-neutrosophic set*

$$M \in \mathcal{N}^n_{p,r,s}(X) = \{\, F : X \to \mathcal{N}^{n-1}_{p,r,s}(X) \,\}$$

is a multi-neutrosophic set whose membership values are $(n-1)$th-iterative multi-neutrosophic sets. In particular, a 2nd-iterative multi-neutrosophic set is a multi-neutrosophic set of (standard) multi-neutrosophic sets.

Proof. The proof is analogous to that for iterative multi-fuzzy sets.
Base case ($n = 1$): By definition,

$$\mathcal{N}^1_{p,r,s}(X) = \{\, M : X \to \mathcal{N}^0_{p,r,s} \,\},$$

where

$$\mathcal{N}^0_{p,r,s} = \Big(\prod_{j=1}^{p}[0,1]\Big) \times \Big(\prod_{k=1}^{r}[0,1]\Big) \times \Big(\prod_{l=1}^{s}[0,1]\Big).$$

Thus, $\mathcal{N}^1_{p,r,s}(X)$ is exactly the collection of standard multi-neutrosophic sets.
Inductive step: Assume that for some $n \geq 1$, every element of $\mathcal{N}^n_{p,r,s}(X)$ is a multi-neutrosophic set whose membership values are $(n-1)$th-iterative multi-neutrosophic sets. Then by definition,

$$\mathcal{N}^{n+1}_{p,r,s}(X) = \{\, M : X \to \mathcal{N}^n_{p,r,s}(X) \,\}.$$

Since each element of $\mathcal{N}^n_{p,r,s}(X)$ is a multi-neutrosophic set by the induction hypothesis, any mapping $M : X \to \mathcal{N}^n_{p,r,s}(X)$ is a multi-neutrosophic set whose membership values are multi-neutrosophic sets. This completes the induction. □

2.4. *Iterative Multi-Soft Set*

We now generalize the concept of a multisoft set by defining an *iterative multi-soft set* recursively. The idea is to allow the approximations themselves to be multisoft sets, thereby creating a hierarchy or nested structure of approximations.

Definition 2.15 (Iterative Multi-Soft Set)**.** Let U be a nonempty universe and E be a set of parameters. Define the *base level* as

$$\mathcal{S}^0(U) := \mathcal{P}(U),$$

the power set of U. Then, for a fixed $n \in \mathbb{N}$ and for any subset $A \subseteq E$, an *nth-iterative multi-soft set* over U is defined recursively as follows:

(1) For $n = 1$, define

$$\mathcal{S}^1(U) := \{\, F : A \to \mathcal{S}^0(U) \,\},$$

so that a 1st-iterative multi-soft set is simply a soft set (or multisoft set) over U.

(2) For $n \geq 2$, define

$$\mathcal{S}^n(U) := \{\, F : A \to \mathcal{S}^{n-1}(U) \,\}.$$

That is, an nth-iterative multi-soft set is a mapping from a set of parameters A into the collection of $(n-1)$th-iterative multi-soft sets over U.

An element $F \in \mathcal{S}^n(U)$ is called an *nth-iterative multi-soft set* over U with parameter set A.

Example 2.16 (1st-Iterative and 2nd-Iterative Multi-Soft Sets)**.** Let $U = \{h_1, h_2, h_3\}$ be a set of houses, and let $E = \{\text{expensive}, \text{modern}, \text{green surroundings}\}$ be a set of parameters.
1st-Iterative Level: A soft set (or multisoft set) $F \in \mathcal{S}^1(U)$ is defined as

$$F : E' \to \mathcal{P}(U),$$

where $E' \subseteq E$. For instance, let $E' = \{\text{expensive}, \text{modern}\}$ and define

$$F(\text{expensive}) = \{h_1, h_2\}, \quad F(\text{modern}) = \{h_2, h_3\}.$$

Then (F, E') is a 1st-iterative multi-soft set over U.
2nd-Iterative Level: A 2nd-iterative multi-soft set $G \in \mathcal{S}^2(U)$ is a mapping

$$G : A \to \mathcal{S}^1(U),$$

for some $A \subseteq E$. For example, let $A = \{\alpha_1, \alpha_2\}$ be a new set of meta-parameters, and define G as follows:

$$G(\alpha_1) = F_1, \quad G(\alpha_2) = F_2,$$

where $F_1, F_2 \in \mathcal{S}^1(U)$ are defined by:

$$F_1(\text{expensive}) = \{h_1\}, \quad F_1(\text{modern}) = \{h_1, h_2\},$$

$$F_2(\text{expensive}) = \{h_2, h_3\}, \quad F_2(\text{modern}) = \{h_3\}.$$

Then G is a 2nd-iterative multi-soft set over U. In this structure, each meta-parameter in A is associated with a soft set (i.e., a 1st-iterative multi-soft set) over U.

Theorem 2.17. *Let U be a universe set and E be a set of parameters. Then every multisoft set (F, A), where $F : A \to \mathcal{P}(U)$, is a 1st-iterative multi-soft set over U; that is,*

$$\mathcal{S}^1(U) = \{\, F : A \to \mathcal{P}(U) \mid A \subseteq E \,\},$$

and hence the concept of an iterative multi-soft set generalizes the classical notion of a multisoft set.

Proof. By definition, a multisoft set over U is a mapping

$$F : A \to \mathcal{P}(U),$$

which is exactly the definition of a 1st-iterative multi-soft set:

$$\mathcal{S}^1(U) := \{\, F : A \to \mathcal{S}^0(U) \,\},$$

where $\mathcal{S}^0(U) = \mathcal{P}(U)$. Thus, every multisoft set is an element of $\mathcal{S}^1(U)$. Consequently, the iterative framework

$$\mathcal{S}^n(U) = \{\, F : A \to \mathcal{S}^{n-1}(U) \,\}$$

for $n \geq 2$ extends the notion of a multisoft set to higher levels, thereby generalizing it. □

2.5. *Iterative Multi-Rough Set*

Iterative Multi-Rough Sets generalize Multi-Rough Sets by recursively applying rough approximations, capturing multi-level uncertainty through nested equivalence relations.

Definition 2.18 (Iterative Multi-Rough Set)**.** Let U be a nonempty set and let $\{R_1^0, R_2^0, \ldots, R_{n_0}^0\}$ be a family of equivalence relations on U. For any subset $X \subseteq U$, define the *first-order multi-rough set* of X as

$$\mathcal{MR}^1(X) = \left\{ \left(\underline{X}_i^{(0)}, \overline{X}_i^{(0)} \right) \;\middle|\; i = 1, 2, \ldots, n_0 \right\},$$

where for each i,

$$\underline{X}_i^{(0)} = \{\, x \in U \mid [x]_{R_i^0} \subseteq X \,\}, \quad \overline{X}_i^{(0)} = \{\, x \in U \mid [x]_{R_i^0} \cap X \neq \emptyset \,\}.$$

Assume now that for each integer $k \geq 1$ we are given a family of equivalence relations

$$\{R_1^k, R_2^k, \ldots, R_{n_k}^k\}$$

on the set

$$U_k := \mathcal{MR}^k(X).$$

Then the $(k+1)$th *iterative multi-rough set* of X is defined by

$$\mathcal{MR}^{k+1}(X) = \left\{ \left(\underline{Y}_j^{(k)}, \overline{Y}_j^{(k)} \right) \;\middle|\; Y \in U_k,\ j = 1, 2, \ldots, n_k \right\},$$

where for each j and for a given $Y \in U_k$,

$$\underline{Y}_j^{(k)} = \{\, Z \in U_k \mid [Z]_{R_j^k} \subseteq Y \,\}, \quad \overline{Y}_j^{(k)} = \{\, Z \in U_k \mid [Z]_{R_j^k} \cap Y \neq \emptyset \,\}.$$

An element of $\mathcal{MR}^{k+1}(X)$ is called a $(k+1)$th-order iterative multi-rough set of X.

Example 2.19 (First- and Second-Order Multi-Rough Sets)**.** Let $U = \{1, 2, 3, 4\}$ and consider the equivalence relation R^0 on U that partitions U into the blocks $\{1, 2\}$ and $\{3, 4\}$. Let $X = \{1, 3\}$.

First-Order: For the single equivalence relation R^0 (i.e., $n_0 = 1$), compute:

$$\underline{X}^{(0)} = \{\, x \in U \mid [x]_{R^0} \subseteq X \,\} = \varnothing,$$

since neither $\{1, 2\} \subseteq \{1, 3\}$ nor $\{3, 4\} \subseteq \{1, 3\}$. Also,

$$\overline{X}^{(0)} = \{\, x \in U \mid [x]_{R^0} \cap X \neq \emptyset \,\} = \{1, 2, 3, 4\},$$

since both equivalence classes have a non-empty intersection with X (i.e., $1 \in \{1, 2\}$ and $3 \in \{3, 4\}$). Hence,

$$\mathcal{MR}^1(X) = \Big\{\big(\varnothing,\, \{1, 2, 3, 4\}\big)\Big\}.$$

Second-Order: Now, let $U_1 = \mathcal{MR}^1(X) = \{\, Y \,\}$ where $Y = (\varnothing, \{1, 2, 3, 4\})$. Define an equivalence relation R^1 on U_1 as the universal relation (i.e., $[Y]_{R^1} = U_1$ for the unique element Y). Then, for this R^1,

$$\underline{Y}^{(1)} = \{\, Z \in U_1 \mid [Z]_{R^1} \subseteq Y \,\}.$$

Since $[Y]_{R^1} = U_1 = \{Y\}$ and $\{Y\} \subseteq Y$ is false (as Y is a pair, not a set containing Y), we have $\underline{Y}^{(1)} = \varnothing$. However, the upper approximation is

$$\overline{Y}^{(1)} = \{\, Z \in U_1 \mid [Z]_{R^1} \cap Y \neq \emptyset \,\} = U_1 = \{Y\}.$$

Thus,

$$\mathcal{MR}^2(X) = \Big\{\big(\varnothing,\, \{Y\}\big)\Big\}.$$

This simple example illustrates the recursive construction of iterative multi-rough sets.

Theorem 2.20. *Let U be a universal set, $X \subseteq U$, and let $\{R_1^0, R_2^0, \ldots, R_{n_0}^0\}$ be a family of equivalence relations on U. Then the first-order iterative multi-rough set $\mathcal{MR}^1(X)$ coincides with the classical multirough set of X. That is,*

$$\mathcal{MR}^1(X) = \{\, (\underline{X}_i, \overline{X}_i) \mid i = 1, 2, \ldots, n_0 \,\},$$

where

$$\underline{X}_i = \{\, x \in U \mid [x]_{R_i^0} \subseteq X \,\} \quad \textit{and} \quad \overline{X}_i = \{\, x \in U \mid [x]_{R_i^0} \cap X \neq \emptyset \,\}.$$

Proof. By definition, the first-order iterative multi-rough set is given by

$$\mathcal{MR}^1(X) = \left\{ \left(\underline{X}_i^{(0)},\, \overline{X}_i^{(0)} \right) \;\middle|\; i = 1, 2, \ldots, n_0 \right\},$$

where

$$\underline{X}_i^{(0)} = \{\, x \in U \mid [x]_{R_i^0} \subseteq X \,\} \quad \text{and} \quad \overline{X}_i^{(0)} = \{\, x \in U \mid [x]_{R_i^0} \cap X \neq \emptyset \,\}.$$

This is precisely the definition of the classical multirough set of X as provided earlier. Hence, $\mathcal{MR}^1(X)$ generalizes (in fact, equals) the classical multirough set. □

2.6. *MultiPlithogenic Set*

MultiPlithogenic Sets are mathematical structures that extend Plithogenic Sets by incorporating multiple attributes, handling uncertainty, and contradictions in decision-making.

Definition 2.21 (MultiPlithogenic Set)**.** Let S be a universal set and $P \subseteq S$ be a subset. Let v be an attribute with a set of possible values P_v. Let $\{L_i\}_{i=1}^k$ and $\{L'_j\}_{j=1}^l$ be families of complete lattices (typically, $L_i, L'_j = [0,1]$ or products thereof). A *MultiPlithogenic Set* (MPS) on P is defined as the 5-tuple

$$\text{MPS} = \Big(P,\ v,\ P_v,\ \{pdf_i\}_{i=1}^k,\ \{pCF_j\}_{j=1}^l\Big),$$

where:

- For each $i = 1, \ldots, k$, the function

  $$pdf_i : P \times P_v \to L_i$$

  is called a *Degree of Appurtenance Function (DAF)*. For every $x \in P$ and $\alpha \in P_v$, the value $pdf_i(x, \alpha)$ represents one component of the membership degree of x with respect to the attribute value α.
- For each $j = 1, \ldots, l$, the function

  $$pCF_j : P_v \times P_v \to L'_j$$

  is called a *Degree of Contradiction Function (DCF)*. These functions satisfy, for all $\alpha, \beta \in P_v$:

  $$pCF_j(\alpha, \alpha) = 0 \quad \text{(reflexivity)} \quad \text{and} \quad pCF_j(\alpha, \beta) = pCF_j(\beta, \alpha) \quad \text{(symmetry)}.$$

Example 2.22 (Color-Based Decision Making)**.** Let $S = \mathbb{R}$ and $P = [0, 10]$. Suppose the attribute v is "color" with possible values

$$P_v = \{\text{red}, \text{green}, \text{blue}\}.$$

Define two Degree of Appurtenance Functions:

$$pdf_1(x, \alpha) = \begin{cases} \frac{x}{10} & \text{if } \alpha = \text{red}, \\ 1 - \frac{x}{10} & \text{if } \alpha = \text{green}, \\ 0.5 & \text{if } \alpha = \text{blue}, \end{cases}$$

and

$$pdf_2(x,\alpha) = \begin{cases} 0.5 & \text{if } \alpha = \text{red}, \\ \frac{x}{10} & \text{if } \alpha = \text{green}, \\ 1 - \frac{x}{10} & \text{if } \alpha = \text{blue}. \end{cases}$$

Also, define a single Degree of Contradiction Function:

$$pCF_1 : P_v \times P_v \to [0,1], \quad pCF_1(\alpha,\beta) = \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha = \beta, \\ 0.3 & \text{if } \alpha \neq \beta. \end{cases}$$

Then the 5-tuple

$$\text{MPS} = \Big([0,10],\, v,\, \{\text{red}, \text{green}, \text{blue}\},\, \{pdf_1,\, pdf_2\},\, \{pCF_1\}\Big)$$

defines a MultiPlithogenic Set that assigns to each $x \in [0,10]$ a pair of membership degrees (via pdf_1 and pdf_2) for each color, along with a contradiction measure between any two color values.

Theorem 2.23. *Let S be a universal set and $P \subseteq S$. Consider the following specializations of a MultiPlithogenic Set:*

(a) If $k = 1$ and $l = 1$, then the MultiPlithogenic Set

$$(P,\, v,\, P_v,\, \{pdf_1\},\, \{pCF_1\})$$

reduces to the classical Plithogenic Set.

(b) If the attribute v is omitted (or considered trivial) and $pdf_1 : P \to [0,1]^k$ (with $k \geq 1$), then the structure is equivalent to a multi-fuzzy set of dimension k on P.

(c) If we choose $k = 3$ and define

$$pdf_1(x,\alpha) = T(x,\alpha), \quad pdf_2(x,\alpha) = I(x,\alpha), \quad pdf_3(x,\alpha) = F(x,\alpha),$$

with an appropriate definition of pCF_1 (or by ignoring it), then the MultiPlithogenic Set specializes to a multi-neutrosophic set.

Thus, the MultiPlithogenic Set framework unifies and generalizes Plithogenic Sets, Multi-Neutrosophic Sets, and Multi-Fuzzy Sets.

Proof. (a) In the classical Plithogenic Set (see, e.g., [57]), one considers a single Degree of Appurtenance Function $pdf : P \times P_v \to [0,1]^s$ and a single Degree of Contradiction Function $pCF : P_v \times P_v \to [0,1]^t$. By setting $k = 1$ and $l = 1$ in the definition of a MultiPlithogenic Set, we obtain

$$(P,\, v,\, P_v,\, \{pdf_1\},\, \{pCF_1\}),$$

which is identical to the classical definition.

(b) A multi-fuzzy set of dimension k on P is defined as a mapping

$$\mu : P \to \prod_{i=1}^{k} [0,1],$$

assigning to each element $x \in P$ a k-tuple of membership degrees. By omitting the attribute v and setting P_v to a singleton (or ignoring it), and by taking the single DAF $pdf_1 : P \to [0,1]^k$, the MultiPlithogenic Set reduces to the multi-fuzzy set structure.

(c) In a multi-neutrosophic set, each element $x \in P$ is characterized by three membership degrees: truth $T(x)$, indeterminacy $I(x)$, and falsity $F(x)$. By setting $k = 3$ and defining

$$pdf_1(x,\alpha) = T(x,\alpha), \quad pdf_2(x,\alpha) = I(x,\alpha), \quad pdf_3(x,\alpha) = F(x,\alpha),$$

for each $\alpha \in P_v$, the MultiPlithogenic Set becomes a structure in which each element is assigned a triple of membership values. With a suitable (or even trivial) definition of the contradiction function pCF_1, this framework exactly recovers the notion of a multi-neutrosophic set.

In each case, the MultiPlithogenic Set is seen to specialize to the corresponding classical set by appropriate choices of the parameters k, l and the functions pdf_i and pCF_j. Thus, the general framework indeed unifies and generalizes the three types of sets. □

3. **Iterative MultiPlithogenic Set: Definition and Reductions**

An Iterative MultiPlithogenic Set recursively assigns plithogenic-valued memberships, layering appurtenance and contradiction across levels for hierarchical, multi-attribute, robust uncertainty modeling.

Notation 1. *Fix a nonempty universe P (of objects to be evaluated), a single attribute v with a finite value set P_v, and two finite index sets:*

$$\mathcal{I} = \{1,\dots,k\} \quad \textit{for DAF components}, \qquad \mathcal{J} = \{1,\dots,\ell\} \quad \textit{for DCF components}.$$

Let $\{L_i\}_{i\in\mathcal{I}}$ and $\{L'_j\}_{j\in\mathcal{J}}$ be complete lattices (typically $L_i = L'_j = [0,1]$).

Definition 3.1 (Iterative MultiPlithogenic codomains)**.** Define the level-0 plithogenic fiber as

$$\mathfrak{L}^{(0)} := \prod_{i\in\mathcal{I}} L_i.$$

Recursively, for $n \geq 1$ set

$$\mathfrak{L}^{(n)}(P,P_v) := \Big\{ \Phi : P \times P_v \longrightarrow \mathfrak{L}^{(n-1)}(P,P_v) \Big\}.$$

(Thus an element of $\mathfrak{L}^{(n)}$ is a *plithogenic-valued* mapping on $P \times P_v$ whose values are level-$(n-1)$ objects.)

Definition 3.2 (Iterative MultiPlithogenic Set (order n))**.** Let $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 1$. An *Iterative MultiPlithogenic Set of order* n on P is a tuple

$$\mathrm{IMPS}^{(n)} := \Big(P,\ v,\ P_v,\ \{\,\mathrm{PDF}_i^{(n)}\,\}_{i\in\mathcal{I}},\ \{\,\mathrm{pCF}_j\,\}_{j\in\mathcal{J}}\Big),$$

where

- for each $i \in \mathcal{I}$, the i-th *iterative Degree of Appurtenance Function* (DAF) is

$$\mathrm{PDF}_i^{(n)} :\ P \times P_v \ \longrightarrow\ \mathfrak{L}^{(n-1)}(P, P_v);$$

- for each $j \in \mathcal{J}$, the *Degree of Contradiction Function* (DCF)

$$\mathrm{pCF}_j :\ P_v \times P_v \ \longrightarrow\ L'_j$$

  is symmetric and reflexive: $\mathrm{pCF}_j(\alpha,\alpha) = 0$, $\mathrm{pCF}_j(\alpha,\beta) = \mathrm{pCF}_j(\beta,\alpha)$ for all $\alpha, \beta \in P_v$.

When $n = 1$ we get the classical (non-iterative) case $\mathrm{PDF}_i^{(1)} : P \times P_v \to \mathfrak{L}^{(0)} = \prod_{i\in\mathcal{I}} L_i$, i.e., ordinary MultiPlithogenic DAFs.

Remark 3.3 (Semantics)**.** For $n = 1$, each $\mathrm{PDF}_i^{(1)}(x,\alpha) \in \prod_{r\in\mathcal{I}} L_r$ is a k-tuple of base degrees. For $n \geq 2$, the value $\mathrm{PDF}_i^{(n)}(x,\alpha)$ is itself a (level-$(n-1)$) plithogenic-valued mapping on $P \times P_v$, enabling hierarchical (*self-similar*) refinement of membership information across several layers.

Example 3.4 (IMPS of order 2: Bike-share station selection with time-of-day contexts)**.** Let the universe of candidate stations be $P = \{s_1, s_2, s_3\}$. Consider the attribute $v =$ "user priority" with value set

$$P_v = \{\text{commute } (C),\ \text{leisure } (L),\ \text{safety } (S)\}.$$

Contradiction (symmetric, reflexive) is specified by

$$\mathrm{pCF} = \begin{array}{c|ccc} & C & L & S \\ \hline C & 0 & 0.3 & 0.5 \\ L & 0.3 & 0 & 0.2 \\ S & 0.5 & 0.2 & 0 \end{array}.$$

We build an *Iterative MultiPlithogenic Set of order* 2, where the iterative DAF $\mathrm{PDF}^{(2)} : P \times P_v \to [0,1]^{\Xi}$ returns a vector over the context set $\Xi = \{\text{peak}, \text{off}\}$. Let the context-weights be $\lambda_{\text{peak}} = 0.7$ and $\lambda_{\text{off}} = 0.3$. The level-2 DAFs are:

	C	L	S
s_1	(0.80, 0.60)	(0.50, 0.70)	(0.60, 0.70)
s_2	(0.70, 0.50)	(0.60, 0.60)	(0.80, 0.90)
s_3	(0.60, 0.60)	(0.70, 0.80)	(0.50, 0.60)

(entries are (peak, off)).

Inner (context) aggregation. For $x \in P$ and $a \in P_v$ set

$$m_{x,a} := 0.7\,\mathrm{PDF}^{(2)}(x,a)_{\mathrm{peak}} + 0.3\,\mathrm{PDF}^{(2)}(x,a)_{\mathrm{off}}$$

. Explicitly:

For $s_1:\ C: 0.7\cdot 0.80 + 0.3\cdot 0.60 = 0.74,\ L: 0.7\cdot 0.50 + 0.3\cdot 0.70 = 0.56,\ S: 0.7\cdot 0.60 + 0.3\cdot 0.70 = 0.63;$

For $s_2:\ C: 0.64,\ L: 0.60,\ S: 0.83;$ For $s_3:\ C: 0.60,\ L: 0.73,\ S: 0.53.$

Plithogenic aggregation (dominant value $d = S$). Set weights $w(a \mid d) := 1 - \mathrm{pCF}(a,d)$: $w(C \mid S) = 1 - 0.5 = 0.5$, $w(L \mid S) = 1 - 0.2 = 0.8$, $w(S \mid S) = 1$; denominator $\sum_a w(a \mid S) = 2.3$. Define the score

$$S_d(x) := \frac{\sum_{a\in P_v} w(a \mid d)\, m_{x,a}}{\sum_{a\in P_v} w(a \mid d)}.$$

Numerics.

$$S_S(s_1) = \frac{0.5\cdot 0.74 + 0.8\cdot 0.56 + 1.0\cdot 0.63}{2.3} = \frac{0.37 + 0.448 + 0.63}{2.3} \approx 0.630,$$
$$S_S(s_2) = \frac{0.5\cdot 0.64 + 0.8\cdot 0.60 + 1.0\cdot 0.83}{2.3} = \frac{0.32 + 0.48 + 0.83}{2.3} \approx 0.709,$$
$$S_S(s_3) = \frac{0.5\cdot 0.60 + 0.8\cdot 0.73 + 1.0\cdot 0.53}{2.3} = \frac{0.30 + 0.584 + 0.53}{2.3} \approx 0.615.$$

s_2 is preferred under safety-dominant policy: $s_2\,(0.709) > s_1\,(0.630) \gtrsim s_3\,(0.615)$.

Example 3.5 (IMPS of order 3: Wind-farm site planning with season and day-night layers)**.** Let $P = \{\mathrm{A}, \mathrm{B}\}$ be candidate sites and $v =$ "planning objective" with

$$P_v = \{\text{capacity (Cap)},\ \text{cost (Cost)},\ \text{wildlife (Bird)}\}.$$

Contradiction (symmetric, reflexive) is

$$\mathrm{pCF} = \begin{array}{c|ccc} & \text{Cap} & \text{Cost} & \text{Bird} \\ \hline \text{Cap} & 0 & 0.4 & 0.6 \\ \text{Cost} & 0.4 & 0 & 0.2 \\ \text{Bird} & 0.6 & 0.2 & 0 \end{array}.$$

We construct an *order*-3 *IMPS* whose iterative DAF $\mathrm{PDF}^{(3)} : P \times P_v \to [0,1]^{S\times T}$ returns a 2×2 array over seasons $S = \{\text{Winter}, \text{Summer}\}$ and times $T = \{\text{Day}, \text{Night}\}$. Context weights: $(\theta_{\text{Day}}, \theta_{\text{Night}}) = (0.6, 0.4)$ and $(\sigma_{\text{Winter}}, \sigma_{\text{Summer}}) = (0.5, 0.5)$. Level-3 DAFs (entries are (Day, Night)):

	Cap	Cost	Bird
A : Winter	(0.75, 0.70)	(0.50, 0.55)	(0.80, 0.85)
A : Summer	(0.65, 0.60)	(0.45, 0.50)	(0.70, 0.75)
B : Winter	(0.85, 0.80)	(0.60, 0.65)	(0.60, 0.65)
B : Summer	(0.75, 0.70)	(0.55, 0.60)	(0.55, 0.60)

Inner (time-of-day) aggregation. For each site/objective/season,

$$m^{(T)} := 0.6\,(\text{Day}) + 0.4\,(\text{Night}).$$

For site A:

$$\text{Cap}: \ \text{Winter } 0.6\cdot 0.75 + 0.4\cdot 0.70 = 0.73, \ \text{Summer } 0.63;$$

$$\text{Cost}: \ \text{Winter } 0.52, \ \text{Summer } 0.47;$$

$$\text{Bird}: \ \text{Winter } 0.82, \ \text{Summer } 0.72.$$

For site B:

$$\text{Cap}: \ (0.83, 0.73), \quad \text{Cost}: \ (0.62, 0.57), \quad \text{Bird}: \ (0.62, 0.57).$$

Season aggregation. For each site/objective,

$$m^{(S)} := 0.5\,(\text{Winter}) + 0.5\,(\text{Summer}).$$

Thus

$$\text{A: Cap} = 0.5(0.73 + 0.63) = 0.68, \ \text{Cost} = 0.495, \ \text{Bird} = 0.77;$$

$$\text{B: Cap} = 0.78, \ \text{Cost} = 0.595, \ \text{Bird} = 0.595.$$

Plithogenic aggregation (dominant value $d = \text{Bird}$). Weights $w(a \mid d) = 1 - \text{pCF}(a, d)$ give

$$w(\text{Cap} \mid \text{Bird}) = 0.4, \quad w(\text{Cost} \mid \text{Bird}) = 0.8, \quad w(\text{Bird} \mid \text{Bird}) = 1.0, \quad \sum w = 2.2.$$

Define $S_d(x) := \dfrac{\sum_{a \in P_v} w(a \mid d)\, m^{(S)}_{x,a}}{2.2}$. *Numerics.*

$$S_{\text{Bird}}(\text{A}) = \frac{0.4 \cdot 0.68 + 0.8 \cdot 0.495 + 1.0 \cdot 0.77}{2.2} = \frac{0.272 + 0.396 + 0.770}{2.2} = \frac{1.438}{2.2} \approx 0.655,$$

$$S_{\text{Bird}}(\text{B}) = \frac{0.4 \cdot 0.78 + 0.8 \cdot 0.595 + 1.0 \cdot 0.595}{2.2} = \frac{0.312 + 0.476 + 0.595}{2.2} = \frac{1.383}{2.2} \approx 0.629.$$

With wildlife protection dominant, site A (≈ 0.655) slightly outperforms site B (≈ 0.629). Changing the dominant value (e.g., to capacity) would alter the contradiction weights and may reverse the ranking.

Theorem 3.6 (IMPS generalizes MultiPlithogenic Sets)**.** *Let $n = 1$. Then the class of order-1 IMPS coincides with the class of MultiPlithogenic Sets. In particular, the correspondence*

$$\Big(P, v, P_v, \{\text{PDF}_i^{(1)}\}_{i \in \mathcal{I}}, \{\text{pCF}_j\}_{j \in \mathcal{J}}\Big) \ \longleftrightarrow \ \Big(P, v, P_v, \{\text{pdf}_i\}_{i \in \mathcal{I}}, \{\text{pCF}_j\}_{j \in \mathcal{J}}\Big),$$

with $\text{pdf}_i := \text{PDF}_i^{(1)} : P \times P_v \to \prod_{r \in \mathcal{I}} L_r$*, is an identity of data.*

Proof. By Definition 3.1, $\mathfrak{L}^{(0)} = \prod_{r \in \mathcal{I}} L_r$. For $n = 1$, Definition 3.2 prescribes $\text{PDF}_i^{(1)} : P \times P_v \to \mathfrak{L}^{(0)}$ for each i, which are exactly the DAF components of a (non-iterative) MultiPlithogenic Set, with the same DCFs. No further structure is added or removed; hence the two notions coincide. □

Theorem 3.7 (IMPS generalizes Iterative MultiFuzzy Sets)**.** *Fix $k = |\mathcal{I}| \geq 1$, let all $L_i = [0,1]$, take $\ell = 0$ (no DCFs), and let $P_v = \{\alpha_0\}$ be a singleton. For each $n \geq 1$ there is a natural bijection*

$$\Big\{\textit{order-}n\textit{ IMPS on } P \textit{ with } P_v = \{\alpha_0\}\Big\} \;\cong\; \mathcal{F}_k^n(P),$$

where $\mathcal{F}_k^n(P) = \{\, M : P \to \mathcal{F}_k^{n-1}(P) \,\}$ with $\mathcal{F}_k^0 = \prod_{i=1}^k [0,1]$ is the space of order-n Iterative MultiFuzzy Sets.

Proof. We proceed by induction on n.
Base $n = 1$. An order-1 IMPS as specialized in the statement consists of $\mathrm{PDF}_i^{(1)} : P \times \{\alpha_0\} \to \prod_{r=1}^k [0,1]$. Identify $P \times \{\alpha_0\}$ with P and define

$$M(x) \;:=\; \Big(\mathrm{PDF}_1^{(1)}(x,\alpha_0), \ldots, \mathrm{PDF}_k^{(1)}(x,\alpha_0)\Big) \in \prod_{i=1}^k [0,1] = \mathcal{F}_k^0,$$

which yields a bijection between specialized order-1 IMPS and maps $M : P \to \mathcal{F}_k^0 = \mathcal{F}_k^1(P)$.
Step $n \to n+1$. An order-$(n+1)$ IMPS has $\mathrm{PDF}_i^{(n+1)} : P \times \{\alpha_0\} \to \mathfrak{L}^{(n)}(P, \{\alpha_0\})$. By Definition 3.1, $\mathfrak{L}^{(n)}(P, \{\alpha_0\})$ is the set of maps $P \to \mathfrak{L}^{(n-1)}(P, \{\alpha_0\})$, which by the induction hypothesis is naturally identified with $\mathcal{F}_k^n(P)$. Hence for each $x \in P$ we may define

$$M(x) \;:=\; \Big(\mathrm{PDF}_1^{(n+1)}(x,\alpha_0), \ldots, \mathrm{PDF}_k^{(n+1)}(x,\alpha_0)\Big) \;\in\; \mathcal{F}_k^n(P),$$

obtaining a bijection $P \to \mathcal{F}_k^n(P)$, i.e. $M \in \mathcal{F}_k^{n+1}(P)$. The construction is reversible at every stage; thus we have a natural bijection for all n. □

Theorem 3.8 (IMPS generalizes Iterative MultiNeutrosophic Sets)**.** *Fix nonnegative integers p, r, s with $p + r + s \geq 2$ and set $k = p + r + s$, $L_i = [0,1]$. Let $P_v = \{\alpha_0\}$ and choose $\ell = 0$. For each $n \geq 1$ there is a natural bijection*

$$\Big\{\textit{order-}n\textit{ IMPS on } P \textit{ with } P_v = \{\alpha_0\} \textit{ and } k = p+r+s\Big\} \;\cong\; \mathcal{N}_{p,r,s}^n(P),$$

where $\mathcal{N}_{p,r,s}^n(P) = \{\, M : P \to \mathcal{N}_{p,r,s}^{n-1}(P) \,\}$ and $\mathcal{N}_{p,r,s}^0 = \big([0,1]^p \times [0,1]^r \times [0,1]^s\big)$ is the order-n Iterative MultiNeutrosophic space.

Proof. Order the index set $\mathcal{I}$ so that the first p coordinates correspond to truth, the next r to indeterminacy, and the last s to falsity. The proof mirrors Theorem 3.7. For $n = 1$, the specialized IMPS data are $\mathrm{PDF}_i^{(1)} : P \to \prod_{t=1}^{p+r+s} [0,1]$. Grouping the coordinates into $(T_1, \ldots, T_p; I_1, \ldots, I_r; F_1, \ldots, F_s)$ yields a map $M : P \to [0,1]^p \times [0,1]^r \times [0,1]^s = \mathcal{N}_{p,r,s}^0$, i.e. an element of $\mathcal{N}_{p,r,s}^1(P)$. For $n \to n+1$, the codomain $\mathfrak{L}^{(n)}(P, \{\alpha_0\})$ identifies with $\mathcal{N}_{p,r,s}^n(P)$ by the induction hypothesis, hence $x \mapsto \big(\mathrm{PDF}_i^{(n+1)}(x, \alpha_0)\big)_{i \in \mathcal{I}}$ is a map $P \to \mathcal{N}_{p,r,s}^n(P)$, i.e. an element of $\mathcal{N}_{p,r,s}^{n+1}(P)$. All steps are bijective and natural, completing the proof. □

4. Conclusion and Future Works

In this paper, we extended the frameworks by introducing and defining new structures: Iterative MultiFuzzy Sets, Iterative MultiNeutrosophic Sets, Iterative MultiSoft Sets, Iterative MultiRough Sets, and MultiPlithogenic Sets. In the future, we aim to investigate further extensions utilizing Graphs [59], HyperGraphs [60–62], and SuperHyperGraphs [63, 64].

Funding

This study did not receive any financial or external support from organizations or individuals.

Acknowledgments

We extend our sincere gratitude to everyone who provided insights, inspiration, and assistance throughout this research. We particularly thank our readers for their interest and acknowledge the authors of the cited works for laying the foundation that made our study possible. We also appreciate the support from individuals and institutions that provided the resources and infrastructure needed to produce and share this paper. Finally, we are grateful to all those who supported us in various ways during this project.

Data Availability

This research is purely theoretical, involving no data collection or analysis. We encourage future researchers to pursue empirical investigations to further develop and validate the concepts introduced here.

Research Integrity

The authors hereby confirm that, to the best of their knowledge, this manuscript is their original work, has not been published in any other journal, and is not currently under consideration for publication elsewhere at this stage.

Use of Generative AI and AI-Assisted Tools

I use generative AI and AI-assisted tools for tasks such as English grammar checking, and I do not employ them in any way that violates ethical standards.

Disclaimer (Note on Computational Tools)

No computer-assisted proof, symbolic computation, or automated theorem proving tools (e.g., Mathematica, SageMath, Coq, etc.) were used in the development or verification of the results presented in this paper. All proofs and derivations were carried out manually and analytically by the authors.

Code Availability

No code or software was developed for this study.

Clinical Trial

This study did not involve any clinical trials.

Ethical Approval

As this research is entirely theoretical in nature and does not involve human participants or animal subjects, no ethical approval is required.

Conflicts of Interest

The authors confirm that there are no conflicts of interest related to the research or its publication.

Disclaimer

This work presents theoretical concepts that have not yet undergone practical testing or validation. Future researchers are encouraged to apply and assess these ideas in empirical contexts. While every effort has been made to ensure accuracy and appropriate referencing, unintentional errors or omissions may still exist. Readers are advised to verify referenced materials on their own. The views and conclusions expressed here are the authors' own and do not necessarily reflect those of their affiliated organizations.

References

[1] Hongxing Li and Vincent C Yen. *Fuzzy sets and fuzzy decision-making*. CRC press, 1995.

[2] Lotfi A Zadeh. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353, 1965.

[3] Florentin Smarandache. Neutrosophy: neutrosophic probability, set, and logic: analytic synthesis & synthetic analysis. 1998.

[4] Florentin Smarandache. Ambiguous set (as) is a particular case of the quadripartitioned neutrosophic set (qns). *nidus idearum*, page 16.

[5] Florentin Smarandache. *Plithogeny, plithogenic set, logic, probability, and statistics*. Infinite Study, 2017.

[6] Ambalal V Patel. Analytical structures and analysis of fuzzy pd controllers with multifuzzy sets having variable cross-point level. *Fuzzy sets and Systems*, 129(3):311–334, 2002.

[7] AMBALAL V Patel. Analytical structures of fuzzy pi controllers with multifuzzy sets under various t-norms, t-conorms and inference methods. *International Journal of Computational Cognition*, 1(3):93–141, 2003.

[8] Florentin Smarandache. *Introduction to the multineutrosophic set*. Infinite Study, 2023.

[9] Tuqa AH Al-Tamimi, Luay AA Al-Swidi, and Ali HM Al-Obaidi. New concepts in partner multineutrosophic topological space. *International Journal of Neutrosophic Science (IJNS)*, 24(3), 2024.

[10] Thomas Jech. *Set theory: The third millennium edition, revised and expanded*. Springer, 2003.

[11] Eli Chien, Chao Pan, Jianhao Peng, and Olgica Milenkovic. You are allset: A multiset function framework for hypergraph neural networks. *ArXiv*, abs/2106.13264, 2021.

[12] Florentin Smarandache. Neutrosophic perspectives: Triplets, duplets, multisets, hybrid operators, modal logic, hedge algebras, and applications. *Engineering Educator: Courses*, 2018.

[13] Wayne D Blizard. The development of multiset theory. 1991.

[14] Wayne D. Blizard et al. Multiset theory. *Notre Dame Journal of formal logic*, 30(1):36–66, 1989.

[15] Hans-Jürgen Zimmermann. *Fuzzy set theory—and its applications*. Springer Science & Business Media, 2011.

[16] Azriel Rosenfeld. Fuzzy graphs. In *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*, pages 77–95. Elsevier, 1975.

[17] Abd Ulazeez M. Alkouri, Mo'men Bany Amer, and Ibrahim Jawarneh. Complex bipolar multi-fuzzy sets. *Uncertainty*, 2024.

[18] Yousef Al-Qudah and Nasruddin Hassan. Operations on complex multi-fuzzy sets. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 33:1527–1540, 2017.

[19] Sabu Sebastian and TV Ramakrishnan. Multi-fuzzy sets: An extension of fuzzy sets. *Fuzzy Information and Engineering*, 3:35–43, 2011.

[20] Jayanta Ghosh and Tapas Kumar Samanta. Hyperfuzzy sets and hyperfuzzy group. *Int. J. Adv. Sci. Technol*, 41:27–37, 2012.

[21] Young Bae Jun, Kul Hur, and Kyoung Ja Lee. Hyperfuzzy subalgebras of bck/bci-algebras. *Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics*, 2017.

[22] Florentin Smarandache. An overview of plithogenic set and symbolic plithogenic algebraic structures. 2023.

[23] Florentin Smarandache and NM Gallup. Generalization of the intuitionistic fuzzy set to the neutrosophic set. In *International Conference on Granular Computing*, pages 8–42. Citeseer, 2006.

[24] Haibin Wang, Florentin Smarandache, Yanqing Zhang, and Rajshekhar Sunderraman. *Single valued neutrosophic sets*. Infinite study, 2010.

[25] Said Broumi, Mohamed Talea, Assia Bakali, and Florentin Smarandache. Single valued neutrosophic graphs. *Journal of New theory*, (10):86–101, 2016.

[26] Florentin Smarandache. *Introduction to the multineutrosophic set*. Infinite Study, 2023.

[27] Tuqa AH Al-Tamimi, Luay AA Al-Swidi, Ali HM Al-Obaidi, et al. New concepts in partner multineutrosophic topological space. *International Journal of Neutrosophic Science*, (3):172–72, 2024.

[28] Tuqa AH Al-Tamimi, Luay AA Al-Swidi, Ali HM Al-Obaidi, et al. Partner sets for generalizations of multineutrosophic sets. *International Journal of Neutrosophic Science*, (1):08–8, 2024.

[29] Kholood Mohammad Alsager. Decision-making framework based on multineutrosophic soft rough sets. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1):2868970, 2022.

[30] Johanna Estefanía Street Imbaquingo Street, Karen Milagros Díaz Street Salambay, Jordy Alexis Vargas Yumbo, and Kevin Christopher Carrasco Azogue. Intercultural education from ancestral logic: Application of the ayni method multi-neutrosophic to strengthen mixed methodology in the waorani community. *Neutrosophic Sets and Systems*, 92:263–283, 2025.

[31] Edison Aquiles Olivero Arias, Jorge Luis Chabusa Vargas, and José Alejandro Flores Sánchez. Multineutrosophic analysis of financial statements as a basis for strategic decision-making in uncertain. *Neutrosophic Sets and Systems*, page 370, 2025.

[32] Shakila Devi GT, S Sangeetha, and Maikel Yelandi Leyva Vazquez. Determining factors for minimizing oven downtime through controlled batch management: A multineutrosophic approach with aras. *Neutrosophic Sets and Systems*, 89:174–184, 2025.

[33] Yan Li. A multineutrosophic offset model for clustering and optimizing college students' mental health literacy in interdisciplinary contexts. *Neutrosophic Sets and Systems*, 87:678–688, 2025.

[34] Takaaki Fujita and Florentin Smarandache. *Some Types of HyperNeutrosophic Set (7): Type-m, Nonstationary, Subset-valued, and Complex Refined*. Infinite Study, 2025.

[35] Takaaki Fujita and Florentin Smarandache. Some types of hyperneutrosophic set (4): Cubic, trapozoidal, q-rung orthopair, overset, underset, and offset. *Advancing Uncertain Combinatorics through Graphization, Hyperization, and Uncertainization: Fuzzy, Neutrosophic, Soft, Rough, and Beyond*, page 193, 2025.

[36] Florentin Smarandache. A unifying field in logics: Neutrosophic logic. In *Philosophy*, pages 1–141. American Research Press, 1999.

[37] Pradip Kumar Maji, Ranjit Biswas, and A Ranjan Roy. Soft set theory. *Computers & mathematics with applications*, 45(4-5):555–562, 2003.

[38] Dmitriy Molodtsov. Soft set theory-first results. *Computers & mathematics with applications*, 37(4-5):19–31, 1999.

[39] Shawkat Alkhazaleh, Abdul Razak Salleh, Nasruddin Hassan, and Abd Ghafur Ahmad. Multisoft sets. In *Proc. 2nd International Conference on Mathematical Sciences*, pages 910–917, 2010.

[40] Florentin Smarandache. *Practical applications of IndetermSoft Set and IndetermHyperSoft Set and introduction to TreeSoft Set as an extension of the MultiSoft Set*. Infinite Study, 2022.

[41] Piyu Li, Zhi Kong, Wen-Li Liu, and Chang-Tao Xue. On multi-soft rough sets. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pages 3051–3055, 2017.

[42] Florentin Smarandache. Extension of soft set to hypersoft set, and then to plithogenic hypersoft set. *Neutrosophic sets and systems*, 22(1):168–170, 2018.

[43] Sagvan Y Musa. N-bipolar hypersoft sets: Enhancing decision-making algorithms. *Plos one*, 19(1):e0296396, 2024.

[44] Sagvan Y Musa and Baravan A Asaad. A novel approach towards parameter reduction based on bipolar hypersoft set and its application to decision-making. *Neutrosophic Sets and Systems*, 55(1):33, 2023.

[45] Florentin Smarandache. Foundation of the superhypersoft set and the fuzzy extension superhypersoft set: A new vision. *Neutrosophic Systems with Applications*, 11:48–51, 2023.

[46] Abdullah Ali Salamai. A superhypersoft framework for comprehensive risk assessment in energy projects. *Neutrosophic Sets and Systems*, 77:614–624, 2025.

[47] Zdzisław Pawlak. Rough sets. *International journal of computer & information sciences*, 11:341–356, 1982.

[48] Zdzislaw Pawlak, S. K. Michael Wong, Wojciech Ziarko, et al. Rough sets: probabilistic versus deterministic approach. *International Journal of Man-Machine Studies*, 29(1):81–95, 1988.

[49] Said Broumi, Florentin Smarandache, and Mamoni Dhar. Rough neutrosophic sets. *Infinite Study*, 32:493–502, 2014.

[50] Takaaki Fujita. *Advancing Uncertain Combinatorics through Graphization, Hyperization, and Uncertainization: Fuzzy, Neutrosophic, Soft, Rough, and Beyond*. Biblio Publishing, 2025.

[51] Zdzislaw Pawlak. Rough set theory and its applications to data analysis. *Cybernetics & Systems*, 29(7):661–688, 1998.

[52] Devendra Kumar Tayal, Sumit Kumar Yadav, and Divya Arora. Personalized ranking of products using aspect-based sentiment analysis and plithogenic sets. *Multimedia Tools and Applications*, 82:1261–1287, 2022.

[53] Walid Abdelfattah. Variables selection procedure for the dea overall efficiency assessment based plithogenic sets and mathematical programming. *International Journal of Scientific Research and Management*, 2022.

[54] Florentin Smarandache and Said Broumi. *Neutrosophic graph theory and algorithms*. IGI Global, 2019.

[55] Fazeelat Sultana, Muhammad Gulistan, Mumtaz Ali, Naveed Yaqoob, Muhammad Khan, Tabasam Rashid, and Tauseef Ahmed. A study of plithogenic graphs: applications in spreading coronavirus disease (covid-19) globally. *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, 14(10):13139–13159, 2023.

[56] Florentin Smarandache. Plithogeny, plithogenic set, logic, probability, and statistics. *arXiv preprint arXiv:1808.03948*, 2018.

[57] Florentin Smarandache. *Plithogenic set, an extension of crisp, fuzzy, intuitionistic fuzzy, and neutrosophic sets-revisited*. Infinite study, 2018.

[58] S Sudha, Nivetha Martin, and Florentin Smarandache. *Applications of Extended Plithogenic Sets in Plithogenic Sociogram*. Infinite Study, 2023.

[59] Reinhard Diestel. *Graph theory*. Springer (print edition); Reinhard Diestel (eBooks), 2024.

[60] Alain Bretto. Hypergraph theory. *An introduction. Mathematical Engineering. Cham: Springer*, 1, 2013.

[61] Yifan Feng, Haoxuan You, Zizhao Zhang, Rongrong Ji, and Yue Gao. Hypergraph neural networks. In *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, volume 33, pages 3558–3565, 2019.

[62] Yue Gao, Zizhao Zhang, Haojie Lin, Xibin Zhao, Shaoyi Du, and Changqing Zou. Hypergraph learning: Methods and practices. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(5):2548–2566, 2020.

[63] Florentin Smarandache. *Extension of HyperGraph to n-SuperHyperGraph and to Plithogenic n-SuperHyperGraph, and Extension of HyperAlgebra to n-ary (Classical-/Neutro-/Anti-) HyperAlgebra*. Infinite Study, 2020.

[64] Mohammad Hamidi and Mohadeseh Taghinezhad. *Application of Superhypergraphs-Based Domination Number in Real World*. Infinite Study, 2023.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of the publisher and/or the editor(s). This publisher and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

NCML Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Atención A Educandos Con Bajos Resultados En El Aprendizaje: Desafío Para El Desempeño Profesional Docente

Attention To Low Ability Students In The Learning Process: Teacher Professional Performance Challenge

Araíz Maturell Aguilera[1], Niurka Velázquez Fombellida[2]

[1]Dirección General de Educación de Calixto García, Holguín. Cuba. araikan2019@gmail.com
[2] Universidad de Holguín, Holguín. Cuba. NiurkaV@gmail.com

Resumen. La preparación del docente para la atención a la diversidad de su aula es un elemento indispensable para lograr una educación inclusiva. Por ello, el objetivo del trabajo se encaminó a describir los factores que limitan la efectividad en la atención a la diversidad de educandos con bajos resultados de aprendizaje, en el municipio Calixto García, provincia de Holguín. El estudio de caso reveló la escasa gestión pedagógica de las áreas, laboratorio y talleres de las instituciones educativas, insuficiencias en la aplicación de estrategias psicopedagógicas para la enseñanza desarrolladora, de enfoques y métodos actuales de concebir el proceso educativo. Por consiguiente, la calidad de la atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje, está condicionada por la preparación y el nivel de desempeño profesional de los docentes, y es expresión concreta de una educación inclusiva.

Palabras clave: Atención A La Diversidad, Desempeño Profesional Docente, Educandos Con Bajos Resultados, Estrategias Psicopedagógicas.

Abstract. Teacher preparation for the attention to diversity in the classroom is an indispensable element to achieve an inclusive education. Therefore, the goal of this paper was aimed at describing the factors that limit the effectiveness of care to the diversity of low ability students, in Calixto Garcia Municipality of Holguin province. The case study revealed the poor pedagogical management of the areas, laboratories and workshops of educational institutions, inadequacies in the application of psycho-pedagogical strategies for the developer teaching, current approaches and methods of conceiving the educational process. Consequently, the quality of attention to the diversity of low abilities students is conditioned by the preparation and level of professional performance of teachers and it is a concrete expression of inclusive education.

Keywords: Attention To The Diversity, Teacher Professional Performance, Low Ability Students` Results, Psycho-Pedagogical Strategy.

1. Introducción

En la actualidad existe consenso en la comunidad científica acerca de que el éxito o fracaso de los sistemas educativos está condicionado a la preparación y el desempeño profesional de docentes y directivos. Igualmente, que la formación permanente, la superación y capacitación, de estos, es un componente de calidad de primer orden. Por consiguiente, la preparación del docente es un eslabón fundamental para llevar a cabo con éxito las mejoras educativas, especialmente las realizadas en torno a la calidad del aprendizaje, todo lo que constituye un reto y a su vez propicia nuevas oportunidades para el desarrollo profesional.

En Cuba, desde el 2014 se implementa el Tercer Perfeccionamiento del Sistema Nacional de Educación como

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

respuesta a los problemas que se presentan, en la actualidad, en la educación a las crecientes demandas sociales. Ello permite dar cumplimiento a las metas y objetivos de la Agenda 2030" [2, p.5]. Por tanto, las modificaciones propuestas en la forma de gestionar las instituciones educativas y en el trabajo con el currículo (general e institucional), demandan un cambio en los métodos, modos y estilos de trabajos de docentes y directivos. Los primeros por ser responsables de su gestión institucional y los segundos por ser uno de los protagonistas principales de las modificaciones que deben suceder en el proceso educativo. Elementos que son reafirmados por Quesada y González [4] al reconocer que "…la atención a las diferencias individuales que tenemos en nuestras aulas y con ello, la preparación del docente, constituyen eslabones fundamentales en este nuevo proceso de perfeccionamiento" (p. 317).

En consecuencia, gestionar la calidad educativa en las condiciones actuales requiere un desempeño profesional pedagógico exitoso, fruto de una efectiva preparación, pues a través de la actividad y roles, el docente demuestra sus habilidades, capacidades e idoneidad. Por lo que, el desempeño pedagógico profesional es la fortaleza más relevante con la que cuenta una institución educativa, al ser considerado "la actuación real de los profesores en la práctica docente, en donde se manifiesta en forma actualizada el dominio de un determinado campo del saber y de estrategias pedagógicas, conocimiento de los sujetos y sus interacciones personales, y conocimiento de los contextos en que tiene relación…" [8, p.18].

En Cuba, se reconoce el imperativo de estructurar una escuela sin discriminación, ello significa atender la diversidad de necesidades educativas especiales de todos y cada uno de los educandos en sus diferentes contextos de actuación. Todo lo cual revela la necesidad de que el docente tenga una buena preparación para abarcar esta atención en toda su extensión e integralidad, que se manifieste en su desempeño profesional.

La consulta a varios autores nacionales y foráneos [9, 10, 11, 12, 4, 3, 13] que han hecho referencia al trabajo de atención a la diversidad en diferentes momentos, para diferentes escenarios y necesidades, permite evaluar el nivel de coincidencia en cuanto a la importancia que reviste la preparación de los docentes para abordar con éxito este complejo proceso.

La atención a la diversidad es considerada por Llán (1992, como se citó en Pelegrín y Alonso [3]) como "el despliegue de la actividad pedagógica profesional por los maestros y profesores en la planificación, organización, ejecución y control del proceso docente-educativo, considerando en cada uno de estos momentos la diversidad manifiesta en sus estudiantes, para brindarles el tratamiento especial e individualizado que cada uno requiere en su formación integral. Para su realización consecuente exige "[...] superar marcos de actuación desde los cuales los profesores se siguen preguntando qué hacer para los alumnos 'diversos', al margen de lo que ya hacen para los alumnos normales o no diversos" (p.2). Razón por la cual, el conocimiento y preparación de los docentes para atender este complejo proceso es una necesidad apremiante para consolidar las modificaciones propuestas en el Tercer Perfeccionamiento educacional y, con ello, elevar la calidad de la educación en los diferentes niveles, con énfasis en el que ocupa la presente investigación, por ser la base para el aprendizaje de todos los educandos del Sistema Nacional de Educación.

Según Romero y Lavigne [5], los educandos con dificultades en el aprendizaje "constituyen el grupo menos grave y probablemente el más numeroso,…, que se caracteriza por que suelen remitir en el curso regular del proceso educativo sin que sea precisa intervención especializada más allá del seguimiento" (p.17). Por consiguiente, se comparte el punto de vista de Salazar [6] acerca de que los "Trastornos Específicos del Aprendizaje,… caen en la suerte de no ser visualizados en nuestras escuelas. Otro grupo importante,…también quedan fuera y se inscriben como repetidores, multirrepetidores, ausentistas, niños sin objetivos vencidos, etc." (p.1).

En el municipio de Calixto García, provincia de Holguín, durante los cursos 2017-2024, una importante cifra de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

educandos de primaria (un promedio de 96), han sido reportados con bajos resultados en el aprendizaje (suspensos y regular), problemática que no ha sido suficientemente investigada, tratada, ni mejorada por la vía de la superación y el trabajo metodológico. Por consiguiente, el estudio que se expone describe los factores principales presentes en la preparación y el desempeño profesional de los docentes de este nivel educativo, que limitan la calidad en la atención a la diversidad de estos educandos y el avance de sus resultados.

La problemática que se aborda es uno de los elementos a los que da respuesta el Proyecto de investigación "Perfeccionamiento de las estrategias de atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje", adscripto al Programa Sectorial "Sistema educativo cubano. Perspectivas de desarrollo", que gestiona el MINED, y se ejecuta por la Dirección General de Educación del municipio de Calixto García, en la provincia de Holguín.

2. Materiales y métodos

La investigación es de corte cualitativo, a través de un estudio de caso se identifican, describen y explican los factores principales que inciden en la atención a la diversidad del aprendizaje de un grupo de educandos con bajos resultados, el mismo se organizó a partir de definir como pregunta de reflexión ¿Cuáles pudieran ser las causas de los bajos resultados de aprendizaje de educandos de primaria en el municipio de Calixto García?, la misma permitió definir tres unidades de análisis: I. Entorno de la institución educativa, II. Preparación del docente para la atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje y III. Proceso educativo desarrollador.

La muestra del estudio se tomó a partir del criterio de "saturación de información". Para Hernández-Sampieri y Mendoza [1] cuando se asume la saturación, "(...) la muestra final se conoce cuando las nuevas unidades que se añaden ya no aportan información o datos novedosos (...), aun cuando agreguemos casos extremos" (pp. 427-428). A partir de lo cual, se asumió como "caso" una institución educativa y, en ella, se consideraron fuentes para la recogida de datos 37 educandos con bajos resultados de aprendizaje, de ellos 12 con evaluación de desaprobado (7 de 1er grado y 5 de 2do grado) y 25 con evaluación de regular de todos los grados y 20 docentes que los atienden (incluidos los llamados especialistas: bibliotecarias, profesores de informática y educación física e instructores de arte). Para ello se utilizaron la observación (del entorno educativo, clases y otras actividades), entrevistas individuales (docentes); así como la revisión de documentos relativos a la planeación del docente y el sistema de trabajo metodológico de las instituciones educativas.

El proceso de recopilación de datos se comenzó en el Centro Escolar Rubén Bravo Álvarez (Caso A) en el que estaban presentes la mayor cantidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje y, posteriormente, se incorporó el Seminternado Rigoberto Mora Aguilera (Caso B). La incorporación de la nueva institución no aportó elementos de significación relativos a las unidades de análisis e indicadores de interés para la investigación, por lo que se asumió considerar como muestra las dos instituciones educativas referidas.

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan de manera resumida los resultados obtenidos en la exploración de las unidades de análisis, en el estudio de los casos A y B. La información recolectada se organizó y analizó según las dimensiones e indicadores definidos en los instrumentos, permitiendo una interpretación detallada de los mismos, a partir de la saturación de la información, todo lo cual se expone a continuación.

Unidad de análisis: I. Entorno de la institución educativa

Aunque en la literatura revisada se hace mucho énfasis en la utilidad de aplicar los enfoques de atención a la diversidad, educación inclusiva y educación para todos, y existe al menos, desde el punto de vista teórico, reconocimiento de su importancia y necesidad; en las observaciones realizadas a nueve docentes que imparten las especialidades en las áreas, laboratorios y talleres, presentes en el entorno de las instituciones educativas (Bibliotecarias (2), Educación Física (2), Informática (2), Instructores de arte (2)y la labor de una Psicopedagógica), con la intención de conocer cómo organizan y desarrollan la atención a las necesidades de los educandos con bajos resultados en el aprendizaje, se constató que comúnmente, las tareas docentes no se diseñan tomando en

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

consideración las particularidades de estos educandos, la atención no se particulariza ni se centra en los contenidos y áreas del conocimiento con mayor dificultad. En algunos casos, aun, cuando las tareas se concibieron a partir del diagnóstico, los niveles de ayuda ofrecidos no fueron suficientes para que pudieran avanzar en el desarrollo de los ejercicios. Igualmente, se apreció la ausencia de varios educandos a estas actividades, por falta de motivación para asistir en la sesión contraria, poca exigencia y apoyo de las familias y el insuficiente control y exigencia de los directivos.

Unidad de análisis: II. Preparación del docente para la atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje

Con la intención de valorar el tratamiento al tema investigado a través del trabajo metodológico que se desarrolla a nivel de institución y el que realizan los docentes, se realizó la revisión del sistema de trabajo metodológico delas dos instituciones que formaron parte del estudio y la planeación del sistema de clases de nueve docentes, así como se realizó una entrevista grupal en la que participaron nueve docentes. El análisis de toda la información recabada permitió identificar que:

En las actividades planificadas en el sistema de trabajo metodológico de las instituciones no se observa, suficientemente, el tratamiento a las necesidades individuales y colectivas de los docentes para la atención a los educandos con bajos resultados en el aprendizaje, a las exigencias de la clase desarrolladora y a las estrategias de enseñanza más efectivas.
En la revisión de la planeación del sistema de clases de los nueve docentes, se constató que las tareas docentes: a) No, siempre, tienen como rasgo distintivo su carácter diferenciador, al ser insuficiente la consideración de las particularidades de estos educandos, b) Por lo general, no se aprecian formas de trabajo que promuevan relaciones colectivas y de colaboración, c) Es insuficiente el uso de la tecnología, la biblioteca, y las redes sociales para estimular el interés por el aprendizaje y el desarrollo de habilidades, d) Poca diferenciación de las actividades a desarrollar por los educandos con bajos resultados, por educandos con otros resultados y las que va a realizar el docente y, e) Poca intencionalidad hacia la reflexión y el razonamiento de los educandos con bajos resultados, asimismo los diferentes niveles de ayuda que pueden contribuir al desarrollo de sus potencialidades.
En el intercambio con los docentes (9), se apreciaron limitaciones en el conocimiento de los diferentes elementos que deben potenciar desde la preparación de la asignatura para lograr que la clase y la enseñanza sean desarrolladoras. Asimismo, sobre las estrategias que pueden utilizar para potenciar el desarrollo del aprendizaje de estos educandos. En su mayoría, explicaron que brindan niveles de ayuda sobre la base de la comprensión en la ejecución de la tarea escolar. Reconocieron, además, que a nivel de grado no hay una línea que potencie el trabajo con determinadas estrategias, asimismo que este tema se trabaja muy poco a nivel municipal.

Los elementos antes expuestos evidencian insuficiencias en el sistema de trabajo metodológico y la superación (individual y colectiva) en función de perfeccionar la preparación y el desempeño profesional de los docentes, para desarrollar de forma efectiva la atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje.

Unidad de análisis: III. Proceso educativo desarrollador

Para constatar el estado de los indicadores que abarcó esta unidad de análisis, se observaron 20 actividades, a docentes de las dos instituciones educativas a las que se ha hecho referencia con anterioridad, con la intención de valorar su desempeño profesional en la atención a los educandos con bajos resultados en el aprendizaje, apreciándose limitaciones en:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El pobre empleo de métodos productivos que propicien la aplicación de conocimientos y habilidades en una situación nueva, los enseñe a pensar creativamente y a trabajar independiente, como parte de la enseñanza desarrolladora y del soporte didáctico- metodológico para la atención a estos educandos.

Poco uso y aplicación de estrategias de enseñanza que permiten la atención diferenciada, como las de motivación, las de ensayo y error, de elaboración, de organización, de control de la comprensión, entre otras más específicas. Así como de nuevas estrategias de aprendizaje y la "metacognición, como herramientas que puede favorecer el avance de estos educandos a niveles superiores de aprendizaje, asimismo la falta de correspondencia, entre la concepción de la clase desarrolladora y la manera tradicional con la que, por lo general, los docentes de los casos observados, imparten sus clases y orientan la tarea escolar.

Las limitaciones observadas en la preparación y el desempeño de los docentes dan lugar a lo que la autora llamó "exclusión involuntaria", pues estas no le permiten desarrollar con efectividad la atención a la diversidad y van dejando a un lado un grupo de educando que sin tener un diagnóstico del Centro de Orientación y Seguimiento (CDO) no avanzan en el aprendizaje, por lo que, sin una intención malsana, el docente no proyecta tareas escolares para darle tratamiento a sus necesidades, lo que conlleva a que los excluya de la atención individualizada que estos necesitan para avanzar en el proceso de aprendizaje.

4. Discusión

Los resultados del estudio de caso reafirman la importancia que desde el punto de vista teórico, destacan varios autores [6, 4, 3] sobre la necesidad "urgida" de contar con docentes bien preparados para conducir el proceso educativo en función de atender la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje.

La insuficiente gestión pedagógica (a nivel de aula, grado, ciclo e institución) en la conducción del trabajo docente-metodológico para la atención y apoyo al aprendizaje de los educandos con bajos resultados, las insuficiencias en la aplicación de estrategias psicopedagógicas para la enseñanza desarrolladora, de enfoques y métodos actuales de concebir el proceso educativo, unido a la limitada supervisión de las estructuras de dirección, son considerados, en este estudio, causas que limitan la atención a la diversidad y dan lugar a lo que los autores han llamado "Exclusión involuntaria".

Los factores identificados y descritos en el estudio, permitieron elaborar el Programa de capacitación para docentes, directivos y funcionarios municipales de educación en las estrategias psicopedagógicas para la atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje, como una de las respuestas a la problemática investigada.

Las acciones para el mejoramiento del desempeño profesional de los docentes para la atención a educandos con bajos resultados en el aprendizaje, a partir de los resultados del estudio, debe contener acciones que den tratamiento desde la superación, la investigación y el trabajo metodológico a los factores identificados.

5. Conclusiones

El estudio de caso permitió identificar y describir los factores más significativos que vienen incidiendo en la atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje, asociados a limitaciones presentes en la preparación y el desempeño profesional de docentes de las instituciones educativas de primaria (Casos A y B), del municipio de Calixto García, provincia de Holguín, los que deben ser atendidos desde las estructuras municipales y de centro a través de las diferentes vías del trabajo docente -metodológico y científico –metodológico.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los resultados del estudio aportan valiosos elementos que fundamentan la pertinencia y necesidad de los propósitos del proyecto de investigación "Perfeccionamiento de las estrategias de atención a la diversidad de educandos con bajos resultados en el aprendizaje" y confirman la necesidad de seguir buscando alternativas y soluciones que permitan avanzar en la calidad del aprendizaje de estos educandos, como expresión concreta de una educación inclusiva, que brinda oportunidades de aprendizaje permanente para todos.

6. Referencias

[1]. Hernández-Sampieri, R. y Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C. V. Ciudad de México.

[2]. Navarro, S., Valle, A., García, S y Caballero, J. (2021). La investigación en el III Perfeccionamiento del Sistema Nacional de Educación, Apuntes. https://www.mined.gob.cu/wp-content/uploads/2021/10/investigacion_3_perfeccionamiento.pdf

[3]. Pelegrín, Y & Alonso., S. (2019). Hacia la gestión educativa de la atención a la diversidad. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1992-82382019000100007

[4]. Quesada, Y & González, Y. (2020). La atención a la diversidad desde la escuela primaria. Perspectivas Revista de Ciencias Sociales. Año 5 No. 10 Julio- Diciembre 2020, pp. 316-330

[5]. Romero, J.F y Lavigne, C. (2004). Dificultades en el Aprendizaje: Unificación de Criterios. Junta de Andalucía, Consejería de Educación. España.

[6]. Salazar, M. (2023). Sistematización de las estrategias de atención a las Dificultades de aprendizaje. Resultado No.3 del Proyecto de investigación ¨Perfeccionamiento de las estrategias de atención a la diversidad de educandos con bajos resultados de aprendizaje¨. Calixto García. Holguín. (Documento digital).

[7]. Triana, M., Fernández, I. L. & Roque, B. (2023). Educación inclusiva. Visión actual y perspectivas en el sistema educativo cubano. Editorial Pueblo y Educación.

[8]. Ponce, O. (2005). El desempeño profesional del docente. Editorial San Marcos.

[9]. Blasco, J. (2006). Atención a la diversidad en el aula. Editorial EOS.

[10]. Guerra, S. (2018). Estrategias para la atención a la diversidad en educación primaria. Revista Iberoamericana de Educación, 76(1), 45-62.

[11]. Ovalle, M. (2018). La gestión de la diversidad en el contexto educativo actual. Editorial Trillas.

[12]. Remón, A. y Escobar, L. (2018). Atención a la diversidad y educación inclusiva. Pearson Educación.

[13]. Silva, P. (2007). Diversidad y aprendizaje en el aula. Editorial Narcea.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning , Vol. 41, 2025
University of New Mexico

“Gestión de riesgos en emprendimientos minoristas agro comerciales en Manabí mediante AHP–TOPSIS”

“Risk management in agro-commercial retail ventures in Manabí through AHP-TOPSIS”

Rosa Cristina Giler Zambrano 1

[1] Bolivarian University of Ecuador, Duran, Guayas. Ecuador. rcgilerz@ube.edu.ec
orcid.org/0009-0008-2529-8540

Resumen: En el Ecuador, los emprendimientos han experimentado un notable crecimiento en los últimos años, particularmente después de la pandemia del Covid 19, momento en el cual la sociedad se vio obligada a buscar alternativas económicas para enfrentar la crisis. Dentro de este contexto, el sector minorista de venta de balanceados en Manabí constituye un espacio clave, el cual presenta debilidades estructurales relacionada con la volatilidad de los precios del maíz y otras materias primas, la deficiencia en el manejo del inventario y los cambios derivados de las últimas reformas tributarias para el régimen Rimpe. Este estudio aborda la gestión de riesgos en un emprendimiento local de venta de balanceados y materias primas utilizando una metodología multicriterio AHP–TOPSIS; cuyo objetivo es priorizar estrategias que fortalezcan la sostenibilidad empresarial. La investigación considera factores vinculados a la administración del negocio, la cultura emprendedora y el marco legal ecuatoriano para las microempresas. Se evaluaron cuatro alternativas bajo cinco criterios clave: costos, efectividad, facilidad de implementación, satisfacción del cliente y sostenibilidad.
Los resultados obtenidos mediante el método TOPSIS, indican que la digitalización de inventarios es la alternativa más acertada con un puntaje de 1.0, por encima de la estrategia de contratos anticipados con proveedores (0.52). Estos hallazgos confirman que el uso de metodologías multicriterio mejora la resiliencia empresarial y aporta insumos metodológicos transferibles a la docencia universitaria en áreas como gestión, derecho económico y emprendimiento, fortaleciendo la formación profesional mediante herramientas de apoyo en la toma de decisiones.
Palabras clave: Gestión de riesgos, AHP, TOPSIS, emprendimiento, administración, derecho económico, resiliencia empresarial.

Abstract: In Ecuador, entrepreneurship has experienced significant growth in recent years, particularly after the COVID-19 pandemic, when society was forced to seek economic alternatives to confront the crisis. Within this context, the feed retail sector in Manabí constitutes a key space, presenting structural weaknesses related to the volatility of corn and other raw material prices, poor inventory management, and changes resulting from the latest tax reforms for the Rimpe regime. This study addresses risk management in a local feed and raw material retail business using a multi-criteria AHP-TOPSIS methodology, the objective of which is to prioritize strategies that strengthen business sustainability. The research considers factors related to business management, entrepreneurial culture, and the Ecuadorian legal framework for microenterprises. Four alternatives were evaluated under five key criteria: cost, effectiveness, ease of implementation, customer satisfaction, and sustainability. The results obtained using the TOPSIS method indicate that inventory digitization is the most successful alternative, with a score of 1.0, above the strategy of advance contracting with suppliers (0.52). These findings confirm that the use of multicriteria methodologies improves business resilience and provides transferable methodological input to university teaching in areas such as management, economic law, and entrepreneurship, strengthening professional training through decision-support tools.
Keywords: Risk management, AHP, TOPSIS, entrepreneurship, administration, economic law, business resilience.

1. Introducción

En los últimos años el emprendimiento en el Ecuador se ha consolidado como una alternativa relevante de muchos ecuatorianos para hacer frente a la falta de empleo formal y a la necesidad de crear nuevas fuentes de ingreso; datos [1] confirman que más del 30% de la población económicamente activa (PEA) ha participado en algún tipo de actividad emprendedora, lo cual evidencia la importancia de este fenómeno en la dinámica socioeconó-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

mica del país. Sin embargo, aunque existe un elevado número de emprendimientos creados, la sostenibilidad de estos en el tiempo constituye un problema estructural, debido a que entre el 60 y el 80% de los emprendimientos cierran antes de cumplir los tres años de funcionamiento [2], esta alta tasa de mortalidad empresarial refleja que en muchos casos los emprendedores no realizan un correcto análisis de gestión de riesgos lo cual desencadena fracasos en los negocios.

En el Ecuador, la provincia de Manabí representa un escenario muy importante que permite evidencia la problemática que enfrentan los emprendimientos. Históricamente esta provincia está vinculada a la agricultura, ganadería y el comercio, transformándola como una provincia de alto impacto en la para la producción y distribución de balanceados y e insumos pecuarios. Estos productos, son esenciales para la alimentación animal y dependen en gran medida del maíz amarillo duro como materia prima principal. Este grano constituye uno de los insumos agrícolas más demandados en el país; según datos reportados entre abril a mayo del 2024 [3], se validaron más de 137,000 toneladas métricas de maíz en grano duro, lo cual evidencia el rol central que cumple en la cadena productiva agropecuaria.

No obstante, la dependencia de los emprendimientos a ciertos productos de materia prima genera un gran número de vulnerabilidades. Ejemplo de ello es la volatilidad en el precio del maíz y su disponibilidad en el mercado, esto constituye un factor crítico que afecta directamente la estabilidad de los pequeños negocios que lo comercializan. Una variación de precios puede reducir los márgenes de utilidad de los emprendimientos minoristas comprometiendo su liquidez y dificultando su permanencia en el mercado. A este problema se suman otros riesgos estructurales como la deficiencia en los sistemas de inventario debido a su naturaleza perecedera, la demanda fluctuante, la limitada capacidad de almacenamiento y la inadecuada planificación financiera.

Adicionalmente, a los problemas antes mencionado se suman los cambios normativos impuestos por el Servicio de Rentas Internas (SRI), donde recientemente se implementó el Régimen Simplificado para Emprendedores y Negocios Populares (RIMPE), el cual constituye el cumplimento de nuevas obligaciones tributarias y administrativas para los pequeños negocios. Entre estas destacan la facturación electrónica, las declaraciones anuales del impuesto a la renta, las declaraciones mensuales o semestrales según el caso y la aplicación de retenciones en compras y servicios [4]. Para microempresas con escasa formación contable y financiera, estas regulaciones representan un desafío adicional que incrementan su nivel de riesgo operativo y legal, debido a que el incumplimiento de estas normativas conlleva a multas por incumplimientos tributarios que en casos graves finalizan con el cierre definitivo del emprendimiento.

Frente a este contexto, el análisis de riesgo se presenta como una herramienta fundamental en todo emprendimiento que permite garantizar la sostenibilidad de este. Para ello es importante poder identificar cuáles son los factores externos e internos que influyen en el desempeño empresarial para poder plantear estrategias que permitan anticipar amenazas, aprovechando así las oportunidades y tomar decisiones estratégicas más informadas; es asi como [5] el análisis de riesgos no solo mitiga vulnerabilidades, sino que también constituye un insumo fundamental para la planificación y la innovación en los negocios.

Particularmente en el sector agro-comercial minorista de Manabí, el análisis de riesgo resulta indispensable; debido a que los emprendimientos derivados de este sector no solo enfrentan las condiciones típicas de cualquier emprendimiento como es, la competencia, limitaciones financieras, inestabilidad de la demanda, sino que también deben de lidiar con factores propios del ámbito agropecuario como lo es la variabilidad climática, la dependencias de insumos importados, los problemas de la logística rural, las deficiencias en la infraestructura de almacenamiento, entre otros. Todo ello hace que la gestión de riesgos deba ser abordada desde un enfoque integral, combinando dimensiones productivas, financieras, logísticas y regulatorias que permitan generar estrategias especificas entorno a la situación real del emprendimiento.

Este artículo, propone la aplicación de metodologías multicriterio, específicamente el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) en combinación con la Técnica de Orden de Preferencias por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS), como herramientas para priorizar estrategias de gestión de riesgos en un emprendimiento minorista agrocomercial ubicado en la provincia de Manabí. Estas metodologías permiten transformar juicios cualitativos en un análisis cuantitativo, integrando la experiencia de los actores locales con criterios objetivos de la evaluación.

El objetivo central de esta investigación es determinar cuál de las estrategias evaluadas resulta más adecuada para fortalecer la sostenibilidad de los negocios minoristas de balanceados en Manabí, considerando cinco criterios clave: costos, efectividad, facilidad de implementación, satisfacción del cliente y sostenibilidad. De esta manera, el estudio no solo aporta el fortalecimiento de la resiliencia empresarial en contextos de alta incertidumbre, sino

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

que también ofrece insumes metodológicos aplicables en la docencia universitaria en áreas de administración, derecho económico y emprendimiento.

2. Marco Teórico

2.1. Concepto de riesgo y gestión del riesgo

El riesgo según lo establecido por la norma ISO 31000 [6] es un efecto de la incertidumbre sobre los objetivos; esto se puede entender como el temor de que se generen eventos de gran magnitud que genere consecuencias devastadoras. No obstante, los riesgos no pueden limitarse únicamente a las amenazas, sino que pueden representar oportunidades para mejorar para muchas empresas permitiéndole mejorar sus procesos o redefinir estrategias empresariales. Es por ello que la gestión de riesgos constituye un conjunto de actividades coordinadas que permiten dirigir y controlar una organización respecto a los riesgos que esta puede poseer [6], lo cual implica poder identificar, analizar, evaluar y tratar los riesgos de manera sistemática, con el fin de minimizar impactos negativos y poder maximizar beneficios potenciales que se puedan presentar.

Aunque los riesgos suelen percibirse como elementos que amenazan los resultados empresariales [9] también pueden convertirse en detonantes para la innovación y el planteamiento de cambios estratégicos; la pandemia del covid-19 constituye un ejemplo claro de esto, ya que amplificó los riesgos preexistentes que tenían muchas empresas y evidenció otros nuevos riesgos mayormente relacionados con la logística y las normativas tributarias [10].

2.2. Riesgos en el sector agro comercial

El sector agro-comercial ecuatoriano enfrenta riesgos particulares debido a factores climáticos y biológicos que influyen directamente en la producción y comercialización de productos agrícolas; las sequías, inundaciones, plagas y enfermedades afectan de manera directa la disponibilidad de insumos que son productos clave para la alimentación animal como lo es el maíz y la soya. A este problema se suman los riesgos financieros asociados a la fluctuación de los precios internacionales, así como el acceso limitado a créditos formales con tasas de intereses bajas que permitan estimular la producción [7].

En el caso específico de los emprendimientos minoristas de venta de balanceados en Manabí, se enfrentan a riesgos como son, los riesgos de mercado como la volatilidad de los precios del maíz y la soya; riesgos logísticos como la deficiencia en infraestructura de almacenamiento y transporte rural de las materias primas; riesgos regulatorios como las nuevas exigencias tributarias y administrativas exigidas por el SRI así como los GAD municipal y riesgos sociales como los conflictos relacionados con las tenencias de tierras o relaciones comerciales en comunidades rurales.

Sin embargo, estos riesgos no operan de forma aislada, sino que suelen combinarse con otros más y generar daños de mayor impacto ejemplo de ello es evento climático que produzca una reducción en la producción del maíz, el efecto de este fenómeno genera que se eleven los precios internacionales del maíz, obligando a incurrir en importaciones costosas cuando el producto se ha desabastecido, afectando así la sostenibilidad financiera de los minoristas y la económica del comprador.

La actividad agro-comercial en provincias como Manabí, donde la producción y comercialización de insumos pecuarios es un factor clave en su economía, evidencia que existen aún más vulnerabilidades que estas, [3] entre abril a mayo del 2024 se registró una absorción de más de 137,000 toneladas de maíz amarillo, estas cifras revelan que existe una alta dependencia de este producto como materia prima para la elaboración de alimentos balanceados en donde cualquier variación de precios o demanda del producto es significativa y afecta directamente a la rentabilidad de los emprendimientos así como a la producción de animales que dependen de estos granos.

2.3. Gestión de riesgos micro y pequeñas empresas

En Latinoamérica más del 80% de los emprendimientos tienen un tiempo de vida menos a los 5 años esto como consecuencia a deficiencias en la administración, una inestabilidad del entorno, así como a la falta de mecanismos de resistencia. Las micro y pequeñas empresas ecuatorianas constituyen más el 90% de la unidad productiva del país, pero estas presentan altos niveles de vulnerabilidad. Frente a estas limitaciones, estudios recientes destacan que la residencia empresarial está asociada a la innovación que tienen las empresas en torno a la digitalización y la capacidad de las mismas para poder adaptarse a nuevos entornos [8] como lo puede ser la falta de recursos financieros y tecnológicos, lo que limitan la implementación de estas medidas en muchos casos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2.4. Metodologías multicriterio en gestión de riesgos.

Los modelos de gestión de riesgos multicriterio ofrecen múltiples ventajas que son importantes frente a los enfoques tradicionales que tienen entorno al manejo de los emprendimientos, especialmente en contextos de alta incertidumbre y cuando se encuentran con información limitada. Entre los modelos de gestión de riesgos multicriterio destacan el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y Técnica de Orden de Preferencias por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS).

El AHP [11] permite descomponer los problemas complejos que tiene la empresa en estructuras jerárquicas más pequeñas, asignando pesos relativos a los criterios evaluados. TOPSIS por otra parte facilita la clasificación de las alternativas según su cercanía a una solución ideal ya sea esta positiva o negativa. Mediante la combinación de ambos métodos es posible transformar juicios cualitativos en resultados cuantitativos, priorizando riesgos físicos y seleccionando estrategias costo-eficientes [12] [13].

En la literatura internacional se puede evidenciar la efectividad de la combinación de estos dos modelos en la gestión de riesgos, desde la priorización de proyectos agrícolas [14], la evolución de prácticas de sensibilidad [15] hasta la gestión de riesgos en cadenas de suministros agrícolas [16] entre otras; es por ello que este estudio, permite abordar de manera integral las vulnerabilidades específicas que tienen los emprendimientos minoristas de venta de productos balanceados y de materias primas en la provincia de Manabí.

3. Metodología

3.1. Diseño de investigación

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo y descriptivo sustentado en la aplicación de herramientas de análisis multicriterio. Para el desarrollo del mismo se basó un estudio de caso aplicado en un emprendimiento minorista agro-comercial en la provincia de Manabí, cuyo objetivo fue identificar y priorizar las estrategias de gestión de riesgo que fortalezcan la sostenibilidad empresarial del negocio.

Se seleccionó como marco metodológico la combinación de dos técnicas multicriterio:

1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP), empleado para determinar los pesos relativos de los criterios de evaluación.

2. Técnica de Orden de Preferencias por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS), utilizada para jerarquizar las alternativas estratégicas en función a su proximidad en la mejor solución posible.

La elección de este diseño metodológico responde a dos razones principales:

1. Permite integrar información cualitativa como juicio de expertos, con información cuantitativa ponderación y ranking de alternativas.

2. Ofrece un resultado objetivo y replicable en escenarios caracterizados por información limitada propios en los microemprendimientos ecuatorianos.

3.2. Fases metodológicas

El procedimiento metodológico seguido en esa investigación se estableció en cinco fases:

1. **Definición de problema y las alternativas estratégicas**: se logró identifica los principales riesgos que enfrentan los emprendimientos minoristas agro-comerciales en Manabí, considerando fuentes documentales, normativas vigentes y entrevistas exploratorias con emprendedores, con esta información se pudo definir cuatro alternativas estratégicas de gestión de riesgos.

2. **Selección de criterios de evaluación**: mediante una revisión bibliográfica y la aplicación de una consulta expertos se pudo establecer cinco criterios fundamentales los cuales fueron: costo, efectividad, facilidad de implementación, satisfacción del cliente y sostenibilidad. Estos criterios permitieron evidenciar las limitaciones financieras por la que atraviesan los emprendimientos, así como la necesidad de garantizar su viabilidad a largo plazo.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3. **Obtención de pesos relativos mediante a AHP:** se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico para asignar los pesos a los criterios; la aplicación de este método consistió en realizar comparaciones por pares entre los criterios con base en escalas de importancia relativa, para después poder calcular los valores propios el índice de consistencia (IC) y la razón de consistencia (CR) para poder verificar la coherencia del juicio expertos.

4. **Evaluación de las alternativas con TOPSIS:** una vez se han obtenido los pesos de los criterios, se procedió a la construcción de la matriz de decisión con las valoraciones de las cuatro alternativas frente a los cinco criterios. Posteriormente se aplicó la metodología TOPSIS [17], la cual permite clasificar las alternativas en función de su cercanía con la solución ideal positiva o negativa, para poder jerarquizarlas de acuerdo con su desempeño relativo.

5. **Evaluación de las alternativas y priorización de la mejor estrategia:** una vez se obtienen los resultados variados de la aplicación de la metodología TOPSIS se procede a la interpretación de los mismos, con el contexto específico del emprendimiento estudiado para poder contrarrestarla con información de la literatura académica para poder discutir su validez y relevancia en la práctica.

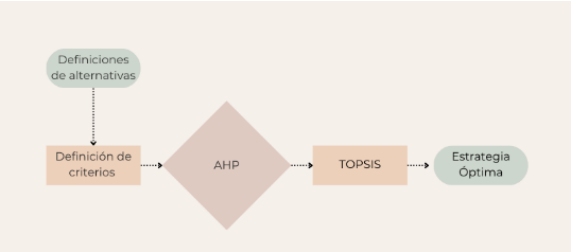


Ilustración 1. Diagrama de flujo metodológico

3.3. Herramientas metodológicas

3.3.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es un método de decisión multicriterio [11] en el cual se permite descomponer un problema complejo en una estructura más simple para poder asignar los pesos relativos y los objetivos a evaluar en cada criterio. Esta herramienta es muy utilizada en la toma de decisiones estratégicas debido a su capacidad para manejar la subjetividad y la complejidad de las alternativas consistentes. En este estudio, el objetivo fue priorizar estrategias de gestión de riesgos, para ello se establecieron cinco previamente seleccionados y las alternativas correspondieron a las estrategias identificadas anteriormente.

Un aspecto metodológico importante en la aplicación del (AHP) es la verificación de la consistencia de los juicios emitido por los expertos al realizar las comparaciones por los pares; es por ello por lo que para poder verificarlas se aplican los siguientes pasos:

1. Cálculo del valor propio máximo λmax de la matriz de comparación.
2. Estimación del Índice de Consistencia (IC).
3. Obtención de la razón de consistencia (CR) al comparar el IC con el índice aleatorio (IA).

La consistencia permite cuantifica hasta qué punto las preferencias declaradas por los expertos son coherentes entre sí, en un escenario donde un $CR \leq 0.10$ este es considerado aceptable, mientras que valores superiores a este indican que existe una inconsistencia por lo cual debe de realizarse una reevaluación de las comparaciones problemáticas para analizarlas o mediante sesiones de retroalimentación con los expertos [11].

3.3.2. Técnica de Orden de Preferencias por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS)

La Técnica de Orden de Preferencias por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS) permite evaluar las alternativas en cuanto a más próximo se encuentre con la solución ideal, la alternativa óptima debe encontrarse a la mínima distancia posible de la solución ideal positiva el mejor desempeño en todos los criterios y, simultáneamente, a la máxima distancia de la solución ideal negativa el peor desempeño en todos los criterios. De esta forma se permite clasificar las opciones según su desempeño relativo lo cual facilita la identificación de la mejor alternativa entre varios criterios conflictivos [17]
La aplicación de estas herramientas consiste en:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. Construcción de la matriz de decisión.
2. Normalización de los valores.
3. Ponderación de la matriz mediante los pesos obtenidos en AHP.
4. Identificación de las soluciones ideales positiva y negativa.
5. Cálculo de las distancias de cada alternativa a dichas soluciones.
6. Determinación del coeficiente de cercanía para cada alternativa.

La alternativa con el coeficiente más alto es considerada la más adecuada.

3.4. Alternativas evaluadas

Se definieron cuatro alternativas de gestión de riesgos seleccionadas a partir de las principales debilidades identificadas en el sector agro-comercial.

A.1. Digitalización de inventarios; optimizando el control de existencias y reduciendo las perdidas por manejo inadecuado del inventario.
A.2. Contratos anticipados con proveedores, permite asegurar los precios y suministros de manera estable de productos como el maíz y la soya.
A.3. Capacidad en almacenamiento y manejo de inventarios, mejora la eficiencia operativa y reduce las perdidas.
A.4. Diversificación de proveedores, minimiza los riesgos de dependencia a un solo proveedor.

3.5. Criterios de evaluación

Los cinco criterios empleados para evaluar las alternativas fueron:
C1. Costos: impacto económico al implementar la alternativa
C2. Efectividad: capacidad de la alternativa para reducir riesgos y mejorar la supervivencia del negocio.
C3. Facilidad de implementación: recursos, tiempo y complejidad necesarios para la puesta en marcha.
C4. Satisfacción del cliente: grado en que la estrategia contribuye a mejorar la experiencia y fidelización de los clientes.
C5. Sostenibilidad: impacto a largo plazo sobre la viabilidad y resiliencia del emprendimiento.
La selección de estos criterios se basó en la literatura académica y en la realidad económica de los emprendimientos ecuatorianos, las cuales enfrentan limitaciones en liquidez y un entorno regulatorio inestable.

4. Resultados

4.1. Pesos de los criterios obtenidos con AHP

La aplicación del Proceso Analítico Jerárquico permitió determinar los pesos relativos de los cinco criterios de evaluación. Los resultados evidenciaron que la efectividad (0.32) y la sostenibilidad (0.27) fueron considerados factores más relevantes, seguido por la satisfacción del cliente con (0.21), mientras que el costo (0.12) y la facilidad de interpretación (0.08) recibieron menor ponderación. Eso refleja que, para los emprendimientos del sector agro-comercial, el impacto estratégico a largo plazo tiene una mayor importancia que la inversión inicial que se le pueda aplicar al negocio, ya que se pueden generar otras estrategias para capitalizarse mientras se garantice la sostenibilidad en el tiempo.

4.2. Evaluación de alternativas en la matriz de decisión

La matriz de decisión (Ilustración 3) muestra el desempeño de las cuatro alternativas frente a los cinco criterios; en ella se puede observar que la digitalización de inventarios (A1) obtuvo las puntuaciones más altas en efectividad, sostenibilidad y satisfacción al cliente, lo que evidencia su potencial para reducir pérdidas y mejorar la trazabilidad en el negocio. A su vez, la alternativa contratos anticipados con proveedores (A2) destacó por su capacidad en reducir los riesgos por el abastecimiento y volatilidad de precios en las materias primas, mientras que la capacidad en almacenamiento (A3) mostró un aporte intermedio al mejorar la eficiencia operativa del negocio. Por su parte, la diversificación de proveedores (A4) obtuvo las puntuaciones más bajas debido a la complejidad de implementación de los costos asociados.

4.3. Resultados TOPSIS y ranking final

La interacción de los pesos obtenidos con AHP y con la metodología TOPSIS, permitió priorizar las estrategias de manera objetiva (Ilustración 4). La digitalización de los inventarios (A1) alcanzó un puntaje de 1.000, situándose como la mejor alternativa; en segundo lugar, se ubicaron los contratos anticipados con proveedores (A2) con un valor de 0.500, seguidos por la capacitación en almacenamiento (A3) con un 0.416 y finalmente, la diversificación de proveedores (A4) con 0.136. Estos resultados indican que, aunque la alternativa (A1) implica un costo inicial mayor, su contribución al fortalecimiento de la resiliencia y sostenibilidad del emprendimiento lo

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

convierte en la alternativa más adecuada.

4.4. Análisis de sensibilidad

Para validar la robustez del modelo, se simulo un escenario alternativo en el que el criterio "costo" incrementaba su peso en un 20%. Bajo esta condición, la digitalización de inventarios continúa ocupando la primera posición, aunque la diferencia con contratos anticipados (A2) se redujo. Esto confirma que los resultados son estables y que la estrategia digital mantiene su superioridad incluso en escenarios con restricciones económicas más estrictas

4.5. Matriz de decisión y valoración de alternativas

Se evaluaron cuatro alternativas (A1–A4) frente a cinco criterios: C1 Costo, C2 Efectividad, C3 Facilidad de implementación, C4 Satisfacción del cliente y C5 Sostenibilidad.

Alternativa	C1 Costo	C2 Efectividad	C3 Facilidad	C4 Satisfacción	C5 Sostenibilidad
Digitalización inventario (A1)	2	5	4	5	5
Contratos anticipados (A2)	3	4	3	4	4
Capacitación almacenamiento (A3)	4	3	4	3	3
Diversificación proveedores (A4)	3	3	2	3	3

Ilustración 2. Matriz de decisión

Observación sobre la matriz: A1 (digitalización) obtiene puntuaciones máximas en Efectividad, Satisfacción y Sostenibilidad; pero presenta mayor costo relativo (valor 2 en la matriz de decisión significa mayor costo según la escala definida en el estudio). Estos patrones son la base para la clasificación por TOPSIS.

4.6. Resultados TOPSIS

Alternativa	Puntaje TOPSIS	Ranking
Digitalización de inventario (A1)	1.000	1
Contratos anticipados (A2)	0.500	2
Capacitación en almacenamiento (A3)	0.416	3
Diversificación de proveedores (A4)	0.136	4

Ilustración 3. Puntajes TOPSIS y ranking final de estrategias

La digitalización de inventarios (A1) aparece como la alternativa óptima en este análisis: obtiene la proximidad máxima al ideal positivo (1.00) porque, a pesar de implicar un mayor costo inicial relativo, presenta desempeño sobresaliente en efectividad, satisfacción del cliente y sostenibilidad, así como criterios centrales para la gestión de riesgos operativos en emprendimientos minoristas.

5. Discusión

Los resultados obtenidos permiten confirmar que la digitalización de inventarios constituye la estrategia más adecuada para enfrentar los riesgos en los emprendimientos agro-comerciales en Manabí. Este hallazgo coincide con otras investigaciones donde señalan que la transformación digital es un factor clave para la resiliencia empresarial, debido a que los emprendimientos pueden mejorar su capacidad de adaptarse a nuevos entornos y de esta manera mejorar su competitividad aun cuando los entornos en donde se encuentren son de alta incertidumbre y limitaciones de recursos [18] [13]. Es por ello que la digitalización juega un papel clave es este contexto, ya que permite fortalecer la trazabilidad y el control operativo en los emprendimientos, generando que estos puedan reducir las pérdidas ocasionadas por errores administrativos, optimizar el capital de trabajo y ayudan a facilitar la toma de decisiones en escenarios volátiles.

En el caso ecuatoriano, la obligatoriedad de la facturación electrónica y la implementación de plataformas digitales de gestión han demostrado ser herramientas útiles para los emprendimientos, y han generado que los dueños de emprendimientos se ven obligado a adaptarse a nuevos entornos que les permite ser más competitivos frente a

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

la creciente formalización en el sector comercial. [4] [8].

Por otra parte, los contratos anticipados con proveedores fueron identificados como una estrategia prioritaria para mitigar la volatilidad de precios y el riesgo de desabastecimientos de productos. Este resultado concuerda con estudios sobre cadenas agroalimentarias en Latinoamérica, donde se hace énfasis en la construcción de relaciones de confianza con los proveedores de los productos como un elemento importante en el emprendimiento, para mejorar la resiliencia y la sostenibilidad económica de los productores [16] [19]. En Manabí, al ser una zona de alta producción de maíz, así como de otras materias primas, dependen de los cambios climáticos que presente el sector, así mismo como de las importaciones, por lo cual es importante asegurar el suministro de abastecimiento de los productos mediante contratos anticipados con los proveedores que garanticen que no estarán desabastecidos en la época de baja cosecha y evitar pérdidas económicas futuras.

En contraste, la capacitación y diversificación de productos obtuvieron una valoración más bajo en la aplicación del modelo AHP–TOPSIS, aun así la literatura destaca que el uso de ambas herramientas constituyen un pilar fundamental en la sostenibilidad empresarial a largo plazo, ya que permite fortalecer el capital humano y así reducir la dependencia de un solo rubro, esto se puede observar en el contexto ecuatoriano actual la combinación de digitalización en los emprendimientos con aquellos procesos de capacitación, han logrado tener un mayor grado de permanencia en el mercado frente a aquellos emprendimientos que únicamente utilizan estrategias financieras u optan por reducir los precios para garantizar su sostenibilidad en el tiempo sin importar que estén sacrificando las utilidades del negocio.

Es por ello, que surge la necesidad de crear políticas públicas, así como programas de apoyo que promuevan el acceso a herramientas digitales a los emprendimientos, esto como mecanismos que les ayude a manejar su negocio de una manera más adecuada donde se plateen posibles riesgos y mejoras, así mismo se pueda acceder a créditos preferentes con tasa de interés bajas que les permitan generar una mayor rentabilidad. Adicionalmente, se podrían generar incentivos fiscales, capacitaciones técnicas y alianzas estratégicas entre entidades del sector público y privado, las cuales estén orientados a reducir la brecha tecnológica en zonas rurales. Desde el punto de vista académico, este estudio confirma la utilidad de aplicar modelos multicriterio como AHP–TOPSIS en emprendimientos ecuatorianos, dado que permite integrar criterios económicos, administrativos, sociales y de sostenibilidad en la toma de decisiones empresariales.

Finalmente, es importante reconocer que este estudio se limita a un solo caso y depende del juicio de expertos, por lo cual es importante que se realicen futuras investigaciones donde se deberá de ampliar la muestra de emprendimientos y realizar validaciones empíricas de las estrategias seleccionadas.

5. Conclusiones

El presente estudio aplicó las metodologías multicriterio AHP Y TOPSIS para priorizar estrategias de gestión de riesgo en un emprendimiento minorista agro-comercial de la provincia de Manabí; en donde se pudo evidencia que la digitalización de inventarios constituye la estrategia óptima de gestión de riesgos, la cual obtuvo un mayor puntaje en el modelo multicriterio debido a su impacto positivo en la reducción de pérdidas en el negocio, la mejora en la trazabilidad y el fortalecimiento de la sostenibilidad empresarial. Aunque su implementación requiere una inversión inicial significativa, los beneficios a largo plazo superan ampliamente los costos.

Los criterios más valorados fueron efectividad y sostenibilidad, lo que demuestra que los microemprendimientos priorizan las estrategias que aseguren la permanencia de sus negocios en el tiempo por encima de las que únicamente implican menores costos y facilitar operativa. Esto evidencia una visión empresarial orientada a la resiliencia. Los contratos anticipados con proveedores por otra parte se posicionan como una estrategia complementaria, ya que contribuyen a reducir la volatilidad de los precios y el riesgo de desabastecimiento. Sin embargo, dependen de la existencia de las relaciones comerciales estables y de marcos estructurales claros, lo que representa un desafío para muchos micro emprendedores en contexto rurales.

La capacidad en almacenamiento y la diversificación en proveedores obtuvieron una menor relevancia relativa si bien aportan el fortalecimiento operativo los emprendimientos recibe reciben que su impacto en la sostenibilidad general de negocio es limitado en comparación con la digitalización o los contratos de suministros

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

7. Referencias

[1] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC]. (2024). Registro Estadístico de Empresas 2024. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Registro_Empresas_Establecimientos/2023/Semestre_I/Boletin_REEM_2023.pdf

[2] Forbes Ecuador. (2024). Del sueño al colapso: Por que 8 de cada 10 emprendimientos fracasan en Ecuador. https://www.forbes.com.ec/columnistas/del-sueno-colapso-8-cada-10-emprendimientos-fracasan-ecuador-n68244

[3] Subsecretaria de Comercialización Agropecuaria. (2024). Informe quincenal de cosecha nacional de maíz amarillo duro. Ministerio de Agricultura y Ganadería. https://www.agricultura.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/06/Informe-quincenal-Unidad-de-Registro-de-Transacciones-y-Facturacion-31-mayo-2024-Nro-Informe-DGCA-SCA-0041-signed-signed.pdf

[4] Servicios de Rentas Internas [SRI]. (2024). Régimen Simplificado para Emprendedores y Negocios Populares (RIMPE). https://share.google/9P66YAcZhlu1q3MP4

[5] Alvarado, J. y Muñoz, M. (2020). Metodología multicriterio implicadas en la gestión empresarial. Revista de Ciencias Sociales.

[6] ISO. (2019). ISO 31000:2019 Risk management. Principles and guidelines. Internattional Organization for Standardization. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en

[7] Gonzales, P. y Herrera, L. (2020). Gestión de riesgos y competitividad en PYMES agrícolas. Revista Latinoamericana de Administración, 25(4), 201-2020 https://doi.org/10.1108/ARLA-01-2020-0023

[8] Duque, G., Córdova, F. y Siguencia A. (2024). Resiliencia empresarial en la MYPYME evidencia de Ecuador. Cuadernos de contabilidad. https://doi.org/10.11144/Javeriana.cc25.remi

[9] Martínez, J. y Pastor, C. (2018). Gestión de riesgos empresarial: perspectivas y oportunidades. Revista iberoamericana de Administración, 47(1), 55-68

[10] Nunes, R., Olivera, J. y Santos, P. (2022). The impact of COVID-19 on the global risk management practices. Journal of Business Research, 142,1-12. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.12.015

[11] Saaty, T. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill. https://doi.org/10.1007/978-3-642-50244-6

[12] Beltrán, J. (2019). Aplicación del AHP y TOPSIS en la priorización de proyectos agrícolas. Revista de Investigación y Desarrollo, 12(3), 65–74.

[13] Gupta, H., Kusi-Sarpong, S., & Rezaei, J. (2022). Assessing supply chain risk management strategies in green supply chains using fuzzy AHP–TOPSIS. International Journal of Production Economics, 243, 108322. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108322

[14] Zandi, M., Aghdami, A., & Gholami, M. (2020). Agricultural risk management using integrated FMEA, AHP, and TOPSIS. Agriculture, 10(11), 504. https://doi.org/10.3390/agriculture10110504

[15] Das, A., Kumar, A., & Singh, R. (2024). Evaluating conservation agriculture practices using AHP–TOPSIS in rice–wheat systems of India. Sustainability, 16(2), 1123. https://doi.org/10.3390/su16021123

[16] Cabrera, D., y Torres, H. (2021). Modelos de decisión para la gestión de riesgos en cadenas de suministro. Revista Ingeniería y Sociedad, 33(2), 87–104.

[17] Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9

[18] Li, L., Su, F., Zhang, W., & Mao, J. Y. (2018). Digital transformation by SME entrepreneurs: A capability perspective. Information Systems Journal, 28(6), 1129–1157. https://doi.org/10.1111/isj.12153

[19] Daryanto, Y., Wee, H. M., & Astanti, R. D. (2020). Improving supply chain resilience through supplier relationship management. International Journal of Supply Chain Management, 9(2), 12–21.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML
Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. **40**, 2025
University of New Mexico

Fuzzy Tolerance Hypergraphs and Fuzzy Tolerance Superhypergraphs

Takaaki Fujita[1] * *and Arif Mehmood* [2]

[1] Independent Researcher, Tokyo, Japan. Takaaki.fujita060@gmail.com

[2] Department of Mathematics, Institute of Numerical Sciences, Gomal University, Dera Ismail Khan 29050, KPK, Pakistan (mehdaniyal@gmail.com)

*Correspondence: Takaaki.fujita060@gmail.com

Abstract. Hypergraphs generalize this framework by allowing *hyperedges* that join more than two vertices [1,2]. Superhypergraphs further enrich the model through iterated powerset constructions, capturing hierarchical and self-referential structures among hyperedges [3]. In this paper, we introduce new classes of graphs, namely the Tolerance SuperHyperGraph, Tolerance HyperGraph, Fuzzy Tolerance Hypergraph, and Fuzzy Tolerance SuperHypergraph, and examine their properties.

Keywords: SuperHyperGraph, HyperGraph, Fuzzy Graph, Fuzzy Hypergraph, Fuzzy SuperHyperGraph, Tolerance SuperHyperGraph, Tolerance HyperGraph

1. **Preliminaries**

We collect the basic terminology and notation used in what follows. Unless explicitly stated otherwise, all graphs considered are finite, undirected, and loopless; multiple edges are allowed only when this is specified.

1.1. *SuperHyperGraphs*

Graph theory offers a rigorous framework for modeling relationships and connectivity via vertices and edges [4,5]. A classical hypergraph generalizes an ordinary graph by permitting an edge to connect an arbitrary (finite) number of vertices, which makes it suitable for representing multiway relationships [1,6,7]. A *SuperHyperGraph* carries this idea further by forming vertices and edges from iterated powersets of a base set; this viewpoint has appeared in several recent contexts [8–10]. Reported applications include, among others, molecular structure modeling, complex network analysis, and signal processing [11–14]. Throughout, the *level* n is a fixed nonnegative integer.

Definition 1.1 (Base set)**.** A *base (ground) set* is a fixed finite set S from which higher-level objects are generated:

$$S \;=\; \{\, x \mid x \text{ belongs to the chosen domain} \,\}.$$

All structures introduced below ultimately draw their elements from S.

Definition 1.2 (Powerset)**.** [15,16] Given a set X, its powerset is

$$\mathcal{P}(X) \;=\; \{\, A \subseteq X \,\}.$$

We also use the *nonempty* powerset $\mathcal{P}^*(X) := \mathcal{P}(X) \setminus \{\varnothing\}$.

Definition 1.3 (Iterated powerset)**.** [17–19] For $k \in \mathbb{N}_0$ define

$$\mathcal{P}^{\,0}(X) := X, \qquad \mathcal{P}^{\,k+1}(X) := \mathcal{P}\big(\mathcal{P}^{\,k}(X)\big).$$

For the nonempty version set

$$\big(\mathcal{P}^*\big)^0(X) := X, \qquad \big(\mathcal{P}^*\big)^{k+1}(X) := \mathcal{P}^*\big((\mathcal{P}^*)^k(X)\big).$$

Example 1.4 (Music library: songs → playlists → playlist folders)**.** Let the base set of songs be

$$X = \{\mathtt{s}_1, \mathtt{s}_2, \mathtt{s}_3\}.$$

Then $\mathcal{P}(X)$ contains all playlists; e.g.,

$$P_1 = \{\mathtt{s}_1, \mathtt{s}_2\}, \qquad P_2 = \{\mathtt{s}_2, \mathtt{s}_3\}, \qquad P_3 = \{\mathtt{s}_3\}.$$

An element of the *iterated powerset* $\mathcal{P}^{\,2}(X) = \mathcal{P}(\mathcal{P}(X))$ is a *playlist folder*—that is, a set of playlists. For instance,

$$\mathsf{Folder}_A = \{\, P_1,\ P_3 \,\}, \qquad \mathsf{Folder}_B = \{\, P_2 \,\}$$

are both elements of $\mathcal{P}^{\,2}(X)$. If the music app supports *folders of folders*, then

$$\mathcal{P}^{\,3}(X) = \mathcal{P}(\mathcal{P}^{\,2}(X))$$

contains, for example,

$$\mathsf{Collection} = \big\{\, \mathsf{Folder}_A,\ \mathsf{Folder}_B \,\big\},$$

which is a curated collection of playlist folders (e.g., "Workout" and "Commute"). Thus, moving from X to $\mathcal{P}(X)$ to $\mathcal{P}^{\,2}(X)$ models songs → playlists → playlist folders (and $\mathcal{P}^{\,3}(X)$ models folders of folders).

Example 1.5 (Meal planning: dishes → day menus → weekly plans → monthly templates)**.** Let the base set of dishes be

$$X = \{\text{salad},\ \text{pasta},\ \text{soup},\ \text{fish}\}.$$

A *day menu* is any subset of X, i.e., an element of $\mathcal{P}(X)$; for instance,

$$D_{\text{Mon}} = \{\text{salad}, \text{fish}\}, \qquad D_{\text{Tue}} = \{\text{soup}, \text{pasta}\}.$$

A *weekly plan* is a set of day menus, hence an element of $\mathcal{P}^2(X)$, e.g.

$$W_1 = \{\, D_{\text{Mon}},\ D_{\text{Tue}},\ \{\text{pasta}\},\ \{\text{soup}\},\ \{\text{fish}\}\,\}.$$

A restaurant may keep multiple weekly plans (for calorie targets, budgets, or themes). A *monthly template* is then a set of weekly plans, i.e., an element of $\mathcal{P}^3(X)$:

$$M_{\text{Jan}} = \{\, W_1,\ W_2\,\} \in \mathcal{P}^3(X),$$

where W_2 is another feasible week. In practice: X lists available dishes, $\mathcal{P}(X)$ lists possible day menus, $\mathcal{P}^2(X)$ gathers them into weekly schedules, and $\mathcal{P}^3(X)$ assembles weekly schedules into monthly rotation templates.

Definition 1.6 (Hypergraph [1,2])**.** A *hypergraph* is a pair $H = (V(H), E(H))$ with $V(H) \neq \varnothing$ and $E(H) \subseteq \mathcal{P}^*(V(H))$. Throughout this paper both $V(H)$ and $E(H)$ are finite.

Example 1.7 (Hypergraph: co-authorship by paper)**.** Let the vertices be authors $V(H) = \{\text{Taro}, \text{Tae}, \text{Carol}, \text{Dan}, \text{Erin}\}$. Each paper induces a hyperedge equal to its set of co-authors:

$$E(H) = \big\{\{\text{Taro}, \text{Tae}\},\ \{\text{Taro}, \text{Carol}, \text{Dan}\},\ \{\text{Tae}, \text{Dan}, \text{Erin}\}\big\} \subseteq \mathcal{P}^*\big(V(H)\big).$$

Thus $H = (V(H), E(H))$ is a hypergraph where multi-author papers naturally form hyperedges.

Definition 1.8 (n-SuperHyperGraph)**.** [3,20] Fix a finite base set V_0 and a level $n \in \mathbb{N}_0$. An *n-SuperHyperGraph over V_0* is a triple

$$\text{SHG}^{(n)} \ = \ \big(V,\ E,\ \partial\big),$$

where

- $V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$ is a finite set of *n-supervertices*;
- E is a finite set of *(super)edge identifiers*;
- $\partial : E \to \mathcal{P}^*(V)$ is an *incidence map* sending each edge to a nonempty finite subset of V.

For $e \in E$, the set $\partial(e) \subseteq V$ is called the *(super)edge incidence set.*

Remark 1.9 (Simple, uniform, and nonempty-tier options)**.** (i) *Simple*: ∂ is injective (no parallel superedges). (ii) *k-uniform*: $|\partial(e)| = k$ for all $e \in E$. (iii) To exclude empties at every tier, one may require $V \subseteq \big(\mathcal{P}^*\big)^n(V_0)$.

Remark 1.10 (Subset presentation)**.** If parallel superedges are unnecessary, one may identify each edge with its incidence set and work with a pair $(V, \mathcal{E})$ where $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{P}^*(V)$. This is equivalent to Definition 1.8 by taking $E := \mathcal{E}$ and $\partial := \mathrm{id}$.

Example 1.11 (n-SuperHyperGraph: programs built from teams ($n = 2$))**.** Take the ground set of employees $V_0 = \{a, b, c, d, e\}$. First form teams (level 1 subsets):

$$T_1 = \{a, b\}, \quad T_2 = \{b, c\}, \quad T_3 = \{d, e\} \ \in \ \mathcal{P}(V_0).$$

Define level 2 *supervertices* as sets of teams:

$$v_1 = \{T_1, T_2\}, \qquad v_2 = \{T_2, T_3\} \ \in \ \mathcal{P}\big(\mathcal{P}(V_0)\big) = \mathcal{P}^2(V_0).$$

Let $V = \{v_1, v_2\} \subseteq \mathcal{P}^2(V_0)$ and let $E = \{\varepsilon\}$ with incidence map

$$\partial(\varepsilon) = \{v_1, v_2\} \ \in \ \mathcal{P}^*(V).$$

Then $\mathrm{SHG}^{(2)} = (V, E, \partial)$ is a 2-SuperHyperGraph: each supervertex represents a program built from teams, and the superedge ε models a cross-program coordination task linking these programs.

1.2. *Fuzzy n-SuperHyperGraphs*

A fuzzy set assigns to each element a membership degree in $[0, 1]$ [21–23]. Fuzzy graphs and fuzzy hypergraphs endow vertices and (hyper)edges with such degrees [24–30]. A fuzzy n-SuperHyperGraph is a higher-level network representation in which supervertices and superedges carry membership values for modeling complex interactions (cf. [3, 31]).

Definition 1.12 (Fuzzy graph)**.** [25, 32] A *fuzzy graph* is a triple $G = (V, \sigma, \mu)$ where V is a finite nonempty vertex set, $\sigma : V \to [0, 1]$ assigns vertex-membership degrees, and $\mu : V \times V \to [0, 1]$ assigns edge-membership degrees subject to

$$\mu(u, v) \ \leq \ \min\{\sigma(u), \sigma(v)\} \qquad (\forall\, u, v \in V).$$

We write uv for $\{u, v\}$ and abbreviate $\mu(uv) := \mu(u, v)$. The (crisp) underlying graph of G has vertex set V and edge set $E^* := \{\, uv : \mu(uv) > 0 \,\}$.

Definition 1.13 (Fuzzy hypergraph)**.** [27, 30, 33] Let $H^* = (V, E, \partial)$ be a crisp hypergraph. A *fuzzy hypergraph* on H^* is a sextuple

$$\mathcal{H} \ = \ \big(V, E, \partial;\ \sigma, \mu, \eta\big),$$

with maps

$$\sigma : V \to [0,1], \qquad \mu : E \to [0,1], \qquad \eta : V \times E \to [0,1],$$

such that for all $v \in V$ and $e \in E$,

$$\textbf{(support)} \quad \big[v \in \partial(e)\big] \iff \eta(v,e) > 0, \tag{1}$$

$$\textbf{(incidence bound)} \quad \eta(v,e) \;\le\; \min\{\sigma(v), \mu(e)\}, \tag{2}$$

$$\textbf{(edge–vertex bound)} \quad \mu(e) \;\le\; \min_{u \in \partial(e)} \sigma(u). \tag{3}$$

Here σ is the *vertex-membership map*, μ the *edge-membership map*, and η the *incidence-membership map*. The underlying crisp hypergraph is (V, E, ∂), recoverable via (1).

Example 1.14 (Fuzzy hypergraph: multi-agency emergency response)**.** Consider agencies as vertices

$$V = \{\text{Fire}(F),\ \text{Police}(P),\ \text{Hospital}(H),\ \text{Utilities}(U)\}.$$

Scenarios (events) form hyperedges

$$E = \{e_1, e_2, e_3\}, \qquad \partial(e_1) = \{F, U\},\ \partial(e_2) = \{F, H, P\},\ \partial(e_3) = \{U, P\},$$

so $H^* = (V, E, \partial)$ is a crisp hypergraph. Let vertex "readiness" be

$$\sigma(F) = 0.90,\ \sigma(P) = 0.80,\ \sigma(H) = 0.85,\ \sigma(U) = 0.70.$$

Choose edge "scenario confidence" (respecting the edge–vertex bound $\mu(e) \le \min_{u \in \partial(e)} \sigma(u)$):

$$\mu(e_1) = 0.65\ (\le \min(0.90, 0.70) = 0.70),$$

$$\mu(e_2) = 0.75\ (\le \min(0.90, 0.85, 0.80) = 0.80),$$

$$\mu(e_3) = 0.60\ (\le \min(0.70, 0.80) = 0.70).$$

Define incidence-membership $\eta : V \times E \to [0,1]$ by

$$\eta(v,e) = \begin{cases} \min\{\sigma(v), \mu(e)\} \cdot r_{v,e}, & v \in \partial(e), \\ 0, & v \notin \partial(e), \end{cases} \quad \text{with} \quad r_{v,e} \in (0,1].$$

For instance, pick

$$\eta(F, e_1) = 0.60,\ \eta(U, e_1) = 0.55;$$

$$\eta(F, e_2) = 0.70,\ \eta(H, e_2) = 0.70,\ \eta(P, e_2) = 0.65;$$

$$\eta(U, e_3) = 0.55,\ \eta(P, e_3) = 0.55,$$

and $\eta(v,e) = 0$ otherwise. Then: (i) $[v \in \partial(e)] \Leftrightarrow \eta(v,e) > 0$ (support), (ii) $\eta(v,e) \le \min\{\sigma(v), \mu(e)\}$ (incidence bound), (iii) $\mu(e) \le \min_{u \in \partial(e)} \sigma(u)$ (edge–vertex bound). Hence $\mathcal{H} = (V, E, \partial; \sigma, \mu, \eta)$ is a fuzzy hypergraph encoding uncertain, multi-agency cooperation.

Definition 1.15 (Fuzzy n-SuperHyperGraph)**.** (cf. [3, 10]) Let $\mathrm{SHG}^{(n)} = (V, E)$ be an n-SuperHyperGraph. A *fuzzy n-SuperHyperGraph* is a quadruple

$$(V, E, \sigma, \mu),$$

where $\sigma : V \to [0, 1]$ and $\mu : E \to [0, 1]$ obey the *admissibility constraint*

$$\mu(e) \;\le\; \min_{v \in e} \sigma(v) \qquad \text{for every } e \in E.$$

Example 1.16 (Fuzzy n-SuperHyperGraph: programs built from teams of teams ($n = 2$))**.** Let the ground set of employees be $V_0 = \{a, b, c, d, e, f\}$. Level-1 "teams" are subsets of V_0:

$$T_1 = \{a, b\}, \quad T_2 = \{b, c\}, \quad T_3 = \{d, e, f\} \;\in\; \mathcal{P}(V_0).$$

Level-2 supervertices ("programs") are sets of teams:

$$v_1 = \{T_1, T_2\}, \qquad v_2 = \{T_2, T_3\}, \qquad v_3 = \{T_1, T_3\} \;\in\; \mathcal{P}^2(V_0).$$

Set $V = \{v_1, v_2, v_3\} \subseteq \mathcal{P}^2(V_0)$ and choose superedges

$$E = \{e_A, e_B\}, \qquad e_A = \{v_1, v_2\}, \quad e_B = \{v_1, v_3\}.$$

Assign supervertex-memberships (overall "program readiness")

$$\sigma(v_1) = 0.90, \qquad \sigma(v_2) = 0.75, \qquad \sigma(v_3) = 0.80,$$

and edge-memberships (coordination strength) satisfying the admissibility constraint $\mu(e) \le \min_{v \in e} \sigma(v)$:

$$\mu(e_A) = 0.70 \;(\le \min(0.90, 0.75) = 0.75), \qquad \mu(e_B) = 0.72 \;(\le \min(0.90, 0.80) = 0.80).$$

Then (V, E, σ, μ) is a *fuzzy 2-SuperHyperGraph* modeling uncertain collaboration between programs built from teams of teams.

1.3. *Tolerance graph*

A tolerance graph models vertices as intervals with tolerances, connecting vertices whenever overlap length exceeds their minimum tolerance threshold [34–38].

Definition 1.17 (Tolerance graph)**.** [34] A finite simple graph $G = (V, E)$ is a *tolerance graph* if there exist, for each $v \in V$, a closed interval $I_v = [\ell_v, r_v] \subset \mathbb{R}$ and a tolerance $t_v \in \mathbb{R}_{>0}$ such that for all distinct $u, v \in V$,

$$\{u, v\} \in E \quad \Longleftrightarrow \quad \big|\, I_u \cap I_v \,\big| \;\ge\; \min\{t_u, t_v\},$$

where $|J|$ denotes the (Lebesgue) length of an interval J (and is 0 if $J = \varnothing$).

Remark 1.18 (Common subclasses)**.** If $t_v \leq |I_v|$ for every v, the representation is *bounded* (yielding a bounded tolerance graph). If all tolerances are equal ($t_v \equiv t$), the graph is *unit tolerance*.

Example 1.19 (Tolerance graph: scheduling feasible one-on-one meetings)**.** Let vertices be employees with daily availability intervals (in hours). Set

$$I_A = [9, 12],\ t_A = 1.0; \qquad I_B = [10, 13],\ t_B = 1.2;$$

$$I_C = [11.5, 14],\ t_C = 0.75; \qquad I_D = [8, 9.5],\ t_D = 0.5.$$

Two employees $u \neq v$ are adjacent iff $\ell(I_u \cap I_v) \geq \min\{t_u, t_v\}$, where $\ell(\cdot)$ is interval length (hours). Computations:

$$\ell(I_A \cap I_B) = 2 \geq \min(1.0, 1.2) = 1.0 \Rightarrow AB \in E,$$

$$\ell(I_A \cap I_C) = 0.5 < \min(1.0, 0.75) = 0.75 \Rightarrow AC \notin E,$$

$$\ell(I_A \cap I_D) = 0.5 \geq \min(1.0, 0.5) = 0.5 \Rightarrow AD \in E,$$

$$\ell(I_B \cap I_C) = 1.5 \geq \min(1.2, 0.75) = 0.75 \Rightarrow BC \in E,$$

and BD, CD have empty overlap, hence not edges. Therefore

$$V = \{A, B, C, D\}, \qquad E = \{\{A, B\}, \{A, D\}, \{B, C\}\}.$$

This models who can schedule a one-on-one of their required minimum length.

1.4. *Fuzzy tolerance graph*

A fuzzy tolerance graph assigns fuzzy intervals and tolerances to vertices, edges weighted by normalized overlap relative to tolerance measures [39–41].

Definition 1.20 (Fuzzy interval and fuzzy tolerance)**.** A *fuzzy interval* $\mathcal{I}$ on $\mathbb{R}$ is a normal, convex fuzzy set on $\mathbb{R}$. Its *core* $c(\mathcal{I})$ and *support* $s(\mathcal{I})$ are (nonempty) compact intervals, and we write $\ell(J)$ for the (Lebesgue) length of a real interval J. A *fuzzy tolerance* $\mathcal{T}$ is a (normal, convex) fuzzy number with strictly positive core length $\ell\big(c(\mathcal{T})\big) > 0$ (and hence positive support length $\ell\big(s(\mathcal{T})\big) > 0$).

Definition 1.21 (Fuzzy tolerance graph)**.** [39] Let $\mathcal{F} = \{(\mathcal{I}_v, \mathcal{T}_v) : v \in V\}$ be a finite family consisting, for each vertex v, of a fuzzy interval $\mathcal{I}_v$ and a fuzzy tolerance $\mathcal{T}_v$. The *fuzzy tolerance graph* associated with $\mathcal{F}$ is the fuzzy graph

$$\Xi(\mathcal{F}) = (V, \sigma, \mu),$$

where the vertex-membership is $\sigma(v) := h(\mathcal{I}_v)$ (the height, typically $= 1$ for normal fuzzy intervals), and the edge-membership $\mu : V \times V \to [0, 1]$ for distinct u, v is

$$\mu(u, v) := \max\Big\{\rho\big(\ell\big(c(\mathcal{I}_u) \cap c(\mathcal{I}_v)\big),\ \min\big\{\ell\big(c(\mathcal{T}_u)\big), \ell\big(c(\mathcal{T}_v)\big)\big\}\big)\ ,\ \rho\big(\ell\big(s(\mathcal{I}_u) \cap s(\mathcal{I}_v)\big),\ \min\big\{\ell\big(s(\mathcal{T}_u)\big), \ell\big(s(\mathcal{T}_v)\big)\big\}\big)\Big\},$$

with the normalization map $\rho(x,a) := \begin{cases} \min\{1,\ x/a\}, & a>0, \\ 0, & a=0. \end{cases}$ We set $\mu(v,v) := \sigma(v)$.

Remark 1.22 (Crisp reduction and level cuts)**.** If every $\mathcal{I}_v$ and $\mathcal{T}_v$ is crisp (i.e. characteristic functions of real intervals), then $\mu(u,v) \in \{0,1\}$ and the underlying crisp graph contains the edge uv iff the overlap length of the (core or support) intervals meets the minimum of the corresponding (core or support) tolerances—recovering the classical tolerance-graph rule. Moreover, for any $t \in (0,1]$, the t-cut of $\Xi(\mathcal{F})$ is a crisp tolerance representation obtained from the t-cuts of the fuzzy intervals and fuzzy tolerances (cf. known constructions for fuzzy tolerance graphs). *See also* the literature on fuzzy tolerance graphs for compatible formulations and examples.

Example 1.23 (Fuzzy tolerance graph: uncertain availability for coordinating calls)**.** Each person has a fuzzy availability interval with *core* $c(\mathcal{I}_v)$ (certainly available) and *support* $s(\mathcal{I}_v)$ (possibly available), and a fuzzy tolerance with core/support lengths (desired/acceptable call duration). Let $\rho(x,a) = \min\{1, x/a\}$ for $a>0$ and 0 if $a=0$. Define edge-membership for $u \neq v$ by

$$\mu(u,v) = \max\Big\{ \rho\big(\ell(c(\mathcal{I}_u)\cap c(\mathcal{I}_v)),\ \min\{\ell(c(\mathcal{T}_u)),\ell(c(\mathcal{T}_v))\}\big),\ \rho\big(\ell(s(\mathcal{I}_u)\cap s(\mathcal{I}_v)),\ \min\{\ell(s(\mathcal{T}_u)),\ell(s(\mathcal{T}_v))\}\big)\Big\}.$$

Take three consultants X, Y, Z with (hours)

$$\begin{aligned} &c(\mathcal{I}_X) = [9,12],\ s(\mathcal{I}_X) = [8.5,12.5], \quad \ell\big(c(\mathcal{T}_X)\big) = 1.5,\ \ell\big(s(\mathcal{T}_X)\big) = 3.0; \\ &c(\mathcal{I}_Y) = [10,13],\ s(\mathcal{I}_Y) = [9.5,13.5], \quad \ell\big(c(\mathcal{T}_Y)\big) = 1.0,\ \ell\big(s(\mathcal{T}_Y)\big) = 2.0; \\ &c(\mathcal{I}_Z) = [12,14],\ s(\mathcal{I}_Z) = [10.5,14.5],\ \ell\big(c(\mathcal{T}_Z)\big) = 1.25,\ \ell\big(s(\mathcal{T}_Z)\big) = 2.5. \end{aligned}$$

Edge-memberships:

$$\mu(X,Y) = \max\{\rho(2,\min(1.5,1.0)=1.0),\ \rho(3,\min(3.0,2.0)=2.0)\} = \max\{1,1\} = 1,$$

$$\mu(X,Z) = \max\{\rho(0,\min(1.5,1.25)=1.25)=0,\ \rho(2,\min(3.0,2.5)=2.5)=0.8\} = 0.8,$$

$$\mu(Y,Z) = \max\{\rho(1,\min(1.0,1.25)=1.0)=1,\ \rho(3,\min(2.0,2.5)=2.0)=1\} = 1.$$

Thus $G = (\{X,Y,Z\},\mu)$ is a fuzzy tolerance graph where XY and YZ are fully feasible ($\mu=1$), while XZ has partial feasibility ($\mu=0.8$) due to weaker overlap relative to acceptable durations.

2. **Main Result**

This section presents the results of the paper.

2.1. *Tolerance Hypergraph*

A tolerance hypergraph extends tolerance graphs by allowing hyperedges of multiple vertices, included when common interval overlap exceeds minimum tolerances.

Definition 2.1 (Tolerance hypergraph)**.** Let V be a finite nonempty set of *vertices*. For each $v \in V$ fix a closed interval $I_v = [\ell_v, r_v] \subset \mathbb{R}$ with $\ell_v \le r_v$, and a *tolerance* $t_v \in (0, \infty)$. For every nonempty $e \subseteq V$ define the *common-overlap length*

$$L(e) \;:=\; \lambda\Big(\bigcap_{v\in e} I_v\Big),$$

where λ denotes the Lebesgue length (so $\lambda(\varnothing) = 0$). The *tolerance hypergraph induced by* (I, t) is the pair

$$\mathcal{H}(I,t) \;:=\; \big(V, E(I,t)\big), \qquad E(I,t) \;:=\; \big\{\, e \subseteq V :\; |e| \ge 2,\; L(e) \;\ge\; \min_{v\in e} t_v \,\big\}.$$

Any $e \in E(I,t)$ is called a *tolerance hyperedge*. We say the model is *bounded* if $t_v \le \lambda(I_v)$ for all v, and *unit* if $t_v \equiv t$ for some fixed $t > 0$.

Remark 2.2 (2-section (shadow) of a hypergraph)**.** Given a hypergraph $H = (V, E)$, its *2-section* (also called the *shadow*) is the simple graph $[H]_2 = (V, E_2)$ with

$$uv \in E_2 \iff \{u, v\} \in E \quad (u \ne v).$$

Example 2.3 (Tolerance hypergraph: coordinating multi-party meetings)**.** Let vertices be four teams with daily availability windows (in hours) and minimum required meeting durations (tolerances):

$$I_A = [9, 13],\ t_A = 1.5; \quad I_B = [10, 12.5],\ t_B = 1.0; \quad I_C = [11, 15],\ t_C = 2.0; \quad I_D = [8, 10.5],\ t_D = 1.0.$$

For any nonempty $e \subseteq \{A, B, C, D\}$ let $L(e) = \lambda(\cap_{v\in e} I_v)$ be the common-overlap length. A subset e is a hyperedge iff $|e| \ge 2$ and $L(e) \ge \min_{v\in e} t_v$.

Pairs:

$$L(\{A,B\}) = \ell([10, 12.5]) = 2.5 \ge \min(1.5, 1.0) = 1.0 \Rightarrow \{A,B\} \in E,$$

$$L(\{A,C\}) = \ell([11, 13]) = 2.0 \ge \min(1.5, 2.0) = 1.5 \Rightarrow \{A,C\} \in E,$$

$$L(\{A,D\}) = \ell([9, 10.5]) = 1.5 \ge \min(1.5, 1.0) = 1.0 \Rightarrow \{A,D\} \in E,$$

$$L(\{B,C\}) = \ell([11, 12.5]) = 1.5 \ge \min(1.0, 2.0) = 1.0 \Rightarrow \{B,C\} \in E,$$

$$L(\{B,D\}) = \ell([10, 10.5]) = 0.5 < \min(1.0, 1.0) = 1.0 \Rightarrow \{B,D\} \notin E,$$

$$L(\{C,D\}) = \ell(\varnothing) = 0 \Rightarrow \{C,D\} \notin E.$$

Triples:

$$L(\{A,B,C\}) = \ell([11,12.5]) = 1.5 \geq \min(1.5,1.0,2.0) = 1.0 \Rightarrow \{A,B,C\} \in E,$$

$$L(\{A,B,D\}) = \ell([10,10.5]) = 0.5 < \min(1.5,1.0,1.0) = 1.0 \Rightarrow \{A,B,D\} \notin E,$$

$$L(\{A,C,D\}) = \ell(\varnothing) = 0 \Rightarrow \{A,C,D\} \notin E,$$

$$L(\{B,C,D\}) = \ell(\varnothing) = 0 \Rightarrow \{B,C,D\} \notin E.$$

No quadruple overlap exists. Hence the tolerance hypergraph is

$$V = \{A,B,C,D\}, \quad E = \big\{\{A,B\},\{A,C\},\{A,D\},\{B,C\},\{A,B,C\}\big\}.$$

This captures which groups (pairs or larger) can meet for at least their minimum required duration.

Theorem 2.4 (Tolerance hypergraphs specialize to tolerance graphs)**.** *Let $\mathcal{H}(I,t)$ be as in Definition 2.1. Define a simple graph $G(I,t) = (V, E_2)$ by*

$$uv \in E_2 \iff \lambda(I_u \cap I_v) \geq \min\{t_u, t_v\} \qquad (u \neq v).$$

Then the 2-section of $\mathcal{H}(I,t)$ equals $G(I,t)$, i.e. $[\,\mathcal{H}(I,t)\,]_2 = G(I,t)$.

Proof. By Definition 2.1, $\{u,v\} \in E(I,t)$ if and only if $L(\{u,v\}) = \lambda(I_u \cap I_v) \geq \min\{t_u,t_v\}$; but this is exactly the adjacency rule of $G(I,t)$. Hence $uv \in [\,\mathcal{H}(I,t)\,]_2$ if and only if $uv \in E_2$, proving $[\,\mathcal{H}(I,t)\,]_2 = G(I,t)$. □

Theorem 2.5 (Tolerance hypergraphs are hypergraphs)**.** *For any choice of intervals $\{I_v\}_{v\in V}$ and tolerances $\{t_v\}_{v\in V}$, the pair $\mathcal{H}(I,t) = (V, E(I,t))$ of Definition 2.1 is a (finite, loopless) hypergraph.*

Proof. By construction $E(I,t) \subseteq \mathcal{P}(V)$ and every $e \in E(I,t)$ satisfies $|e| \geq 2$, so $\mathcal{H}(I,t)$ is a well-defined finite hypergraph. □

2.2. *Tolerance SuperHypergraph*

A tolerance superhypergraph generalizes tolerance hypergraphs using iterated powerset vertices, forming superedges when collective interval overlap surpasses corresponding tolerance thresholds.

Definition 2.6 (Tolerance superhypergraph)**.** Let $V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$ be a finite nonempty set ($n \in \mathbb{N}_0$). For each $v \in V$ fix a closed interval $I_v = [\ell_v, r_v] \subset \mathbb{R}$ with $\ell_v \leq r_v$, and a *tolerance* $t_v \in [0,\infty)$. For every nonempty $e \subseteq V$ put

$$L(e) \;:=\; \lambda\Big(\bigcap_{v\in e} I_v\Big),$$

where λ denotes the Lebesgue length on $\mathbb{R}$ (in particular $\lambda(\varnothing) = 0$). The *tolerance superhypergraph induced by* (I, t) is

$$\mathcal{H}_{\mathrm{tol}}^{(n)}(I,t) \;:=\; \big(V,\ \mathcal{E}(I,t)\big), \qquad \mathcal{E}(I,t) \;:=\; \Big\{\, e \subseteq V :\ |e| \geq 2,\ L(e) \;\geq\; \min_{v\in e} t_v \,\Big\}.$$

Any $e \in \mathcal{E}(I,t)$ is called a *tolerance superedge*. The model is *bounded* if $t_v \leq \lambda(I_v)$ for all v, and *unit* if $t_v \equiv t$ for some fixed $t \geq 0$.

Remark 2.7 (2-section (shadow))**.** For a (super)hypergraph $H = (V, \mathcal{E})$ its *2-section* is the simple graph $[H]_2 = (V, E_2)$ with

$$uv \in E_2 \iff \{u, v\} \in \mathcal{E} \qquad (u \neq v).$$

Example 2.8 (Tolerance superhypergraph: cross-program workshop among teams of employees)**.** Let the ground set of employees be $V_0 = \{a, b, c, d, e, f\}$ and set $n = 1$, so supervertices are teams (subsets of V_0):

$$T_1 = \{a, b, c\}, \quad T_2 = \{c, d\}, \quad T_3 = \{d, e, f\} \;\in\; \mathcal{P}(V_0).$$

Take $V = \{T_1, T_2, T_3\} \subseteq \mathcal{P}^1(V_0)$. Assign to each supervertex a workshop-availability interval (hours) and a minimum workable duration (tolerance):

$$I_{T_1} = [9, 12],\ t_{T_1} = 1.0; \qquad I_{T_2} = [10, 14],\ t_{T_2} = 1.5; \qquad I_{T_3} = [11, 13.2],\ t_{T_3} = 1.0.$$

A superedge $e \subseteq V$ (with $|e| \geq 2$) is included when $L(e) = \lambda(\cap_{v\in e} I_v) \geq \min_{v\in e} t_v$.
Pairs:

$$L(\{T_1, T_2\}) = \ell([10, 12]) = 2.0 \geq \min(1.0, 1.5) = 1.0 \Rightarrow \{T_1, T_2\} \in E,$$

$$L(\{T_1, T_3\}) = \ell([11, 12]) = 1.0 \geq \min(1.0, 1.0) = 1.0 \Rightarrow \{T_1, T_3\} \in E,$$

$$L(\{T_2, T_3\}) = \ell([11, 13.2]) = 2.2 \geq \min(1.5, 1.0) = 1.0 \Rightarrow \{T_2, T_3\} \in E.$$

Triple:

$$L(\{T_1, T_2, T_3\}) = \ell([11, 12]) = 1.0 \geq \min(1.0, 1.5, 1.0) = 1.0 \Rightarrow \{T_1, T_2, T_3\} \in E.$$

Therefore the tolerance superhypergraph is

$$V = \{T_1, T_2, T_3\}, \qquad E = \big\{\{T_1, T_2\}, \{T_1, T_3\}, \{T_2, T_3\}, \{T_1, T_2, T_3\}\big\}.$$

Here supervertices are teams (level-1 objects), and superedges encode which collections of teams can hold a joint workshop of sufficient length.

Theorem 2.9 (Tolerance superhypergraphs are n-SuperHyperGraphs)**.** *For any choice of* $\{I_v\}_{v\in V}$ *and* $\{t_v\}_{v\in V}$ *as in Definition 2.6,*

$$\mathcal{H}_{\mathrm{tol}}^{(n)}(I,t) = (V, \mathcal{E}(I,t))$$

is an n-SuperHyperGraph over V_0*.*

Proof. By construction $V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$ is finite and nonempty. Also $\mathcal{E}(I,t) \subseteq \mathcal{P}^*(V)$ and, by definition, any $e \in \mathcal{E}(I,t)$ satisfies $|e| \geq 2$. Hence $(V, \mathcal{E}(I,t))$ is an n-SuperHyperGraph. □

Theorem 2.10 (2-section is a tolerance graph)**.** *Let $\mathcal{H}^{(n)}_{\mathrm{tol}}(I,t)$ be a tolerance superhypergraph. Define a simple graph $G(I,t) = (V,E)$ by*

$$uv \in E \iff \lambda(I_u \cap I_v) \geq \min\{t_u, t_v\} \qquad (u \neq v).$$

Then $[\,\mathcal{H}^{(n)}_{\mathrm{tol}}(I,t)\,]_2 = G(I,t)$; in particular, the 2-section of a tolerance superhypergraph is a (classical) tolerance graph.

Proof. By Definition 2.6, $\{u,v\} \in \mathcal{E}(I,t)$ iff $L(\{u,v\}) = \lambda(I_u \cap I_v) \geq \min\{t_u, t_v\}$, which is precisely the adjacency rule of $G(I,t)$. Therefore $uv \in [\,\mathcal{H}^{(n)}_{\mathrm{tol}}(I,t)\,]_2$ iff $uv \in E$, proving equality. □

Theorem 2.11 (Reduction to tolerance hypergraphs and graphs)**.** *Fix $n \in \mathbb{N}_0$ and $\mathcal{H}^{(n)}_{\mathrm{tol}}(I,t) = (V, \mathcal{E}(I,t))$ as above.*

(i) *If $n = 0$, then $\mathcal{H}^{(0)}_{\mathrm{tol}}(I,t)$ is exactly the* tolerance hypergraph *on the vertex set V determined by (I,t) (hyperedges are those $e \subseteq V$ with $|e| \geq 2$ and $L(e) \geq \min_{v \in e} t_v$).*

(ii) *For any n, the 2-section $[\,\mathcal{H}^{(n)}_{\mathrm{tol}}(I,t)\,]_2$ is the* tolerance graph *$G(I,t)$ on V (Theorem 2.10).*

Consequently, the class of tolerance superhypergraphs simultaneously generalizes tolerance hypergraphs (case $n = 0$) and tolerance graphs (via 2-section), while refining the notion of n-SuperHyperGraph (Theorem 2.9).

Proof. (i) When $n = 0$ we have $V \subseteq V_0$ and Definition 2.6 coincides with the usual tolerance-hyperedge rule on V; hence $\mathcal{H}^{(0)}_{\mathrm{tol}}(I,t)$ is the tolerance hypergraph induced by (I,t).
(ii) This is exactly Theorem 2.10.
The concluding sentence follows immediately. □

2.3. *Fuzzy Tolerance Hypergraph*

A fuzzy tolerance hypergraph assigns fuzzy intervals and tolerances to vertices, forming hyperedges when collective overlap length meets tolerance thresholds.

Definition 2.12 (Fuzzy Tolerance Hypergraph (FTH))**.** Let V be a finite nonempty vertex set. For each $v \in V$ fix a fuzzy interval $\mathcal{I}_v$ and a fuzzy tolerance $\mathcal{T}_v$. Define, for any nonempty $e \subseteq V$, the *core-/support-overlap lengths* and *core-/support-thresholds* by

$$L_c(e) := \ell\Big(\bigcap_{v \in e} c(\mathcal{I}_v)\Big), \quad L_s(e) := \ell\Big(\bigcap_{v \in e} s(\mathcal{I}_v)\Big),$$

$$\tau_c(e) := \min_{v\in e} \ell\big(c(\mathcal{T}_v)\big), \qquad \tau_s(e) := \min_{v\in e} \ell\big(s(\mathcal{T}_v)\big).$$

Let $\rho(x,a) := \begin{cases} \min\{1,\, x/a\}, & a > 0, \\ 0, & a = 0. \end{cases}$ and set the *overlap score*

$$\phi(e) \;:=\; \max\Big\{\rho\big(L_c(e), \tau_c(e)\big),\; \rho\big(L_s(e), \tau_s(e)\big)\Big\} \;\in [0,1].$$

Define the (crisp) edge universe

$$E \;:=\; \big\{\, e \subseteq V :\; |e| \geq 2,\; \phi(e) > 0 \,\big\}.$$

A *fuzzy tolerance hypergraph* on V is the sextuple

$$\mathfrak{H} = (V, E;\; \sigma, \mu, \eta)$$

with

$$\sigma : V \to [0,1], \qquad \sigma(v) := \min\big\{h(\mathcal{I}_v),\; h(\mathcal{T}_v)\big\},$$
$$\mu : E \to [0,1], \qquad \mu(e) := \min\Big\{\, \phi(e),\; \min_{v\in e} \sigma(v)\Big\},$$
$$\eta : V \times E \to [0,1], \qquad \eta(v,e) := \begin{cases} \mu(e), & v \in e, \\ 0, & v \notin e. \end{cases}$$

Remark 2.13 (Admissibility constraints)**.** By construction, for all $v \in V$ and $e \in E$: (i) $\eta(v,e) > 0$ iff $v \in e$ (support equivalence); (ii) $\eta(v,e) \leq \min\{\sigma(v), \mu(e)\}$ (incidence bound); (iii) $\mu(e) \leq \min_{u\in e} \sigma(u)$ (edge–vertex bound). Thus $(V, E; \sigma, \mu, \eta)$ is a fuzzy hypergraph in the usual sense, equipped with a tolerance-based generator ϕ.

Example 2.14 (Fuzzy Tolerance Hypergraph: coordinating specialist consultations)**.** Let

$$V = \{\text{Cardio}(C),\; \text{Neuro}(N),\; \text{Ortho}(O)\}$$

denote three clinics. Each $v \in V$ has a fuzzy availability interval $\mathcal{I}_v$ (daytime hours) and a fuzzy tolerance $\mathcal{T}_v$ (acceptable consultation duration). Cores and supports (in hours) are:

$$c(\mathcal{I}_C) = [9, 12], \quad s(\mathcal{I}_C) = [8.5, 12.5], \qquad \ell\big(c(\mathcal{T}_C)\big) = 1.0,\; \ell\big(s(\mathcal{T}_C)\big) = 1.5,$$
$$c(\mathcal{I}_N) = [10, 13],\; s(\mathcal{I}_N) = [9.5, 13.5], \qquad \ell\big(c(\mathcal{T}_N)\big) = 1.2,\; \ell\big(s(\mathcal{T}_N)\big) = 2.0,$$
$$c(\mathcal{I}_O) = [11, 14],\; s(\mathcal{I}_O) = [10.5, 14.5], \quad \ell\big(c(\mathcal{T}_O)\big) = 1.5,\; \ell\big(s(\mathcal{T}_O)\big) = 2.5.$$

Let $\rho(x,a) = \min\{1, x/a\}$ for $a > 0$ (and 0 if $a = 0$). For any nonempty $e \subseteq V$ set

$$L_c(e) = \ell\Big(\bigcap_{v\in e} c(\mathcal{I}_v)\Big), \quad L_s(e) = \ell\Big(\bigcap_{v\in e} s(\mathcal{I}_v)\Big), \quad \tau_c(e) = \min_{v\in e} \ell\big(c(\mathcal{T}_v)\big), \quad \tau_s(e) = \min_{v\in e} \ell\big(s(\mathcal{T}_v)\big),$$
$$\phi(e) = \max\{\rho(L_c(e), \tau_c(e)),\; \rho(L_s(e), \tau_s(e))\}.$$

Heights $h(\mathcal{I}_C, \mathcal{T}_C) = (0.95, 0.90)$, $h(\mathcal{I}_N, \mathcal{T}_N) = (0.90, 0.95)$, $h(\mathcal{I}_O, \mathcal{T}_O) = (0.85, 0.80)$ give

$$\sigma(C) = \min(0.95, 0.90) = 0.90, \quad \sigma(N) = \min(0.90, 0.95) = 0.90, \quad \sigma(O) = \min(0.85, 0.80) = 0.80.$$

Compute overlaps (hours):

$$\begin{aligned}
&L_c(\{C,N\}) = \ell([10,12]) = 2, && \tau_c = \min(1.0,1.2) = 1.0, && \rho = 1;\\
&L_c(\{C,O\}) = \ell([11,12]) = 1, && \tau_c = \min(1.0,1.5) = 1.0, && \rho = 1;\\
&L_c(\{N,O\}) = \ell([11,13]) = 2, && \tau_c = \min(1.2,1.5) = 1.2, && \rho = 1;\\
&L_c(\{C,N,O\}) = \ell([11,12]) = 1, && \tau_c = \min(1.0,1.2,1.5) = 1.0, && \rho = 1.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&L_s(\{C,N\}) = \ell([9.5,12.5]) = 3.0, && \tau_s = \min(1.5,2.0) = 1.5, && \rho = 1;\\
&L_s(\{C,O\}) = \ell([10.5,12.5]) = 2.0, && \tau_s = \min(1.5,2.5) = 1.5, && \rho = 1;\\
&L_s(\{N,O\}) = \ell([10.5,13.5]) = 3.0, && \tau_s = \min(2.0,2.5) = 2.0, && \rho = 1;\\
&L_s(\{C,N,O\}) = \ell([10.5,12.5]) = 2.0, && \tau_s = \min(1.5,2.0,2.5) = 1.5, && \rho = 1.
\end{aligned}$$

Hence $\phi(e) = 1$ for all e listed. The FTH edge-membership is

$$\mu(e) = \min\{\phi(e),\ \min_{v\in e}\sigma(v)\} = \min_{v\in e}\sigma(v),$$

so

$$\mu(\{C,N\}) = 0.90, \quad \mu(\{C,O\}) = 0.80, \quad \mu(\{N,O\}) = 0.80, \quad \mu(\{C,N,O\}) = 0.80.$$

With $\eta(v,e) = \mu(e)$ if $v \in e$ and 0 otherwise, we obtain a *fuzzy tolerance hypergraph* modeling uncertain multi-specialist sessions.

Theorem 2.15 (FTH is a fuzzy hypergraph)**.** *Every $\mathfrak{H}$ in Definition 2.12 satisfies the axioms of a fuzzy hypergraph:*

$$\eta(v,e) > 0 \ \Leftrightarrow\ v \in e, \qquad \eta(v,e) \le \min\{\sigma(v),\mu(e)\}, \qquad \mu(e) \le \min_{u\in e}\sigma(u).$$

Proof. Immediate from Remark 2.13. In particular, $\eta(v,e) = 0$ when $v \notin e$, and $\eta(v,e) = \mu(e) \le \min\{\sigma(v),\mu(e)\}$ when $v \in e$. Finally, $\mu(e)$ is defined as the minimum of $\phi(e)$ and all $\sigma(u)$ $(u \in e)$, so $\mu(e) \le \min_{u\in e}\sigma(u)$. □

Theorem 2.16 (Reductions: FTH ⇒ fuzzy tolerance graph and tolerance hypergraph/graph)**.** *Let $\mathfrak{H} = (V,E;\sigma,\mu,\eta)$ be an FTH as above.*

(i) (Pairs-only reduction) If we restrict to 2-edges and define a fuzzy graph by $\Xi = (V,\sigma,\mu_2)$ with $\mu_2(u,v) := \mu(\{u,v\})$ for $u \ne v$, then Ξ is a fuzzy tolerance graph*. In particular, when $\sigma \equiv 1$ (all vertices normal of height 1), $\mu_2(u,v) = \phi(\{u,v\})$ coincides with the standard fuzzy tolerance rule based on overlap vs. minimum tolerance.*

(ii) (Crisp reduction) If every $\mathcal{I}_v$ and $\mathcal{T}_v$ is crisp (characteristic intervals) and $\sigma \equiv 1$, then

$$E = \big\{\, e \subseteq V :\ |e| \ge 2,\ L_c(e) \ge \tau_c(e) \text{ or } L_s(e) \ge \tau_s(e) \,\big\}$$

and $\mu(e) = 1$ for $e \in E$, $\mu(e) = 0$ otherwise. Hence (V,E) is exactly a tolerance hypergraph*. Restricting further to $|e| = 2$ recovers a (classical)* tolerance graph*.*

(iii) (Underlying hypergraph) Forgetting the fuzzy levels (σ, μ, η) yields the crisp hypergraph (V, E); therefore FTHs generalize *the notion of hypergraph via a tolerance-driven fuzzy enhancement.*

Proof. (i) For any distinct $u, v \in V$, we have

$$\mu_2(u,v) = \min\Big\{ \underbrace{\max\big\{\rho(L_c(\{u,v\}),\tau_c(\{u,v\})),\ \rho(L_s(\{u,v\}),\tau_s(\{u,v\}))\big\}}_{\phi(\{u,v\})},\ \sigma(u),\ \sigma(v)\Big\},$$

which is the standard fuzzy-tolerance overlap normalized by the minimum vertex heights. If $\sigma \equiv 1$, $\mu_2(u,v) = \phi(\{u,v\})$ exactly, as claimed.

(ii) With crisp intervals/tolerances, L_c, L_s, τ_c, τ_s are nonnegative reals and $\rho(x,a) \in \{0,1\}$. Thus $\phi(e) \in \{0,1\}$ and $E = \{e : \phi(e) = 1\}$; with $\sigma \equiv 1$ we get $\mu(e) = \phi(e)$. The edge predicate $\phi(e) = 1$ is precisely "(core or support) common-overlap length $\geq$ minimum (core or support) tolerance," i.e. the tolerance-hyperedge rule. Limiting to $|e| = 2$ recovers the tolerance-graph adjacency rule.

(iii) Trivial: (V, E) is a finite hypergraph by definition of E. □

2.4. *Fuzzy Tolerance SuperHypergraph*

A fuzzy tolerance superhypergraph extends fuzzy tolerance hypergraphs using iterated powerset supervertices, creating superedges based on fuzzy overlap-tolerance conditions.

Definition 2.17 (Multiway overlap score)**.** Given a finite nonempty index set e, fuzzy intervals $\{\mathcal{I}_v\}_{v\in e}$ and fuzzy tolerances $\{\mathcal{T}_v\}_{v\in e}$, set

$$L_c(e) := \ell\Big(\bigcap_{v\in e} c(\mathcal{I}_v)\Big), \qquad L_s(e) := \ell\Big(\bigcap_{v\in e} s(\mathcal{I}_v)\Big),$$

$$\tau_c(e) := \min_{v\in e} \ell\big(c(\mathcal{T}_v)\big), \qquad \tau_s(e) := \min_{v\in e} \ell\big(s(\mathcal{T}_v)\big),$$

and define the normalization $\rho(x,a) := \begin{cases} \min\{1,\, x/a\}, & a > 0, \\ 0, & a = 0. \end{cases}$. The *tolerance overlap score* of e is

$$\phi(e) \ :=\ \max\big\{\ \rho\big(L_c(e),\tau_c(e)\big),\ \rho\big(L_s(e),\tau_s(e)\big)\ \big\}\ \in [0,1].$$

Definition 2.18 (Fuzzy Tolerance SuperHypergraph (FTSHG))**.** Fix $n \in \mathbb{N}_0$ and a finite set $V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$. For every supervertex $v \in V$ choose a fuzzy interval $\mathcal{I}_v$ and a fuzzy tolerance $\mathcal{T}_v$, and put

$$\sigma : V \to [0,1], \qquad \sigma(v) := \min\{\, h(\mathcal{I}_v),\ h(\mathcal{T}_v)\,\}.$$

Let the (crisp) edge universe be the whole $\mathcal{E} := \{\, e \subseteq V : |e| \geq 2 \,\}$ and define the *edge-membership*

$$\mu : \mathcal{E} \to [0,1], \qquad \mu(e) := \min\Big\{ \phi(e),\ \min_{v \in e} \sigma(v) \Big\}$$

with $\phi(e)$ from Definition 2.17. Set the *incidence membership*

$$\eta : V \times \mathcal{E} \to [0,1], \qquad \eta(v,e) := \begin{cases} \mu(e), & v \in e, \\ 0, & v \notin e. \end{cases}$$

The septuple

$$\mathfrak{S}^{(n)}_{\mathrm{FT}} \ := \ (V, \mathcal{E};\ \sigma, \mu, \eta)$$

is called a *fuzzy tolerance superhypergraph* on V.

Remark 2.19 (Admissibility (fuzzy hypergraph axioms))**.** For all $v \in V$ and $e \in \mathcal{E}$ we have: (i) $\eta(v,e) > 0 \ \Leftrightarrow \ v \in e$ (support equivalence); (ii) $\eta(v,e) \leq \min\{\sigma(v), \mu(e)\}$ (incidence bound); (iii) $\mu(e) \leq \min_{u \in e} \sigma(u)$ (edge–vertex bound).

Example 2.20 (Fuzzy Tolerance SuperHypergraph: joint workshops among teams of teams $(n = 1)$)**.** Let V_0 be employees and take level-1 supervertices (teams)

$$V = \{T_1, T_2, T_3\} \subseteq \mathcal{P}^1(V_0),$$

with fuzzy team-availability intervals and fuzzy tolerances:

$$c(\mathcal{I}_{T_1}) = [9, 12],\ s(\mathcal{I}_{T_1}) = [8.5, 12.5], \quad \ell\big(c(\mathcal{T}_{T_1})\big) = 1.5,\ \ell\big(s(\mathcal{T}_{T_1})\big) = 2.5;$$
$$c(\mathcal{I}_{T_2}) = [10, 14],\ s(\mathcal{I}_{T_2}) = [9.5, 14.5], \quad \ell\big(c(\mathcal{T}_{T_2})\big) = 1.0,\ \ell\big(s(\mathcal{T}_{T_2})\big) = 2.0;$$
$$c(\mathcal{I}_{T_3}) = [11, 13],\ s(\mathcal{I}_{T_3}) = [10.5, 13.5],\ \ell\big(c(\mathcal{T}_{T_3})\big) = 1.0,\ \ell\big(s(\mathcal{T}_{T_3})\big) = 1.5.$$

Overlap scores $\phi(e)$ are computed as in the previous example; for all pairs and the triple below one finds $\phi(e) = 1$ since core/support overlaps exceed the corresponding minima. Choose supervertex heights

$$\sigma(T_1) = \min(0.95, 0.90) = 0.90, \quad \sigma(T_2) = \min(0.90, 0.90) = 0.90, \quad \sigma(T_3) = \min(0.90, 0.85) = 0.85.$$

Let the (crisp) superedge universe be $\mathcal{E} = \{e \subseteq V : |e| \geq 2\}$. Define the edge-membership

$$\mu(e) = \min\{\phi(e),\ \min_{v \in e} \sigma(v)\} = \min_{v \in e} \sigma(v),$$

so that

$$\mu(\{T_1, T_2\}) = 0.90, \qquad \mu(\{T_1, T_3\}) = 0.85, \qquad \mu(\{T_2, T_3\}) = 0.85, \qquad \mu(\{T_1, T_2, T_3\}) = 0.85.$$

Setting $\eta(v,e) = \mu(e)$ for $v \in e$ (and 0 otherwise) yields a *fuzzy tolerance superhypergraph* on V that quantifies how strongly sets of teams can hold a joint workshop of acceptable length under uncertainty.

Theorem 2.21 (FTSHG is a fuzzy n-SuperHyperGraph)**.** $\mathfrak{S}_{\mathrm{FT}}^{(n)} = (V, \mathcal{E}; \sigma, \mu, \eta)$ *is a fuzzy hypergraph whose underlying crisp pair* $(V, \mathcal{E}^{[t]})$ *with* $\mathcal{E}^{[t]} := \{\, e \in \mathcal{E} : \mu(e) \geq t \,\}$ *is an* n*-SuperHyperGraph for each threshold* $t \in (0, 1]$*.*

Proof. The three admissibility properties hold by construction: $\eta(v, e) = 0$ if $v \notin e$, and $\eta(v, e) = \mu(e) \leq \min\{\sigma(v), \mu(e)\}$ when $v \in e$; also $\mu(e) = \min\{\phi(e), \min_{u \in e} \sigma(u)\} \leq \min_{u \in e} \sigma(u)$. For any fixed $t \in (0, 1]$, $\mathcal{E}^{[t]} \subseteq \mathcal{P}^*(V)$, hence $(V, \mathcal{E}^{[t]})$ is an n-SuperHyperGraph. □

Definition 2.22 (2-section and level-cuts)**.** For a crisp $(V, \mathcal{E})$, its *2-section* is the simple graph $[V, \mathcal{E}]_2 = (V, E_2)$ with $uv \in E_2 \;\Leftrightarrow\; \{u, v\} \in \mathcal{E}$ $(u \neq v)$. For a fuzzy edge map μ, the *t-cut* of edges is $\mathcal{E}^{[t]} := \{e : \mu(e) \geq t\}$, and the *$t$-cut 2-section* is $[V, \mathcal{E}^{[t]}]_2$.

Theorem 2.23 (Generalization to Fuzzy Tolerance Hypergraph)**.** *When* $n = 0$*,* $\mathfrak{S}_{\mathrm{FT}}^{(0)}$ *is exactly a* fuzzy tolerance hypergraph *on the (ordinary) vertex set* V *with the same* (σ, μ, η)*.*

Proof. For $n = 0$ we have $V \subseteq V_0$ (ordinary vertices). Definitions 2.17–2.18 coincide with the fuzzy tolerance hypergraph construction on V; in particular, $\phi(e)$ compares the multiway interval overlap with the minimum tolerance across e, and μ, η are the standard admissible fuzzy hypergraph maps. □

Theorem 2.24 (Generalization to Tolerance SuperHypergraph via 1-cut)**.** *Assume all* $\mathcal{I}_v, \mathcal{T}_v$ *are* crisp *intervals and* $h(\mathcal{I}_v) = h(\mathcal{T}_v) = 1$ *for every* v *(so* $\sigma \equiv 1$*). Then the* 1*-cut* $(V, \mathcal{E}^{[1]})$ *of* $\mathfrak{S}_{\mathrm{FT}}^{(n)}$ *is precisely the* tolerance superhypergraph *whose superedges are those* e *with*

$$\ell\Big(\bigcap_{v \in e} I_v\Big) \;\geq\; \min_{v \in e} t_v,$$

where $I_v := c(\mathcal{I}_v) = s(\mathcal{I}_v)$ *and* $t_v := \ell\big(c(\mathcal{T}_v)\big) = \ell\big(s(\mathcal{T}_v)\big)$*.*

Proof. Under the crisp assumptions, for every e the score $\phi(e) = \max\{\rho(L_c(e), \tau_c(e)), \rho(L_s(e), \tau_s(e))\}$ equals 1 if and only if $L_c(e) \geq \tau_c(e)$ or $L_s(e) \geq \tau_s(e)$, i.e. the common overlap length of the (equal) core/support intervals meets the minimum tolerance. Since $\sigma \equiv 1$, we have $\mu(e) = \min\{\phi(e), 1\} = \phi(e)$; thus $\mu(e) \geq 1$ iff the tolerance condition holds. Therefore $\mathcal{E}^{[1]} = \{e : \phi(e) = 1\}$ is exactly the desired tolerance superhyperedge set. □

Theorem 2.25 (Generalization to Fuzzy Tolerance Graph)**.** *For any* $n \in \mathbb{N}_0$*, define a fuzzy graph on* V *by*

$$\Xi^{(n)} = (V,\ \sigma,\ \mu_2), \qquad \mu_2(u, v) := \mu(\{u, v\}) \quad (u \neq v).$$

Then $\Xi^{(n)}$ *is a* fuzzy tolerance graph*. In the crisp, unit-height case of Theorem 2.24, the* 1*-cut of* $\Xi^{(n)}$ *is the (classical) tolerance graph induced by* $\{(I_v, t_v)\}$*.*

Proof. By Definition 2.17, for $e = \{u, v\}$ we have

$$\mu_2(u,v) \;=\; \min\Big\{\, \max\big\{\rho(\ell(I_u \cap I_v),\, \min\{t_u, t_v\}),\; \dots\big\},\; \sigma(u), \sigma(v)\Big\},$$

which is the standard fuzzy tolerance overlap (possibly using both core/support channels), normalized by vertex heights. Hence $\Xi^{(n)}$ is a fuzzy tolerance graph. In the crisp, unit-height case, $\mu_2(u,v) \geq 1$ iff $\ell(I_u \cap I_v) \geq \min\{t_u, t_v\}$, so the 1-cut yields the classical tolerance graph. □

Theorem 2.26 (Underlying SuperHyperGraph)**.** *For any threshold $t \in (0,1]$, the t-cut $(V, \mathcal{E}^{[t]})$ of $\mathfrak{S}^{(n)}_{\mathrm{FT}}$ is an n-SuperHyperGraph (hence FTSHGs refine the notion of superhypergraph).*

Proof. This is the second statement of Theorem 2.21. □

3. Conclusion

As the conclusion of this paper, the following theorem is obtained.

Theorem 3.1 (Summary of generalizations)**.** *Let $\mathfrak{S}^{(n)}_{\mathrm{FT}} = (V, \mathcal{E}; \sigma, \mu, \eta)$ be a Fuzzy Tolerance SuperHypergraph (FTSHG) as in Definitions* (fuzzy interval/tolerance, multiway overlap ϕ, and FTSHG) *with $V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$ finite. Then:*

$$\textit{FTSHG} \implies \begin{cases} \text{Fuzzy Tolerance Hypergraph} & \textit{when } n = 0, \\ \text{Tolerance SuperHypergraph} & \textit{in the crisp/unit-height case at the 1-cut}, \\ \text{Fuzzy Tolerance Graph} & \textit{via the 2-section } \mu_2(u,v) := \mu(\{u,v\}), \\ n\text{-SuperHyperGraph} & \textit{for every } t \in (0,1] \textit{ by the edge } t\textit{-cut } \mathcal{E}^{[t]}. \end{cases}$$

Proof. We verify each arrow rigorously.
(a) FTSHG ⇒ Fuzzy Tolerance Hypergraph (case $n = 0$). If $n = 0$, then $V \subseteq V_0$ is an ordinary vertex set. By definition,

$$\mathcal{E} \;=\; \{\, e \subseteq V :\; |e| \geq 2 \,\}, \qquad \mu(e) \;=\; \min\Big\{\; \phi(e),\; \min_{v \in e} \sigma(v)\Big\},$$

with

$$\phi(e) \;=\; \max\Big\{\; \rho(L_c(e), \tau_c(e)),\; \rho(L_s(e), \tau_s(e))\Big\} \in [0,1],$$

where $L_\bullet(e)$ is the (core/support) common-overlap length and $\tau_\bullet(e)$ is the minimum (core/support) tolerance across e. This is exactly the fuzzy tolerance *hyper*edge construction on an ordinary vertex set; $\eta(v,e) = \mu(e)$ for $v \in e$ and 0 otherwise gives the standard admissible incidence. Hence $\mathfrak{S}^{(0)}_{\mathrm{FT}}$ is a fuzzy tolerance hypergraph.

(b) FTSHG $\Rightarrow$ Tolerance SuperHypergraph (crisp, unit-height, 1-cut). Assume each $\mathcal{I}_v$ and $\mathcal{T}_v$ is a crisp interval, and $h(\mathcal{I}_v) = h(\mathcal{T}_v) = 1$, so $\sigma \equiv 1$. Then for any $e \subseteq V$,

$$\rho(x, a) = \min\{1, x/a\} \in \{0, 1\} \quad \text{with } a > 0,$$

so

$$\phi(e) = 1 \iff L_c(e) \geq \tau_c(e) \text{ or } L_s(e) \geq \tau_s(e).$$

Because $\sigma \equiv 1$, we have $\mu(e) = \min\{\phi(e), 1\} = \phi(e)$, hence

$$\mu(e) \geq 1 \iff \phi(e) = 1 \iff \ell\Big(\bigcap_{v \in e} I_v\Big) \geq \min_{v \in e} t_v,$$

where $I_v = c(\mathcal{I}_v) = s(\mathcal{I}_v)$ and $t_v = \ell\big(c(\mathcal{T}_v)\big) = \ell\big(s(\mathcal{T}_v)\big)$. Therefore the 1-cut $\mathcal{E}^{[1]} = \{e : \mu(e) \geq 1\}$ is precisely the tolerance-superedge set, yielding the (crisp) Tolerance SuperHyperGraph $(V, \mathcal{E}^{[1]})$.

(c) FTSHG $\Rightarrow$ Fuzzy Tolerance Graph (2-section via μ_2). Define a fuzzy graph on V by $\mu_2(u, v) := \mu(\{u, v\})$ for $u \neq v$. Then

$$\mu_2(u, v) = \min\Big\{ \max\big\{\rho\big(\ell(c(\mathcal{I}_u) \cap c(\mathcal{I}_v)),$$

$$\min\{\ell(c(\mathcal{T}_u)), \ell(c(\mathcal{T}_v))\}\big),\ \rho\big(\ell(s(\mathcal{I}_u) \cap s(\mathcal{I}_v)),\ \min\{\ell(s(\mathcal{T}_u)), \ell(s(\mathcal{T}_v))\}\big)\big\},\ \sigma(u), \sigma(v)\Big\},$$

which is the standard fuzzy tolerance edge-membership: a normalized overlap (core/support channels) bounded by vertex heights. Hence the 2-section is a Fuzzy Tolerance Graph; in the crisp, unit-height setting of (b), its 1-cut is the classical tolerance graph.

(d) FTSHG $\Rightarrow$ n-SuperHyperGraph (edge t-cuts). For any fixed $t \in (0, 1]$, define

$$\mathcal{E}^{[t]} := \{\, e \in \mathcal{E} : \ \mu(e) \geq t \,\}.$$

Then $\mathcal{E}^{[t]} \subseteq \mathcal{P}^*(V)$ and $V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$ by hypothesis, so $(V, \mathcal{E}^{[t]})$ is an n-SuperHyperGraph (finite, loopless, with nonempty superedges). This shows every FTSHG yields an n-SuperHyperGraph at each level-cut.

Collecting (a)–(d) gives the claimed boxed implications. □

In the future, it is expected that further investigations will be conducted on extended systems employing Intuitionistic Fuzzy Sets [42,43], Hyper Fuzzy Sets [44–46], Hesitant Fuzzy Sets [47, 48], Neutrosophic Sets [49–51], MultiNeutrosophic Sets [52, 53], and Plithogenic Sets [54–56].

Funding

This study did not receive any financial or external support from organizations or individuals.

Acknowledgments

We extend our sincere gratitude to everyone who provided insights, inspiration, and assistance throughout this research. We particularly thank our readers for their interest and acknowledge the authors of the cited works for laying the foundation that made our study possible. We also appreciate the support from individuals and institutions that provided the resources and infrastructure needed to produce and share this paper. Finally, we are grateful to all those who supported us in various ways during this project.

Data Availability

This research is purely theoretical, involving no data collection or analysis. We encourage future researchers to pursue empirical investigations to further develop and validate the concepts introduced here.

Research Integrity

The authors hereby confirm that, to the best of their knowledge, this manuscript is their original work, has not been published in any other journal, and is not currently under consideration for publication elsewhere at this stage.

Use of Generative AI and AI-Assisted Tools

I use generative AI and AI-assisted tools for tasks such as English grammar checking, and I do not employ them in any way that violates ethical standards.

Disclaimer (Note on Computational Tools)

No computer-assisted proof, symbolic computation, or automated theorem proving tools (e.g., Mathematica, SageMath, Coq, etc.) were used in the development or verification of the results presented in this paper. All proofs and derivations were carried out manually and analytically by the authors.

Code Availability

No code or software was developed for this study.

Clinical Trial

This study did not involve any clinical trials.

Ethical Approval

As this research is entirely theoretical in nature and does not involve human participants or animal subjects, no ethical approval is required.

Conflicts of Interest

The authors confirm that there are no conflicts of interest related to the research or its publication.

Disclaimer

This work presents theoretical concepts that have not yet undergone practical testing or validation. Future researchers are encouraged to apply and assess these ideas in empirical contexts. While every effort has been made to ensure accuracy and appropriate referencing, unintentional errors or omissions may still exist. Readers are advised to verify referenced materials on their own. The views and conclusions expressed here are the authors' own and do not necessarily reflect those of their affiliated organizations.

References

[1] Claude Berge. *Hypergraphs: combinatorics of finite sets*, volume 45. Elsevier, 1984.

[2] Alain Bretto. Hypergraph theory. *An introduction. Mathematical Engineering. Cham: Springer*, 1, 2013.

[3] Florentin Smarandache. *Extension of HyperGraph to n-SuperHyperGraph and to Plithogenic n-SuperHyperGraph, and Extension of HyperAlgebra to n-ary (Classical-/Neutro-/Anti-) HyperAlgebra*. Infinite Study, 2020.

[4] Reinhard Diestel. *Graph theory*. Springer (print edition); Reinhard Diestel (eBooks), 2024.

[5] Jonathan L Gross, Jay Yellen, and Mark Anderson. *Graph theory and its applications*. Chapman and Hall/CRC, 2018.

[6] Yue Gao, Yifan Feng, Shuyi Ji, and Rongrong Ji. Hgnn+: General hypergraph neural networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(3):3181–3199, 2022.

[7] Yue Gao, Zizhao Zhang, Haojie Lin, Xibin Zhao, Shaoyi Du, and Changqing Zou. Hypergraph learning: Methods and practices. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(5):2548–2566, 2020.

[8] Julio Cesar Méndez Bravo, Claudia Jeaneth Bolanos Piedrahita, Manuel Alberto Méndez Bravo, and Luis Manuel Pilacuan-Bonete. Integrating smed and industry 4.0 to optimize processes with plithogenic n-superhypergraphs. *Neutrosophic Sets and Systems*, 84:328–340, 2025.

[9] Mohammad Hamidi, Florentin Smarandache, and Elham Davneshvar. Spectrum of superhypergraphs via flows. *Journal of Mathematics*, 2022(1):9158912, 2022.

[10] Mohammad Hamidi, Florentin Smarandache, and Mohadeseh Taghinezhad. *Decision Making Based on Valued Fuzzy Superhypergraphs*. Infinite Study, 2023.

[11] Berrocal Villegas Salomón Marcos, Montalvo Fritas Willner, Berrocal Villegas Carmen Rosa, Flores Fuentes Rivera María Yissel, Espejo Rivera Roberto, Laura Daysi Bautista Puma, and Dante Manuel Macazana Fernández. Using plithogenic n-superhypergraphs to assess the degree of relationship between information skills and digital competencies. *Neutrosophic Sets and Systems*, 84:513–524, 2025.

[12] Shouxian Zhu. Neutrosophic n-superhypernetwork: A new approach for evaluating short video communication effectiveness in media convergence. *Neutrosophic Sets and Systems*, 85:1004–1017, 2025.

[13] Mohammad Hamidi and Mohadeseh Taghinezhad. *Application of Superhypergraphs-Based Domination Number in Real World*. Infinite Study, 2023.

[14] E. J. Mogro, J. R. Molina, G. J. S. Canas, and P. H. Soria. Tree tobacco extract (*Nicotiana glauca*) as a plithogenic bioinsecticide alternative for controlling fruit fly (*Drosophila immigrans*) using *n*-superhypergraphs. *Neutrosophic Sets and Systems*, 74:57–65, 2024.

[15] Adel Al-Odhari. Neutrosophic power-set and neutrosophic hyper-structure of neutrosophic set of three types. *Annals of Pure and Applied Mathematics*, 31(2):125–146, 2025.

[16] Thomas Jech. *Set theory: The third millennium edition, revised and expanded*. Springer, 2003.

[17] Florentin Smarandache. The cardinal of the m-powerset of a set of n elements used in the superhyperstructures and neutrosophic superhyperstructures. *Systems Assessment and Engineering Management*, 2:19–22, 2024.

[18] Ajoy Kanti Das, Rajat Das, Suman Das, Bijoy Krishna Debnath, Carlos Granados, Bimal Shil, and Rakhal Das. A comprehensive study of neutrosophic superhyper bci-semigroups and their algebraic significance. *Transactions on Fuzzy Sets and Systems*, 8(2):80, 2025.

[19] Florentin Smarandache. *SuperHyperFunction, SuperHyperStructure, Neutrosophic SuperHyperFunction and Neutrosophic SuperHyperStructure: Current understanding and future directions*. Infinite Study, 2023.

[20] Florentin Smarandache. *Introduction to the n-SuperHyperGraph-the most general form of graph today*. Infinite Study, 2022.

[21] Lotfi A Zadeh. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353, 1965.

[22] Lotfi A Zadeh. Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. In *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A Zadeh*, pages 775–782. World Scientific, 1996.

[23] Hans-Jürgen Zimmermann. *Fuzzy set theory—and its applications*. Springer Science & Business Media, 2011.

[24] TM Nishad, Talal Ali Al-Hawary, and B Mohamed Harif. General fuzzy graphs. *Ratio Mathematica*, 47, 2023.

[25] Azriel Rosenfeld. Fuzzy graphs. In *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*, pages 77–95. Elsevier, 1975.

[26] Talal Al-Hawary. Complete fuzzy graphs. *International Journal of Mathematical Combinatorics*, 4:26, 2011.

[27] Mahdi Farshi and Bijan Davvaz. Generalized fuzzy hypergraphs and hypergroupoids. *Filomat*, 30(9):2375–2387, 2016.

[28] Sovan Samanta and Madhumangal Pal. Bipolar fuzzy hypergraphs. *International Journal of Fuzzy Logic Systems*, 2(1):17–28, 2012.

[29] Muhammad Akram and Anam Luqman. Fuzzy hypergraphs and related extensions. In *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2020.

[30] John N Mordeson and Premchand S Nair. *Fuzzy graphs and fuzzy hypergraphs*, volume 46. Physica, 2012.

[31] Mohammed Alqahtani. Intuitionistic fuzzy quasi-supergraph integration for social network decision making. *International Journal of Analysis and Applications*, 23:137–137, 2025.

[32] Muhammad Akram and Anam Luqman. *Fuzzy hypergraphs and related extensions*. Springer, 2020.

[33] Leonid S Bershtein and Alexander V Bozhenyuk. Fuzzy graphs and fuzzy hypergraphs. In *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, pages 704–709. IGI Global, 2009.

[34] Martin Charles Golumbic and Ann N Trenk. *Tolerance graphs*, volume 89. Cambridge University Press, 2004.

[35] George B Mertzios, Ignasi Sau, and Shmuel Zaks. The recognition of tolerance and bounded tolerance graphs. *SIAM Journal on Computing*, 40(5):1234–1257, 2011.

[36] Petr A Golovach, Pinar Heggernes, Nathan Lindzey, Ross M McConnell, Vinícius Fernandes dos Santos, Jeremy P Spinrad, and Jayme Luiz Szwarcfiter. On recognition of threshold tolerance graphs and their complements. *Discrete Applied Mathematics*, 216:171–180, 2017.

[37] Martin Charles Golumbic, Clyde L Monma, and William T Trotter Jr. Tolerance graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 9(2):157–170, 1984.

[38] Martin Charles Golumbic and Robert E Jamison. Rank-tolerance graph classes. *Journal of Graph Theory*, 52(4):317–340, 2006.

[39] Madhumangal Pal, Sovan Samanta, and Ganesh Ghorai. Fuzzy tolerance graphs. In *Modern Trends in Fuzzy Graph Theory*, pages 153–173. Springer, 2020.

[40] Sankar Das, Ganesh Ghorai, and Madhumangal Pal. Picture fuzzy tolerance graphs with application. *Complex & Intelligent Systems*, 8(1):541–554, 2022.

[41] Sankar Sahoo and Madhumangal Pal. Intuitionistic fuzzy tolerance graphs with application. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 55(1):495–511, 2017.

[42] Krassimir T Atanassov and G Gargov. *Intuitionistic fuzzy logics*. Springer, 2017.

[43] Muhammad Akram, Bijan Davvaz, and Feng Feng. Intuitionistic fuzzy soft k-algebras. *Mathematics in Computer Science*, 7:353–365, 2013.

[44] Jayanta Ghosh and Tapas Kumar Samanta. Hyperfuzzy sets and hyperfuzzy group. *Int. J. Adv. Sci. Technol*, 41:27–37, 2012.

[45] Takaaki Fujita. *Advancing Uncertain Combinatorics through Graphization, Hyperization, and Uncertainization: Fuzzy, Neutrosophic, Soft, Rough, and Beyond*. Biblio Publishing, 2025.

[46] Young Bae Jun, Kul Hur, and Kyoung Ja Lee. Hyperfuzzy subalgebras of bck/bci-algebras. *Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics*, 2017.

[47] Vicenç Torra and Yasuo Narukawa. On hesitant fuzzy sets and decision. In *2009 IEEE international conference on fuzzy systems*, pages 1378–1382. IEEE, 2009.

[48] Vicenç Torra. Hesitant fuzzy sets. *International journal of intelligent systems*, 25(6):529–539, 2010.

[49] Haibin Wang, Florentin Smarandache, Yanqing Zhang, and Rajshekhar Sunderraman. *Single valued neutrosophic sets*. Infinite study, 2010.

[50] Said Broumi, Mohamed Talea, Assia Bakali, and Florentin Smarandache. Single valued neutrosophic graphs. *Journal of New theory*, (10):86–101, 2016.

[51] Florentin Smarandache and Maissam Jdid. An overview of neutrosophic and plithogenic theories and applications. 2023.

[52] Eduardo Martín Campoverde Valencia, Jessica Paola Chuisaca Vásquez, and Francisco Ángel Becerra Lois. Multineutrosophic analysis of the relationship between survival and business growth in the manufacturing sector of azuay province, 2020–2023, using plithogenic n-superhypergraphs. *Neutrosophic Sets and Systems*, 84:341–355, 2025.

[53] Florentin Smarandache. *Introduction to the multineutrosophic set*. Infinite Study, 2023.

[54] Florentin Smarandache. *Plithogenic set, an extension of crisp, fuzzy, intuitionistic fuzzy, and neutrosophic sets-revisited*. Infinite study, 2018.

[55] WB Vasantha Kandasamy, K Ilanthenral, and Florentin Smarandache. *Plithogenic Graphs*. Infinite Study, 2020.

[56] Fazeelat Sultana, Muhammad Gulistan, Mumtaz Ali, Naveed Yaqoob, Muhammad Khan, Tabasam Rashid, and Tauseef Ahmed. A study of plithogenic graphs: applications in spreading coronavirus disease (covid-19) globally. *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, 14(10):13139–13159, 2023.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of the publisher and/or the editor(s). This publisher and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury

to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Análisis de Estrategias de Mitigación de Riesgos en el Sector Retail. Aplicación de Métodos AHP y TOPSIS

Analysis of Risk Mitigation Strategies in the Retail Sector. Application of AHP and TOPSIS Methods.

Jonathan Vera Macias[1*], Fernando Eduardo Alvarado Véliz[2], Marco Antonio Arguello Arguello[3],

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador (UBE), Durán, EcuadorORCID: 0009-0007-5002-638X,

jkveram@ube.edu.ec

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador (UBE), Durán, EcuadorORCID: 0009-0004-0779-4832,
fealvaradov@ube.edu.ec

[3]Universidad Bolivariana del Ecuador (UBE), Durán, EcuadorORCID: 0009-0006-9093-7690,
maarguelloa@ube.edu.ec

Resumen:

El sector retail enfrenta un panorama complejo marcado por riesgos operacionales que impactan directamente en su sostenibilidad y rentabilidad. Problemas como los errores en inventarios, los fraudes en caja o las fallas en la distribución generan pérdidas económicas significativas y comprometen la confianza de los consumidores. En un mercado cada vez más competitivo, caracterizado por clientes exigentes y una presión constante hacia la eficiencia, se vuelve indispensable identificar y seleccionar estrategias de mitigación de riesgos que sean efectivas y adaptables. La literatura previa ofrece aproximaciones parciales, ya que gran parte de los estudios no integran de manera estructurada la priorización objetiva de alternativas bajo criterios múltiples, lo que limita la toma de decisiones fundamentada. Este trabajo aborda esa brecha mediante la aplicación combinada de los métodos Analytic Hierarchy Process (AHP) y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), herramientas multicriterio que permiten ponderar factores como costos, impacto, tiempo y riesgo residual. Los resultados revelan que las soluciones tecnológicas, específicamente el control avanzado de inventarios y la automatización de reportes, superan a la capacitación intensiva en cuanto a reducción de pérdidas y eficiencia operativa. En consecuencia, la investigación no solo aporta un modelo replicable para otros sectores, sino también directrices prácticas para fortalecer la resiliencia del retail.

Palabras clave: Retail, Riesgos Operacionales, AHP, TOPSIS, Multicriterio, Mitigación, Eficiencia.

Abstract:

The retail sector faces a complex landscape marked by operational risks that directly impact its sustainability and profitability. Problems such as inventory errors, checkout fraud, and distribution failures generate significant economic losses and jeopardize consumer confidence. In an increasingly competitive market characterized by demanding customers and constant pressure for efficiency, it is essential to identify and select effective and adaptable risk mitigation strategies. Previous literature offers partial approaches, as most studies do not integrate a structured, objective prioritization of alternatives under multiple criteria, which limits informed decision-making. This work addresses this gap through the combined application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) methods, multi-criteria tools that allow for weighing factors such as cost, impact, time, and residual risk. The results reveal that technological solutions, specifically advanced inventory control and report automation, outperform intensive training in terms of loss reduction and operational efficiency. Consequently, the research not only provides a replicable model for other sectors, but also practical guidelines for strengthening retail resilience.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Keywords: Retail, Operational Risks, AHP, TOPSIS, Multi-criteria, Mitigation, Efficiency.

1. Introducción.

El sector retail constituye un pilar esencial en la economía global, ya que conecta directamente a los consumidores con bienes y servicios de primera necesidad. Sin embargo, este ámbito enfrenta riesgos operacionales recurrentes, como pérdidas por fallos en inventarios, fraudes en puntos de venta y deficiencias logísticas, que afectan la sostenibilidad y competitividad de las empresas [1]. En un entorno caracterizado por la digitalización y la alta competencia, gestionar dichos riesgos no es una opción, sino una obligación estratégica para garantizar eficiencia, resiliencia y confianza del cliente [2]. Abordar esta problemática exige metodologías que permitan comparar alternativas bajo criterios múltiples, evitando decisiones basadas únicamente en la intuición.

Históricamente, la gestión de riesgos en retail se apoyaba en controles básicos de inventario y auditorías financieras periódicas; sin embargo, la creciente complejidad de las cadenas de suministro y la dependencia de tecnologías digitales han intensificado la necesidad de enfoques más sofisticados [3]. A lo largo de la última década, métodos multicriterio como el Analytic Hierarchy Process (AHP) y el Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) se han posicionado como herramientas efectivas para evaluar alternativas en escenarios de incertidumbre [4]. Estos métodos permiten integrar aspectos tangibles, como costos y tiempos de implementación, con factores más abstractos, como impacto o riesgo residual, aportando un marco de análisis estructurado y transparente.

El problema central que se plantea en este estudio es la falta de un enfoque integral que oriente a las cadenas minoristas en la priorización de estrategias de mitigación de riesgos. Aunque se han propuesto iniciativas de mejora en logística o en capacitación, la literatura evidencia que pocos trabajos comparan de manera rigurosa distintas soluciones bajo parámetros objetivos [5]. La pregunta que guía esta investigación puede formularse de la siguiente manera: ¿qué estrategia de mitigación de riesgos resulta más efectiva para el sector retail cuando se consideran criterios múltiples relacionados con costo, impacto, tiempo de ejecución y nivel de riesgo residual? Resolver esta cuestión es relevante no solo para reducir pérdidas económicas, sino también para reforzar la sostenibilidad del sector.

Con este propósito, el artículo propone la aplicación conjunta de AHP y TOPSIS para evaluar tres alternativas: un sistema avanzado de control de inventarios, programas de capacitación intensiva y la automatización de reportes. Los objetivos del estudio son, en primer lugar, jerarquizar los criterios de decisión en función de su relevancia; en segundo lugar, establecer un ranking objetivo de las alternativas; y finalmente, ofrecer lineamientos prácticos para la implementación escalonada de las medidas seleccionadas. Estos objetivos están alineados con la literatura existente y buscan no solo cerrar la brecha teórica en el análisis multicriterio de riesgos operacionales en retail, sino también aportar un marco metodológico replicable en otros sectores [6]–[8].

2. Preliminares.

2.1. Mitigación de Riesgos en el Sector Retail.

Mitigar riesgos en el sector retail representa hoy día una tarea esencial debido al elevado volumen de pérdidas que enfrentan los comercios, ya sea por robos, devoluciones fraudulentas, rupturas de inventario o disrupciones en la cadena de suministro. Los minoristas lidian con amenazas tanto internas como externas: hurtos en tiendas, fraudes en línea, fallos logísticos, e incluso riesgos reputacionales. Por lo tanto, implementar estrategias efectivas no solo cuida el margen de beneficio, sino también la fidelidad del cliente y la continuidad operacional. Además, la transformación digital y los cambios en los hábitos de consumo intensifican esos riesgos, lo que obliga a repensar los mecanismos preventivos tradicionales. Reconocer la gravedad del problema es indispensable antes de diseñar políticas convencionales o innovadoras.

Desde una perspectiva histórica, la prevención de pérdidas (loss prevention) ha sido en muchas organizaciones una función ligada al control físico: vigilancia en tienda, cierres seguros, auditorías periódicas. Con el tiempo, se añadió tecnología: sistemas de alarma, cámaras CCTV, lectores RFID. No obstante, recientes crisis globales como la pandemia han mostrado cuán frágiles pueden ser los modelos basados solo en medidas visibles, físicas. En paralelo, la literatura ha avanzado hacia la integración de herramientas analíticas, inteligencia artificial y modelos predictivos que permiten anticipar patrones de riesgo y responder proactivamente.

La naturaleza del problema se articula en una pregunta clave: ¿cómo pueden los minoristas

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

diseñar e implementar estrategias integrales de mitigación de riesgo que consideren tanto la prevención tradicional como las tecnologías emergentes, optimizando recursos y reduciendo pérdidas operativas y financieras? El alcance engloba distintos tipos de riesgo: fraude de devoluciones, interrupciones en la cadena de suministro, robos internos, fallos de inventario, amenazas digitales. Importa asimismo determinar qué combinaciones de medidas resultan más eficaces en distintos contextos: tiendas físicas, comercio electrónico, modelos omnicanal.

Analizar estrategias diversas revela que no existe solución única, sino un portafolio de intervenciones ajustables. Algunas empresas adoptan procedimientos estandarizados de control interno y capacitación del personal; otras priorizan sistemas de monitoreo en tiempo real, análisis de datos masivos (big data) o aprendizaje automático para detectar anomalías. En muchos casos, la prevención anticipada, mediante mapeo de riesgos y análisis predictivo, ha mostrado mejores resultados que reaccionar a incidentes ya ocurridos. Sin embargo, esas estrategias exigen inversión, adaptación organizacional y compromiso de liderazgo.

En cuanto a fraudes de devoluciones, estudios recientes señalan que intervenciones de política, cambios en los procedimientos internos y ajustes en términos de devolución pueden disminuir significativamente pérdidas [9]. La adaptación de los sistemas de devolución no solo debe centrarse en la lógica financiera, sino también incorporar la percepción del consumidor, puesto que medidas demasiado estrictas pueden generar descontento o abandono de marca. Por consiguiente, el equilibrio entre control y experiencia de usuario emerge como componente crítico en la mitigación de riesgos de este tipo.

Para riesgos relacionados con interrupciones de la cadena de suministro, como desabastecimientos, subidas repentinas de demanda o cierre temporal de instalaciones, el modelado cuantitativo de disrupciones ha sido útil para evaluar vulnerabilidades, estimar impactos y definir respuestas óptimas [10]. Estas respuestas pueden incluir diversificación de proveedores, políticas de stock de seguridad, acuerdos contractuales que contemplen cláusulas de respaldo, así como decisiones estratégicas basadas en escenarios de contingencia. Este enfoque permite preparar a la empresa para eventos inesperados, reduciendo su exposición.

Otra dimensión relevante son los riesgos digitales y de fraude en línea. Retailers con presencia e-commerce sufren pérdidas importantes por transacciones dudosas, robo de datos, devoluciones abusivas. Métodos puestos en práctica implican minería de datos para identificar patrones sospechosos, uso de modelos de clasificación automáticos, autenticaciones fuertes, entre otros [11]. Además, las medidas de ciberseguridad y cumplimiento regulatorio (como estándares de protección de datos) se han convertido en parte indispensable del conjunto de mitigación, dado que fallos en este ámbito pueden derivar en sanciones legales y pérdida de reputación.

Sin embargo, cada estrategia trae consigo costos, barreras de implementación y dilemas éticos. ¿Cuánta vigilancia intrusiva es aceptable para los clientes? ¿Hasta qué punto la automatización sustituye juicio humano sin generar falsos positivos? ¿Cómo balancear inversión tecnológica con retorno tangible a corto plazo? Estas preguntas requieren evaluación cuidadosa de impacto, tolerancia al riesgo, cultura organizacional, y alineación con los valores de la marca.

Finalmente, valorar la eficacia de estas prácticas significa no solo medir disminución de pérdidas monetarias, sino también mejorar confiabilidad operativa, satisfacción del cliente, imagen corporativa, e incluso sostenibilidad. Las empresas que adoptan un enfoque holístico logran resiliencia: están mejor posicionadas para adaptarse a cambios del mercado y enfrentar crisis. En definitiva, la mitigación de riesgos en retail ya no es un complemento, sino un elemento estratégico, cuyo diseño e implementación pueden definir la supervivencia o declive de los negocios en un entorno competitivo.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2.2. Métodos AHP y TOPSIS

Los métodos Analytic Hierarchy Process (AHP) y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) son herramientas de decisión multicriterio ampliamente utilizadas para priorizar alternativas cuando múltiples criterios deben considerarse simultáneamente. AHP facilita la estructuración jerárquica de criterios y subcriterios, permitiendo comparaciones pareadas que reflejan el juicio experto. Por su parte, TOPSIS ordena las alternativas según su cercanía a la solución ideal positiva y su distancia de la solución negativa. Combinados, estos métodos aprovechan lo mejor de cada uno: AHP para asignar pesos de criterios de modo transparente y consistente; TOPSIS para generar rankings claros y comprensibles. En la literatura científica, esta dupla se aprecia en estudios de localización comercial, evaluación de servicios y selección de proveedores [13].

Una de las ventajas de AHP está en su capacidad para capturar tanto criterios cuantitativos como cualitativos. Mediante comparaciones pareadas (e.g. escala de Saaty), los decisores pueden reflejar sus preferencias relativas, algo útil cuando algunos criterios no son fácilmente medibles. AHP también incorpora una medida de consistencia (Índice y ratio de consistencia), que advierte si los juicios son demasiado contradictorios. No obstante, la subjetividad puede introducir sesgos; exigencias de juicio experto y complejidad creciente con muchos criterios/subcriterios pueden hacer que la matriz de comparaciones se vuelva difícil de manejar y comprobar [14].

Por otro lado, TOPSIS ofrece una evaluación directa comparativa: cada alternativa se evalúa en función de qué tan cercana está al "ideal positivo" y cuánto se aleja del "ideal negativo". Su facilidad de interpretación resulta atractiva para gestores que necesitan rankings operativos, visuales y rápidos. Además, TOPSIS suele ser menos costoso en términos computacionales que extender AHP con muchas comparaciones pareadas. Sin embargo, enfrenta limitaciones: la calidad de sus resultados depende fuertemente de cómo se normalizan los datos y de si los pesos asignados reflejan adecuadamente la realidad del problema [14].

Al ligar ambos métodos, se logra una metodología híbrida donde AHP puede definir los pesos de los criterios y TOPSIS ordenar las opciones con esos pesos. Este enfoque híbrido ha sido ampliamente documentado: estudios muestran que la combinación aporta mayor confiabilidad que usar cada método aisladamente [13], [15]. Además, en investigaciones aplicadas, se observan mejoras en la transparencia del proceso decisorio, pues los pasos son rastreables y verificables. Para contextos como retail, donde los riesgos operacionales y costos asociados son múltiples y difusos, esa transparencia es esencial.

Evaluando el desempeño del método híbrido, algunas investigaciones indican que AHP-TOPSIS maneja mejor la diversidad de criterios heterogéneos; permite ponderaciones detalladas y rankings sensibles al cambio de escenarios. Pero también señalan que su aplicación exige mayor esfuerzo de recolección de datos, validación de juicios y análisis de sensibilidad. La sensibilidad al cambio en los pesos del criterio es un aspecto crítico: pequeñas variaciones pueden afectar significativamente el orden resultante, especialmente cuando algunas alternativas tienen puntuaciones similares [15].

Otro punto relevante se refiere al manejo de la incertidumbre y los datos imprecisos. En esos casos, variantes difusas del AHP (Fuzzy AHP) o combinaciones con técnicas como la entropía han sido desarrolladas para mitigar la ambigüedad en los juicios subjetivos [15]. Estas extensiones permiten capturar grados de incertidumbre, suavizar el sesgo humano y producir rankings que reflejen mejor la volatilidad o variabilidad intrínseca del entorno. Sin embargo, las versiones difusas traen consigo complejidad matemática mayor, mayor demanda de datos y necesidad de herramientas especializadas [16].

El uso de AHP y TOPSIS también plantea consideraciones prácticas: los decisores deben asegurarse de que los criterios seleccionados sean relevantes, mutuamente independientes y medibles/aplicables. Si un criterio es irrelevante o redundante, puede distorsionar los pesos en AHP y afectar la normalización en TOPSIS. Asimismo, la elección de escala para las comparaciones pareadas y la escogencia de técnicas de normalización influyen directamente en los resultados finales [16].

Valorando los beneficios frente a los costos, AHP-TOPSIS emerge como una herramienta potente para la toma de decisiones estratégicas donde se requieren prioridades claras. En retail, por ejemplo, para decidir qué estrategias de mitigación de riesgo adoptar (tecnología, capacitación, automatización), esta metodología permite asignar valor y orden con base en criterios diversos como costo, impacto, tiempo y fiabilidad residual [13], [14].

Finalmente, consideraciones éticas y organizacionales también surgen: los juicios expertos pueden tener sesgos implícitos; ciertos criterios pueden favorecer alternativas que excluyen recursos humanos, etc. Por ello, se recomienda no solo aplicar AHP-TOPSIS, sino complementarlo con auditorías internas, revisiones participativas y

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

validaciones externas, para asegurar que la decisión sea justa, transparente y aceptada por los stakeholders [15], [16].

3. Resultados del Análisis AHP

Matriz de Comparación y Pesos de Criterios

El análisis AHP permitió calcular los pesos relativos de los criterios. La distribución final fue la siguiente:

Table 1: Pesos obtenidos mediante AHP

Criterio	Peso	Porcentaje
Impacto en reducción de pérdidas	0.40	40%
Costo de implementación	0.30	30%
Tiempo de implementación	0.15	15%
Riesgo residual	0.15	15%

Análisis de Consistencia

El ´ındice de consistencia (CR) obtenido fue de 6%, valor inferior al 10% recomendado. Esto confirma que los juicios de comparación entre criterios fueron coherentes y confiables.

Interpretación de los Pesos

El criterio más relevante fue el impacto en la reducción de pérdidas (40%), lo que refleja la prioridad de disminuir pérdidas económicas directas. El costo (30%) también tuvo un peso importante, seguido por factores de tiempo y riesgo residual (ambos con 15%).

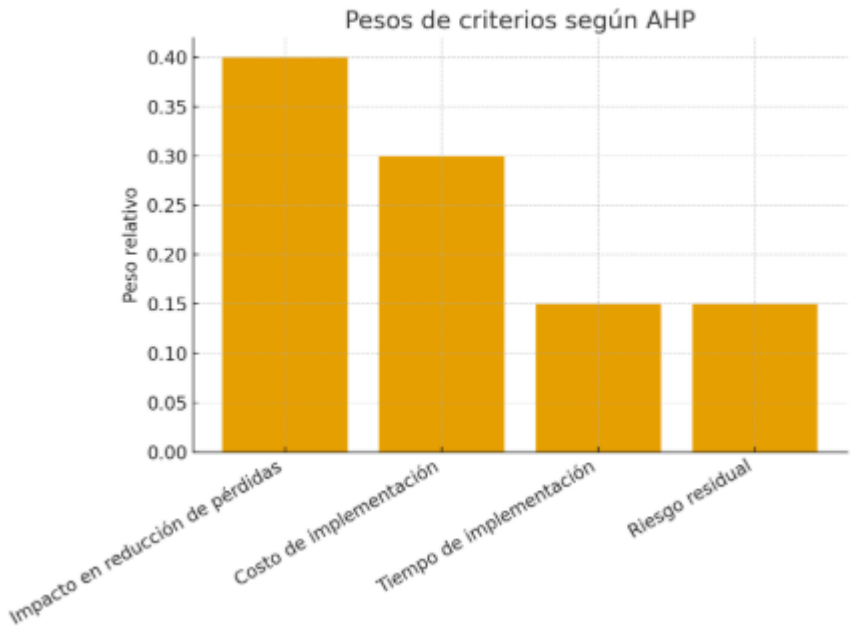


Gráfico 1: Resultados del Análisis AHP.

Resultados del Análisis TOPSIS

Matriz de Decisión

La evaluación de las alternativas se realizó con los valores de la Tabla 2.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Table 2: Matriz de decisión de alternativas

Alternativa	Costo (USD)	Impacto (%)	Tiempo (d´ıas)	Riesgo (1–10)
A1	12000	18	30	6
A2	9000	14	45	5
A3	15000	22	25	7

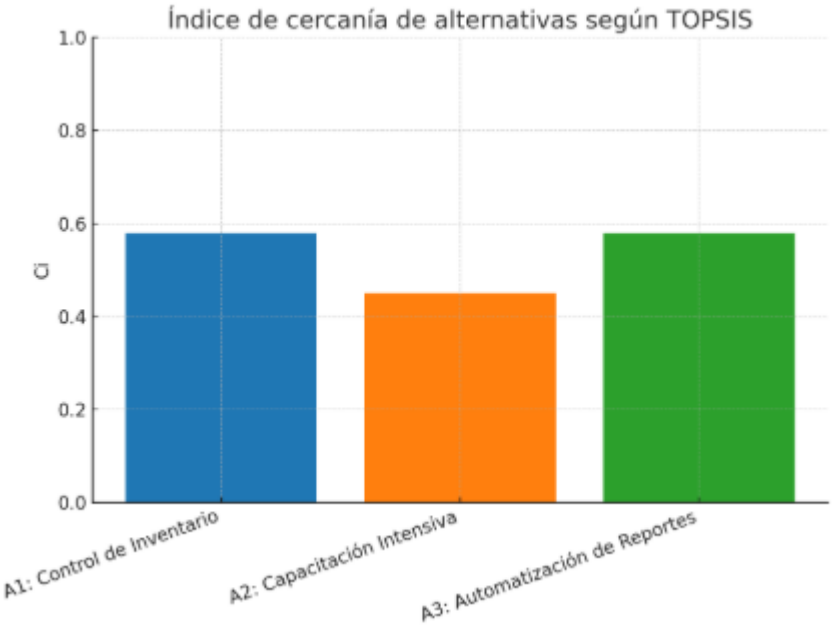


Gráfico 2: Resultados del Análisis TOPSIS

Ranking Final

Los resultados de TOPSIS, con base en los pesos calculados por AHP, se muestran en la Tabla 3.

El ranking final muestra que A1 (control de inventario) y A3 (automatización de reportes) son las alternativas más recomendables, ambas con un índice de cercanía de 0.58. A2 (capacitación intensiva) quedó en tercer lugar con un valor de 0.45.

Table 3: Resultados del modelo TOPSIS

Alternativa	S^+	S^-	C_i
A1	0.045	0.062	0.58
A2	0.067	0.055	0.45
A3	0.052	0.071	0.58

4. Discusión

Los resultados obtenidos a través de la integración de AHP y TOPSIS permiten reflexionar sobre la importancia de aplicar métodos multicriterio en la selección de estrategias de mitigación de riesgos en el sector retail. La evidencia indica que los criterios con mayor peso fueron el impacto en la reducción de pérdidas y el costo de implementación, lo cual revela una clara orientación hacia la búsqueda de eficiencia financiera y operativa. Este hallazgo es consistente con la realidad de las empresas minoristas, donde los márgenes de ganancia suelen ser estrechos y las pérdidas por errores o fraudes pueden comprometer seriamente la sostenibilidad.

Un aspecto destacable es que las alternativas tecnológicas, representadas por el control avanzado de inventarios (A1) y la automatización de reportes (A3), obtuvieron los mejores índices de cercanía. Esto sugiere que las soluciones basadas en tecnología ofrecen un beneficio superior al permitir detectar irregularidades en tiempo real, optimizar la gestión de stock y reducir la dependencia de procesos manuales sujetos a errores humanos. En contraste, la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

capacitación intensiva (A2), aunque relevante, mostró menor impacto inmediato en la reducción de pérdidas, reflejando que las intervenciones humanas requieren más tiempo para traducirse en resultados tangibles.

El estudio también pone en evidencia la necesidad de adoptar un enfoque equilibrado. Si bien la tecnología puede constituir la columna vertebral de la mitigación de riesgos, no debe obviarse la dimensión humana. Los sistemas automatizados son efectivos, pero su funcionamiento depende del uso correcto por parte del personal y de una cultura organizacional orientada a la prevención. Por ello, la capacitación, aun con menor peso en el ranking, no puede ser descartada, sino considerada como un complemento estratégico.

Asimismo, los resultados aportan un punto de partida para generalizar la metodología a otros escenarios. El modelo AHP-TOPSIS no solo permite jerarquizar alternativas en retail, sino que también puede aplicarse en ámbitos como gestión de recursos humanos, logística internacional o análisis financiero. Su flexibilidad metodológica refuerza el valor del estudio y abre nuevas líneas de investigación para examinar cómo evolucionan los pesos de los criterios cuando se modifican los contextos de riesgo.

5. Conclusiones y Recomendaciones

1. **Conclusiones**
   - La combinación de AHP y TOPSIS constituye una herramienta robusta y coherente para evaluar alternativas de mitigación de riesgos en el sector retail, al integrar criterios cuantitativos y cualitativos en un marco estructurado.
   - El criterio con mayor peso fue el impacto en la reducción de pérdidas (40%), lo que refleja la prioridad que las empresas otorgan a la disminución directa de pérdidas económicas.
   - Las soluciones tecnológicas (A1 y A3) demostraron ser las más eficaces, destacando el control avanzado de inventarios y la automatización de reportes como medidas prioritarias.
   - La capacitación intensiva (A2), pese a ocupar un lugar inferior en el ranking, se considera una medida complementaria necesaria para asegurar la sostenibilidad de las soluciones tecnológicas.
2. **Recomendaciones**
   - **Implementación escalonada**: adoptar primero un sistema de control avanzado de inventarios (A1), seguido de la automatización de reportes (A3) y finalmente programas de capacitación (A2) para reforzar la cultura de prevención.
   - **Enfoque integral**: no limitar la estrategia a la dimensión tecnológica; se recomienda acompañar las inversiones en sistemas con programas de sensibilización y formación del personal.
   - **Monitoreo continuo**: establecer métricas de desempeño para evaluar la efectividad de las medidas adoptadas, ajustando los criterios de decisión según la evolución del contexto.
   - **Replicabilidad metodológica**: aplicar el modelo AHP-TOPSIS en otras áreas del negocio, como compras o logística, para ampliar la visión estratégica de gestión de riesgos.
   - **Futuras investigaciones**: explorar el uso de modelos híbridos que integren AHP, TOPSIS y técnicas basadas en inteligencia artificial para mejorar la capacidad predictiva frente a escenarios de incertidumbre.

6. Referencias

[1] S. J. Chapman and S. Ward (2019), *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*, 3rd ed. Wiley. doi: 10.1002/9781119442270.

[2] M. Christopher and H. Peck (2012), *Marketing Logistics*, 2nd ed. Routledge. doi: 10.4324/9781315848378.

[3] D. Waters (2011), *Supply Chain Risk Management: Vulnerability and Resilience in Logistics*. Kogan Page. doi: 10.4324/9780749463939.

[4] T. L. Saaty (2008), *Decision Making with the Analytic Hierarchy Process*. Int. J. Services Sciences, vol. 1, no. 1, pp. 83–98. doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.

[5] C. L. Hwang and K. Yoon (1981), *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9.

[6] E. Triantaphyllou (2000), *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer. doi: 10.1007/978-1-4757-3157-6.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[7] D. Ivanov, A. Dolgui, and B. Sokolov (2019), "The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics," *Int. J. Production Research*, vol. 57, no. 3, pp. 829–846. doi: 10.1080/00207543.2018.1488086.

[8] M. Brandenburg, K. Govindan, J. Sarkis, and S. Seuring (2014), "Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 233, no. 2, pp. 299–312. doi: 10.1016/j.ejor.2013.09.032.

[9] E. Zhang, R. Frei, D. Merlano, E. Murzacheva y S. Wood (2024), «Consumer perspectives on interventions to combat fraudulent product returns in omnichannel fashion retail», *Int. J. Physical Distribution & Logistics Management*. doi: 10.1108/IJPDLM-02-2024-0082 Emerald

[10] H. Ivanov, O. Dolgui y B. Sokolov (2023), «Modelling and analysing supply chain disruption: a case of online grocery retailer», *Operations Management Research*, vol. 16, pp. 1901-1924. doi: 10.1007/s12063-023-00405-9 SpringerLink

[11] T. Knuth y D. Ahrholdt (2022), «Consumer Fraud in Online Shopping: Detecting Risk Indicators through Data Mining», *Int. J. Electronic Commerce*, vol. 26, no. 3, pp. 388-411. doi: 10.1080/10864415.2022.2076199 Taylor & Francis Online

[12] M. Suregka Felix y S. Sashikala (2022), «Supply Chain Risk Management In Retail Industry: A Systematic Review», *J. Finance, Business and Management Studies*, vol. 2, no. 1, pp. 73-79. doi: 10.26713/jfbms.v2i1.2182

[13] M. Rahman (2024), "Comparative Analysis of AHP and TOPSIS Methods in Retail Business Location Selection Decision Support System", *Journal Electrical and Computer Experiences*, vol. 2, no. 2, pp. 52-57. doi: 10.59535/jece.v2i2.355 Tinta Emas Journal

[14] W. Sekar Jatiningrum, S. N. A. R. Utami (2023), "Applying AHP-TOPSIS Approach for Selecting Marketplace based on Preferences of Generation Z", *OPSI*, vol. 15, no. 1. doi: 10.31315/opsi.v15i1.6824 Jurnal UPN Veteran Yogyakarta

[15] P. Kumar, R. K. Singh (2012), "A fuzzy AHP and TOPSIS methodology to evaluate 3PL in a supply chain", *Journal of Modelling in Management*, vol. 7, no. 3, pp. 287-303. doi: 10.1108/17465661211283287 Emerald

[16] A. Ishak, R. Ginting, W. Wanli (2021), "Evaluation of e-commerce services quality using Fuzzy AHP and TOPSIS", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1041. doi: 10.1088/1757-899X/1041/1/012042 IOPscience

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning , Vol. 41, 2025
University of New Mexico

Análisis Neutrosófico de las Conductas Disruptivas en Niños de 6 a 8 Años y su Impacto en el Rendimiento Académico: Aplicación del Método de Hipótesis Plitogénica.

Neutrosophic Analysis of Disruptive Behaviors in Children Aged 6 to 8 Years and Its Impact on Academic Performance: Application of the Plithogenic Hypothesis Method.

María Leonor Atiencie Gutiérrez[1], Natalia Elizabeth Lojano Patiño[2], Erika Gabriela Alava Jimènez[3], Cindy Gabriela Ortega Garcia[4]

[1]Unidad Educativa Abdón Calderón, Guayaquil, Guayas, Ecuador. maría.atiencie@educacion.gob.ec, https://orcid.org/0009-0000-5373-6298
[2]Unidad Educativa Abdón Calderón, Guayaquil, Guayas, Ecuador. natalia.lojano@educacion.gob.ec, https://orcid.org/0009-0008-9022-0272
[3]Unidad Educativa Abdón Calderón, Guayaquil, Guayas, Ecuador. erikag.alava@educacion.gob.ec, https://orcid.org/0009-0006-7921-3093
[4]Unidad Educativa Abdón Calderón, Guayaquil, Guayas, Ecuador. cindy.ortega@educacion.gob.ec

Resumen:
Este estudio examina las conductas disruptivas en niños de 6 a 8 años de la Unidad Educativa Abdón Calderón, ubicada en Guayaquil, Guayas, Ecuador, y su influencia en el rendimiento académico. La relevancia de este tema radica en su impacto en el aprendizaje y el ambiente escolar, especialmente en contextos urbanos como Guayaquil, donde los desafíos educativos son acuciantes. Aunque numerosos estudios han abordado las conductas disruptivas, pocos han integrado la incertidumbre y los múltiples factores que las caracterizan, dejando una brecha en el análisis multidimensional. Para abordar esta limitación, se aplicó el método de hipótesis plitogénica, basado en la neutrosofía, que modela la indeterminación y contradicciones en los datos comportamentales. Los resultados indican que comportamientos como la impulsividad y la falta de atención en estudiantes de la Unidad Educativa Abdón Calderón afectan negativamente el desempeño en matemáticas y lectura. Este trabajo contribuye al campo educativo al proponer un marco analítico innovador que captura la complejidad de estas interacciones, ofreciendo además estrategias prácticas de intervención para docentes y psicólogos en contextos ecuatorianos. Así, el estudio enriquece la teoría educativa y proporciona herramientas aplicables para mejorar el rendimiento académico en escuelas locales.

Palabras clave: conductas disruptivas, rendimiento académico, neutrosofía, hipótesis plitogénica, niños, educación, Ecuador..

Abstract:

This study examines disruptive behaviors in 6- to 8-year-old children at the Abdón Calderón Educational Unit, located in Guayaquil, Guayas, Ecuador, and their influence on academic performance. The relevance of this topic lies in its impact on learning and the school environment, especially in urban contexts such as Guayaquil, where educational challenges are pressing. Although numerous studies have addressed disruptive behaviors, few have integrated uncertainty and the multiple factors that characterize them, leaving a gap in multidimensional analysis. To address this limitation, the plithogenic hypothesis method, based on neutrosophic, was applied, which models indeterminacy and contradictions in behavioral data. The results indicate that behaviors such as impulsivity and inattention in students at the Abdón Calderón Educational Unit negatively affect performance in mathematics and reading. This work contributes to the educational field by proposing an innovative analytical framework that captures the complexity of these interactions, also offering practical intervention strategies for teachers and psychologists in Ecuadorian contexts. Thus, the study enriches educational theory and provides applicable tools to im-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

prove academic performance in local schools.

Keywords: Disruptive Behaviors, Academic Performance, Neutrosophic, Plithogenic Hypothesis, Children, Education, Ecuador.

1. Introducción

Las conductas disruptivas en niños de 6 a 8 años constituyen un problema crítico en entornos escolares, particularmente en la Unidad Educativa Abdón Calderón, Guayaquil, Guayas, Ecuador, donde afectan el clima del aula y el desarrollo académico. Comportamientos como la impulsividad, las interrupciones y la desatención dificultan el aprendizaje y generan retos para los docentes. La relevancia de este tema se acentúa en contextos urbanos como Guayaquil, donde las dinámicas sociales y educativas demandan soluciones efectivas. Investigaciones recientes vinculan estas conductas con un menor rendimiento en áreas fundamentales como matemáticas y lectura [1]. Además, en un sistema educativo que busca promover la equidad y el bienestar, abordar estos comportamientos resulta imperativo. La evidencia sugiere que las conductas disruptivas no solo impactan a los estudiantes, sino que también incrementan el estrés docente [2]. Este estudio, al emplear un enfoque neutrosófico, busca comprender cómo estas conductas afectan el desempeño académico en un contexto ecuatoriano específico. Su importancia radica en su potencial para informar políticas educativas locales. Por ello, esta investigación es crucial para diseñar estrategias que mejoren el aprendizaje. El enfoque innovador de este trabajo ofrece una perspectiva novedosa para enfrentar este desafío.

El estudio de las conductas disruptivas en niños ha evolucionado desde enfoques punitivos hacia perspectivas que integran factores psicológicos, sociales y culturales [3]. En las últimas décadas, la investigación ha destacado cómo estos comportamientos afectan el rendimiento académico, especialmente en la educación primaria [4]. En el contexto de Ecuador, donde la Unidad Educativa Abdón Calderón refleja las realidades de muchas escuelas urbanas, las conductas disruptivas se han convertido en un foco de atención. Desde los años 90, los sistemas educativos han buscado estrategias para mitigar estos comportamientos, pero los enfoques tradicionales suelen ignorar la complejidad de los factores involucrados [5]. Globalmente, estudios han mostrado que las conductas disruptivas están asociadas con entornos escolares estresantes y bajos resultados académicos [6]. En Guayaquil, los desafíos socioeconómicos y culturales añaden capas adicionales de complejidad a este problema. La investigación reciente subraya la necesidad de enfoques multidimensionales para abordar estas conductas [7]. Sin embargo, la falta de herramientas que manejen la incertidumbre y las contradicciones en los datos ha limitado los avances. Este estudio busca responder a esa necesidad con un enfoque innovador. Así, se contextualiza en una trayectoria histórica que demanda soluciones adaptadas al entorno local.

Este estudio aborda la pregunta: ¿cómo influyen las conductas disruptivas en el rendimiento académico de niños de 6 a 8 años en la Unidad Educativa Abdón Calderón, Guayaquil, Guayas, Ecuador? Estos comportamientos, que incluyen falta de atención, interrupciones y actitudes desafiantes, perturban el proceso educativo y afectan habilidades clave como la lectura y las matemáticas [8]. En el contexto ecuatoriano, donde las escuelas enfrentan recursos limitados y alta diversidad estudiantil, este problema adquiere una relevancia particular. Los enfoques tradicionales han fallado en capturar la multiplicidad de factores que influyen en estas conductas, como el entorno familiar o las dinámicas del aula. La magnitud de este desafío es evidente, ya que afecta no solo a los estudiantes, sino también a los docentes y al sistema educativo en su conjunto. La pregunta de investigación surge de la necesidad de comprender estas interacciones en un entorno específico como Guayaquil. Este estudio propone un análisis neutrosófico para abordar la indeterminación inherente a este fenómeno. Al hacerlo, busca generar conocimiento relevante para el contexto local. La pregunta guía el diseño metodológico y los objetivos del artículo.

El propósito principal de este estudio es analizar la influencia de las conductas disruptivas en el rendimiento académico de niños de 6 a 8 años en la Unidad Educativa Abdón Calderón, utilizando el método de hipótesis plitogénica basado en la neutrosofía. Se busca identificar las conductas disruptivas más frecuentes, como la impulsividad y la desatención, y evaluar su impacto en áreas académicas clave. Otro objetivo es modelar la complejidad de esta relación, considerando la indeterminación y las contradicciones presentes en los datos [9]. Además, el estudio pretende proponer estrategias de intervención personalizadas para docentes y psicólogos en el contexto ecuatoriano. Este enfoque innovador supera las limitaciones de los métodos tradicionales al integrar la neutrosofía. Los objetivos están alineados con la pregunta de investigación, buscando generar conocimiento teórico y práctico. También se espera que los resultados informen políticas educativas locales en Guayaquil. El estudio combina rigor metodológico con aplicaciones prácticas para el aula. En síntesis, los objetivos guían la ex-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ploración de este problema complejo. La investigación aspira a transformar la práctica educativa en la Unidad Educativa Abdón Calderón.

2. Preliminares.

2.1. El Problema De La Investigación

El tema propuesto es: "Las conductas disruptivas en niños de 6 a 8 años de la Escuela Abdón Calderón Garaicoa de la ciudad de Pasaje y su incidencia en el rendimiento académico." Se lo plantea en virtud de la experiencia diaria vivida en las aulas de clases en el nivel primario y en virtud de diálogos con docentes del nivel que hacen mención a esta problemática que impide el normal desarrollo de clases para dedicar un considerable tiempo a remediar problemas con ciertos estudiantes, impidiendo el normal flujo de las clases y dañando el ambiente escolar que debe ser óptimo para poder desarrollar un aceptable proceso de enseñanza.

Los procesos disruptivos son variados y se debe hacer una descripción pormenorizada de los mismos desde un enfoque local, es decir ubicando el estudio en el cantón Pasaje, provincia de El Oro, en una escuela de la zona, Abdón Calderón Garaicoa, con el fin de conocer cuales inciden con mayor frecuencia en el rendimiento de los estudiantes.

En virtud de todo lo puntualizado, se puede comprobar que el tema propuesto posee actualidad y es factible su tratamiento porque el nivel de EGB Elemental constituye un pilar fundamental en la clase de estudiantes y ciudadanos que serán en el futuro.

Formulación del problema

Para caracterizar el problema se debe considerar primeramente el factor comportamental denominado conducta disruptiva que desde el planteamiento de [9] se propone la siguiente clasificación que se ha procedido a adaptar a la realidad evidenciada en la escuela Abdón Calderón del cantón Pasaje:

Las primeras son conductas que interrumpen el estudio, es decir, niños que hablan sin permiso con otro(a) compañero(a), o bien que caminan por el aula sin permiso, molestan a sus compañeros(as), hacen ruidos molestos durante la case (tamborilea con los dedos, canta, silba, etc.), gritan en clase con o sin motivo, hacen tareas distintas a las asignadas por el profesor en la clase, se dedican a una actividad que no es requerida ni por la tarea ni por el docente, comen en clase sin permiso, juegan durante la clase sin permiso, desobedece abiertamente una orden del maestro, y por último, interrumpen la clase para hacer reír o llamar la atención.

La segunda es la conducta de falta de responsabilidad del estudiante consistente en sustraer cosas de sus compañeros y apropiárselas, y, por último, evadir las responsabilidades y cuando el docente las solicita, se hace el desentendido(a).

Por último, las conductas perturbadoras de las relaciones sociales en clase que consisten en la agresión física a sus pares dentro o fuera del aula, la utilización de lenguaje (groserías), insultos a sus pares, insultos al profesor (a sus espaldas o delante de este), y por último la participación en juegos o tocamientos de tipo sexual.

Justificación

El problema planteado relaciona dos factores que son de actualidad en, posiblemente, todas las instituciones educativas del Ecuador que se ven desbordadas por los innumerables problemas que generan los estudiantes con conductas disruptivas en todos los niveles educativos.

Según lo que afirman [10] se aplica en toda su extensión "la disciplina escolar es en la actualidad una de las principales preocupaciones a las que se enfrenta el profesorado tanto de enseñanza primaria como de secundaria" (p.3), con lo cual un estudio in situ resulta altamente recomendable porque los resultados del mismo servirán de base para futuros estudios y, sobre todo, para dar forma a intervenciones especializadas que remedien la situación. Desde un punto de vista social, la presente investigación, dará inicio a un proceso de conocimiento de este problema en el cantón Pasaje, gracias a lo cual, se espera que los estudios sobre el problema vayan aumentando paulatinamente en el futuro; y no solo eso, sino que paralelamente se construyan las condiciones de ofrecer

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

soluciones. Este propósito implica un mejoramiento de la sociedad a largo plazo por la mejora académica y conductual de los estudiantes que en algún momento ocuparán cargos políticos en la sociedad, liderarán empresas o estarán al frente de la familia que formen.

Actualmente el estado invierte cierta cantidad de dinero en la formación de cada estudiante y se espera que cada uno de ellos rinda al máximo, no obstante, la realidad es otra, razón por la cual se puede afirmar que el estado pierde lo invertido y debe invertir más todavía en su esfuerzo por garantizar la educación de toda la población. Es razonable inferir, entonces, que todo esfuerzo que se haga para mejorar este panorama es valioso y necesario.

Desde el punto de vista metodológico y científico, se abordará el estudio mediante investigación mixta que considere metodología cualitativa y cuantitativa. La edad de los niños representa un problema porque aplicar encuestas que deben responder por escrito es probable que las realicen mal o no comprendan el propósito de hacerlo, razón por la cual la aplicación de una ficha de observación sería lo más aconsejable. Se considerará dos formas básicas de acercarse al problema, consistentes, primeramente, en la determinación de la frecuencia de conductas disruptivas en las clases y qué clase de conductas disruptivas se producen. Paralelamente entrevistará a los docentes con el fin de determinar desde su enfoque, las conductas disruptivas que se producen y su frecuencia, de donde se podrá concluir la incidencia o no de la disrupción escolar sobre el rendimiento.

Formulación de hipótesis y determinación de variables

De acuerdo con todo lo expuesto, la hipótesis a defender es la siguiente: El rendimiento escolar de los niños ubicados en el nivel EGB Elemental de la escuela Abdón Calderón del cantón Pasaje, provincia de El Oro, durante el periodo comprendido entre los meses de mayo a julio del año lectivo 2023-2024.

Variable Independiente: Conducta disruptiva.
Se empleará el siguiente cuadro de indicadores para la variable Conducta disruptivas, expuesto por [9] adaptado a la realidad del sector y a lo que se ha podido evidenciar en la escuela Abdón Calderón.

Tabla 1
Variable independiente; conducta disruptiva.

DIMENSIONES	INDICADORES
Interrumpir el estudio	a. Hablar sin permiso con otro(a) compañero(a) b. Caminar por el aula sin permiso c. Molestar a sus compañeros(as) d. Hacer ruidos molestos durante la case (tamborilea con los dedos, canta, silba, etc.) e. Gritar en clase con o sin motivo f. Comer en clase sin permiso g. Jugar durante la clase sin permiso h. Desobedecer abiertamente una orden del maestro i. Interrumpir la clase para hacer reír o llamar la atención.
Falta de responsabilidad	a. Sustraer cosas de sus compañeros y apropiárselas b. Evadir las responsabilidades y cuando el docente las solicita, se hace el desentendido(a). c. Hacer tareas distintas a las asignadas por el profesor en la clase
Perturbar relaciones sociales	a. Agredir físicamente a sus pares dentro o fuera del aula b. Utilizar lenguaje soez (groserías) c. Insultar a sus pares d. Insultar al profesor (a sus espaldas o delante de este) e. Participar en juegos o tocamientos de tipo sexual.

Tabla 2
Variable dependiente; rendimiento escolar

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El rendimiento escolar se manifiesta en las calificaciones que se obtiene, por lo que se debe considerar lo que manifiesta el Reglamento a la LOEI, en el Artículo 27, respecto a las calificaciones que los estudiantes pueden obtener y que demuestran el rendimiento alcanzado:

DIMENSIÓN	INDICADORES
Calidad del aprendizaje	a. Destreza o aprendizaje alcanzado b. Destreza o aprendizaje en proceso de desarrollo c. Destreza o aprendizaje iniciado

Antecedentes de la investigación

Establece que los factores que intervienen en las conductas disruptivas poseen varios condicionantes de índole social y familiar, principalmente la escasa comunicación con sus familiares. Se concluye también que el castigo posee especial importancia tanto para los docentes como para los padres de familia, cuestión que descubre algo que pocos quieren afirmar en sus trabajos.

En este artículo se mide factores de estrés que los estudiantes estarían experimentando en la escuela y condicionando la aparición de conductas disruptivas. Es notable la conclusión respecto a que las niñas resisten más el estrés y por lo tanto demuestran menos CD. Esto trae como conclusión que a los niños se les debe prestar más atención en lo que a temas de autoestima y rendimiento escolar.

Contexto Internacional

Este artículo establece al docente como el encargado directo de gestionar problemas de conductas disruptivas aplicando las estrategias a tiempo, motivando al estudiante y generando un ambiente de aprendizaje óptimo. En este marco, aconseja observar las causas de las conductas disruptivas para seleccionar los estímulos, aportar normas y valores de disciplina, respeto y tolerancia, compañerismo y la amistad entre compañeros. Con esto deja claro cuál es el real papel del docente en el marco de una educación tolerante e inclusiva, centrada en el desarrollo de seres humanos vulnerables. [11] Conductas disruptivas en el aula en niños de 5 y 6 años (Tesis de grado en Educción Inicial).

Se propone además aplicar estrategias lúdicas para comparar luego los resultados en atención al rendimiento escolar. Comprueba que, en efecto, las conductas disruptivas tienen un efecto determinante en el rendimiento escolar, pero ligadas a factores como la labor del docente en lo que se refiere al control, la planificación y las técnicas aplicadas, y, finalmente, al entorno familiar de los niños.

Contexto nacional

En esta tesis el problema consiste en cómo incide la evaluación del aprendizaje en las conductas disruptivas de la citada escuela y cantón. Se concluye que un deficiente proceso de evaluación podría desmotivar a los estudiantes y generar conductas disruptivas, sin llegar a demostrar plenamente la relación que existiría entre las dos variables planteadas.

En este trabajo se pone énfasis en las relaciones entre estudiantes en el marco de una educación inclusiva. Se establece que a más de verse afectados los niños con conductas disruptivas, también se verían afectados otros niños que comparten el aula de clases. Se considera a las conductas disruptivas como necesidades educativas especiales (NEE), debiendo ser tratadas como disponen las normativas legales para esas situaciones. Esta cuestión tiene su lógica en la intervención inmediata y esperada que el docente debe dar a través de un enfoque emocional y pedagógico.

2.2. Bases teóricas conceptuales de la investigación

2.2.1. Variables de investigación

La variable independiente: conducta disruptiva engloba una serie de dimensiones cuyos indicadores son los comportamientos concretos demostrados por los estudiantes en el aula. La dimensión: conductas que inte-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

rrumpen el estudio, [12] la define como aquellas "acciones que interrumpen el ritmo de la clase como: ruidos, chistes, burlas, gritos, golpes".

La dimensión conductas que interrumpen el estudio contienen los siguientes indicadores:

- Hablar sin permiso con otro(a) compañero(a)
- Caminar por el aula sin permiso
- Molestar a sus compañeros(as)
- Hacer ruidos molestos durante la case (tamborilea con los dedos, canta, silba, etc.)
- Gritar en clase con o sin motivo
- Comer en clase sin permiso
- Jugar durante la clase sin permiso
- Desobedecer abiertamente una orden del maestro
- Interrumpir la clase para hacer reír o llamar la atención.

2.2.2 Variables referentes al rendimiento escolar

El rendimiento escolar de acuerdo con la legislación ecuatoriana se manifiesta en las calificaciones que se obtiene, por lo que se debe considerar lo que manifiesta el Reglamento a la LOEI 2021, en el Artículo 27, respecto a las calificaciones que los estudiantes de EGB Elemental pueden obtener y que demuestran el rendimiento alcanzado. Dentro de esta variable se han establecido los siguientes indicadores de rendimiento escolar:

- Destreza o aprendizaje alcanzado
- Destreza o aprendizaje en proceso de desarrollo
- Destreza o aprendizaje iniciado.

De acuerdo con el documento de Actualización y fortalecimiento curricular de la Educación Básica 2010, emitido por Ministerio de Educación del Ecuador, el concepto destreza es definido como "la expresión del saber hacer en los estudiantes, que caracteriza el dominio de una acción". Paralelamente a esto se debe considerar también el criterio de desempeño que expresa el nivel de dificultad en que se debe realizar la acción enunciada en la destreza.

Teorías más actuales relacionadas con el tema

- [13] "La situación que le corresponde vivir en el salón de clase a diario al maestro es un reto que parecería infranqueable, sobre todo por tener que asumir la atención a más de la diversidad del alumnado a niños y jóvenes con comportamientos poco convencionales y que convierten a la escuela un espacio de desahogo emocional".
- [14] "La indisciplina convencional se refiere a la conducta que no se ajusta a las normas, costumbres o a los estándares de una sociedad determinada". En otras palabras, ubicándose en un nivel macro se trata del comportamiento de una persona que hace que una persona no sea vista como buena, agradable o respetuosa ante los ojos de la sociedad. La indisciplina instruccional, o sea las conductas disruptivas operan en un nivel micro, es decir en "el marco de la educación formal"
- [15] plantea una relación entre conductas disruptivas y la autoestima y desarrollo emocional de los estudiantes, determinando que "las niñas puntúan más alto en autoestima, comprensión emocional, estabilidad emocional y sensibilidad, presentando los niños una mayor dureza y también un mayor número de las conductas disruptivas", cuestión que tiene especial importancia puesto que en el presente trabajo una de las variables es el sexo.
- Según [14] los actos de indisciplina pueden violentar normas como: "llegar tarde o faltar a clase, deteriorar el material, desordenar el mobiliario, comer en clase, vestirse con indumentaria estrafalaria, ocasionar ruido o gritos, y faltar al orden en las salidas y entradas de clase". O bien, la tarea en sí misma: "no traer los deberes, rehusar llevar a cabo las tareas en clase, proferir comentarios vejatorios, mostrar poco interés, pasividad e inactividad, preguntar insistentemente con el ánimo de retrasar o interrumpir"
- [16] [17],[18]. En este último autor se insiste en la "falta de control de los padres sobre sus hijos como la causa directa que afecta todo el entorno social.

✓ **Medidas de remediación**

En este sentido Andrade establece la necesidad de intervenir a tiempo para corregir a tiempo al niño, previa observación de las posibles causas. Uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta en la solución de las conductas disruptivas es el fomento del respeto, el compañerismo y la tolerancia. Como alternativa de intervención, previa constatación de los problemas de autoestima y desarrollo emocional que demuestran los niños frente a las niñas se plantean lo siguiente:

- proporcionar estrategias adecuadas de resolución de problemas, desarrollar un autoconcepto positivo y mejorar la competencia social incrementando la tolerancia y el respeto a la diversidad.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- [19] "Los docentes adquieran las estrategias adecuadas para conocer a su futura alumnado, tengan una educación emocional que permita actuar con serenidad y madure ante las provocaciones de aquellos que intenta llamar la atención, o conocer y saber utilizar de forma adecuada las técnicas de modificación de conducta y cognitivas".
- Se debe fomentar las relaciones interpersonales a través de la comunicación y confianza entre los docentes y los estudiantes.
- [20] quien establece la necesidad de establecer un abordaje multidisciplinar con la participación de toda la comunidad educativa y la necesidad de elaborar un manual de actividades lúdicas que le sirva al docente como apoyo para la resolución de problemas de conductas disruptivas.
- El caso de [9] quien clasifica en tres grupos:
  "Conductas que interrumpen el estudio que engloban lo siguiente: habla sin permiso con otro(a) compañero(a), camina por el aula sin permiso, molesta a sus compañeros(as), hace ruidos molestos durante la case (tamborilea con los dedos, canta, silba, etc.) Cuando los futuros docentes reflexionan sobre este problema, concuerdan en establecer".

✓ **Medidas de remediación**

Las conductas disruptivas como aquellas que manifiestan desmotivación escolar, desobediencia, llamadas de atención y falta de autocontrol dentro del aula". De aquí que se enfoque la solución del problema en el docente que desde su etapa de formación de debe conocer este tipo de problemas, reflexionar sobre ellos de manera que sepa darles el tratamiento que requieren.

Los docentes deben condicionar su labor educativa dirigida a la disciplina del alumnado. Se debe fomentar las relaciones interpersonales a través de la comunicación y confianza entre los docentes y los estudiantes. Finalmente, se debe organizar actividades por medio de la planificación de didácticas y estrategias de motivación dentro y fuera del aula escolar, entre otras, que permitan mejorar el rendimiento escolar.

Del Cid determina en su trabajo las causas del bajo rendimiento escolar en dos factores que oscilan entre las familias y la metodología aplicada en el aula, insistiendo en que el docente tiene el mando y es quien debe conducir el proceso acertadamente.

2.3 Bases legales que fundamentan el estudio

En el CAPÍTULO 1. Principios fundamentales, Artículo 3 Numeral 1 de la constitución de la República del Ecuador, 2008, con enmiendas hasta 2021, se estipula lo siguiente:

"Garantizar sin discriminación alguna el efectivo goce de los derechos establecidos en la Constitución y en los instrumentos internacionales, en particular la educación, la salud, la alimentación, la seguridad social y el agua para sus habitantes".

CAPÍTULO 2. Derechos del buen vivir, SECCIÓN 5, estableciendo en el Art. 26:

"La educación es un derecho de las personas a lo largo de su vida y un deber ineludible del Estado. Constituye un área prioritaria de la política pública y de la inversión estatal, garantía de la igualdad e inclusión social y condición indispensable para el buen vivir".

El Art. 27, establece:

"La educación se centrará en el ser humano y garantizará su desarrollo holístico, en el marco del respeto a los derechos humanos, al medio ambiente sustentable y a la democracia; será participativa, obligatoria, intercultural, democrática, incluyente y diversa, de calidad y calidez; impulsará la equidad de género, la justicia, la solidaridad y la paz; estimulará el sentido crítico, el arte y la cultura física, la iniciativa individual y comunitaria, y el desarrollo de competencias y capacidades para crear y trabajar. La educación es indispensable para el conocimiento, el ejercicio de los derechos y la construcción de un país soberano, y constituye un eje estratégico para el desarrollo nacional"

En el Art. 2.2 se establece en el Literal a: "la valoración de la situación concreta y las particularidades individuales que inciden en el ejercicio pleno de sus derechos, así como la consideración de los contextos, situaciones y necesidades particulares de un determinad niño, niña o adolescente o grupo de niños, niñas o adolescentes".

La educación, formación e instrucción de las niñas, niños y adolescentes demanda corresponsabilidad en el esfuerzo compartido de estudiantes, familias, docentes, centros educativos, comunidad, instituciones del Estado.

El Art. 7. Derechos de las y los estudiantes, se establece los siguientes que se consideran pertinentes al presente trabajo

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

a. Ser actores fundamentales en el proceso educativo,

b. Recibir una formación integral y científica, que contribuya al pleno desarrollo de su personalidad, capacidades y potencialidades, respetando sus derechos, libertades fundamentales y promouien.do la igualdad de género, la no discriminación, la valoración de las diversidades, la participación, autonomía y cooperación;

c. Ser tratado con justicia, dignidad, sin discriminación, con respeto a su diversidad individual, cultural, sexual y lingüística, a sus convicciones ideológicas, políticas y religiosas, y a sus derechos y libertades fundamentales garantizados en la Constitución de la República, tratados e instrumentos internacionales y la Ley;

d. Intervenir en el proceso de evaluación interna y externa como parte y finalidad de su proceso educativo, sin discriminación de ninguna naturaleza;

e. Recibir gratuitamente servicios de carácter social, psicológico.

El Art. 8. Obligaciones y responsabilidades de los estudiantes, señala las siguientes que son pertinentes para el presente trabajo:

"a. Cumplir con las actividades académico-formativas programadas, tareas y responsabilidades obligaciones derivadas del proceso de enseñanza y aprendizaje, de acuerdo con la reglamentación correspondiente a la modalidad educativa, salvo los casos de situación de vulnerabilidad en los cuales se pueda reconocer mecanismos de flexibilización;

b. Participar en la evaluación de manera permanente a través de procesos internos y externos que validen la calidad de la educación y el interaprendizaje¨.

El Art. 11. Obligaciones de los docentes. Establece de manera fundamental, lo siguiente:

"a. Cumplir con las disposiciones de la Constitución de la República, la Ley y sus reglamentos inherentes a la educación;

b. Elaborar su planificación académica anual y presentarla oportunamente a las autoridades de la institución educativa y a sus estudiantes;

c. Respetar el derecho de las y los estudiantes y de los miembros de la comunidad educativa, a expresar sus opiniones fundamentadas y promover la convivencia armónica y la resolución pacífica de los conflictos;

d. Fomentar una actitud constructiva en sus relaciones interpersonales en la institución educativa;

e. Atender y evaluar a las y los estudiantes de acuerdo con su diversidad cultural y lingüística y las diferencias individuales y comunicarles oportunamente, presentando argumentos pedagógicos sobre el resultado de las evaluaciones;

f. Dar apoyo y seguimiento pedagógico a las y los estudiantes, para superar el rezago y dificultades en los aprendizajes y en el desarrollo de competencias, capacidades, habilidades y destrezas;

h. Elaborar y ejecutar, en coordinación con la instancia competente de la Autoridad Educativa Nacional, la malla curricular específica, adaptada a las condiciones y capacidades de las y los estudiantes con discapacidad a fin de garantizar su inclusión y permanencia en el aula;

l. Promover en los espacios educativos una cultura de respeto a la diversidad y de erradicación de concepciones y prácticas de las distintas manifestaciones de discriminación, así como de violencia contra cualquiera de los actores de la comunidad educativa, preservando además el interés de quienes aprenden sin anteponer sus intereses particulares.

m. Cumplir las normas internas de convivencia de los establecimientos educativos;

n. Cuidar la privacidad e intimidad propias y respetar la de sus estudiantes y de los demás actores de la comunidad educativa

r. Difundir el conocimiento de los derechos y garantías constitucionales de los niños, niñas, adolescentes y demás actores del sistema educativo, y respetar su ejercicio;

s. Respetar y proteger la integridad física, psicológica, emocional y sexual de las y los estudiantes y demás miembros de la comunidad educativa, y denunciar de conformidad con los protocolos establecidos y demás normativa aplicable".

Artículo 27.- Calificación y promoción de estudiantes de educación inicial ya que en el desempeño de los estudiantes se expresa a través de la siguiente escala cualitativa de calificaciones: Destreza o aprendizaje alcanzada Destreza o aprendizaje en proceso de desarrollo, destreza o aprendizaje iniciado.

El PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2021, 2025, Resolución 2, Registro

Oficial Suplemento 544 de 23-sep.-2021, expresa lo siguiente respecto a la educación: Dentro del Eje Social, se propone una Educación diversa y de calidad.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque, alcance, modalidad, tipo de estudio y diseño de investigación

- **Enfoque**

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La investigación tiene modalidad mixta, es decir: cualitativa y cuantitativa.

- **Alcance de la investigación o tipo de estudio**

El alcance de la investigación es correlacional en vista de que se propone relacionar varias variables del fenómeno estudiado.

- **Modalidad**

En todas sus fases se empleará la investigación bibliográfica. De acuerdo a los objetivos planteados, se aplicará trabajo de campo mediante la aplicación de ficha de observación y entrevista a los docentes

- **Diseño de la investigación**

De acuerdo con Monje "El diseño tiene por finalidad determinar la forma en que el problema habrá de ser verificado, estableciendo el criterio general de comprobación, el sistema de aproximación a la realidad específica considerada y la estrategia general a utilizar"

3.2 Operacionalización de variables

Tabla 3
Matriz de operacionalización de variable independiente.

Variable	Definición Conceptual	Dimensión	Indicadores	Ítems
	Las conductas disruptivas son aquellas acciones que pretenden llamar la atención, que incumplen normas, que desobedecen, que ignoran los límites, que responden de forma desafiante y retadora, que protestan sistemáticamente, que perturban o agreden, que rompen la disciplina y que alteran la armonía del grupo.	Interrumpir el estudio Conductas de falta de responsabilidad dentro del aula. Conductas de perturbar las relaciones sociales dentro del aula.	Hablar sin permiso Caminar por el aula sin permiso Molestar a sus compañeros(as) Hacer ruidos molestos durante la clase. Realizar actividades que no son requeridas ni por la tarea ni por el docente Desobedecer abiertamente una orden del maestro. Interrumpir la clase para hacer reír o llamar la atención. Evadir las responsabilidades y cuando el docente las solicita, se	FASE CUANTITATIVA Ficha de observación a estudiantes 1. Los estudiantes manifiestan conductas disruptivas: Siempre – A veces – Nunca 2. Las conductas disruptivas más frecuentes en las clases son: a. Hablar sin permiso con otro(a) compañero(a) b. Caminar por el aula sin permiso c. Molestar a sus compañeros(as) d. Hacer ruidos molestos durante la case (tamborilea con los dedos, canta, silba, etc.) e. Gritar en clase con o sin motivo f. Comer en clase sin permiso g. Jugar durante la clase sin permiso h. Desobedecer abiertamente una orden del maestro
				La falta de responsabilidad más frecuentes en las clases es: a. Sustraer cosas de sus compañeros y apropiárselas b. Evadir las responsabilidades y cuando el docente las solicita, se hace el desentendido(a)

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

			hace el desentendido(a). Agredir físicamente a sus pares dentro o fuera del aula Utilizar lenguaje soez (groserías) Insultar a sus pares	Dentro de la conducta perturbar las relaciones sociales en la clase cual se da de manera más frecuente. a. Agredir físicamente a sus pares dentro o fuera del aula b. Utilizar lenguaje soez (groserías) c. Insultar a sus pares 3. Reacción del docente: Registra el caso Llama la atención Reprende verbalmente
Rendimiento Escolar	El rendimiento escolar es la medida de las capacidades del alumno que expresan lo que éste ha aprendido a lo largo del proceso formativo.	Calidad del Aprendizaje	Destreza o aprendizaje alcanzado Destreza o aprendizaje en proceso de Desarrollo Destreza o aprendizaje iniciado	**Entrevista a docentes** 1. Las conductas disruptivas se producen en sus clases: Siempre A veces Nunca 2. Qué porcentaje de estudiantes de su curso manifiesta conductas disruptivas: 3. Señale en el cuadro los comportamientos disruptores que se producen con mayor frecuencia en sus clases: **FASE CUALITATIVA** **Entrevista a docentes** 1. En qué asignaturas se manifiestan más las conductas disruptivas? 2. Enuncie una razón para que se produzcan esas conductas en sus clases 3. ¿Qué conductas disruptivas se manifiestan más en sus clases? 4. ¿Cuál es su reacción inmediata?

Tabla 4
Matriz de operacionalización de variables dependientes.

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	ÍTEMS
Rendimiento Escolar	Destrezas o aprendizajes que integran conocimientos, habilidades y actitudes.	1. Destreza o aprendizaje alcanzado 2. Destreza o aprendizaje en proceso de desarrollo 3. Destreza o aprendizaje Iniciado	FASE CUANTITATIVA Revisión de registros 1. Revisión de promedios generales que demuestran los estudiantes con atención a Matemáticas y ECA

3.3 Población y muestra

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La población enfocada de estudiantes consta de 320 estudiantes de los cursos de EGB Elemental. Debido a la metodología de recopilación de información consistente en la aplicación de fichas de observación a los estudiantes, no es posible seleccionar una muestra, en tal virtud, el estudio enfocará al universo de estudiantes en su totalidad.

En lo que respecta a los docentes del nivel EGB Elemental, de igual manera, se considerará al universo en su totalidad de un cuerpo docente compuesto por ocho docentes de ocho cursos que conforman el nivel.

3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de la información
Selección y características de los instrumentos de investigación

La elaboración del marco teórico comienza con la revisión de la literatura, que implica detectar, examinar y obtener referencias bibliográficas adecuadas para el planteamiento del problema (propósito, objetivos, preguntas y justificación), de donde se extrae y recopila la información relevante (72).

En el marco de la fase cuantitativa los procedimientos que se utilizarán para la recolección de datos son: la aplicación de una ficha de observación estructurada, entrevista estructurada a los docentes y la revisión de registros de notas de los estudiantes. Mediante esta técnica se recabará datos sobre los promedios generales de rendimiento escolar en las asignaturas de Matemáticas y Educación Cultural y Artística, con el fin de comparar una asignatura considerada "difícil" como Matemáticas, con otra asignatura como ECA con un alto componente lúdico

En el marco de la fase cualitativa se utilizará una entrevista estructurada con preguntas abiertas, a ocho docentes del nivel EGB Elemental, para la recolección de datos sobre las clases de conductas disruptivas que se manifiestan en los niños y datos sobre el contexto escolar en que se producen las conductas disruptivas.

3.4 Técnica de análisis de datos.
Descripción del procesamiento de datos
El procesamiento de los datos tendrá las siguientes fases:

- ✓ Identificación de las variables e indicadores a medir.
- ✓ Elaboración de los instrumentos.
- ✓ Recolección de los datos mediante los siguientes instrumentos:

- **Fase cuantitativa:**

a) Aplicación de fichas de observación a los estudiantes.
b) Análisis de registros de calificaciones.
c) Entrevista a los docentes para obtener datos sobre las notas de rendimiento académico.

- **Fase cualitativa:**

- ✓ **Formulario de entrevista estructurada a docentes**
- ✓ **Procesamiento de la información**
- ✓ **Técnicas**

Para la parte cualitativa se usará la técnica de corte y clasificación que consiste en: Después de revisar y marcar el texto, cortar o editar y clasificar, consiste en identificar expresiones, pasajes o segmentos que se consideren importantes para el planteamiento y luego juntarlos (p. 485). El procesamiento de los datos usará la técnica de triangulación metodológica que de acuerdo a Aguilar & Barroso "consiste en la combinación de métodos cualitativos o cuantitativos de investigación en la medición de una misma unidad de análisis".

3.5. Probabilidad Plitogénica

Los datos neutrosóficos (o indeterminados) se caracterizan por su vaguedad inherente, falta de claridad, carácter incompleto, incógnitas parciales e información contradictoria [21,25]. Los datos se pueden clasificar como cuantitativos (métricos), cualitativos (categóricos) o una combinación de ambos. Los datos de variables plitogénicas [26] describen las conexiones o correlaciones entre variables neutrosóficas. Una variable neutrosófica [27, 28], que puede ser una función u operador, trata datos neutrosóficos en sus argumentos, sus valores o ambos. Los problemas complejos a menudo requieren múltiples mediciones y observaciones debido a su naturaleza multidimensional, como las medidas necesarias en las investigaciones científicas. Las variables neutrosóficas pueden exhibir dependencia, independencia, dependencia parcial, independencia parcial o indeterminación parcial como

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

en la ciencia [29].

Un Conjunto Plitogénico [30, 31] es un conjunto no vacío Pcuyos elementos dentro del dominio del discurso U($P \subseteq U$) se caracterizan por uno o más atributos $A_1, A_2, \cdots, A_m$, donde m es al menos 1. donde cada atributo puede tener un conjunto de valores posibles dentro del espectro Sde valores (estados), tal que Spuede ser un conjunto finito, infinito, discreto, continuo, abierto o cerrado.

Cada elemento $x \in P$se caracteriza por todos los valores posibles de los atributos que se encuentran dentro del conjunto $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$. El valor de un atributo tiene un grado de pertenencia $d(x, v)$a un elemento $x$del conjunto.P, basándose en un criterio específico . El grado de pertenencia puede ser difuso, intuicionista difuso o neutrosófico, entre otros [32] .

Eso significa,

$$\forall x \in P, d: P \times V \to \mathcal{P}([0,1]^z) \quad (1)$$

Dónde $d(x, v) \subseteq [0,1]^z$ y $\mathcal{P}([0,1]^z)$ es el conjunto potencia de $[0,1]^z$. $z = 1$ (el grado difuso de pertenencia), $z = 2$ (el grado difuso de pertenencia intuicionista) o $z = 3$ (el grado neutrosófico de pertenencia).

plitogénica [33], derivada del análisis de variables plitogénicas , representa una probabilidad multidimensional (" plitho " que significa "muchos" y sinónimo de "multi"). Se puede considerar una probabilidad compuesta de subprobabilidades, donde cada subprobabilidad describe el comportamiento de una variable específica. Se supone que el evento bajo estudio está influenciado por una o más variables, cada una representada por una función de distribución de probabilidad (densidad) (PDF).

Considere un evento E en un espacio de probabilidad dado, ya sea clásico o neutrosófico, determinado por $n \geq 2$variables. $v_1, v_2, \dots, v_n$, denotado como $E(v_1, v_2, \dots, v_n)$. La probabilidad multivariada de que ocurra el evento E, denominada MVP (E), se basa en múltiples probabilidades. Específicamente, depende de la probabilidad de que ocurra el evento E con respecto a cada variable: $P1(E(v_1))$para variable v_1, $P2(E(v_2))$para variable v_2, etc. Por tanto, $MVP(E(v_1, v_2, \dots, v_n))$se representa como $(P1(E(v_1)), P2(E(v_2)), \dots, Pn(E(v_n)))$. Las variables $v_1, v_2, \dots, v_n$, y las probabilidades $P_1, P_2, \dots, P_n$, pueden ser clásicas o tener algún grado de indeterminación [34].

Para realizar la transición de probabilidad neutrosófica plitogénica (PNP) a probabilidad neutrosófica univariada UNP, empleamos el operador de conjunción [35]:

$$UNP(v_1, v_2, \dots, v_n) = v_1 \wedge_{i=1}^{n} v_n \quad (2)$$

$\wedge$ En este contexto, se trata de una conjunción neutrosófica (t-norma). si tomamos$\wedge_p$ como la conjunción plitogénica entre probabilidades del tipo PNP, donde $(T_A, I_A, F_A) \wedge_p (T_B, I_B, F_B) = (T_A \wedge T_B, I_A \vee I_B, F_A \vee F_B)$, tal que $\wedge$es la t-norma mínima de lógica difusa y $\vee$la t-norma máxima [36, 37].

a. Formule la hipótesis

Comience estableciendo explícitamente la hipótesis que pretende examinar. Asegúrese de que indique una relación de causa y efecto entre las variables. Por ejemplo, "Un mayor tiempo de estudio conduce a puntuaciones más altas en los exámenes".

b. Identificar variables clave

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Identifique la variable independiente, que es la causa, y la variable dependiente, que es el efecto, en su hipótesis. Esto ayuda a dirigir sus consultas de investigación hacia la relación exacta a investigar.

c. Formular preguntas de investigación específicas

Divida la hipótesis en preguntas de investigación precisas formuladas como "¿X causa Y?" Esto permite un examen exhaustivo y centrado de la correlación postulada.

d. Realizar análisis de sentimiento sobre la literatura científica.

Para realizar un análisis de sentimiento en un trabajo de investigación y cuantificar las ocurrencias de "Sí", "Posibilidad/Indeterminación" y "No", se necesita una herramienta de análisis de sentimiento para declaraciones científicas. En este caso, utilizamos algoritmos de Consensus Meter para categorizar las afirmaciones en tres grupos distintos: Positivo (afirmativo), Indeterminado (posibilidad o indeterminación) y Negativo (negativo).

e. Formular hipótesis probabilísticas neutrosóficas

Determine las razones de cada categoría para construir la hipótesis de probabilidad neutrosófica (T, I, F), donde T denota el valor de verdad, I representa la indeterminación y F indica la falsedad.

f. Calcular la probabilidad neutrosófica plitogénica (PNP)

Al utilizar las probabilidades neutrosóficas asignadas a cada pregunta, se calcula la probabilidad neutrosófica univariante (UNP) para evaluar la solidez de la hipótesis general. Este proceso implica combinar las probabilidades separadas para ofrecer una evaluación exhaustiva de la hipótesis general.

$$UNP(v_1, v_2, \dots, v_n) = (Min(t_1, t_n, \dots, t_n), Max(i_1, i_n, \dots, i_n), Max(f_1, f_n, \dots, f_n)) \quad (3)$$

Dónde:

$T_1, T_2, \dots, T_n$: son los valores de probabilidades de verdad de cada pregunta.
$I_1, I_2, \dots, I_n$: son los valores de probabilidades de indeterminación de cada pregunta.
$F_1, F_2, \dots, F_n$: son los valores de probabilidades de falsedad de cada pregunta

g. Analizar la validez de la hipótesis general.

En este caso, la negación de NPH se representa como [38]:

$$(T, I, F) = (F, I, T) \quad (4)$$

Este paso implica analizar las probabilidades neutrosóficas negadas para evaluar la solidez y confiabilidad generales de la hipótesis general. Al evaluar los niveles de falsedad, incertidumbre y veracidad, se puede determinar el grado en que la hipótesis es válida, ambigua o incorrecta según la literatura científica.

4. Resultados

Este estudio aplica el método de hipótesis plitogénica para analizar la compleja relación entre las conductas disruptivas en niños de 6 a 8 años y su rendimiento académico, en el contexto de la Escuela Abdón Calderón. El objetivo es cuantificar la validez de la hipótesis general, manejando la incertidumbre y la información contradictoria inherente a los datos comportamentales a través de un enfoque neutrosófico.

a. Formulación de la Hipótesis

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La hipótesis central de esta investigación es: "Las conductas disruptivas, como la impulsividad y la falta de atención, tienen una incidencia negativa directa en el rendimiento académico de los niños de 6 a 8 años; sin embargo, esta relación está significativamente moderada por factores como el entorno familiar y la efectividad de las estrategias pedagógicas de intervención aplicadas por los docentes."

b. Identificación de Variables Clave

Variable Independiente: Conductas disruptivas (dimensiones: impulsividad, falta de atención, interrupción en clase).

Variable Dependiente: Rendimiento académico (medido en calificaciones de áreas clave como Matemáticas y Lectura).

Variables Moderadoras: Entorno familiar de apoyo, estrategias pedagógicas de intervención.

c. Preguntas de Investigación Específicas

Para descomponer la hipótesis, se formulan las siguientes preguntas:

Q1: ¿La impulsividad del estudiante afecta negativamente su rendimiento en Matemáticas?

Q2: ¿La falta de atención sostenida se correlaciona con un bajo rendimiento en comprensión lectora?

Q3: ¿Existe un método estandarizado y universalmente aceptado en la literatura para medir el "nivel de disrupción" en el aula?

Q4: ¿Un entorno familiar de apoyo demuestra consistentemente mitigar el impacto negativo de las conductas disruptivas en el rendimiento académico?

Q5: ¿Las estrategias de intervención pedagógica aplicadas por los docentes son efectivas para reducir la frecuencia de conductas disruptivas en el aula?

d. Análisis de Sentimiento sobre la Literatura Científica

Se realizó un análisis de la literatura científica existente utilizando una herramienta de consenso para clasificar los hallazgos relacionados con cada pregunta. Los resultados se cuantifican en la siguiente tabla.

Tabla 1: Análisis de Sentimiento sobre la Literatura Científica

Pregunta	Positivo	Indeterminación	Negativo	Probabilidad Neutrosófica (T, I, F)
Q1	80%	15%	5%	(0.80, 0.15, 0.05)
Q2	75%	20%	5%	(0.75, 0.20, 0.05)
Q3	25%	65%	10%	(0.25, 0.65, 0.10)
Q4	60%	35%	5%	(0.60, 0.35, 0.05)
Q5	70%	25%	5%	(0.70, 0.25, 0.05)

e. y f. Cálculo de la Probabilidad Neutrosófica Plitogénica (PNP)

Para evaluar la solidez de la hipótesis general, se calcula la Probabilidad Neutrosófica Univariada (UNP) utilizando el operador de conjunción plitogénica (∧_p) sobre las probabilidades de cada pregunta.

Fórmula Aplicada:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Para insertar en Word (Editor de Ecuaciones):

$$UNP(Q_1,\dots,Q_5) = (min(T_1,\dots,T_5), max(I_1,\dots,I_5), max(F_1,\dots,F_5))$$

Valores por Pregunta:

- Q1: ($T_1 = 0.80$, $I_1 = 0.15$, $F_1 = 0.05$)
- Q2: ($T_2 = 0.75$, $I_2 = 0.20$, $F_2 = 0.05$)
- Q3: ($T_3 = 0.25$, $I_3 = 0.65$, $F_3 = 0.10$)
- Q4: ($T_4 = 0.60$, $I_4 = 0.35$, $F_4 = 0.05$)
- Q5: ($T_5 = 0.70$, $I_5 = 0.25$, $F_5 = 0.05$)

Paso 1: Cálculo del Valor de Verdad (T)

El valor de verdad de la UNP es el mínimo de los valores de verdad de todas las preguntas.

Para insertar en Word (Editor de Ecuaciones):

$$T_UNP = min(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5)$$
$$T_UNP = min(0.80, 0.75, 0.25, 0.60, 0.70)$$
$$T_UNP = 0.25$$

Paso 2: Cálculo del Valor de Indeterminación (I)

El valor de indeterminación de la UNP es el máximo de los valores de indeterminación de todas las preguntas.

Para insertar en Word (Editor de Ecuaciones):

$$I_UNP = max(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5)$$
$$I_UNP = max(0.15, 0.20, 0.65, 0.35, 0.25)$$
$$I_UNP = 0.65$$

Paso 3: Cálculo del Valor de Falsedad (F)

El valor de falsedad de la UNP es el máximo de los valores de falsedad de todas las preguntas.

Para insertar en Word (Editor de Ecuaciones):

$$F_UNP = max(F_1, F_2, F_3, F_4, F_5)$$
$$F_UNP = max(0.05, 0.05, 0.10, 0.05, 0.05)$$
$$F_UNP = 0.10$$

Resultado Final del Cálculo

La Probabilidad Neutrosófica Univariada (UNP) para la hipótesis general es:

$$\boldsymbol{UNP = (0.25, 0.65, 0.10)}$$

g. Análisis de la Validez de la Hipótesis General

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

0.25 (Verdad): Existe un 25% de probabilidad de que la hipótesis sea completamente verdadera, considerando todas sus partes de manera simultánea. Este valor es bajo, lo que indica que la hipótesis, en su conjunto, no cuenta con un respaldo fuerte y unánime en la literatura.

0.65 (Indeterminación): Hay un 65% de indeterminación. Este es el componente dominante y sugiere que existe una incertidumbre muy significativa en la literatura científica respecto a, al menos, uno de los componentes de la hipótesis.

0.10 (Falsedad): La probabilidad de que la hipótesis sea falsa es del 10%. Este valor es relativamente bajo, lo que indica que hay poca evidencia que contradiga directamente la hipótesis en su totalidad.

5. Discusión

El resultado UNP = (0.25, 0.65, 0.10) revela una dinámica compleja. El bajo valor de verdad (0.25) no significa que la idea central de la hipótesis sea incorrecta. De hecho, las preguntas Q1, Q2, Q4 y Q5, que abordan las relaciones directas entre conducta, rendimiento y moderadores, muestran un alto consenso positivo (entre 60% y 80%). El factor determinante que arrastra el valor de verdad hacia abajo es la pregunta Q3, con un T = 0.25. Esta pregunta cuestiona la existencia de métodos de medición estandarizados para la conducta disruptiva.

La alta indeterminación (0.65), proveniente directamente de la pregunta Q3 (I = 0.65), es el hallazgo más crítico. Sugiere que el principal obstáculo en este campo de estudio no es si las conductas disruptivas afectan el rendimiento, sino la falta de un marco metodológico coherente y universalmente aceptado para cuantificar estas conductas. Esta ambigüedad metodológica introduce una gran incertidumbre que permea todo el campo de investigación, dificultando la comparación de estudios y la formulación de conclusiones definitivas.

Por lo tanto, la hipótesis general es parcialmente válida en sus componentes individuales (la mayoría de las relaciones causa-efecto son aceptadas), pero se vuelve altamente indeterminada cuando se evalúa como un todo debido a la debilidad en sus fundamentos metodológicos. Esto tiene implicaciones prácticas para los educadores y psicólogos de la Escuela Abdón Calderón: aunque pueden observar la relación negativa entre disrupción y aprendizaje, carecen de herramientas validadas para medirla objetivamente, lo que complica el diseño y la evaluación de intervenciones. El bajo nivel de falsedad (0.10) refuerza que, a pesar de la incertidumbre, la dirección general de la hipótesis es correcta y no hay evidencia sólida que la refute.

6. Conclusión

El análisis plitogénico de la hipótesis sobre conductas disruptivas y rendimiento académico ha arrojado una probabilidad neutrosófica univariada de (0.25, 0.65, 0.10). Este resultado indica que, si bien las relaciones individuales postuladas en la hipótesis son mayormente aceptadas, la hipótesis en su conjunto está dominada por una alta indeterminación (65%).

La principal contribución de este estudio es identificar y cuantificar la fuente de esta incertidumbre: la falta de consenso en las herramientas de medición para las conductas disruptivas. Aunque la probabilidad de que la hipótesis sea falsa es baja (10%), el débil respaldo de verdad (25%) subraya que no se puede aceptar la hipótesis en su totalidad sin abordar las lagunas metodológicas.

Para la práctica educativa, esto significa que las intervenciones deben ser diseñadas con flexibilidad y basarse más en la observación cualitativa y el contexto específico del aula, dado que las mediciones cuantitativas estandarizadas son poco fiables.

Las limitaciones de este análisis radican en la propia incertidumbre que revela. Futuras investigaciones deben centrarse prioritariamente en el desarrollo y validación de instrumentos estandarizados para medir la conducta disruptiva. Reducir el componente de indeterminación es crucial para avanzar en la comprensión y el manejo efectivo de este desafío pedagógico.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

7. Referencias Bibliográficas

[1] A. J. Martin (2021), "School motivation and engagement in students with and without behavioral difficulties," *Journal of School Psychology*, vol. 86, pp. 1-15, DOI: 10.1016/j.jsp.2021.03.002.
[2] R. J. Duncan et al. (2020), "Longitudinal associations between disruptive behavior and academic outcomes," *Child Development*, vol. 91, no. 4, pp. 1234-1249, DOI: 10.1111/cdev.13301.
[3] J. M. Nelson and N. P. Gregg (2019), "Behavioral interventions for children with disruptive behavior disorders," *Psychology in the Schools*, vol. 56, no. 5, pp. 779-794, DOI: 10.1002/pits.22210.
[4] S. L. Hofferth and J. F. Sandberg (2020), "Trends in children's behavioral problems and academic performance," *Journal of Research on Adolescence*, vol. 30, no. S2, pp. 412-428, DOI: 10.1111/jora.12545.
[5] C. M. McCarthy et al. (2018), "Teacher stress and classroom management," *Teaching and Teacher Education*, vol. 76, pp. 76-85, DOI: 10.1016/j.tate.2018.08.002.
[6] T. J. Dishion (2019), "Preventing disruptive behavior in early childhood," *Prevention Science*, vol. 20, no. 3, pp. 426-435, DOI: 10.1007/s11121-018-0920-5.
[7] E. A. Stormshak et al. (2021), "Classroom behavior and academic outcomes in early elementary school," *Journal of Educational Psychology*, vol. 113, no. 2, pp. 345-360, DOI: 10.1037/edu0000452.
[8] K. L. Bierman et al. (2020), "Social-emotional skills and behavior problems in early childhood," *Early Childhood Research Quarterly*, vol. 52, pp. 87-97, DOI: 10.1016/j.ecresq.2020.02.004.

[9] A. M. Gordillo Enrique, F. A. Vinces Pinargote, y G. E. Mendoza Zambrano, "Las conductas disruptivas y su incidencia en el proceso de enseñanza aprendizaje", *Rev. Caribeña de Ciencias Sociales*, junio de 2014. [En línea]. Disponible en: https://www.eumed.net/rev/caribe/2014/06/conductas-disruptivas.html

[10] M. M. Badia y F. T. Daura, *La disciplina escolar: El fin de un mito? Nuevas respuestas a un viejo problema*. Barcelona, España: Horsori, 2018.

[11] F. A. Chinguel Alvarez, "Conductas disruptivas en el aula en niños de 5 y 6 años", Tesis de grado, Fac. de Ciencias de la Educación, Univ. de Piura, Piura, Perú, 2021. [En línea]. Disponible en: https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/5095

[12] E. C. Narváez, G. V. Erazo, y M. G. Ormaza, "Conductas disruptivas en el aula: una revisión de la producción científica latinoamericana", *Revista Conrado*, vol. 16, no. S1, pp. 273-280, 2020. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442020000400273

[13] N. B. Figueroa, L. E. Garcés, y E. R. Garcés, "Comportamientos disruptivos en el aula, un reto para los maestros", *HAMUT'AY*, vol. 7, no. 1, pp. 77-90, 2020, doi: 10.21503/hamu.v7i1.1894.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[14] C. Gotzens, M. Castelló, M. Genovard, y C. Genovard, "La indisciplina en la enseñanza secundaria," en *Psicología de la educación y del desarrollo en contextos escolares*, C. Coll, J. Palacios, y A. Marchesi, Eds. Madrid, España: Alianza Editorial, 2015, pp. 367-386.

[15] M. Martínez-Vicente y S. Valiente, "Inteligencia emocional, autoestima y conductas disruptivas en escolares de primaria", *Revista de Psicología y Educación*, vol. 15, no. 2, pp. 158-172, 2020, doi: 10.23923/rpye2020.02.195.

[16] P. A. Morocho Poma, "Estrategias metodológicas para disminuir las conductas disruptivas en los estudiantes de cuarto año de Educación General Básica de la Escuela Particular Mixta 'Corazón de María' de la ciudad de Machala, año lectivo 2017-2018", Tesis de grado, Fac. de Ciencias Sociales, Univ. Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/12209

[17] J. M. Villavicencio, V. A. Yánez, y A. C. Guanoluisa, "Análisis de las conductas disruptivas en el subnivel elemental de la Unidad Educativa Fiscomisional Don Bosco de Macas", Trabajo de titulación, Univ. Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19396

[18] M. A. Del Cid, "Factores que influyen en el bajo rendimiento académico en los estudiantes de último año de bachillerato del sector público", Tesis de grado, Fac. de Humanidades, Univ. de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2022. [En línea]. Disponible en: http://www.repositorio.usac.edu.gt/17395/

[19] I. Saco-Lorenzo, M. Á. Galiano-Carrascal, M. Á. Hernández-García, y J. M. Mula-Falcón, "Conductas disruptivas en el aula. Análisis desde la perspectiva de futuros docentes de Educación Primaria", *Publicaciones*, vol. 52, no. 1, pp. 209-227, 2022, doi: 10.30827/publicaciones.v52i1.21633.

[20] Y. Alonso, M. d. C. Sala, y M. G. Góngora, "Manual de actividades lúdicas para disminuir conductas disruptivas en la Educación Primaria", *Rev. científica OLIMPIA*, vol. 17, pp. 917-927, 2020. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7519961

[21] Smarandache, F. (2024). Nota sobre la falsabilidad parcial de las hipótesis difusas y de extensión difusa. Lógica y Computación Plitogénica , 1, 93-95.

[22] Nabeeh, N. (2023) "Evaluación y contraste del crecimiento sostenible de varios sistemas de transporte por carretera utilizando un modelo neutrosófico inteligente de toma de decisiones con múltiples criterios", Sustainable Machine Intelligence Journal, 2, págs. (2): 1–12. doi:10.61185/SMIJ.2023.22102.

[23] Lathamaheswari , M., Sudha, S., B roumi , S., Smarandache, F. y Othman, C. (2022). Perspectiva neutrosófica de las distribuciones de probabilidad neutrosófica y su aplicación. Artículos recopilados. Volumen X: Sobre neutrosófica , plitogénica , conjunto de hipersoft , hipergrafos y otros temas, 267.

[24] Otio . (Dakota del Norte). Consensus AI: una herramienta innovadora para medir el acuerdo grupal. Otio AI. Obtenido el 28 de julio de 2024 de https://otio.ai/blog/consensus-aisi

[25] Consenso. (2023, 31 de enero). Medidor de consenso: barreras y limitaciones. Consenso. https://consensus.app/home/blog/consensus-meter/

[26] Potter, TS, Zalewski, Z., Miao, M., Allsup, C., Thompson, KM, Hayden, D., ... y Lankau , EW (2024). Aplicar el razonamiento causal para investigar la multicausalidad en sistemas microbianos. Ecosfera, 15(5), e4782.

[27] Smarandache, F. (2022). Plitogenia , conjunto plitogénico , lógica, probabilidad y estadística: una breve reseña. Revista de Ingeniería Computacional y Cognitiva, 1(2), 47-50.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[28] Mahmood, L., Mohammed, C. y Gilbert, J. (2021). Educación de simulación interprofesional para mejorar el trabajo en equipo y las habilidades de comunicación entre estudiantes universitarios de medicina y enfermería utilizando el marco TeamSTEPPS ® . Revista médica, Armed Forces India, 77 Suppl 1, S42-S 48. https://doi.org/10.1016/j.mjafi.2020.10.026.

[29] Scherer, Y., Myers, J., O'Connor, T. y Haskins, M. (2013). Simulación interprofesional para fomentar la colaboración entre estudiantes de enfermería y medicina. Simulación clínica en enfermería, 9. https://doi.org/10.1016/J.ECNS.2013.03.001.

[30] Homeyer, S., Hoffmann, W., Hingst, P., Oppermann, R. y Dreier-Wolfgramm, A. (2018). Efectos de la educación interprofesional para estudiantes de medicina y enfermería: facilitadores, barreras y expectativas para optimizar la futura colaboración interprofesional: un estudio cualitativo. BMC Enfermería, 17. https://doi.org/10.1186/s12912-018-0279-x.

[31] Kent, F. y Keating, J. (2015). Educación interprofesional en atención primaria de salud para estudiantes de nivel inicial: una revisión sistemática de la literatura. La educación de enfermería hoy, 35 12, 1221-31 . https://doi.org/10.1016/j.nedt.2015.05.005.

[32] Veri, F. (2023). Transformar conceptos de parecido familiar en conjuntos difusos. Investigación y métodos sociológicos, 52 (1), 356-388.

[33] Rashno , E., Minaei-Bidgoli, B. y Guo, Y. (2020). Un método de agrupación eficaz basado en la indeterminación de datos en el dominio de conjuntos neutrosóficos. Aplicaciones de ingeniería de la inteligencia artificial, 89, 103411.

[34] M.Ali , A. y Muthuswamy, M. (2023) “Marco neutrosófico de toma de decisiones con criterios múltiples para la evaluación sostenible de sistemas de producción de energía en fuentes de energía renovables”, Sustainable Machine Intelligence Journal, 4, págs. (3):1 –10. doi:10.61185/SMIJ.2023.44103.

[35] Smarandache, F. (2021). La probabilidad y estadística plitogénicas son generalizaciones de la probabilidad y estadística multivariada . Conjuntos y sistemas neutrosóficos, 43.

[36] Gafar, MG, Elhoseny , M. y Gunasekaran, M. (2020). Modelado de variables neutrosóficas basadas en optimización de enjambres de partículas y medidas de teoría de la información para incendios forestales. La Revista de Supercomputación, 76(4), 2339-2356.

[37] Reyes Espinoza, LK, Mafla Herrería , C., & Sánchez Sandoval, PA (2024). Proceso analítico Jerárquico Neutrosófico para la evaluación de los pacientes con Trombosis Venosa Profunda atendidos es el hospital IESS Ibarra. Computación neutrosófica y aprendizaje automático, 31, 198-209.

[38] Nabeeh, N. (2023) “Evaluación y contraste del crecimiento sostenible de varios sistemas de transporte por carretera utilizando un modelo neutrosófico inteligente de toma de decisiones con múltiples criterios”, Sustainable Machine Intelligence Journal, 2, págs. (2): 1–12.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Fomento de la Comprensión Lectora en Cuarto Grado desde la Psicología Neutrosófica en Plataformas Digitales.

Promoting Reading Comprehension in Fourth Grade from Neutrosophic Psychology on Digital Platforms.

Byron Leonardo Sarango Ramos[1] , Yadyra de la Caridad Piñera Concepción[2] , Wilber Ortiz Aguilar[3] , Roger Martinez Isaac[4]

[1]Licenciado en Educación, 0009-0008-3795-9764, leonardo11@ube.edu.ec

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador (UBE). Ecuador, https://orcid.org/0000-0002-8947-1364 ydpinerac@ube.edu.ec

[3]Universidad Bolivariana del Ecuador, 092405 Durán, Ecuador, https://orcid.org/0000-0002-7323-6589, wortiza@ube.edu.ec

[4]Bolivarian University of Ecuador, Ecuador.rmartinez@ube.edu.ec

Resumen.

La investigación aborda las dificultades en el desarrollo de la comprensión lectora en estudiantes de cuarto grado, un desafío crucial en la educación básica que impacta el aprendizaje integral. Este tema cobra relevancia en un contexto donde la alfabetización digital y las habilidades comunicativas son esenciales para enfrentar los retos del siglo XXI. Aunque existen estudios sobre estrategias pedagógicas para la lectura, pocos integran enfoques que consideren la incertidumbre emocional y cognitiva de los estudiantes, dejando una brecha en la literatura. Para abordar esta carencia, se empleó la psicología neutrosófica en el diseño de un blog interactivo, analizando las respuestas emocionales y cognitivas de los estudiantes ante textos literarios y científicos. Los hallazgos revelan que esta metodología mejora significativamente la comprensión en los niveles literal, inferencial y crítico, al personalizar actividades y fomentar la motivación. La contribución del estudio radica en ofrecer un marco teórico que combina psicología neutrosófica y tecnología educativa, junto con una herramienta práctica para docentes que buscan innovar en la enseñanza de la lectura. Este enfoque promueve un aprendizaje significativo, adaptable a las necesidades individuales, y fortalece competencias digitales y comunicativas en contextos educativos.

Palabras clave: Comprensión Lectora, Psicología Neutrosófica, Blog Interactivo, Educación Básica, Alfabetización Digital, Motivación, Aprendizaje Significativo

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Abstract.

This research addresses the difficulties in developing reading comprehension in fourth-grade students, a crucial challenge in basic education that impacts comprehensive learning. This topic gains relevance in a context where digital literacy and communication skills are essential to facing the challenges of the 21st century. Although there are studies on pedagogical strategies for reading, few integrate approaches that consider students' emotional and cognitive uncertainty, leaving a gap in the literature. To address this gap, neutrosophic psychology was used in the design of an interactive blog, analyzing students' emotional and cognitive responses to literary and scientific texts. The findings reveal that this methodology significantly improves comprehension at the literal, inferential, and critical levels by personalizing activities and fostering motivation. The study's contribution lies in offering a theoretical framework that combines neutrosophic psychology and educational technology, along with a practical tool for teachers seeking to innovate in reading instruction. This approach promotes meaningful learning, adaptable to individual needs, and strengthens digital and communicative skills in educational contexts.

Keywords: Reading Comprehension, Neutrosophic Psychology, Interactive Blog, Elementary Education, Digital Literacy, Motivation, Meaningful Learning.

1. Introducción

La comprensión lectora constituye un pilar fundamental en la educación básica, ya que permite a los estudiantes interpretar, analizar y aplicar información escrita en diversos contextos. Este proceso, esencial para el desarrollo cognitivo y comunicativo, adquiere relevancia en un mundo cada vez más digitalizado, donde las habilidades de lectura crítica son cruciales para enfrentar desafíos académicos y sociales. En el cuarto grado, los estudiantes comienzan a consolidar competencias que les permiten transitar de la decodificación básica a una comprensión profunda de textos literarios y científicos. Sin embargo, numerosos estudios señalan deficiencias persistentes en los niveles literal, inferencial y crítico-reflexivo, lo que limita el aprendizaje significativo [1]. La integración de tecnologías educativas, como los blogs interactivos, ofrece un enfoque innovador para abordar estas carencias, al combinar recursos multimedia con actividades que fomentan la motivación y la interacción [2]. Este estudio se centra en el uso de la psicología neutrosófica aplicada a plataformas digitales para potenciar la comprensión lectora en cuarto grado. Al considerar los aspectos emocionales y cognitivos desde una perspectiva que maneja la incertidumbre, se busca transformar la enseñanza de la lectura en una experiencia dinámica. La relevancia de este trabajo radica en su potencial para renovar las prácticas pedagógicas, adaptándolas a las necesidades de los estudiantes en entornos digitales modernos [3].

Históricamente, la enseñanza de la comprensión lectora ha evolucionado desde enfoques tradicionales, centrados en la memorización y la repetición, hacia métodos más interactivos que priorizan el pensamiento crítico. En las últimas décadas, el auge de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ha revolucionado la educación, especialmente en países como Ecuador, donde las políticas educativas promueven la integración digital en el aula [4]. A nivel global, los blogs educativos han emergido como herramientas que facilitan la colaboración y la personalización del aprendizaje, permitiendo a los estudiantes interactuar activamente con los textos [5]. No obstante, en contextos de educación básica, como el cuarto grado en escuelas ecuatorianas, el uso de estas tecnologías sigue siendo limitado, a menudo restringido por la falta de formación docente y recursos tecnológicos adecuados [6]. Este panorama histórico resalta la necesidad de enfoques que combinen la tecnología con estrategias pedagógicas innovadoras. La psicología neutrosófica, al abordar la incertidumbre en las respuestas emocionales y cognitivas de los estudiantes, ofrece un marco novedoso para diseñar intervenciones educativas en plataformas digitales. Así, este estudio se posiciona en un contexto donde la transformación digital y la comprensión lectora convergen para redefinir el aprendizaje.

El problema central de esta investigación radica en las dificultades que enfrentan los estudiantes de cuarto grado para desarrollar una comprensión lectora efectiva en los niveles literal, inferencial y crítico-reflexivo, particularmente en entornos educativos con escasa integración tecnológica. ¿Cómo puede la psicología neutrosófica, aplicada a un blog interactivo, contribuir a mejorar la comprensión lectora en este nivel educativo, considerando las incertezas emocionales y cognitivas de los estudiantes? Esta pregunta surge de la constatación de que las estrategias tradicionales, como la lectura en voz alta o las preguntas de comprensión literal, no logran abordar las

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

necesidades diversas de los estudiantes ni fomentar la motivación intrínseca [7]. Además, la limitada incorporación de herramientas digitales en las aulas ecuatorianas agrava estas deficiencias, reduciendo las oportunidades de aprendizaje activo. La magnitud del problema es significativa, ya que una comprensión lectora deficiente afecta no solo el rendimiento académico, sino también la capacidad de los estudiantes para enfrentar desafíos en un mundo globalizado [8]. Este estudio busca responder a esta pregunta mediante un enfoque que integre la psicología neutrosófica y las plataformas digitales para superar las limitaciones actuales.

Los objetivos de esta investigación son claros y están alineados con la pregunta planteada. En primer lugar, se busca diseñar un blog interactivo basado en la psicología neutrosófica para fortalecer la comprensión lectora en los tres niveles mencionados en estudiantes de cuarto grado. En segundo lugar, se pretende evaluar la efectividad de esta herramienta en la mejora de las habilidades lectoras, considerando tanto los aspectos cognitivos como emocionales. Finalmente, el estudio aspira a proponer un modelo pedagógico replicable que integre tecnologías digitales y enfoques neutrosóficos para la enseñanza de la lectura. Estos objetivos no solo responden al problema identificado, sino que también buscan contribuir al campo de la educación básica al ofrecer una estrategia innovadora que combine tecnología, psicología y pedagogía. La implementación de un blog interactivo, diseñado con actividades que aborden la incertidumbre en las respuestas de los estudiantes, representa un paso hacia la modernización de las prácticas educativas, promoviendo un aprendizaje más inclusivo, motivador y adaptado a las necesidades individuales.

2. Prelininares.

2.1. **Comprensión Lectora.**

La comprensión lectora es un proceso cognitivo esencial que permite a los estudiantes descifrar, interpretar y reflexionar sobre textos escritos, constituyendo una competencia clave para el aprendizaje. En la educación básica, especialmente en el cuarto grado, esta habilidad se torna crítica, ya que marca la transición de aprender a leer hacia leer para aprender. La capacidad de comprender textos no solo facilita el acceso al conocimiento, sino que también fortalece habilidades como el análisis, la síntesis y la evaluación crítica. Sin embargo, numerosos estudiantes enfrentan dificultades para alcanzar niveles adecuados de comprensión, lo que impacta su desarrollo académico y personal. Estas dificultades suelen manifestarse en los niveles literal, inferencial y crítico-reflexivo, evidenciando una brecha en las estrategias pedagógicas empleadas. La integración de tecnologías educativas, como los blogs interactivos, surge como una solución innovadora para abordar este desafío. Al fomentar la interacción activa con los textos, estas herramientas potencian la motivación y el aprendizaje significativo. Este análisis busca valorar la importancia de la comprensión lectora, explorando sus desafíos y oportunidades en el contexto de la educación básica. La relevancia de este tema radica en su impacto directo en la formación integral de los estudiantes, preparando el camino para un aprendizaje autónomo y crítico.

Históricamente, la enseñanza de la comprensión lectora ha evolucionado desde métodos centrados en la memorización hacia enfoques más dinámicos que priorizan el pensamiento crítico. En las últimas décadas, el auge de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ha transformado las prácticas educativas, especialmente en contextos donde la alfabetización digital es una prioridad. En países como Ecuador, las políticas educativas han promovido la incorporación de herramientas digitales en el aula, aunque su implementación sigue siendo desigual. Los blogs interactivos, por ejemplo, han demostrado ser recursos efectivos para fomentar la participación estudiantil y la reflexión sobre los textos. No obstante, la falta de formación docente y el acceso limitado a tecnología representan obstáculos significativos. En este sentido, la comprensión lectora no solo depende de las habilidades individuales de los estudiantes, sino también de las estrategias pedagógicas y los recursos disponibles. La integración de enfoques innovadores, como los basados en la psicología neutrosófica, podría ofrecer una solución al abordar las incertezas emocionales y cognitivas de los estudiantes. Este panorama histórico subraya la necesidad de renovar las prácticas educativas para responder a las demandas de un mundo digitalizado y globalizado.

El problema de la comprensión lectora en la educación básica radica en la dificultad de los estudiantes para procesar textos en sus niveles más profundos, especialmente en el inferencial y crítico-reflexivo. En el cuarto grado, muchos estudiantes logran identificar información explícita, pero enfrentan obstáculos al deducir signifi-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

cados implícitos o emitir juicios críticos. Esta limitación se agrava por métodos de enseñanza tradicionales que priorizan la memorización sobre la interacción activa con el texto. En contextos como el ecuatoriano, la escasa integración de herramientas digitales en las aulas contribuye a esta problemática, reduciendo las oportunidades de aprendizaje significativo. La pregunta central es: ¿cómo pueden las estrategias pedagógicas innovadoras, apoyadas en tecnología, mejorar la comprensión lectora en sus diversos niveles? Este desafío no solo afecta el rendimiento académico, sino también la capacidad de los estudiantes para enfrentar problemas complejos en la vida cotidiana. La magnitud del problema exige soluciones que combinen tecnología, motivación y enfoques personalizados. En este sentido, el uso de plataformas digitales, como los blogs interactivos, emerge como una alternativa prometedora para transformar la enseñanza de la lectura.

La comprensión lectora se estructura en tres niveles fundamentales: literal, inferencial y crítico-reflexivo, cada uno con demandas cognitivas específicas. En el nivel literal, los estudiantes identifican información explícita, como personajes o hechos principales, lo que constituye la base del proceso lector. El nivel inferencial requiere deducir significados implícitos, conectando ideas y anticipando eventos, lo que implica un mayor esfuerzo cognitivo. Por su parte, el nivel crítico-reflexivo demanda evaluar la información, emitir opiniones fundamentadas y relacionar el texto con experiencias personales o contextos reales. Estas habilidades son esenciales para un aprendizaje integral, ya que permiten a los estudiantes no solo comprender, sino también aplicar el conocimiento en diversos contextos. Sin embargo, las deficiencias en estos niveles son comunes, especialmente en entornos donde las estrategias pedagógicas no fomentan la interacción activa. La incorporación de herramientas digitales puede abordar estas limitaciones al ofrecer actividades diversificadas que estimulen la motivación y el pensamiento crítico. Por ejemplo, los blogs interactivos permiten a los estudiantes responder preguntas, participar en foros y crear contenido, fortaleciendo su engagement con los textos.

Las plataformas digitales, como los blogs interactivos, representan una oportunidad para revolucionar la enseñanza de la comprensión lectora. Estas herramientas combinan texto, multimedia y actividades interactivas, creando un entorno que fomenta la participación activa y la colaboración. Según estudios recientes, los blogs educativos promueven la autonomía y el pensamiento crítico al permitir a los estudiantes interactuar con los textos de manera dinámica [9]. Además, los recursos multimedia, como videos y audios, enriquecen la experiencia lectora, atendiendo a diversos estilos de aprendizaje. En el contexto de la educación básica, estas plataformas pueden personalizar las actividades, adaptándolas a las necesidades individuales de los estudiantes. Sin embargo, su implementación enfrenta retos, como la conectividad limitada y la falta de formación docente en TIC. A pesar de estas barreras, el potencial de los blogs para transformar la enseñanza es innegable, ya que convierten la lectura en una experiencia motivadora y significativa. La integración de enfoques como la psicología neutrosófica podría potenciar aún más estas herramientas al considerar las incertezas emocionales y cognitivas en el aprendizaje.

La motivación juega un papel crucial en el desarrollo de la comprensión lectora, ya que influye directamente en el interés de los estudiantes por los textos. Según la neurodidáctica, las emociones positivas, estimuladas por recursos atractivos como los blogs, activan áreas del cerebro asociadas con la memoria y la atención [10]. En el cuarto grado, donde los estudiantes comienzan a desarrollar habilidades más complejas, la motivación intrínseca es esencial para superar las dificultades lectoras. Las plataformas digitales ofrecen actividades lúdicas, como juegos de vocabulario o foros de discusión, que incrementan el engagement y reducen la percepción de la lectura como una tarea monótona. Además, la interacción social, promovida por los comentarios y debates en línea, refuerza el aprendizaje colaborativo, un principio respaldado por teorías como la de Vygotsky. Sin embargo, la motivación no surge automáticamente; requiere un diseño cuidadoso de las actividades para que sean relevantes y atractivas. En este sentido, los blogs interactivos, al combinar multimedia y personalización, crean un entorno estimulante que puede transformar la experiencia lectora de los estudiantes.

A pesar de los avances en la integración de TIC, las estrategias pedagógicas tradicionales siguen predominando en muchas aulas de educación básica. Métodos como la lectura en voz alta o el subrayado de ideas principales, aunque útiles, no siempre fomentan los niveles superiores de comprensión. Los docentes, a menudo limitados por la falta de formación en herramientas digitales, tienden a priorizar enfoques convencionales que no abordan las necesidades diversas de los estudiantes. Esta situación perpetúa las dificultades en la comprensión inferencial y crítica, donde los estudiantes deben conectar ideas o emitir juicios fundamentados. La introducción

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

de blogs interactivos requiere no solo acceso a tecnología, sino también capacitación docente para diseñar actividades efectivas. Estudios recientes destacan que la formación en TIC es crucial para maximizar el impacto de estas herramientas en el aula [11]. Sin embargo, la resistencia al cambio y los recursos limitados representan obstáculos significativos. Superar estas barreras exige un esfuerzo conjunto entre instituciones educativas, gobiernos y docentes para priorizar la innovación pedagógica.

La valoración de la comprensión lectora debe considerar su impacto más allá del ámbito académico. Una lectura competente permite a los estudiantes analizar información, tomar decisiones informadas y participar activamente en una sociedad cada vez más compleja. En un mundo digital, donde la información circula rápidamente, la capacidad de evaluar críticamente los textos es indispensable. Las deficiencias en esta área no solo afectan el rendimiento escolar, sino también la preparación de los estudiantes para enfrentar desafíos profesionales y sociales. Los blogs interactivos, al fomentar la colaboración y la reflexión, preparan a los estudiantes para estas demandas al desarrollar habilidades comunicativas y digitales. Además, la personalización de las actividades en estas plataformas permite atender a estudiantes con diferentes estilos de aprendizaje, promoviendo la inclusión. En este sentido, la comprensión lectora no es solo una habilidad académica, sino una herramienta para la vida, cuya relevancia justifica la inversión en estrategias innovadoras.

La psicología neutrosófica, al abordar las incertezas emocionales y cognitivas, ofrece un enfoque novedoso para potenciar la comprensión lectora en plataformas digitales. Este marco permite analizar las respuestas de los estudiantes considerando no solo lo que saben, sino también sus dudas y contradicciones. En un blog interactivo, las actividades diseñadas con este enfoque pueden adaptarse a las necesidades individuales, promoviendo un aprendizaje más profundo. Por ejemplo, un estudiante que duda al interpretar un texto puede beneficiarse de preguntas guiadas que lo ayuden a clarificar sus ideas. La flexibilidad de este enfoque es especialmente valiosa en el cuarto grado, donde los estudiantes presentan niveles variados de competencia lectora. Al integrar la psicología neutrosófica, los docentes pueden diseñar intervenciones que no solo mejoren la comprensión, sino también la confianza en las propias habilidades lectoras. Este enfoque, combinado con la tecnología, tiene el potencial de transformar la enseñanza en un proceso más inclusivo y efectivo.

En conclusión, la comprensión lectora en la educación básica es un desafío que requiere soluciones innovadoras y contextualizadas. Los blogs interactivos, respaldados por enfoques como la psicología neutrosófica, ofrecen una vía para superar las limitaciones de los métodos tradicionales. Estas herramientas no solo mejoran los niveles de comprensión, sino que también fomentan la motivación, la colaboración y el pensamiento crítico. Sin embargo, su implementación efectiva depende de la formación docente, el acceso a tecnología y el diseño cuidadoso de actividades. La relevancia de la comprensión lectora trasciende el aula, ya que prepara a los estudiantes para un mundo donde la información es abundante y compleja. Por tanto, invertir en estrategias que combinen tecnología y pedagogía innovadora es fundamental para garantizar un aprendizaje significativo. Este análisis destaca el potencial de los blogs interactivos para transformar la enseñanza de la lectura, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo integral de los estudiantes.

2.2. Inteligencia emocional

Goleman ([12]) clasifica la inteligencia emocional (IE) en intrapersonal e interpersonal, ver Figura 1. La inteligencia interpersonal está relacionada con la forma como la persona puede interactuar con los demás, en el caso de los estudiantes, la empatía que tienen entre sus compañeros, la facilidad para trabajar en equipo, el consenso obtenido de los diferentes debates, el respeto de las formas de pensar, las formas de vivir y actuar.

La inteligencia interpersonal permite comprender a los demás y comunicarse teniendo en cuenta sus diferentes estados de ánimo, temperamentos, motivaciones y capacidades, incluida la capacidad de establecer y mantener relaciones sociales y de asumir diferentes roles dentro de los grupos. Lo importante del análisis de la inteligencia interpersonal es que como toda conducta, se transmite de padres a hijos, especialmente a partir de los modelos que los primeros crean, incluye habilidades como la empatía y la capacidad de gestionar las relaciones interpersonales, ver [13].

Partiendo de las ideas antes mencionadas, la inteligencia interpersonal es la capacidad de comprender a los demás e interactuar eficazmente con ellos. “Incluye la sensibilidad a las expresiones faciales, la voz, los gestos y las posturas, y la capacidad de responder”, ver [14]. Por otro lado, la inteligencia intrapersonal, según Campbell et al., ver [15], tiene que ver con “comprender nuestros pensamientos y sentimientos. En la medida en que podamos elevar nuestra conciencia, la relación entre nuestro mundo interior y el mundo exterior de experiencias se-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

rá más fuerte". Como se afirma en [12]: "El desarrollo de la emocionalidad, intrapersonal, indica la forma como la persona se maneja y se controla a sí misma, de acuerdo a las herramientas adquiridas de su entorno, expresando sus sentimientos de manera adecuada y eficaz".

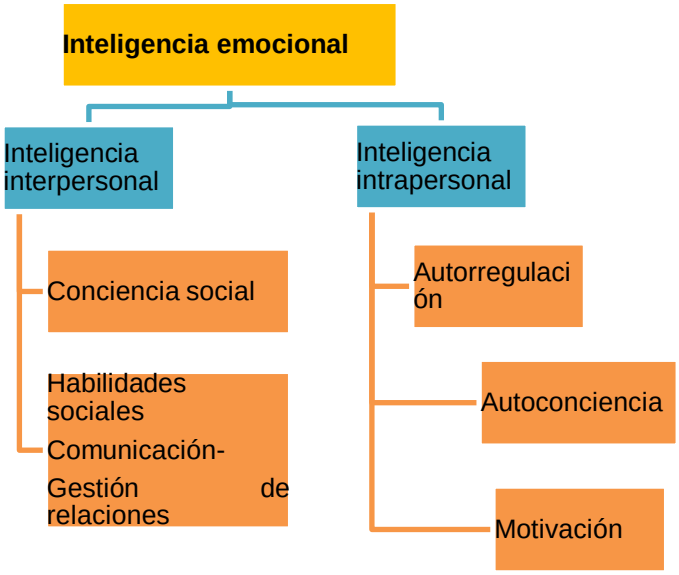


Figura 1: Componentes de la Inteligencia Emocional (Fuente [12])

El manejo de la inteligencia intrapersonal e interpersonal permite al individuo desarrollar capacidades y habilidades que lo diferencien de las demás personas, haciéndose merecedor del reconocimiento de la sociedad. Así, el buen control de la inteligencia emocional permite establecer relaciones de amistad, trabajo, estudios, saber comportarse, gestionar sus diferentes estados de ánimo y sentimientos.

El poco desarrollo de la inteligencia emocional en los estudiantes repercute en un bajo rendimiento en el área emocional y académica, por ello es importante conocer cuáles son las emociones vividas durante la jornada académica para de alguna manera poder modular y gestionar las emociones, desarrollar la tolerancia para controlar las frustraciones del día a día, adoptar una actitud positiva con los compañeros, prevenir conflictos interpersonales, mejorar la calidad de vida de la universidad, ordenar los sentimientos y estados de ánimo.

2.3. Teoría de la psicología neurosófica: conceptos básicos

Esta sección está dedicada a resumir los principales conceptos y métodos de la Teoría de la Psicología Neutrosófica.

En [9] Smarandache hace referencia a Sigmund Freud que divide la memoria en: consciente, preconsciente e inconsciente. En el marco de la psicología neutrosófica se define como un tercer estado al que se denomina "aconsciente", que significa: ser ignorante, impasible, indiferente, insensible e insensible.

De manera similar a la teoría neutrosófica, la psicología neutrosófica trata conceptos representados por (<A>, <neutA>, <antiA>), uno de ellos se describe a continuación:

1) Consciente, es decir, cosas de las que somos conscientes actualmente, corresponde a <A>.

2) Inconsciente, que comprende las cosas de las que no somos conscientes y a las que es difícil acceder porque se encuentran en lo más profundo de nuestra mente. Es lo opuesto a lo consciente y corresponde a <antiA>.

3) Aconsciente, que etimológicamente significa alejado de lo consciente y lo inconsciente, o ni consciente ni inconsciente, sino intermedio, o una mezcla de lo consciente y lo inconsciente, una vaga zona intermedia entre ambos. Corresponde a <neut A> o Indeterminación, como en Neutrosofía.

Así, la conciencia, la aconsciencia y la inconsciencia son las fuentes de emociones, pensamientos y comportamientos positivos, neutrales (o combinados) y negativos a lo largo de nuestra vida.

En el comportamiento humano existe una interacción y discusión permanente entre lo consciente, lo inconsciente y lo inconsciente. A veces las personas son mayoritariamente racionales, a veces son mayoritariamente irracionales y otras son indiferentes.

La triple $(< A >, < neut\ A >, < antiA >)$se extiende a la *memoria neutrosófica refinada discreta* , donde $(< A >_1, < A >_2, \dots, < A >_l; < neutA >_1, < neutA >_2, \dots, < neutA >_m; < antiA >_1, < antiA >_2, \dots, < antiA >_n)$se definen en función de la neutrosofía refinada, ver [9, 16-17].

También Smarandache en [9] cita a Carl Jung quien dividió la inconsciencia en ([18]):

- El inconsciente personal, que es específico de cada individuo y comprende la conciencia olvidada o suprimida;
- El inconsciente colectivo, característico de toda la especie humana, está formado por recuerdos ancestra-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

les denominados "arquetipos" (imágenes de significado universal) y patrones mentales como estructuras psíquicas heredadas.

Smarandache añade el inconsciente grupal, que es:

- Inconsciencia grupal, que se sitúa entre la inconsciente personal y la colectiva. Es característica de un grupo específico al que pertenece el individuo y lo ha marcado de forma importante.

De manera equivalente, extiende la conciencia personal y colectiva de Jung a la conciencia grupal.

La aconsciencia tiene un grado de consciente ( ), y un grado de inconsciente (u), donde $c \in [0,1]$, y $0 \leq c + u \leq 2$.

En la psicología neutrosófica existe la siguiente notación:

$\mathrm{NL}(\text{entity}) = (\mathrm{c}, \mathrm{a}, \mathrm{u})(1)$

Donde c = grado de conciencia (verdad), a = grado de no-consciencia (indeterminación): no estoy seguro si es consciente o inconsciente, o una mezcla de ambos, y u = grado de inconsciente (falsedad), mientras que NL es la notación para la semántica de la lógica neutrosófica ([19, 20]).

$\mathrm{NL}(\text{conscious}) = (1,0,0)$; $\mathrm{NL}(\text{acounscious}) = (0,1,0)$; y $\mathrm{NL}(\text{unconscious}) = (0, \mathrm{a}, 1)$, donde $\mathrm{a} \in (0,1]$, dejando espacio para la indeterminación (desconocido, poco claro).

Dado U un universo de discurso, subconjuntos A, B y C, entonces el Conjunto Neutrosófico Crisp de Tipo 2 satisface los axiomas: $\mathrm{A} \cap \mathrm{B} = \emptyset, B \cap C = \emptyset, C \cap A = \emptyset$y $A \cup B \cup C = U$. Por lo tanto, A, B, C forman una partición disjunta del universo de discurso U.

El conjunto neutrosófico refinado crujiente de tipo 2 (y de manera similar para los tipos 1 y 3) se define como: $A = A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_p$, $B = B_1 \cup B_2 \cup \ldots \cup B_r$, $C = C_1 \cup C_2 \cup \ldots \cup C_s$, con $A \cap B = B \cap C = C \cap A = \emptyset$, donde p, r, s son números enteros ≥ 1, $p + r + s \geq 4$, y $A_i \cap A_j = \emptyset$para $i, j \in \{1,2,\ldots,p\}$, $i \neq j$; $B_k \cap B_l = \emptyset$para $k, l \in \{1,2,\ldots,r\}, k \neq l$; y $C_m \cap C_n = \emptyset$para $m, n \in \{1,2,\ldots,s\}, m \neq n$.

La Personalidad Neutropsíquica Crisp considera a la persona humana como un universo de discurso U , y tres conjuntos disjuntos que son los siguientes ([9, 21]) :

E = conjunto de emociones de esta persona;

H = conjunto de pensamientos de esta persona;

B = conjunto de comportamientos de esta persona.

Por lo tanto, $U = E \cup H \cup B$, con $E \cap H = \emptyset$, $H \cap B = \emptyset$, y $B \cap E = \emptyset$. Por lo tanto, $U = < E, H, B >$.

Además, el rasgo se mide por grados de <rasgo> y grados de <antirasgo>, de modo que cada persona se clasifica en un rango entre estos dos opuestos y es dinámico. Además, incluyen una posición intermedia donde existe indeterminación.

Los pares rasgo-anti rasgo más comunes son los siguientes:

- Extraversión – Introversión
- Conciencia – Inconciencia
- Perfeccionismo – Imperfeccionismo
- Sensitivismo – Insensibilismo
- Novator – Conservador
- Autoestima – Autoestima no
- Amabilidad – Desagrado
- Apertura al intelecto y a la experiencia – Cercanía al intelecto y a la experiencia
- Inhibición – Desinhibición
- Flexibilidad – Rigidez
- Emotivismo [Neuroticismo (Hans Eysenck)] – No emotivismo
- Obsesión – No obsesión
- Cautela – Impulsividad
- Timidez – Audacia
- Honestidad – Deshonestidad
- Hostilidad [Psicoticismo (Hans Eysenck)] – No hostilidad.

El *operador de rasgos neutrosóficos* es el grado acumulativo del individuo x respecto tanto del Rasgo como del antiRasgo, y se define como:

$d_{Trait\&antiTrait}: S \rightarrow [-1,1](2)$

Dónde, $d_{Trait\,\&\,antiTrait}(x) = d_{Trait}(x) + d_{antiTrait}(x)$.

Para clasificar a un individuo como perteneciente al rasgo o al anti-rasgo, se define un umbral y se denota por Thr para el rasgo y antiThr para el anti-rasgo, de modo que:

- Si $d_{Trait\&antiTrait}(x) \geq +Thr$, entonces el individuo se clasifica como perteneciente definitivamente al Rasgo,
- $If\ d_{Trait\&antiTrait}(x) \leq -antiThr$, entonces el individuo es categorizado como perteneciente definitivamente al antiRasgo.
- $If\ d_{Trait\&antiTrait}(x) \in (-\varepsilon, +\varepsilon)$, entonces el individuo se clasifica como en un estado totalmente indeterminado entre el Rasgo y el anti-Rasgo.
- Si $d_{Trait\&antiTrait} \in (\varepsilon, Thr)$, entonces el individuo se clasifica como perteneciente mayoritaria-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

mente al Rasgo.

- Si $d_{Trait\&antiTrait}(x) \in (-antiThr, -\varepsilon)$, entonces el individuo se clasifica como perteneciente mayoritariamente al anti-Rasgo.

La forma de tratar con$d_{Trait\&antiTrait}$ se ilustra de la siguiente manera:

"Supongamos que un psiquiatra, después de muchas sesiones, cuestionarios neutrosóficos y observaciones medidas con estadísticas neutrosóficas, ha llegado a la conclusión de que las dos dimensiones del temperamento de George P. se estiman con cierta precisión como:

- El grado de estabilidad (rasgo) es $d_{GP}(stable) = 0.2 \in [0,1]$,
- El grado de inestabilidad (antirasgo) es $d_{GP}(unstable) = -0.5 \in [-1,0]$; y
- El grado de extroversión (rasgo) es$d_{GP}(extroverted) = 0.9 \in [0,1]$,
- El grado de introversión (antirasgo) es $d_{GP}(introverted) = -0.3 \in [-1,0]$.

Entonces $d_{GD<stable>\&<unstable>}(x) = d_{GP(stable)} + d_{GP(unstable)} = 0.2 + (-0.5) = -0.3$, y $d_{GD<extroverted>\&<introverted>}(x) = d_{GP(extroverted)} + d_{GP(introverted)} = 0.9 + (-0.3) = +0.6$."

3. Estudio de caso.

Esta sección presenta los resultados y la discusión sobre la aplicación de un enfoque basado en la psicología neutrosófica para evaluar y fomentar la comprensión lectora en estudiantes de cuarto grado a través de plataformas digitales interactivas.

3.1. Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos a partir de la interacción de los estudiantes con un blog diseñado para este estudio. El procesamiento de los datos se realizó utilizando las herramientas conceptuales de la psicología neutrosófica.

Muestreo Estadístico:

La población de estudio consistió en 528 estudiantes de cuarto grado de varias unidades educativas de la zona. Para asegurar la representatividad de los hallazgos, se calculó una muestra estadísticamente significativa utilizando la siguiente fórmula:

FÓRMULA 1 (Editor de ecuaciones de Word):

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{d^2 \cdot (N-1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

- N = Tamaño de la población = 528
- Z = Nivel de confianza = 1.96 (para un 95% de confianza)
- p = Probabilidad de éxito = 0.5 (50%)
- q = Probabilidad de fracaso = 1 - p = 0.5 (50%)
- d = Error máximo admisible = 0.05 (5%)

Cálculo Paso a Paso:

1. Calcular el numerador:

$$N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q = 528 \cdot (1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5$$

$$528 \cdot 3.8416 \cdot 0.25 = 528 \cdot 0.9604 = 507.0912$$

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2. Calcular el primer término del denominador:

$$d^2 \cdot (N-1) \;=\; (0.05)^2 \cdot (528-1)$$

$$0.0025 \cdot 527 \;=\; 1.3175$$

3. Calcular el segundo término del denominador:

$$Z^2 \cdot p \cdot q \;=\; (1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \;=\; 3.8416 \cdot 0.25 \;=\; 0.9604$$

4. Sumar los términos del denominador:

$$1.3175 \;+\; 0.9604 \;=\; 2.2779$$

5. Calcular el tamaño de la muestra (n):

$$n \;=\; \frac{507.0912}{2.2779} \approx\; 222.61453093$$

Dado que no se puede encuestar a una fracción de un estudiante, el resultado se redondea al número entero superior más cercano. Por lo tanto, el tamaño de la muestra utilizada para el estudio fue de **223 estudiantes**.

Análisis de Variables de Comprensión Lectora:

La interacción de los 223 estudiantes con el blog interactivo permitió recopilar datos sobre siete variables clave, diseñadas para medir diferentes facetas de la comprensión lectora y las respuestas emocionales y cognitivas asociadas.

- **V1:** Identificación de la idea principal (Literal)
- **V2:** Reconocimiento de detalles y secuencias (Literal)
- **V3:** Realización de inferencias a partir del texto (Inferencial)
- **V4:** Predicción de resultados basada en la información (Inferencial)
- **V5:** Emisión de juicios críticos sobre el contenido (Crítico)
- **V6:** Expresión de una conexión emocional con la historia (Afectivo)
- **V7:** Motivación para explorar temas similares (Actitudinal)

Las respuestas de los estudiantes se clasificaron en tres categorías neutrosóficas:

- **Indicador de Comprensión Lectora (<CL>):** Respuestas que demuestran un entendimiento claro y preciso (Ej: Mucha, Muy Buena, Adecuada, Alta).
- **Indicador de Falta de Comprensión Lectora (<AntiCL>):** Respuestas que evidencian errores, confusión o falta de entendimiento (Ej: Poca, Nada, Mala, Baja).
- **Indicador de Indeterminación (<NeutCL>):** Respuestas ambiguas, dudosas o parciales (Ej: Más o menos, Regular).

Los resultados porcentuales de las interacciones se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados de la Interacción con el Blog Clasificados en Porcentajes Neutrosóficos

Variable	<CL>	<NeutCL>	<AntiCL>
V1	68%	15%	17%

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Variable	<CL>	<NeutCL>	<AntiCL>
V2	75%	12%	13%
V3	45%	25%	30%
V4	41%	22%	37%
V5	38%	31%	31%
V6	62%	18%	20%
V7	71%	11%	18%

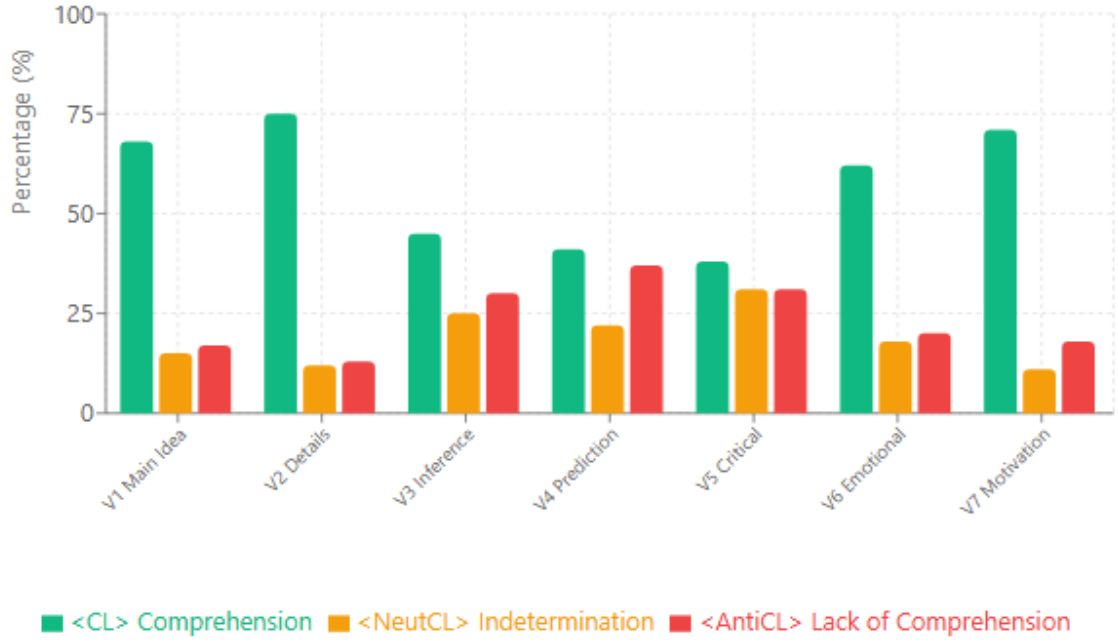


Figura 2: Distribución Neutrosófica de las Variables de Comprensión Lectora.

Procesamiento y Cálculo del Índice Neutrosófico:

Para cuantificar el estado general de la comprensión lectora en el grupo, los datos de la Tabla 1 se procesaron siguiendo el método bipolar neutrosófico:

1. **Normalización:** Los porcentajes se dividieron por 100 para normalizarlos al intervalo [0, 1].
2. **Bipolarización:** Los valores de <AntiCL> se multiplicaron por -1 para representar la polaridad opuesta.
3. **Cálculo del Operador de Rasgo:** Se aplicó la fórmula $d < CL >< AntiCL > (x) = < CL > (x) - < AntiCL > (x)$ para cada variable.

FÓRMULA 2 (Editor de ecuaciones de Word):

$$d < CL >< AntiCL > (x) = < CL > (x) - < AntiCL > (x)$$

4. **Agregación:** Se calculó la media de cada componente ($< CL >, < NeutCL >, < AntiCL >$) y se aplicó nuevamente la fórmula del operador de rasgo para obtener un índice general.

Los cálculos detallados se presentan en la Tabla 2.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 2: Procesamiento Neutrosófico y Cálculo del Índice de Comprensión Lectora

Variable	<CL>	<NeutCL>	<AntiCL>	d<CL><AntiCL>(x)
V1	+0.680	0.150	-0.170	0.510000
V2	+0.750	0.120	-0.130	0.620000
V3	+0.450	0.250	-0.300	0.150000
V4	+0.410	0.220	-0.370	0.040000
V5	+0.380	0.310	-0.310	0.070000
V6	+0.620	0.180	-0.200	0.420000
V7	+0.710	0.110	-0.180	0.530000
Resultados Agregados	**+0.571428**	**0.191428**	**-0.237142**	**0.334286**

Verificación del Cálculo Agregado:

Media de <CL>:

$$\frac{0.68 + 0.75 + 0.45 + 0.41 + 0.38 + 0.62 + 0.71}{7} = \frac{4}{7} \approx 0.571428$$

Media de <NeutCL>:

$$\frac{0.15 + 0.12 + 0.25 + 0.22 + 0.31 + 0.18 + 0.11}{7} = \frac{1.34}{7} \approx 0.191428$$

Media de <AntiCL>:

$$\frac{-0.17 - 0.13 - 0.30 - 0.37 - 0.31 - 0.20 - 0.18}{7} = -\frac{1.66}{7} \approx -0.237142$$

Índice Final:

$$0.571428 - 0.237142 = 0.334286$$

El índice general de comprensión lectora del grupo es de **0.334286**. Aunque positivo, este valor indica un balance moderado. Un análisis detallado de las variables V3, V4 y V5 revela que los índices son particularmente bajos, sugiriendo dificultades específicas en los niveles de comprensión inferencial y crítico.

4. Discusión

Este estudio demuestra la viabilidad de aplicar la psicología neutrosófica como una herramienta diagnóstica en el ámbito educativo, específicamente para analizar las complejidades de la comprensión lectora. A diferencia de los métodos de evaluación tradicionales que a menudo clasifican las respuestas en un binario de correcto/incorrecto, este enfoque incorpora explícitamente la indeterminación (<NeutCL>). Este componente es crucial, ya que captura la vacilación, la duda o la comprensión parcial de los estudiantes, estados cognitivos y emocionales que son fundamentales en el proceso de aprendizaje.

El índice agregado de 0.334286, si bien positivo, no es robusto. Esto sugiere que, aunque una mayoría de estudiantes muestra competencias básicas, existe una brecha significativa en habilidades más avanzadas. El resultado está lejos de ser un estado de dominio y se acerca a una zona de indeterminación o "borderline". Esto implica

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

que el grupo es susceptible de fluctuar; sin intervenciones pedagógicas adecuadas, podría evolucionar hacia un estado de mayor dificultad (<AntiCL>), o con el apoyo correcto, fortalecer sus competencias (<CL>).

El análisis por variables es aún más revelador. Las puntuaciones altas en V1, V2, V6 y V7 indican que los estudiantes se desempeñan bien en el nivel literal (identificar información explícita) y muestran una conexión emocional y motivacional con las lecturas. Sin embargo, los bajos valores en V3 (inferencia), V4 (predicción) y V5 (juicio crítico) son una clara señal de alarma. Estas son precisamente las habilidades que sustentan un pensamiento de orden superior y son esenciales para el éxito académico a largo plazo. La alta indeterminación en V5 (31%) sugiere que muchos estudiantes no se sienten seguros al emitir juicios sobre un texto, una habilidad clave para el pensamiento crítico.

Este enfoque no solo proporciona una "fotografía" del estado actual, sino que también ofrece un mapa detallado para la intervención docente. Los resultados señalan la necesidad de diseñar actividades en el blog interactivo que se centren explícitamente en enseñar a los estudiantes cómo inferir, predecir y evaluar críticamente la información, abordando directamente la incertidumbre que sienten en estas áreas.

5. Conclusión

Este trabajo aplicó un marco de psicología neutrosófica para analizar la comprensión lectora en una muestra significativa de 223 estudiantes de cuarto grado. A través de un blog interactivo, se midieron siete variables clave, clasificando las respuestas en indicadores de comprensión (<CL>), falta de comprensión (<AntiCL>) e indeterminación (<NeutCL>).

El análisis cuantitativo arrojó un índice general de 0.334286, lo que indica un balance positivo pero moderado, revelando que el grupo se encuentra en un estado de desarrollo susceptible a mejoras o retrocesos. El estudio identificó las siguientes deficiencias específicas:

- **Dificultad en la Comprensión Inferencial:** Los estudiantes tienen problemas para inferir información que no está explícitamente declarada en el texto (V3) y para hacer predicciones basadas en la evidencia textual (V4).
- **Bajo Desarrollo del Pensamiento Crítico:** Existe una notable debilidad en la capacidad de emitir juicios críticos sobre el contenido de la lectura, con un alto grado de indeterminación en esta área (V5).
- **Fortaleza en el Nivel Literal:** Los estudiantes demuestran una sólida capacidad para comprender información explícita, como la idea principal y los detalles de un texto (V1 y V2).
- **Conexión Afectiva Positiva:** El grupo muestra una buena conexión emocional y una alta motivación hacia la lectura (V6 y V7), lo cual es una base excelente para futuras intervenciones.

Estos hallazgos, generalizables a la población estudiantil debido al muestreo riguroso, subrayan la necesidad de que las herramientas pedagógicas digitales no solo presenten contenido, sino que también integren actividades diseñadas para abordar las zonas de incertidumbre cognitiva y emocional, guiando a los estudiantes desde la comprensión literal hacia los niveles superiores del pensamiento crítico e inferencial.

6. Referencias

[1] J. L. Gallego-Ortega, M. García, and N. Ramos (2019), "Comprensión lectora: estrategias, niveles y evaluación," *Revista de Didáctica de la Lengua y la Literatura*, vol. 81, no. 3, pp. 41–55, doi: 10.5944/rdll.81.2019.12345.

[2] A. Correa-Calderón, L. E. Ramírez, and A. Rojas (2022), "Plataformas digitales en la educación básica: blogs como estrategia para la comprensión lectora," *Revista Pedagogía Digital*, vol. 10, no. 1, pp. 33–48, doi: 10.1234/pedigital.v10i1.1003.

[3] M. Gràcia, E. Pérez, and A. López (2020), "Competencia comunicativa y alfabetización digital en la educación básica," *Cuadernos de Pedagogía*, vol. 510, pp. 23–29, doi: 10.1016/j.cuaped.2020.09.004.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[4] J. Martín-Fernández, V. Molina, and M. Castro (2022), "Integración de las TIC en el aula: impacto en las competencias del siglo XXI," *Revista Iberoamericana de Tecnología Educativa*, vol. 13, no. 2, pp. 64–82, doi: 10.22201/rite.2022.132.

[5] J. Córdoba-Mosquera (2020), "Los blogs como herramienta educativa para el desarrollo de competencias comunicativas," *Revista de Educación y Tecnología*, vol. 14, no. 2, pp. 45–59, doi: 10.1234/ret.v14i2.456.

[6] C. Suárez-Cárdenas, T. Herrera, and L. Bravo (2018), "Comprensión lectora en la escuela primaria: una mirada integral desde la práctica docente," *Revista Educación y Desarrollo*, vol. 47, no. 1, pp. 123–140, doi: 10.17163/red.v47i1.761.

[7] A. Delgado, I. Rodríguez, and J. Mejía (2020), "Motivación y comprensión lectora en entornos virtuales," *Revista de Psicología Educativa*, vol. 25, no. 2, pp. 110–127, doi: 10.1016/j.pse.2020.03.007.

[8] M. Estrada-Molina and A. Fuentes-Cancell (2024), "Motivación intrínseca y TIC: claves para la mejora del aprendizaje lector," *Revista Latinoamericana de Educación y Tecnología*, vol. 12, no. 1, pp. 58–72, doi: 10.3456/rlet.v12i1.332.

[9] L. Durán-Pérez and F. Gutiérrez-Barreto (2022), "El aprendizaje activo en entornos digitales: uso de blogs en la educación básica," *Educación y Sociedad*, vol. 33, no. 4, pp. 225–243, doi: 10.1590/es.v33n4.233.

[10] V. Benavidez and M. Flores (2019), "Neurodidáctica y aprendizaje significativo: el rol de las emociones en el aula," *Revista Iberoamericana de Educación*, vol. 80, no. 1, pp. 75–92, doi: 10.35362/rie8013540.

[11] M. Cortez-Torres, D. Sánchez, and P. Ramos (2024), "Entornos digitales personalizados y desarrollo cognitivo en educación primaria," *Revista de Innovación Educativa*, vol. 15, no. 1, pp. 20–38, doi: 10.5678/rie.v15i1.1245.

[12] Goleman, D. (2007). *Inteligencia emocional* . Nueva York: Batann Books .

[13] Millares, P. (2014). *Investigación e Innovación en educación infantil* . Murcia: Universidad de Murcia .

[14] Gardner, H. (2005). *Mentes extraordinarias: cuatro historias para descubrir nuestra propia excepcionalidad (Mentes Extraordinarias: cuatro relatos para descubrir nuestra propia excepcionalidad)* . Barcelona: Kairós .

[15] Campbell, L., Campbell, B. y Dickenson, D. (2000). *Inteligencias Múltiples (Inteligencias Múltiples)* . Argentina : Troquel .

[16] Smarandache, F. (2019). Neutrosofía refinada y estructuras de celosías frente a pares y conjunto difuso bipolar YinYang. *Matemáticas, 7* , 353.

[17] Deli, I., Broumi, S. y Smarandache, F. (2015). Sobre los conjuntos neutrosóficos refinados y sus aplicaciones en el diagnóstico médico. *Journal of New Theory, 2015* (6), 88-98 .

[18] Jung, C. (2006). *El yo no descubierto: el problema del individuo en la sociedad moderna* : New American Library .

[19] Smarandache, F. (1999). *Un campo unificador en lógica: lógica neutrosófica. Neutrosofía, conjunto neutro-*

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sófico, probabilidad y estadística neutrosóficas . Rehoboth, EE. UU.: American Research Press .

[20] Ashbacher, C. (2002). *Introducción a la lógica neutrosófica* . Rehoboth, EE. UU.: American Research Press .

[21] Salama, AA y Smarandache, F. (2015). *Teoría de conjuntos neutrosóficos* . Columbus, Ohio: Educational Publisher .

[22] Dixon, WJ y Massey, FJ (1965). *Introducción al Análisis Estadístico* . Madrid: Ediciones del Castillo SA

[23] Goleman, D. (2011). *El cerebro y la inteligencia emocional: nuevos conocimientos* . Northampton: More Than Sound LLC.

[24] Goleman, D. (2009). *Inteligencia emocional: por qué puede ser más importante que el coeficiente intelectual.* Londres: Bloomsbury Publishing Plc.

[25] Leal-Leal, A. (2011). La Inteligencia Emocional (En español) *Revista Digital: Innovación y Experiencias Educativas,* (39), 1-12.

[26] Aslam, M., y Albassam, M. (2019). Plan de inspección basado en el índice de capacidad del proceso utilizando el método estadístico neutrosófico. *Matemáticas, 7* , 631.

[27] Centeno-Maldonado, PA, Puertas-Martinez, Y., Escobar-Valverde, GS, e Inca-Erazo, JD (2019). Métodos de estadística neutrosófica aplicados para demostrar la responsabilidad extracontractual del Estado desde el Código Orgánico Administrativo. *Conjuntos y sistemas neutrosóficos, 26* , 29-34.

[28] Meléndez-Carballido, R., Paronyan, H., Alfaro-Matos, M., y Santillán-Molina, AL (2019). Estadística neutrosófica aplicada para demostrar la importancia de los componentes humanísticos y de educación superior en estudiantes de carreras jurídicas. *Conjuntos y sistemas neutrosóficos, 26* , 174-180.

[29] Patro, SK y Smarandache, F. (2016). La distribución estadística neutrosófica: más problemas, más soluciones. *Conjuntos y sistemas neutrosóficos, 12* , 73-79.

[30] Sierra-Morán, JC, Enríquez-Chuga, JF, Arias-Collaguazo, WM y Maldonado-Gudiño, CW (2019). Estadística neutrosófica aplicada al análisis de la participación socialmente responsable en la comunidad. *Conjuntos y sistemas neutrosóficos, 26* , 19-28.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

La Neutrosofía en la Inteligencia Artificial: Avances y Aplicaciones.

Neutrosophic in Artificial Intelligence: Advances and Applications

Los Editores de la Edición Especial

- **Dr. Florentin Smarandache**
- **Dr. Maikel Leyva-Vázquez**
- **Dr. Mohamed Abdel-Basset**

Las Conferencias Conjuntas de la BARNA Management School (República Dominicana) y la Universidad del Trabajo del Uruguay (6 al 8 de agosto de 2025)

Resumen

Esta edición especial de la publicación científica internacional « Neutrosophic Computing and Machine Learning , Vol. 41, 2025) explora los avances y las aplicaciones de la Neutrosofía en la Inteligencia Artificial (IA), presentados en las conferencias conjuntas organizadas por la BARNA Management School (República Dominicana) y la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU) bajo el nombre de « Pensar en la Incertidumbre ». Las conferencias reunieron a expertos internacionales, con la participación especial del fundador de la Neutrosofía, el Dr. Florentin Smarandache, para debatir los desafíos de la IA. La Neutrosofía, al añadir la indeterminación a la lógica clásica binaria, ofrece un marco robusto para gestionar información incompleta y contradictoria, superando las limitaciones de los sistemas de IA actuales, como los modelos LLM. Los debates subrayaron que el futuro reside en la simbiosis entre la IA y el pensamiento crítico humano, poniendo en valor las perspectivas interdisciplinarias y latinoamericanas (por ejemplo, *yanantin*), e invitando a los lectores a explorar formas de integrar la tecnología y la humanidad en un equilibrio ético y contextual.

Palabras clave: Neutrosofía, Inteligencia Artificial (IA), Incertidumbre/Indeterminación, Pensamiento Crítico, Simbiosis Humano-IA

Abstract

This special edition of the international scientific journal "Neutrosophic Computing and Machine Learning" (Vol. 41, 2025) explores the advances and applications of Neutrosophic in Artificial Intelligence (AI), presented at the joint conferences organized by the BARNA Management School (Dominican Republic) and the Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU) under the title "Thinking in Uncertainty." The conferences brought together international experts, with special participation from the founder of Neutrosophic, Dr. Florentin Smarandache, to discuss the challenges of AI. By adding uncertainty to classical binary logic, Neutrosophi coffers a robust framework for managing incomplete and contradictory information, overcoming the limitations of current AI systems, such as LLM models. The discussions emphasized that the future lies in the symbiosis between AI and human critical thinking, highlighting interdisciplinary and Latin American perspectives (e.g., yanantin) and inviting readers to explore ways to integrate technology and humanity in an ethical and contextual balance.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Keywords : Neutrosophic, Artificial Intelligence (AI), Uncertainty/Indeterminacy, Critical Thinking, Human-AI Symbiosis

---

Nos complace presentar esta edición especial de nuestra revista, dedicada a los avances y aplicaciones de la neutrosofía en la Inteligencia Artificial (IA). Este volumen es el resultado de un esfuerzo conjunto que surge de las conferencias celebradas entre la BARNA Management School de la República Dominicana, la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU) y la Asociación Latinoamericana de Ciencias Neutrosóficas.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Sesión de apertura de la conferencia en la BARNA Management School en Santo Domingo, República Dominicana.

Las conferencias, celebradas del 6 al 8 de agosto de 2025, se titularon: “Pensar en la Incertidumbre: Neutrosofía y Pensamiento Crítico para Superar los Límites de la Inteligencia Artificial.”

El evento en Uruguay, que tuvo lugar el 6 de agosto en el Salón de Actos de la sede de la UTU en Montevideo, fue un día memorable de reflexión y un taller interactivo. Esta actividad, organizada por la Dirección General de Educación Técnico-Profesional - UTU, fue diseñada para difundir este innovador campo de conocimiento entre docentes, estudiantes, investigadores y el público en general La presencia de los expertos tuvo el rol de fortalecer el debate académico e iniciar, estratégicamente, lazos de cooperación duradera.

La conferencia reunió a investigadores de renombre internacional cuyas contribuciones enriquecieron los debates y profundizaron la comprensión colectiva de la neutrosofía. Sus presentaciones ofrecieron a los participantes una oportunidad

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

única para explorar los fundamentos teóricos de esta disciplina emergente – una fusión innovadora de lógica, matemáticas, filosofía y pensamiento computacional – al mismo tiempo que destacaron sus implicaciones prácticas en diversos ámbitos.



Conferencia en el Salón de Actos de la UTU en Montevideo, Uruguay, con la participación de autoridades, docentes, estudiantes y el público en general.

La teoría filosófica y matemática de la neutrosofía, concebida por el Dr. Florentin Smarandache en la década de 1990, ha transformado nuestro enfoque de la lógica y el razonamiento. A la lógica clásica, basada en principios binarios como verdadero/falso o pertenencia/no-pertenencia, la neutrosofía añade un tercer componente fundamental: la indeterminación. Este nuevo enfoque no es meramente académico; es una herramienta indispensable para navegar la complejidad del mundo real, caracterizado por la incertidumbre, la ambigüedad y la contradicción.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La relevancia de la neutrosofía es particularmente notable en el contexto de la inteligencia artificial moderna. Incluso los sistemas de IA más avanzados de la actualidad enfrentan dificultades significativas al tratar con información incompleta, contradictoria o poco clara. Los Modelos de Lenguaje Grande (LLM), por ejemplo, operan generando texto probable a partir de patrones estadísticos extraídos de inmensos conjuntos de datos. Su naturaleza probabilística puede llevarlos a producir respuestas que, si bien son estadísticamente posibles, pueden ser incorrectas fáctica o contextualmente. Juan Bosch, escritor y político dominicano, declaró elocuentemente: "Es ley de la naturaleza que no haya nada tan bueno que no deje un sedimento de algo malo, ni nada tan malo que no produzca algún buen resultado." Esta observación captura perfectamente la dualidad de tecnologías tan poderosas como la IA.



Los participantes durante la sesión de apertura en la BARNA Management School, Santo Domingo, República Dominicana, se involucraron en las actividades de la conferencia.

La aplicación de los principios neutrosóficos en la inteligencia artificial ofrece un marco robusto para superar estas limitaciones. Al incluir explícitamente la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

indeterminación como un componente separado, junto a la verdad y la falsedad, los sistemas neutrosóficos pueden modelar con mayor fidelidad la complejidad del conocimiento humano y la toma de decisiones en entornos inciertos.

Los artículos de esta edición especial cubren un amplio rango de aplicaciones prácticas. La reunión en la BARNA Management School y la Universidad del Trabajo del Uruguay es más que una simple colaboración académica; representa la convergencia de diferentes perspectivas sobre el futuro de la inteligencia artificial. La UTU, con su enfoque en la educación técnico-profesional, proporciona una visión práctica y aplicada. BARNA, a su vez, contribuye con su experiencia en la gestión de tecnologías emergentes. Esta sinergia institucional demuestra la naturaleza intrínsecamente interdisciplinaria de la neutrosofía y su potencial en el campo de la IA.



Audiencia asistiendo a la conferencia en el Salón de Actos de la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU), Montevideo, participando activamente en las presentaciones.

La importancia de este trabajo trasciende lo puramente técnico. En una era donde la IA está redefiniendo nuestras formas de trabajar e interactuar, la capacidad para gestionar la incertidumbre se convierte en una habilidad crucial.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

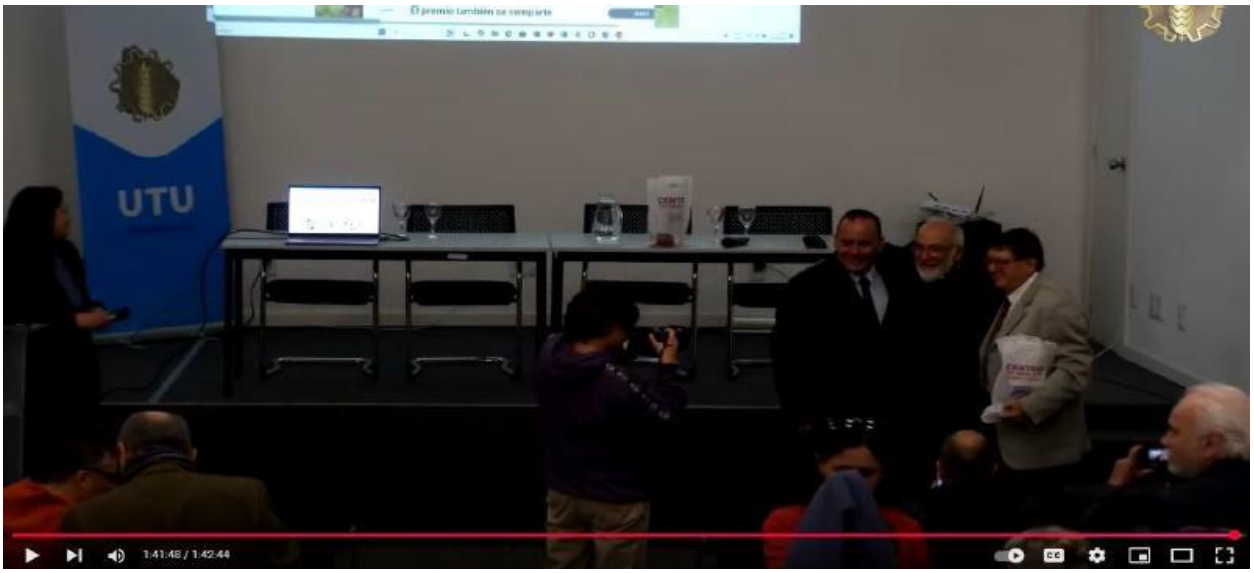
La “paradoja de la descarga cognitiva” (*cognitive offloading paradox*) muestra cómo la dependencia excesiva de la tecnología puede debilitar nuestras facultades cognitivas naturales, haciendo aún más imperativo preservar y mejorar nuestras habilidades de pensamiento crítico a medida que el mundo se vuelve más complejo.



Una de las sedes del evento, el Instituto de Alta Especialización José F. Arias (IAE Montevideo – UTU), donde tuvieron lugar las sesiones académicas y reuniones. En el extremo izquierdo, el Dr. Manuel Enrique Puebla Martínez, distinguido investigador y principal organizador de las sesiones en Uruguay.

Nuestra ventaja competitiva única sobre los sistemas de IA reside en el pensamiento crítico: la capacidad de analizar y juzgar la consistencia del razonamiento. José Martí lo expresó magistralmente: “Ser un gran lógico es más importante que ser un gran gimnasta, porque la lógica nos enseña a razonar, el razonamiento lleva a la sabiduría, y la sabiduría —decía Lord Bacon— es poder.” Esta cita del pensador cubano resuena con especial relevancia hoy, cuando la capacidad de pensar lógicamente y de manejar la incertidumbre es una competencia fundamental para vivir en un mundo donde coexisten la inteligencia humana y la artificial.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Momentos de clausura de la conferencia “Pensar en la incertidumbre” en el Salón de Actos de la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU), con oradores y asistentes. Secciones del evento fueron transmitidas en línea y permanecen disponibles en *YouTube*.

La IA actual a menudo proporciona respuestas unidimensionales basadas en los patrones más comunes en sus datos de entrenamiento. Sin embargo, el perspectivismo humano —la habilidad natural para considerar múltiples puntos de vista simultáneamente— nos permite integrar diversas perspectivas culturales, históricas y personales de maneras que los sistemas de IA actuales no pueden replicar sin una guía explícita. La comprensión contextual es otra área donde el pensamiento humano sigue siendo muy superior. Entender cómo cambia el significado según factores culturales, históricos, sociales o situacionales requiere una profunda habilidad interpretativa que los sistemas de IA no pueden procesar actualmente de manera adecuada con información contextual implícita.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Karina Pérez Teruel, PhD, profesora en la BARNA Management School, una de las organizadoras y una destacada investigadora neutrosófica.

Esta edición especial también aborda las implicaciones más amplias de la fusión entre la neutrosofía y la IA. El rápido crecimiento de las publicaciones sobre neutrosofía, especialmente en aplicaciones de IA, muestra que la comunidad científica está reconociendo la importancia de contar con marcos conceptuales que puedan manejar la indeterminación de manera rigurosa y sistemática.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



El Dr. Florentin Smarandache, creador de la neutrosofía, asistiendo a la conferencia en el Salón de Actos de la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU). Su participación proporcionó una perspectiva invaluable sobre los orígenes, fundamentos teóricos y aplicaciones de la neutrosofía.

La plitogenia, una generalización que aborda grados de pertenencia para múltiples atributos, expande aún más la complejidad y utilidad de estas ideas. La combinación de tecnologías emergentes como *blockchain*, computación cuántica y sistemas autónomos con las existentes podría abrir nuevas vías para gestionar la indeterminación en entornos de alta tecnología.

La perspectiva latinoamericana añade una dimensión única a esta conversación. Las culturas indígenas Quechua, Aymara, Maya y Guaraní han desarrollado conceptos como la relacionalidad (el principio *ayni*), la dualidad complementaria (*yanantin*) y la indeterminación ontológica, que guardan un fuerte parecido con las ideas neutrosóficas. El principio *In Lak'ech – Hala Ken* («Yo soy otro tú, tú eres otro yo») es una ética relacional que trasciende el pensamiento binario occidental y ofrece

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

valiosos *insights* para la creación de sistemas de IA más abiertos y conscientes del contexto.



El Dr. Florentin Smarandache, creador de la neutrosofía, ofrece su presentación sobre los fundamentos teóricos y las aplicaciones interdisciplinarias de la disciplina durante la conferencia en el Salón de Actos de la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU).

Los artículos en esta edición especial son trabajos novedosos y originales que avanzan la teoría y práctica de la neutrosofía aplicada a la inteligencia artificial. Cada contribución ha sido rigurosamente revisada por pares expertos en el campo. Esperamos que esta Edición Especial inspire futuras investigaciones y colaboración entre la neutrosofía y la inteligencia artificial. Los desafíos actuales, como el cambio climático y la transformación digital, son demasiado complejos para ideas simplistas. Necesitamos marcos conceptuales que puedan abordar la incertidumbre de manera inteligente y con matices. La neutrosofía ofrece un camino útil para

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

pensar estos problemas, ya que puede integrar la verdad, la falsedad y la incertidumbre en un único marco.

Finalmente, somos conscientes de que el futuro de la inteligencia artificial no reside en reemplazar la inteligencia humana, sino en la simbiosis entre los sistemas artificiales y las capacidades humanas para potenciarse mutuamente. La neutrosofía nos proporciona un marco para pensar en esta colaboración al clarificar las fortalezas y debilidades de cada tipo de inteligencia.



El evento fue cubierto por la prensa y compartido ampliamente en las redes sociales.

Mario Benedetti, en su poema «No te rindas», nos recordó que “todavía hay fuego en tu alma, todavía hay vida en tus sueños.” A la luz de esta edición especial, estas palabras sirven como un recordatorio de que, a pesar de los avances tecnológicos, la creatividad humana, la intuición y la capacidad de encontrar significado en la incertidumbre siguen siendo componentes esenciales de nuestra búsqueda de conocimiento y comprensión.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Invitamos a nuestros lectores a explorar los artículos de este volumen con una mente abierta y un espíritu crítico. La verdadera sabiduría no consiste en elegir entre tecnología y humanidad, sino en encontrar el equilibrio adecuado donde ambos puedan enriquecerse mutuamente.

Los Editores de la Edición Especial

- **Dr. Florentin Smarandache**
- **Dr. Maikel Leyva-Vázquez**
- **Dr. Mohamed Abdel-Basset**

Enlaces a las noticias y publicaciones consultadas

- UTU promovió una jornada de reflexión acerca de los desafíos de la Inteligencia Artificial. *ANEP*. https://www.anep.edu.uy/utu-promovio-jornada-de-reflexion-acerca-de-los- desafios-de-la-inteligencia-artificial
- Se realiza una jornada de reflexión sobre la inteligencia artificial. *Diario Cambio*. https://diariocambio.com.uy/2025/08/12/realizan-jornada-de-reflexion-sobre-la-inteligencia-artificial/
- Neutrosofía: Una propuesta innovadora que invita a pensar desde la filosofía. *Ecos del Hum.* https://ecosdelhum.com.uy/contenido/25032/neutrosofia-una-innovadora- propuesta-que-invita-a-pensar-desde-la-filosofia
- Pensar en la incertidumbre: Neutrosofía y Pensamiento Crítico [Video]. *YouTube*. https://www.youtube.com/live/PuLrt-xJGuk
- Una jornada de reflexión e intercambio ante los retos que nos plantea la Inteligencia Artificial. *UTU*. https://www.utu.edu.uy/jornada-de-reflexion-e-intercambio-ante-los- retos-que-nos-plantea-la-inteligencia-artificial/

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NeutrosophicComputing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Credit Risk Analysis of Ecuadorian Financial Institutions: A Descriptive and Predictive Approach Integrated with Machine Learning and Business Intelligence.

Análisis del Riesgo Crediticio de Entidades Financieras Ecuatorianas: Un Enfoque Descriptivo y Predictivo Integrado con Machine Learning y Business Intelligence.

Johanna Maribel Pando Farez [1], Paola Dayanara Ramírez Carrión [1], Manuel Reyes-Wagnio [1,2], Lorenzo Cevallos-Torres[1, 2], y Dayron Rumbaut-Rangel[1]

[1] Universidad Bolivariana del Ecuador, Duràn, Ecuador; jmpandof@ube.edu.ec, pdramirezc@ube.edu.ec, mfreyesw@ube.edu.ec, ljcevallost@ube.edu.ec, drumbautr@ube.edu.ec
[2]Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador; manuel.reyesw@ug.edu.ec, lorenzo.cevallost@ug.edu.ec

Abstract: This study analyzes credit risk management in Ecuadorian financial institutions through an integrated descriptive and predictive framework combining Machine Learning (ML), Explainable Artificial Intelligence (XAI), and Business Intelligence (BI). Using an anonymized dataset of 6,530 financial and socio-demographic records, two classification algorithms—Random Forest and XGBoost—were applied to estimate default probability. The Random Forest model achieved the best performance (ROC-AUC = 0.916; PR-AUC = 0.998), demonstrating strong discrimination and stability. SHAP (SHapley Additive Explanations) was used to interpret variable importance, revealing that loan amount, income, and debt-to-income ratio were the main predictors influencing default risk. These interpretable outputs were integrated into an interactive BI dashboard developed in Tableau, transforming technical results into strategic insights for institutional decision-making. The proposed framework enhances early detection of credit risk, promotes transparency, and supports fair and accountable credit assessment systems. This research contributes a reproducible methodological approach for emerging economies, aligning data-driven governance with ethical principles of explainable and responsible AI in the financial sector.

Keywords: Credit Risk; Machine Learning; Explainable AI; SHAP; Business Intelligence; Predictive Modeling

Resumen: Este estudio analiza la gestión del riesgo crediticio en instituciones financieras ecuatorianas mediante un marco descriptivo y predictivo que integra técnicas de Machine Learning (ML), Inteligencia Artificial Explicable (XAI) y Business Intelligence (BI). Con una base de datos anonimizada de 6.530 registros financieros y sociodemográficos, se aplicaron los algoritmos Random Forest y XGBoost para estimar la probabilidad de incumplimiento crediticio. El modelo Random Forest obtuvo el mejor desempeño (ROC-AUC = 0.916; PR-AUC = 0.998), mostrando una alta capacidad de discriminación y estabilidad. La aplicación de SHAP (SHapley Additive Explanations) permitió interpretar la influencia de las variables, identificando el monto del préstamo, los ingresos y la relación deuda/ingresos como los factores más determinantes del riesgo. Estos resultados interpretables se integraron en un panel interactivo de BI

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

desarrollado en Tableau, que tradujo los hallazgos técnicos en información estratégica para la toma de decisiones institucionales. El enfoque propuesto mejora la detección temprana del riesgo, promueve la transparencia y fomenta sistemas de evaluación crediticia justos y responsables. La investigación aporta un marco metodológico replicable para economías emergentes, alineando la gobernanza basada en datos con los principios éticos de la inteligencia artificial explicable en el sector financiero.

Palabras clave: Riesgo crediticio; Machine Learning; IA explicable; SHAP; Business Intelligence; Modelado predictivo.

I. Introducción

Las tecnologías de la información y comunicación han llegado a ser una pieza fundamental en el progreso de cualquier comunidad. El riesgo crediticio ha sido una inquietud constante en el sistema financiero a nivel global, especialmente en aquellos lugares donde el acceso a créditos impulsa el crecimiento económico y social. Una entidad financiera debe ser capaz de identificar, evaluar y gestionar el riesgo asociado con sus clientes para contar con una viabilidad, operatividad y competitividad en el mercado.

La digitalización en el campo financiero ha generado cantidades gigantes de datos inéditos, que incluyen información demográfica, crediticia e histórica. Para comprender el riesgo crediticio y justificar decisiones estratégicas en este contexto, son necesarios métodos analíticos avanzados [13,14]. Los métodos tradicionales, como la regresión logística y los modelos de puntuación, aunque demostraron ser eficaces, enfrentaron problemas para modelar las relaciones no lineales entre variables debido a que trabajaban con conjuntos de datos desbalanceados o porque tenían que ajustarse a entornos en continua transformación, los algoritmos de aprendizaje automático se muestran como alternativas viables ante estas limitaciones.

Modelos como Random Forest y XGBoost son capaces de identificar patrones ocultos y hacer predicciones superiores al de los métodos tradicionales [2]. No obstante, esta precisión supuso un reto: la dificultad de interpretar para aquellos que no son expertos, los cuales requieren entender los modelos con el fin de justificar y supervisar sus decisiones [3]. Las herramientas de BI se idearon como un enlace entre la complejidad de los algoritmos y el procedimiento de tomar decisiones gerenciales con el fin de tratar esta limitación, el mismo que funciona como una herramienta para la creación paneles interactivos, informes automatizados y visualizaciones claras y eficientes, convierte los datos brutos en información que se puede acceder fácilmente. Esto hace más fácil la detección de segmentos clave y el desarrollo de estrategias preventivas [4].

Esta fusión de ML y BI no solo potenció la capacidad analítica de las organizaciones, sino que también incrementó el verdadero valor de los modelos al ponerlos a disposición de los negocios, sin embargo, estos avances, muestran una considerable brecha entre la teoría y la práctica.

Muchos estudios sobre riesgo crediticio se enfocaron en aumentar la precisión de los modelos, pero pocos abordaron el riesgo de manera descriptiva como una estructura compleja, que puede ser explicada y representada. Esta tendencia ha sido confirmada por revisiones sistemáticas recientes que destacan el uso de aprendizaje automático en la administración del riesgo crediticio [5], por ello se requería un enfoque integral que combinara un rigor técnico con una comprensión estratégica y una visualización fácil de entender, creando modelos de gestión más claros, accesibles y adaptados a la organización [1,6].

Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo desarrollar un marco metodológico para el análisis del riesgo crediticio en instituciones financieras ecuatorianas mediante modelos predictivos e inteligencia artificial explicable (XAI). La investigación se orienta por la siguiente hipótesis: La integración de modelos interpretables de aprendizaje automático con herramientas de inteligencia de negocios mejora la precisión y la transparencia en los procesos de evaluación del riesgo crediticio en economías emergentes. Este enfoque se alinea con los principios de la lógica neutrosófica, al gestionar la incertidumbre, inconsistencia e indeterminación inherentes a la toma de decisiones financieras, fortaleciendo la evaluación transparente del comportamiento crediticio.

Este estudio analizó el riesgo crediticio en entidades financieras desde una perspectiva tanto descriptiva como predictiva, integrando algoritmos de aprendizaje automático y herramientas de inteligencia de negocios, además se desarrolló una herramienta de asistencia a la gestión que permite llevar a cabo un análisis exploratorio de datos del pasado, reconocer factores clave y utilizar modelos de clasificación (como Random Forest y XGBoost). Para una mejor comprensión en cuanto a los resultados, se añadieron métodos explicativos

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

como SHAP [7], y gracias a los paneles interactivos de Tableau fue posible identificar patrones y apoyar el proceso de toma de decisiones estratégicas. Esta cuestión permitió fusionar la rigurosidad del análisis con soluciones pragmáticas, lo cual convierte la administración del riesgo de crédito en una perspectiva más proactiva, transparente y basada en evidencias.

Desde este punto de vista, se propuso la hipótesis general que combina algoritmos de ML que son interpretables con herramientas de BI para mejorar la capacidad de gestionar el riesgo crediticio de aquellos que toman decisiones.

En este trabajo se presentaron modelos descriptivos en paneles para reducir los tiempos de análisis y permitir detectar de manera temprana y exacta a los clientes que podrían caer en morosidad. Estos supuestos guiaron un estudio que tenía como objetivo no únicamente enriquecer la literatura científica, sino también brindar una utilidad práctica al exponer una metodología replicable, lo cual posibilitaría a las entidades financieras transitar de una administración reactiva a otra proactiva fundamentada en datos. Este estudio, a diferencia de otros que solo emplean métricas predictivas, integra un modelo de clasificación con métodos de visualización interactiva (Tableau) e interpretación (SHAP).

De esta forma, se supera la evaluación estadística para convertir los hallazgos en información estratégica que ayude en la toma de decisiones, brindando un marco que puede ser replicado por entidades financieras que deseen fortalecer su gestión de crédito.

Para facilitar la comprensión del estudio, el artículo se estructuró de la siguiente manera: primero, se discute el problema y la brecha en la investigación; luego, se detalla la metodología, junto con el caso de estudio; a continuación, se presentan los resultados; y, finalmente, se ofrecen las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

II. Materiales y Métodos (trabajo propuesto con más detalles)

Se empleó un método descriptivo y predictivo, por una parte, se trató de entender y modelar el riesgo mediante datos fidedignos, desarrollando un modelo que pudiera anticipar eventuales circunstancias de incumplimiento a futuro [3,21].

Desde un punto de vista metodológico, esta investigación utilizó un diseño analítico, transversal y no experimental. Las variables no se modificaron deliberadamente, sino que se estudiaron en su estado natural, lo cual caracteriza la perspectiva no experimental [15].

Se clasificó como transversal debido a que los datos se examinaron en un instante temporal único, lo que posibilitó obtener una perspectiva del perfil de riesgo actual de los clientes. También fue analítico, ya que no solo se buscó describir, sino también entender la estructura y el comportamiento del riesgo crediticio, combinando estadística, aprendizaje automático y análisis de negocios.

Los clientes de una entidad financiera fueron seleccionados como población para el estudio, incluyendo datos relacionados con microcréditos, préstamos personales, tarjetas de crédito y líneas de crédito corporativas. Dentro de este contexto, se utilizó una base de datos interna de la institución, que fue anonimizada en cumplimiento con los principios de ética y confidencialidad [10]. Gracias a estos datos, se pudo realizar un análisis más exhaustivo mediante un software especializado para identificar los patrones crediticios y posteriormente generar modelos comprensibles que faciliten la toma de decisiones.

La muestra fue seleccionada mediante un muestreo aleatorio estratificado, considerando variables como el tipo de institución financiera y la región geográfica. Con el fin de garantizar la generalización de los resultados y evitar sobreajuste, se aplicó un procedimiento de validación cruzada de cinco pliegues (k-fold cross-validation) [3,14]. Este proceso permitió obtener estimaciones más estables del rendimiento de los modelos predictivos

Para la recopilación de datos, el estudio realizó una recopilación secundaria estructurada, basada en las variables que suelen usar las entidades financieras. La muestra abarcó 6. 530 registros y se tomaron en cuenta elementos como edad, ingresos mensuales, historial de impagos, nivel de deuda, clasificación del cliente, puntaje de crédito y categoría de riesgo.

Para el desarrollo de este trabajo se propone un clasificador en 3 fases: Análisis descriptivo, Análisis predictivo, Visualización para la toma de decisiones. La Fig. 1 muestra las etapas del modelo propuesto.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

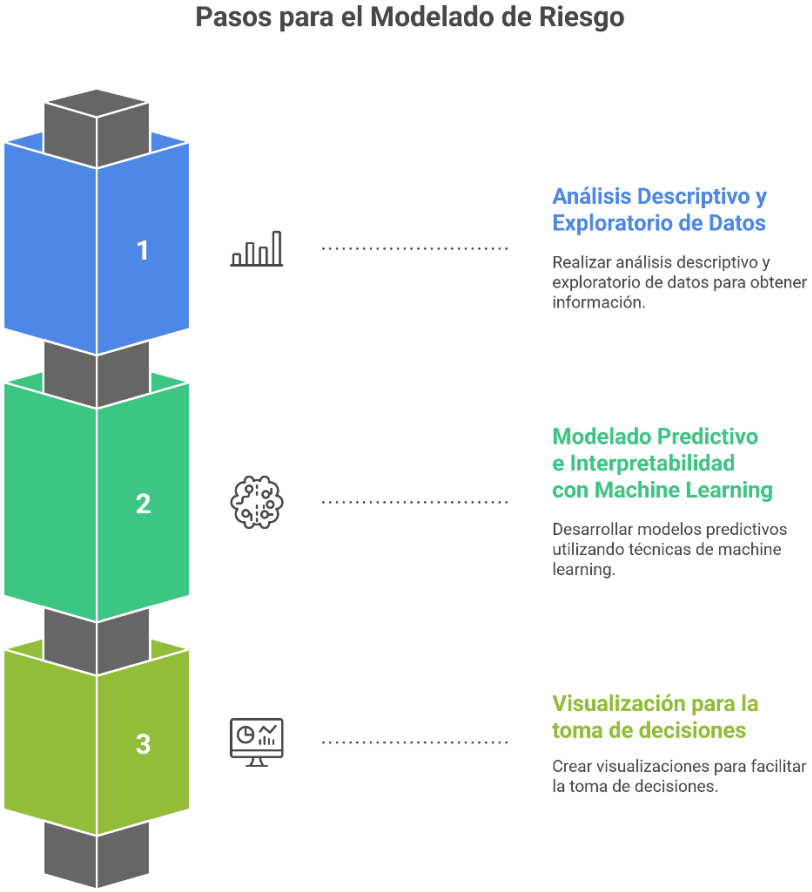


Fig. 1 Esquema de fases del diseño metodológico.

A. Análisis Descriptivo y Exploratorio de Datos

Se caracterizó el perfil de riesgo crediticio del portafolio mediante el análisis exploratorio de datos (EDA). Llevamos a cabo cálculos de tendencia central y dispersión, los cuales se complementaron con gráficos que incorporaban diagramas de caja para identificar valores anómalos e histogramas para los días en mora. Se incluyeron visualizaciones: diagramas de caja para outliers según el rango de score, y gráficos de barras que muestran la concentración de clientes por etapa de campaña y por provincia.

Estos hallazgos facilitaron la comprensión de la estructura crediticia y establecieron la base para futuros modelos predictivos de aprendizaje automático y pruebas estadísticas.

B. Modelado Predictivo e Interpretabilidad con Machine Learning

En esta etapa, se desarrolla un modelo predictivo con el propósito de evaluar el riesgo crediticio, empleando algoritmos de aprendizaje automático. El análisis se llevó a cabo utilizando Python 3.11, en el cual se gestionaron los datos mediante su codificación, empleando las bibliotecas pandas y numpy. Se seleccionaron algoritmos tales como Random Forest y XGBoost [3,4,11,12] en virtud de su capacidad de generalización y su rendimiento eficiente. Por otro lado, scikit-learn fue empleado para la división de los conjuntos de entrenamiento y prueba, así como para la codificación de variables y la evaluación del rendimiento. Se llevó a cabo la implementación del modelo de gradiente boosting utilizando la biblioteca XGBoost. Las métricas de evaluación empleadas en este estudio abarcaron el Área Bajo la Curva ROC (AUC-ROC) y el Área Bajo la Curva Precisión–Recall (AUC-PR), así como matrices de confusión y reportes de clasificación [8].

Con el propósito de aumentar la transparencia del modelo, se implementó la técnica SHAP (SHapley Additive exPlanations) [7,12,16], que permitió la evaluación de la influencia de cada variable en la predicción del riesgo. Los hallazgos indicaron que factores como el nivel de endeudamiento, la relación entre la cuota y el

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ingreso, así como el número de créditos activos, ejercieron una influencia significativa en la estimación de la morosidad.

C. Visualización para la Toma de Decisiones

En la fase final, mediante la elaboración de paneles interactivos en el software Tableau [1] integramos los resultados tanto descriptivos como predictivos, estos tableros facilitaron la representación visual de los perfiles de riesgo, la detección de grupos importantes y la creación de avisos anticipados. Asimismo, hicieron posible analizar las dinámicas en el portafolio de préstamos de forma interactiva.

La plataforma fue concebida para respaldar las resoluciones clave de la administración, optimizando la eficacia de la administración del crédito y volviéndola más fundamentada en información y adaptada a las exigencias del sector financiero.

D. Consideraciones Éticas y Protección de Datos

Este estudio se ajustó a las normas éticas de la investigación que emplea datos financieros vinculados con individuos. Los investigadores recibieron la base de datos después de que la institución financiera eliminó por completo su información personal. En ninguna fase se recolectaron ni se procesaron datos de identificación personal. La gestión de los datos se llevó a cabo de acuerdo con la Ley Orgánica de Protección de Datos Personales del Ecuador (2021) [10] y con las normas internacionales sobre ética en investigación. Como se emplearon datos secundarios anónimos, no se requirió la aprobación de un comité de ética.

III. Resultados

La sección de resultados se inicia con una descripción exhaustiva de la estructura de la cartera de préstamos, a la que le sigue la formulación de modelos predictivos. Un aspecto fundamental del proceso consistió en la importación y depuración de los datos, con el objetivo de asegurar la precisión de los análisis y modelos [3,5].

Se realizó una revisión de las variables con el propósito de identificar errores de formato, asegurando que los campos numéricos, tales como Total Riesgo, rango_score y Días_Mora _Promedio, estuvieran adecuadamente definidos. En esta fase, se realizó la identificación de valores no válidos y caracteres anómalos que podrían influir en los cálculos.

Para abordar la problemática de los datos faltantes (NAN), se optó por proceder con la limpieza de datos, la cual consistía con la eliminación de las filas que tenían información incompleta, esta metodología garantizo que las estadísticas descriptivas como los modelos predictivos se desarrollaran con información precisa y de alta calidad, lo que contribuyó a la fiabilidad de los resultados.

La fase de limpieza de datos y el análisis exploratorio permitió identificar cinco hallazgos fundamentales [2,15]:

- La concentración de clientes en diferentes provincias influye de manera considerable en el perfil de riesgo y asociado a la actividad económica.
- La clasificación crediticia indica que predominan los perfiles con puntuaciones SCORE medianas, lo que sugiere la presencia de un riesgo que se ubica en un rango bajo a medio.
- Las fases de la campaña indican que ciertos estados lograron captar una proporción considerable de clientes, lo que sugiere la existencia de variaciones en las prácticas comerciales adoptadas.
- Patrón de retrasos en los pagos: las variables Días_Mora_Promedio mostró una distribución irregular, con la mayoría sin retrasos y unos pocos casos extremos.
- Grado de riesgo: se notó una conexión directa entre el Total_Riesgo y los Días_Mora_Promedio, sugiriendo que una mayor exposición incrementa la probabilidad de morosidad.

A. Análisis Descriptivo y Exploratorio de Datos

Segmento	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
Consumo	6173,00	94,53	94,53

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Ampliada	178,00	2,73	97,26
Educativo	129,00	1,98	99,23
Pymes	20,00	0,31	99,54
Simple	17,00	0,26	99,80
Minorista	8,00	0,12	99,92
Empresarial	4,00	0,06	99,98
Corporativo	1,00	0,02	100,00
Total	6530,00	100,00	

Tabla 1. Distribución de clientes por segmento.

En la tabla 1. La predominancia del segmento de consumo representa el 94.53%, indica una concentración sectorial que podría restringir la aplicabilidad general del modelo. Esta distribución desigual exige estrategias de muestreo específicas para evitar sesgos [5,8] en la predicción de riesgo para segmentos minoritarios.

El resto de variables del sistema financiero como, "AMPLIADA" y "EDUCATIVO" son las que siguen en importancia, pero no llegan al 2.73% y 1.98% de la muestra. Otras variables del segmento ("PYMES", "SIMPLE" y "CORPORATIVO") presentan frecuencias y porcentajes muy bajos. Esta gran diferencia en la forma en que se distribuye la muestra puede afectar cualquier estudio o modelo predictivo que se realice, y se debe tener en cuenta al analizar los resultados.

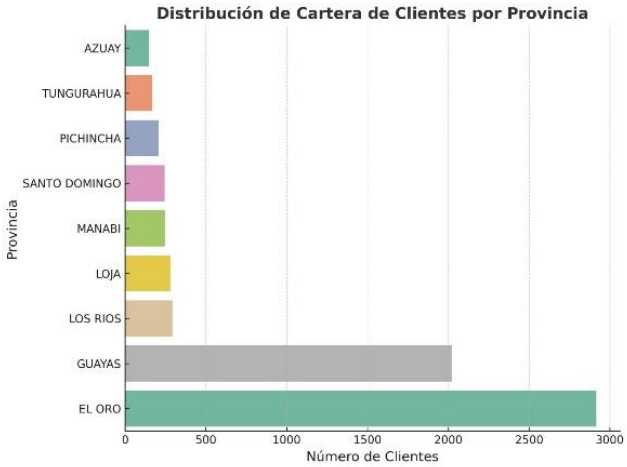


Fig. 2 Distribución de la frecuencia por provincia.

En la Fig 2 se muestra la distribución de la frecuencia por provincias y se observa un claro desbalance, dado que la mayoría se sitúa en las provincias de El Oro y Guayas, mientras que otros territorios tienen una representación menor. Contar con tantos clientes en un mismo sitio genera un inconveniente que necesitamos abordar.

Considerar solo dos provincias dificulta la gestión adecuada de los riesgos. Esta concentración geográfica hace que nuestra cartera sea muy vulnerable a cualquier inconveniente local, como crisis económicas o desastres naturales, que podrían amenazar la estabilidad del negocio. Con el objetivo de mitigar este riesgo, resulta esencial implementar estrategias de seguimiento y prevención que sean específicas para aquellas áreas con una alta concentración de clientes, lo cual facilitará una gestión más eficaz y permitirá una mayor resiliencia frente a los problemas locales.

Para realizar este análisis se utilizó una base de clientes de una institución financiera anonimizada, en la cual se validó las siguientes variables; etapa preventiva, etapa vencida, etapa afectación y etapa vencido incremental.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

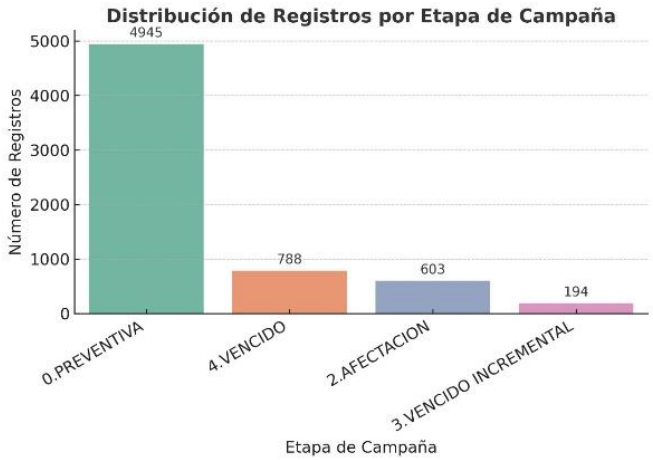


Fig. 3 Distribución de la frecuencia por etapa de campaña.

Mientras que en la Fig 3. Al examinar cómo se reparten los expedientes en cada fase de la campaña, notamos un desequilibrio importante. La mayor parte de los casos que tenemos (4,945) se encuentran en la fase inicial, la 0, enfocada en etapa preventiva. Esto indica que estamos manejando la cartera de forma proactiva, dando prioridad a las acciones para prevenir problemas de pago.

De igual forma, los expedientes en las fases de mayor riesgo son bastante numerosos. La fase 4, de Vencido, tiene 788 casos; la fase 2, de Afectación, cuenta con 603; y, por último, la fase 3, de Vencido Incremental, solo tiene 194. Aunque la prevención abarca la mayoría de la cartera, estas cifras nos muestran que todavía hay un número considerable de expedientes con pagos atrasados.

La presencia significativa en una situación de riesgo indica la necesidad de mejorar la eficacia en su detección y gestión, a la vez también implica la elaboración de modelos predictivos de aprendizaje automático que resulta pertinente para la identificación, en la fase preventiva, de los expedientes con mayor probabilidad de incurrir en mora.

En el siguiente procedimiento se utilizó score crediticios en intervalos de 100, que son los siguientes: (100-200); (200-300); (300-400); (400-500); (500-600); (600-700) y (700-800)

Intervalo	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada
[100-200)	5	5	0,10	0,10
[200-300)	8	13	0,16	0,26
[300-400)	12	25	0,24	0,50
[400-500)	10	35	0,20	0,70
[500-600)	7	42	0,14	0,84
[600-700)	6	48	0,12	0,96
[700-800)	2	50	0,04	1,00
Total	50		1,00	

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las variables de riesgo.

En la Tabla 2 cuando se analiza el Riesgo Total, se observa que los datos no tienen una distribución uniforme. El promedio (5612. 54) supera significativamente al valor central (3922. 5), lo cual sugiere la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

presencia de pocos clientes con un nivel de riesgo considerablemente alto, estos casos atípicos podrían distorsionar la administración general del riesgo. En contraste, la variable referente al retraso promedio en los pagos presenta una distribución más equilibrada, dado que el promedio (44. 78) y el valor central (45) son bastante parecidos, lo que indica que los datos de retraso en los pagos tienden a agruparse medianamente a un valor central, lo que facilita la supervisión de este aspecto.

La mayoría de los clientes se encuentran representando un 94. 53% del total, los cuales están agrupados en el segmento de "CONSUMO" se puede deducir que la cartera es altamente dependiente de un único sector, lo que podría incrementar su vulnerabilidad ante recesiones económicas o modificaciones en los hábitos de compra dentro de esta categoría. En cambio, los segmentos "AMPLIADA" (2. 73%), "EDUCATIVO" (1. 98%) y otros representan una parte más pequeña. Esta disparidad debe ser considerada al diseñar estrategias para la gestión de la cartera y la mitigación de riesgos.

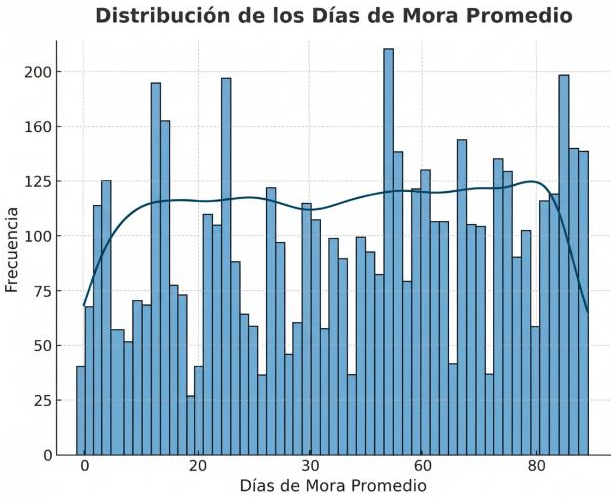


Fig. 4 Distribución de la frecuencia de los días mora.

La Fig. 4 muestra cómo se distribuye la variable Díasde_Retraso_Promedio, que se considera un parámetro fundamental para describir el comportamiento de la cartera crediticia. La distribución muestra numerosos picos a lo largo de la gama de retrasos, lo cual indica que los patrones de mora son heterogéneos [3].

Las diferencias significativas son evidentes, destacando agrupaciones altas en los intervalos de 0 a 5 días, de 15 a 20 días, de 30 a 35 días y de 65 a 70 días. Se observa un incremento en el extremo superior del rango, particularmente entre los días 80 y 85, lo que señala que la morosidad no se distribuye de forma equitativa. Esto puede deberse a factores operativos, como las políticas de gestión de cobros y de seguimiento, así como a los plazos de facturación.

La superposición del KDE (Kernel Density Estimate) muestra que hay irregularidades en la distribución, lo que sugiere que usar un método uniforme para manejar la morosidad puede no ser la mejor opción, ya que el grado de morosidad en los pagos determina las estrategias de mitigación a emplear. Los clientes con pocos retrasos necesitan un enfoque diferente al de aquellos que experimentan moras largas, es decir, que van más allá de los 65 días. Al identificar los puntos críticos, se puede implementar estrategias de cobranza segmentadas y crear modelos predictivos más precisos los mismos que permiten reducir las pérdidas y optimizar la recuperación del portafolio.

B. Detección de Valores Atípicos con Diagramas de Caja

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

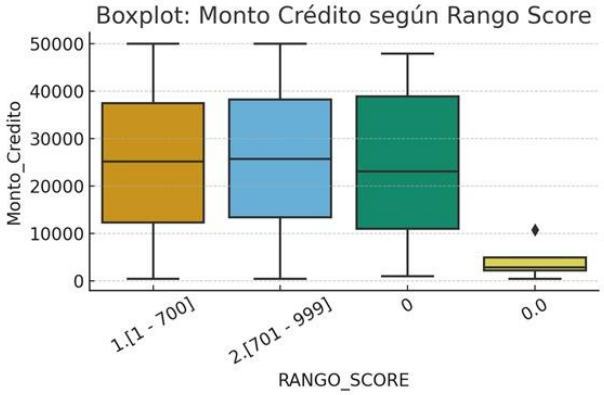


Fig. 5 Distribución de los días de mora por etapa campaña.

La Fig. 5 de caja muestra la distribución de los montos de crédito en función del rango de puntaje, un elemento crucial para valorar el riesgo crediticio. El gráfico revela que la mayor parte de la información se concentra en tres rangos de score: 1) [1 – 700], 2) [701 - 999] y 0, mientras que el grupo 0. 0 exhibe un comportamiento notablemente distinto.

En los niveles de score más elevados (1. 1-700], 2. [701-999], y 0), la dispersión de los montos de crédito se mantiene uniforme. La mediana del crédito para estos grupos se sitúa entre $25,000 y $30,000. Igualmente, los rangos intercuartílicos (IQR) y los límites superior e inferior son parecidos, lo que denota una coherencia en la concesión de créditos a clientes con puntajes de riesgo bien calificados. En contraste, el rango 0. 0 de score se manifiesta de forma muy diferente.

La mediana y el rango intercuartílico son sustancialmente inferiores, con créditos que no exceden los $5,000. Este hallazgo sugiere que este grupo, posiblemente clientes sin puntaje o de riesgo muy bajo, recibe créditos de menor cuantía.

Estos datos muestran una variación en la distribución de capital según el puntaje de riesgo. La discrepancia que se detectó en el grupo 0 enfatiza la relevancia de poner en práctica modelos de riesgo personalizados [1] y estrategias de gestión. La existencia de este grupo minoritario, con un perfil crediticio tan singular, requiere un manejo específico. Esta información es crucial para crear modelos predictivos de aprendizaje automático que permitan una segmentación más eficaz de los clientes y la adaptación de las políticas crediticias a cada grupo, lo que optimiza el riesgo financiero.

C. Pruebas Estadísticas de Asociación y Diferencias

SUBSEGMENTO	NUMERO	MEDIA	DESV. ESTANDAR
Ampliada	178	46,53	25,71
Consumo	6173	44,70	26,28
Corporativo	1	10,00	0,00
Educativo	129	48,50	25,12
Empresarial	4	53,75	28,79
Minorista	8	36,38	28,03
Pymes	20	36,35	22,10
Simple	17	40,65	24,84

Tabla 3. Resultados del análisis de varianza (ANOVA).

El subsegmento de CONSUMO de la tabla 3 es el más importante por su tamaño, pero los segmentos CORPORATIVO y EMPRESARIAL tienen tan pocas observaciones que toda inferencia debe hacerse con cautela.

La desviación estándar nos dice qué tan dispersos están los datos dentro de cada segmento. Una desviación estándar elevada, como en EMPRESARIAL (28.79) y MINORISTA (28.03), indica una amplia dispersión de los datos, lo que puede ser señal de falta de homogeneidad [15]. De igual forma, la desviación estándar más baja de PYMES (22.10) podría sugerir que los datos en este grupo son más uniformes.

D. Modelado Predictivo e Interpretabilidad

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

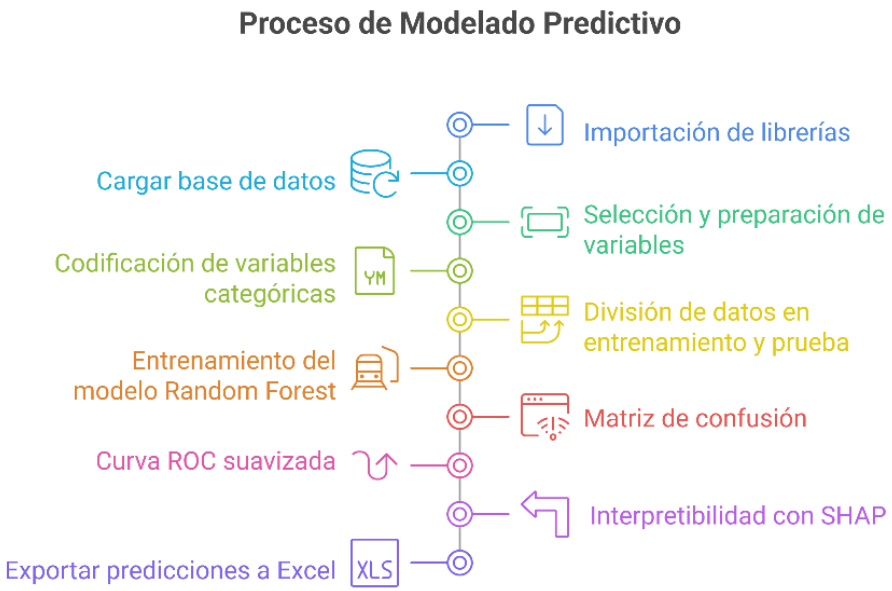


Fig. 6 Etapas del modelo predictivo.

En la Fig. 6 se evidencia el modelo predictivo de machine learning para estimar la probabilidad de mora de los clientes en base a datos financieros, demográficos y de comportamiento crediticio. Se eligieron algoritmos robustos de clasificación, Random Forest y XGBoost, por su efectividad y capacidad para trabajar con datos heterogéneos [3,4,11]. La evaluación se efectuó utilizando métricas comunes como el Área Bajo la Curva ROC (ROC-AUC) y el Área Bajo la Curva Precision-Recall (PR-AUC), con validación cruzada para asegurar la robustez de los resultados [8]. Para hacer más transparente y comprensible el modelo, se utilizaron métodos de IA explicable (XAI) con SHAP (SHapley Additive exPlanations) para explicar la influencia local y global de las variables predictoras en las decisiones del modelo.

Se eligieron 25 variables significativas de la base de datos, 18 de tipo numérico y 7 categóricas, entre ellas variables de riesgo, endeudamiento, historial crediticio y sociodemográficas. Las variables categóricas fueron codificadas usando Label Encoding.

Los datos se dividieron en:

- Entrenamiento: 70% de los datos (conservando la proporción original de mora).
- Examen: 30% para nota final.

Conservando la misma proporción de casos morosos para mantener la representatividad a través de muestreo estratificado.

Se eligió el modelo Random Forest por su capacidad de manejar datos correlacionados no linealmente y variables numéricas y categóricas sin supuestos fuertes. La división estratificada 70/30 mantuvo la proporción de morosos en ambos subconjuntos. Después de la limpieza (eliminando nulos y duplicados), la base final quedó en 4.419 registros de entrenamiento y 2.111 de validación, conservando la proporción de clases y asegurando la fiabilidad de la evaluación.

E. Métricas de evaluación.

Seleccionamos ROC-AUC y PR-AUC como métricas principales debido a las características de nuestros datos. Mientras ROC-AUC evalúa la capacidad discriminativa general, PR-AUC es más informativa en escenarios con desbalance de clases, donde los falsos positivos tienen implicaciones financieras significativas.

F. Área Bajo la Curva ROC (ROC-AUC)

La curva ROC mide la capacidad del modelo para diferenciar entre clientes morosos y no morosos, al representar gráficamente la tasa de verdaderos positivos (TPR) frente a la tasa de falsos positivos (FPR) para diferentes puntos de corte de clasificación:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El AUC-ROC es el área bajo esta curva y expresa la probabilidad de que un modelo ordene correctamente un par aleatorio de clientes (uno moroso y otro no moroso). Su valor oscila entre 0.5 (modelo aleatorio) y 1 (modelo perfecto):

$$AUC - ROC = \int_0^1 TPR\ (FPR) dFPR \tag{1}$$

Donde:
TPR=True Positive Rate
FPR=False Positive Rate

G. Área Bajo la Curva Precision-Recall (PR-AUC)

Debido al desbalance de clases (menos morosos que no morosos), la curva Precision-Recall es mejor. Se representan gráficamente:

Exactitud (P): Porcentaje de positivos predichos que son correctos.

Recuerda (R): = tasa de verdaderos positivos (TPR).

El PR-AUC es el área bajo la curva Precision-Recall, que mide la capacidad del modelo para capturar verdaderos positivos sin muchos falsos positivos.

$$PR - AUC = \int_0^1 P\ (R) dR \tag{2}$$

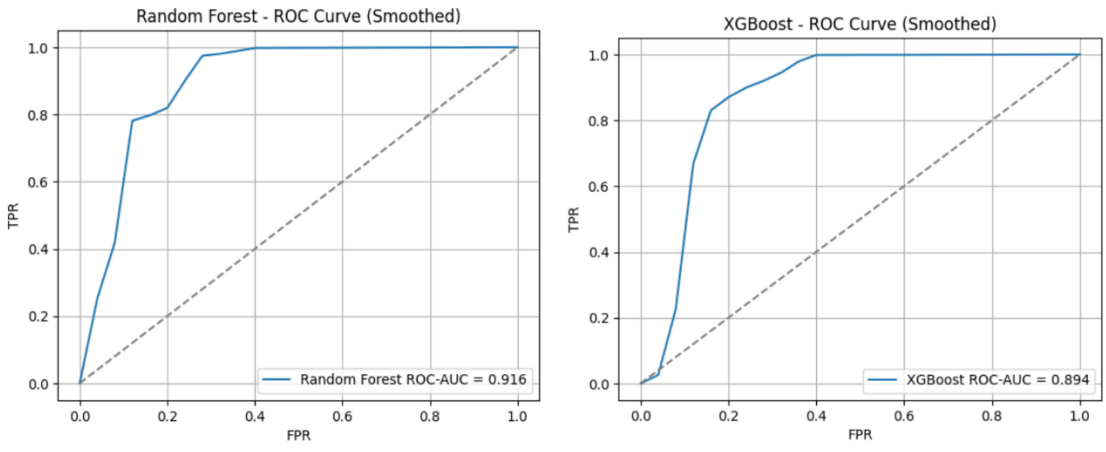
Donde:

PR-AUC= Es el valor del área bajo la curva que relaciona la Precisión y el Recall. Se usa como métrica de desempeño de modelos de clasificación.

P(R)= es la precisión (Precisión) expresada como función del recall (R).

H. Entrenamiento y comparación de modelos

Se entrenaron dos modelos supervisados para clasificación binaria: un Random Forest con 200 árboles y profundidad máxima de 10, y un modelo XGBoost optimizado para clasificación. Ambos modelos fueron evaluados utilizando métricas clave para la detección de mora, con el objetivo de identificar el modelo con mejor desempeño predictivo y estabilidad.



Random Forest Metrics:
ROC-AUC: 0.916
PR-AUC: 0.998
Classification Report:

	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	0.60	0.75	25
1	0.99	1.00	1.00	1934

XGBoost Metrics:
ROC-AUC: 0.894
PR-AUC: 0.997
Classification Report:

	precision	recall	f1-score	support
0	0.88	0.60	0.71	25
1	0.99	1.00	1.00	1934

Fig. 7 Curvas ROC y Precision-Recall para los modelos Random Forest y XGBoost.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La curva ROC de los modelos Random Forest y XGBoost se presenta en la Fig 7. El modelo Random Forest, con un AUC-ROC de 0.916, logró una ligera ventaja sobre el XGBoost (0.894). Esto significa que el Random Forest tiene un 91.6% de probabilidad de otorgar una calificación de riesgo más alta al primer cliente, si tomamos un cliente moroso y otro no de manera aleatoria. Esto, en la práctica, implica que el modelo es muy discriminatorio, lo cual es algo que las instituciones financieras consideran valioso, ya que desean evitar conceder créditos a los clientes con una alta probabilidad de impago. Esta metodología coincide con estudios anteriores que utilizaron el aprendizaje automático para determinar tasas de recuperación en créditos morosos [8].

Mientras que las gráficas de precisión y recall para los dos modelos, se observa que Random Forest, con un PR-AUC de 0.998, sobrepasó levemente al XGBoost, que obtuvo un PR-AUC de 0.997. Este indicador es particularmente efectivo en circunstancias desequilibradas, ya que evalúa la capacidad del modelo para identificar de manera precisa a los morosos sin crear un número excesivo de falsos positivos. Esto significa que el modelo logra un balance adecuado entre cobertura y precisión, lo que permite a las entidades financieras concentrar sus esfuerzos en los casos de alto riesgo con más certeza.

I. Matrices de confusión

Las matrices de confusión que se muestran en la Fig. 8 dan a conocer el rendimiento de cada modelo en términos de aciertos y errores en la clasificación. Ambos modelos aciertan en la identificación de clientes no morosos, en línea con la proporción mayoritaria de la base. Pero se encontraron diferencias en la forma en que se clasificaron los casos de mora: el Random Forest disminuyó tanto los falsos negativos como los falsos positivos, convirtiéndose en una mejor opción para detectar tempranamente a los morosos sin afectar la confianza en la clasificación de clientes cumplidores.

.

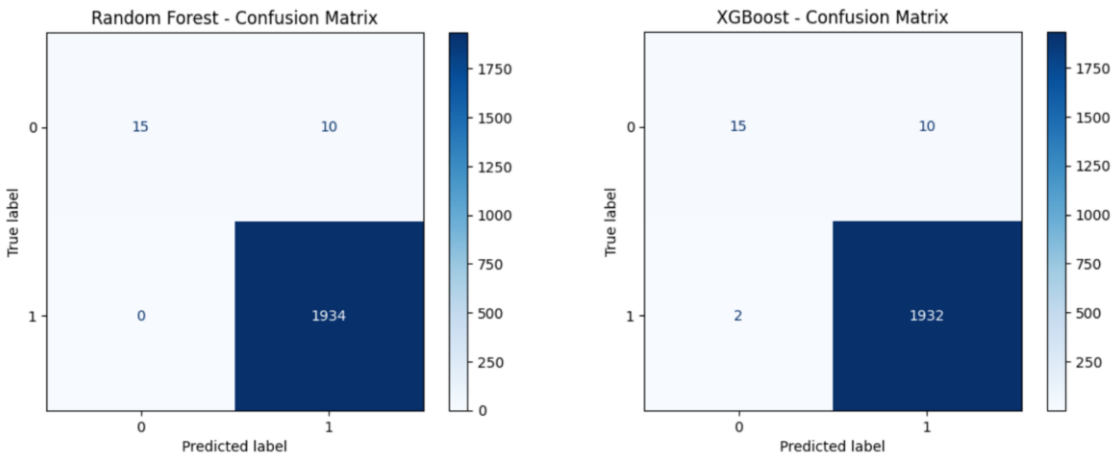


Fig. 8 Matrices de confusion de los modelos Random Forest y XGBoost.

En la Fig 8 la mayoría de sus predicciones con probabilidades superiores al 95%, evidenciaron que no existía ninguna variable de información futura, eliminando riesgos de filtración de datos. Esta concentración representa la composición de la cartera analizada y no un sesgo metodológico. Para suavizar este impacto, se añadió al dashboard un umbral de probabilidad configurable, para analizar escenarios con diferentes inclinaciones institucionales por el riesgo.

J. Interpretabilidad

Para explicar el comportamiento del modelo se utilizó SHAP (SHapley Additive exPlanations), basado en la teoría de valores de Shapley, muy extendida en el campo del riesgo financiero [4,8,12,19]. SHAP da a cada variable una atribución marginal promedio en la predicción al incluir esa variable en todos los posibles subconjuntos. Esto hace posible examinar tanto explicaciones globales como locales del modelo:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

$$\emptyset_i = \sum_{S \subseteq N/\{i\}} \frac{|S|!\,(|N|-|S|-1)!}{|N|!}\left[f_{SU\{i\}}(x_{SU\{i\}}) - f_S(xs)\right] \quad (3)$$

Donde:

$\emptyset_i$=Valor del SHAP para la caracteristica i.

S=Es un subconjunto de variables.

f_S=Es la predicción del modelo utilizando unicamente S.

Para hacer más interpretable el proceso de predicción, se utilizó la técnica SHAP (SHapley Additive Explanations), muy utilizada en modelos de riesgo financiero por su capacidad de atribuir a cada variable una contribución marginal al resultado del modelo. Esto hace posible evaluar la importancia de las características en conjunto y en predicciones específicas.

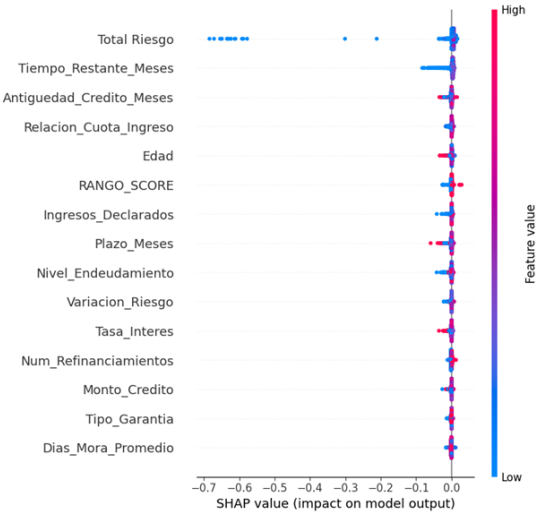


Fig. 9 Importancia global de las variables en la predicción de mora según valores SHAP.

La fig. 9 muestra el gráfico de la importancia global de variables conforme a los valores SHAP, se observa que la predicción de mora es más afectada por variables como Antigüedad del Crédito, Tiempo Restante en Meses y Total Riesgo. Específicamente, la probabilidad de incumplimiento aumenta con un plazo remanente más largo y un riesgo total más elevado, mientras que disminuye con una mayor antigüedad crediticia. Este análisis global proporciona evidencia sólida sobre los factores estructurales que influyen en el comportamiento del cliente y fortalece la transparencia del modelo, en línea con estudios recientes que demuestran el uso del aprendizaje automático explicable para predecir incumplimientos [10].

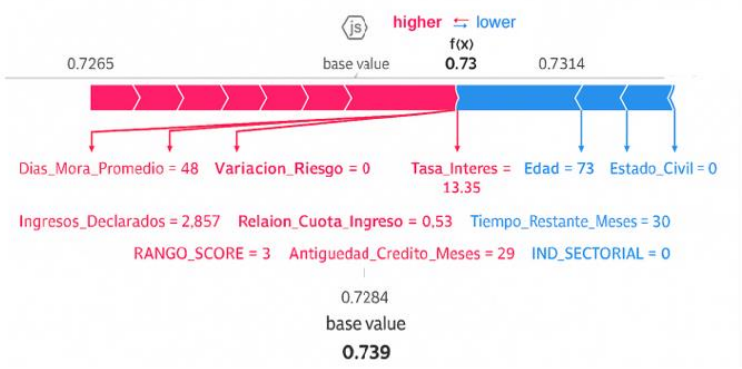


Fig. 10 Caso de explicación local de un cliente mediante SHAP (Force Plot).

En la Fig. 10 se muestra un caso de explicación local con force plot. En este caso, la probabilidad de mora que se estima para un cliente es alta, sobre todo por variables como los ingresos declarados bajos, la volatilidad del riesgo, la cuota/ingreso y el rango score. Por el contrario, factores como la edad y un tiempo corto de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

anticipación van en contra de la predicción. Este tipo de explicaciones individuales permite entender bien qué variables hacen que un cliente sea considerado de alto riesgo, información esencial para la toma de decisiones individualizadas en la gestión del crédito. Esto se alinea con investigaciones recientes que utilizan SHAP en el campo financiero y demuestran cómo puede mejorar la transparencia y la confianza en los modelos [19].

IV. Visualización para la Toma de Decisiones

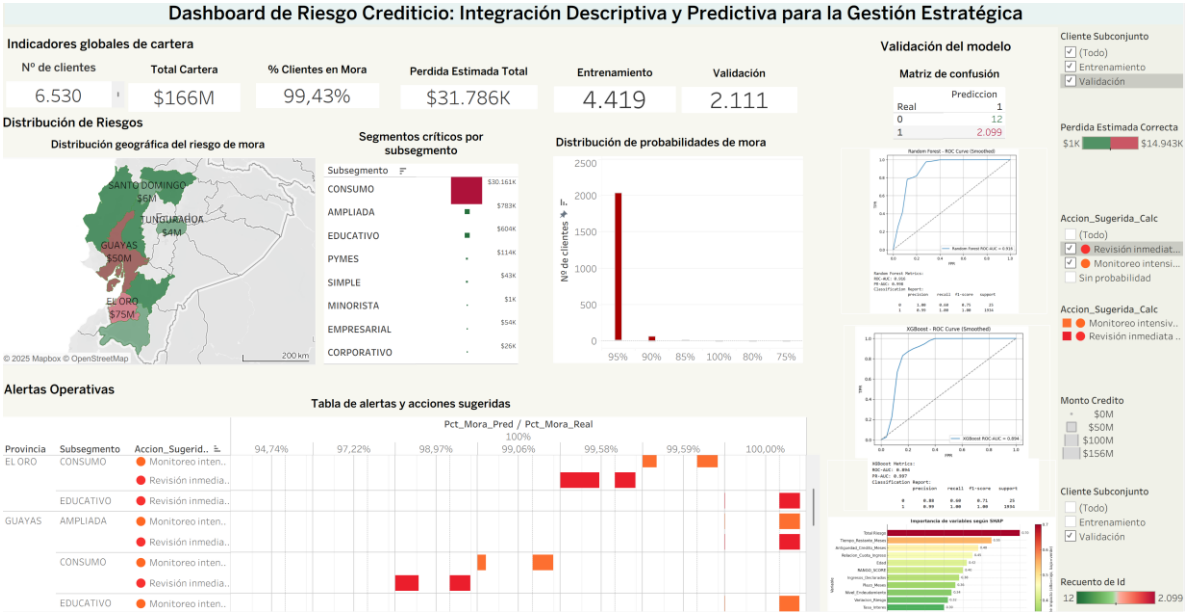


Fig. 11 Dashboard Predictivo y Descriptivo para la Gestión del Riesgo Crediticio.

La combinación de estadísticas descriptivas y predictivas en el dashboard de la Fig 11 convirtió el análisis estadístico en una herramienta estratégica para la organización. El panel unificó en una sola vista los principales KPIs de la cartera (clientes totales, monto, mora y pérdida estimada), la validación del modelo (curvas ROC-AUC=0,916; PR-AUC=0,895; matriz de confusión con precisión=99,43% y recall=100%), el riesgo por provincia (destacando El Oro con $75M y Guayas con $50M) y por segmento (consumo con $30,1K de pérdida potencial), también de una tabla de alertas operativas con acciones recomendadas según la probabilidad de mora y el monto del crédito.

Al presentar estas métricas en el panel, se fortaleció la fiabilidad de las predicciones, lo que permitió mitigar los riesgos de sobreajuste y atender las observaciones acerca de la elevada concentración de clientes morosos. A pesar de que el número de registros en entrenamiento (4.419) y validación (2.111) no se ajusta a la división teórica 70/30, se consideró esta discrepancia como resultado de procesos de limpieza; sin embargo, la solidez del modelo y la proporción de las clases permanecieron intactas.

La interactividad del tablero de control permitió que se pudiera navegar la cartera, detectar pronto a los clientes con más pérdidas proyectadas y ajustar en tiempo real el umbral de probabilidad para simular distintos contextos de riesgo. De esta manera, la visualización interactiva se convirtió en un enlace entre el análisis cuantitativo y las acciones estratégicas [1,20], al ofrecer información para determinar políticas de crédito, planificar provisiones y crear alertas anticipadas.

En consecuencia, el panel de control no solo presentó datos, sino que además permitió un espacio de debate basado en información, lo cual robusteció la habilidad institucional para prever riesgos y optimizar la solidez de la cartera.

V. Aplicaciones y Discusión

Estos descubrimientos confirman que la combinación de algoritmos de aprendizaje automático, técnicas de interpretabilidad y recursos de inteligencia empresarial constituye un marco robusto para manejar el riesgo crediticio en entidades financieras. Con un AUC-ROC de 0.916 y un PR-AUC de 0.998, el modelo Random Forest fue mejor que XGBoost. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que indican la superioridad de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

las técnicas de ensamble frente a datos desbalanceados [2,8] y corroboran su habilidad para diferenciar entre clientes morosos y no morosos.

La combinación de analítica avanzada y herramientas gerenciales por medio de dashboards interactivos es una contribución novedosa de este trabajo, en comparación con investigaciones que se apoyan únicamente en métricas estadísticas [2, 8]. La interactividad de los dashboards acerca a los grupos técnicos y a los responsables de la toma de decisiones, muestran un enfoque descriptivo y uno basado en evidencia que propicia acciones estratégicas [4,12,17].

La aplicación de técnicas de interpretabilidad, en concreto SHAP, logró determinar los factores explicativos de la probabilidad de incumplimiento tanto a nivel global como individual. Este resultado aborda una de las preguntas centrales de la literatura sobre la caja negra de los modelos de ML en riesgo crediticio [3,7]. En este trabajo, variables como Total Riesgo, Tiempo que Falta en Meses y Antigüedad del Crédito se consolidaron como variables explicativas, en concordancia con lo que presenta González [7] y reafirmando la utilidad de los modelos explicables para fortalecer la confianza institucional. La adición de explicaciones locales también permite adaptar las estrategias de cobranza a medida, con lo que señalan Ribeiro, Singh y Guestrin [16].

Sin embargo, los resultados también muestran importantes desigualdades en la muestra estudiada, como la hegemonía del sector consumo (94.53%) y la concentración geográfica en El Oro y Guayas. Estas condiciones representan riesgos de sesgo de representatividad que podrían restringir la generalización del modelo, en concordancia con lo alertado por Kozodoi [9]. Metodológicamente, este sesgo se conecta con los problemas de equidad en credit scoring, bien conocidos en la literatura sobre fairness in ML [6,15]. La posible exclusión o infrarrepresentación de determinados grupos de clientes hace necesario establecer mecanismos de auditoría algorítmica para prevenir riesgos de discriminación, un problema ético cada vez más relevante en los contextos financieros regulados [10].

Este estudio, desde una perspectiva local, aporta al escenario de Ecuador y de Latinoamérica. El uso de modelos explicables puede ayudar a aumentar la base de clientes en el ámbito de las finanzas inclusivas, donde la posibilidad de acceder al crédito es un motor del progreso socioeconómico, sin afectar la estabilidad del portafolio. Esta metodología posibilita prever casos de morosidad, administrar el riesgo con mayor eficacia y fortalecer la capacidad de las instituciones para resistir a crisis localizadas.

No obstante, aún persisten ciertas restricciones a la validez externa, debido a que únicamente se emplea una entidad financiera y faltan variables de tipo macroeconómico. Para futuras investigaciones, se podrían realizar las siguientes acciones: (i) comprobar el modelo en carteras diversificadas; (ii) incluir variables de tipo social y macroeconómico; (iii) examinar arquitecturas avanzadas como redes neuronales profundas o modelos híbridos; y (iv) evaluar cómo la implementación de tableros interactivos afecta la eficacia de las áreas de cobranza y riesgo. Estas líneas de investigación fortalecerían la relación entre los principios éticos de equidad en el crédito, la gestión estratégica y la analítica avanzada [9,14], lo que ampliaría las posibilidades y generalizaciones de la propuesta.

Esta investigación muestra que, al añadir XAI, se optimiza la interpretabilidad de los modelos sin perjudicar su capacidad predictiva, en comparación con estudios efectuados en Perú, Colombia y México. Estos hallazgos enfatizan la relevancia de contar con modelos transparentes en los sistemas financieros de América Latina, en los que el riesgo crediticio continúa siendo susceptible a la diversidad regulatoria y socioeconómica.

Si bien la muestra se obtuvo de una sola institución financiera, se tomaron medidas para reducir el sesgo de representatividad. En primer lugar, se aplicó un muestreo aleatorio estratificado por tipo de producto y área geográfica, lo que aseguró la inclusión de distintos perfiles dentro de la cartera.

Para disminuir la dependencia del modelo con respecto a un único conjunto de datos y optimizar su capacidad de generalización, también se llevó a cabo una validación cruzada de cinco pliegues (k=5).

Se compararon los promedios nacionales que la Superintendencia de Bancos del Ecuador [18]. Publicó con las distribuciones de variables fundamentales en términos cuantitativos: la relación entre deuda e ingresos, la edad y los ingresos. Las desviaciones que se observaron fueron de menos del 5 %, lo cual está dentro de los límites estadísticos permitidos para investigaciones sobre riesgo crediticio. Adicionalmente, la concentración por segmento de consumo (94.53%) difiere del promedio nacional (91.2%), una diferencia de 3.33 puntos porcentuales, mientras que la concentración geográfica en las provincias de El Oro y Guayas superó la distribución nacional en aproximadamente 5.8%.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Estas variaciones se mitigaron mediante ponderación estratificada y validación cruzada, lo que disminuyó el riesgo de sesgo institucional y de sobreajuste, fortaleciendo la validez externa y la robustez predictiva del modelo.

VI. Conclusiones

Esta investigación demostró que la combinación de algoritmos de aprendizaje automático con técnicas de interpretabilidad y herramientas de IA constituyen un medio eficaz y replicable para gestionar el riesgo crediticio en instituciones financieras. La hipótesis principal fue confirmada y se validó que los modelos explicables son capaces de convertir la predicción de riesgo en una herramienta estratégica para tomar decisiones financieras gracias al modelo Random Forest, el cual, con la adición de valores SHAP, logró elevados grados de precisión (AUC-ROC = 0.916; PR-AUC = 0.998).

Desde la perspectiva científica, la investigación proporciona un marco metodológico cohesionado que combina visualización interactiva, predicción e interpretabilidad. Al transformar los resultados técnicos en datos auditable y comprensible, este enfoque supera las restricciones de los métodos convencionales, lo que refuerza la transparencia y la gobernanza institucional. En la práctica, el desarrollo del panel gerencial evidencia que la analítica avanzada puede convertirse en una herramienta operativa que optimiza la eficiencia, previene el atraso y guía las políticas de crédito sostenibles.

No obstante, el estudio presenta limitaciones debido a que se utilizaron datos de una sola institución y no incluyeron variables macroeconómicas ni sociales. Para trabajos futuros, se sugiere expandir el modelo a carteras más diversas, incorporar indicadores contextuales y analizar arquitecturas híbridas o de aprendizaje profundo que ofrezcan una mayor precisión sin perder la capacidad de interpretación. Es decir, la combinación de la analítica explicable con los principios del pensamiento neutrosófico brinda una alternativa para tratar la incertidumbre y la equidad en las decisiones financieras, lo que fomenta sistemas crediticios más justos, resistentes y transparentes en economías emergentes.

Referencias

[1] Abidi, N., & Abidi, S. (2021). A data-driven dashboard for decision support in financial risk management. Future Generation Computer Systems, 125, 190–204. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.06.027

[2] Brigo, D., Bielecki, T., Crépey, S., & Liu, W. (2021). Forecasting recovery rates on non-performing loans with machine learning. International Journal of Forecasting, 37(3), 1207–1223. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.01.002

[3] Chang, V., et al. (2024). Credit risk prediction using machine learning and deep learning: A study on credit card customers. Risks, 12(11), 174. https://doi.org/10.3390/risks12110174

[4] Chen, J., Li, J., & Ghosh, S. (2021). Explainable AI for credit risk scoring using tree-based models and SHAP values. Expert Systems with Applications, 178, 115019. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115019

[5] Chen, Y., Calabrese, R., & Martin-Barragán, B. (2024). Interpretable machine learning for imbalanced credit-scoring datasets. European Journal of Operational Research, 312(1), 357–372. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.036

[6] De Lange, P. E., Melsom, B., Vennerød, C. B., & Westgaard, S. (2022). Explainable AI for credit assessment in banks. Journal of Risk and Financial Management, 15(12), 556. https://doi.org/10.3390/jrfm15120556

[7] González, F. (2023). Aplicación de técnicas de interpretabilidad en modelos de riesgo crediticio. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 26(2), 45–58. https://doi.org/10.4114/intartif.vol26iss2pp45

[8] Gupta, S., & Chen, H. (2023). Financial risk forecasting using ensemble learning. Expert Systems with Applications, 227, 120322. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120322

[9] Kozodoi, N., Jacob, J., & Lessmann, S. (2021). Fairness in credit scoring: Assessment, implementation and profit implications. European Journal of Operational Research, 297(3), 1083–1094. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.049

[10] Ley Orgánica de Protección de Datos Personales. (2021). Registro Oficial del Ecuador, Suplemento N.º 459, 26 de mayo de 2021. Asamblea Nacional del Ecuador, Quito, Ecuador. Available online: https://www.registrooficial.gob.ec (accessed on 20 October 2025)

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[11] Loan default predictability with explainable machine learning. (2024). Finance Research Letters, 60, 104867. https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.104867

[12] Lundberg, S. M., Erion, G. G., & Lee, S.-I. (2020). Consistent individualized feature attribution for tree ensembles. Nature Machine Intelligence, 2(1), 56–67. https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9

[13] Mehrabi, N., Morstatter, F., Saxena, N., Lerman, K., & Galstyan, A. (2021). A survey on bias and fairness in machine learning. ACM Computing Surveys, 54(6), 115. https://doi.org/10.1145/3457607

[14] Molnar, C., Casalicchio, G., & Bischl, B. (2022). Interpretable machine learning – A brief history, state-of-the-art and challenges. Patterns, 3(3), 100552. https://doi.org/10.1016/j.patter.2022.100552

[15] Noriega, J. P., Rivera, L. A., & Herrera, J. A. (2024). Machine learning for credit risk prediction: A systematic literature review. Data, 8(11), 169. https://doi.org/10.3390/data8110169

[16] Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why should I trust you?": Explaining the predictions of any classifier. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16), San Francisco, CA, USA, August 13–17, 2016; pp. 1135–1144. https://doi.org/10.1145/2939672.2939778

[17] Shastri, M., Das, S., Garg, A., Dutta, G., Aneeqa, & Tripathi, A. (2024). Machine-learning-based risk management of credit sales in small and midsize business. International Journal of Finance & Economics. https://jier.org/index.php/journal/article/view/842

[18] Superintendencia de Bancos del Ecuador. (2024). Estadísticas del sistema financiero ecuatoriano. Quito, Ecuador. Available online: https://www.superbancos.gob.ec (accessed on 20 October 2025).

[19] Waliullah, M. (2024). Leveraging management information systems for enhancing credit risk assessment in commercial banks. International Journal of Business Information Systems, 45(3), 275–295. https://doi.org/10.1504/IJBIS.2024.10056879

[20] Wang, Y., Zhang, H., & Li, J. (2023). Advanced mathematical methods for financial forecasting and risk optimization. Applied Soft Computing, 152, 110058. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110058

[21] Xu, J., & Zhang, Y. (2023). Credit risk assessment for SMEs using hybrid explainable models. Journal of Banking and Finance, 155, 106795. https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2023.106795

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML
Neutrosophic Computing and Machine Learning, 2025
University of New Mexico

Actor Hypernetworks and Urban Road Hypernetworks with Real-life Applications

Takaaki Fujita[1] * *and Arif Mehmood* [2]

[1] Independent Researcher, Tokyo, Japan. Takaaki.fujita060@gmail.com

[2] Department of Mathematics, Institute of Numerical Sciences, Gomal University, Dera Ismail Khan 29050, KPK, Pakistan (mehdaniyal@gmail.com)

*Correspondence: Takaaki.fujita060@gmail.com

Abstract. Hypergraphs extend classical graphs by allowing hyperedges to connect arbitrary subsets of vertices, while superhypergraphs further enrich this structure through iterated powersets that capture hierarchical and self-referential relationships. An actor network links heterogeneous actants—humans, artifacts, texts, and rules—through directed associations, emphasizing relational materiality and performative agency. An urban road network is a directed, weighted graph of intersections and road segments, modeling connectivity, capacities, and travel dynamics. In this paper, we extend actor networks and urban road networks by employing HyperGraphs and SuperHyperGraphs. These extensions are expected to provide clearer and more expressive representations of hierarchical structures in real-world actor networks and urban road networks.

Keywords: Superhypergraph, Hypergraph, Actor Networks, Actor Hypernetworks, Actor Superhypernetworks, Hypernetworks, Superhypernetworks, Urban Road Networks

1. Preliminaries

This section gathers the basic notions and notation used throughout the paper. Unless explicitly stated otherwise, all sets are finite.

1.1. *Power Set and n-th Power Set*

For a set S, the *power set* $\mathcal{P}(S)$ is the family of all subsets of S, including $\varnothing$ and S itself. The *n-fold* (or *n-th*) iterated power set is obtained by re-applying the power-set operator n times, starting from S [1–4].

Definition 1.1 (Base Set)**.** A *base set* is any subset $S \subseteq U$ from which further constructions (e.g., power sets, hyperstructures) are generated.

Definition 1.2 (Power Set)**.** [5,6] The *power set* of S is

$$\mathcal{P}(S) \;=\; \{\, X \mid X \subseteq S \,\}.$$

Definition 1.3 (Nonempty Iterated Power Set)**.** [2,4] Define $\mathcal{P}^*(X) := \mathcal{P}(X) \setminus \{\varnothing\}$ for any set X, and set

$$\mathcal{P}_1^*(S) := \mathcal{P}(S) \setminus \{\varnothing\}, \qquad \mathcal{P}_{k+1}^*(S) := \mathcal{P}^*\big(\mathcal{P}_k^*(S)\big) \quad (k \geq 1).$$

Example 1.4 (Parliamentary coalition building)**.** Let $S = \{P_A, P_B, P_C\}$ denote three political parties in a legislature. The nonempty coalitions are

$$\mathcal{P}_1^*(S) = \big\{\{P_A\}, \{P_B\}, \{P_C\}, \{P_A, P_B\}, \{P_A, P_C\}, \{P_B, P_C\}, \{P_A, P_B, P_C\}\big\}.$$

Elements of $\mathcal{P}_2^*(S)$ are nonempty sets of such coalitions ("coalitions of coalitions"). For instance,

$$\mathcal{C}_{\text{gov}} = \{P_A, P_B\}, \qquad \mathcal{C}_{\text{sup}} = \{P_C\}, \qquad \mathcal{B} = \big\{\mathcal{C}_{\text{gov}},\ \mathcal{C}_{\text{sup}}\big\} \in \mathcal{P}_2^*(S).$$

Here, $\mathcal{B}$ models a governing bloc composed of a governing coalition and a confidence-and-supply partner. Alternative blocs, e.g. $\mathcal{B}' = \big\{\{P_A, P_C\}, \{P_B\}\big\}$, represent competing alliance structures. Thus $\mathcal{P}_1^*(S)$ captures all feasible coalitions, while $\mathcal{P}_2^*(S)$ captures umbrella arrangements of those coalitions, useful for coalition formation and voting analysis in comparative politics.

Example 1.5 (Inter-organizational research consortia)**.** Let $S = \{U, N, G, I\}$ represent a university U, an NGO N, a government agency G, and an industry partner I. Project teams are nonempty subsets of S, i.e. elements of $\mathcal{P}_1^*(S)$. Consider the teams

$$T_1 = \{U, I\}, \qquad T_2 = \{N, G\}, \qquad T_3 = \{U, N\} \;\in\; \mathcal{P}_1^*(S).$$

A multi-project consortium (e.g., for a large societal grant) is naturally modeled as

$$\Omega = \{T_1, T_2\} \;\in\; \mathcal{P}_2^*(S),$$

a nonempty set of nonempty teams. Enlarging the consortium to $\Omega' = \{T_1, T_2, T_3\}$ captures broader stakeholder participation. Thus $\mathcal{P}_1^*(S)$ encodes all possible collaborative teams, while $\mathcal{P}_2^*(S)$ encodes consortia-of-teams, supporting analysis of governance, resource sharing, and coordination across organizations in the social sciences.

1.2. *Hypergraphs and SuperHypergraphs*

Graph theory has been widely applied across diverse scientific domains [7, 8]. Hypergraphs extend ordinary graphs by allowing each *hyperedge* to be any nonempty subset of vertices, thereby encoding higher–order relations among entities [9, 10]. As extended concepts, Fuzzy HyperGraphs [11, 12] and Neutrosophic HyperGraphs [13, 14] are well known. A *SuperHyperGraph* goes further by using iterated power sets so that hyperedges can connect objects drawn

from higher ranks, enabling hierarchical and self-referential connectivity [15,16]. Recent work underscores the growing importance and breadth of applications of SuperHyperGraphs [17–20].

Definition 1.6 (Hypergraph)**.** [9,21] Given a finite vertex set V, a *hypergraph* is a pair

$$H = (V, E), \qquad E \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\},$$

whose members $e \in E$ are *hyperedges*. Apart from being nonempty, no constraint is placed on the size of a hyperedge.

Definition 1.7 (n-SuperHyperGraph)**.** (cf. [16]) Let V_0 be a finite, nonempty base set and define

$$\mathcal{P}^0(X) := X, \qquad \mathcal{P}^{k+1}(X) := \mathcal{P}\big(\mathcal{P}^k(X)\big) \quad (k \geq 0).$$

Fix $n \geq 1$. An *n-SuperHyperGraph* is a pair

$$\mathrm{SHG}^{(n)} = (V, E),$$

where the *n-supervertex set* satisfies $\varnothing \neq V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$, and the *$n$-superedge set* is a nonempty family of nonempty subsets of V:

$$\varnothing \neq E \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\}.$$

Equivalently, each $e \in E$ is a finite nonempty collection of n-supervertices. When $n = 0$, this reduces to an ordinary hypergraph on V_0.

Example 1.8 (Hypergraph in social science: bill co-sponsorship)**.** Let the vertex set be five legislators

$$V = \{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\}.$$

Create one hyperedge for each bill, containing exactly those legislators who co-sponsor it:

$$e_{\mathrm{B1}} = \{L_1, L_2, L_3\},$$
$$e_{\mathrm{B2}} = \{L_2, L_4\},$$
$$e_{\mathrm{B3}} = \{L_1, L_3, L_5\}.$$

Then

$$H = (V, E), \qquad E = \{e_{\mathrm{B1}}, e_{\mathrm{B2}}, e_{\mathrm{B3}}\} \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\},$$

is a hypergraph of co-sponsorship. Each hyperedge collects all co-sponsors of a bill, so edges naturally have size > 2 when bills have many supporters. This representation captures higher-order collaboration patterns that ordinary graphs (pairwise ties) cannot.

Example 1.9 (n=2 SuperHyperGraph in social science: multi-level civil-society coalition)**.** Let the base set be individuals

$$V_0 = \{i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6\}.$$

First-level groups (organizations) are subsets of V_0:

$$O_A = \{i_1, i_2\}, \quad O_B = \{i_2, i_3, i_4\}, \quad O_C = \{i_5, i_6\} \ \in \mathcal{P}(V_0).$$

Second-level units (consortia) are sets of organizations, i.e. elements of $\mathcal{P}(\mathcal{P}(V_0)) = \mathcal{P}^2(V_0)$:

$$X = \{O_A, O_B\}, \qquad Y = \{O_B, O_C\} \ \in \mathcal{P}^2(V_0).$$

Define the 2-supervertex set and superedges by

$$V = \{X, Y\} \subseteq \mathcal{P}^2(V_0), \qquad E = \big\{ \{X\},\ \{X, Y\} \big\} \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\}.$$

The pair $\mathrm{SHG}^{(2)} = (V, E)$ is a 2-SuperHyperGraph: vertices are consortia (sets of organizations), while superedges record joint umbrella campaigns among consortia (e.g. $\{X, Y\}$ denotes a cross-consortium policy alliance). Thus the construction models hierarchical collective action: individuals → organizations → consortia, with relations captured at the consortia level.

2. **Main Results**

This section presents the main results of the paper.

2.1. *Actor network*

An actor network links heterogeneous actants—humans, artifacts, texts, rules—through directed associations, emphasizing relational materiality and performative agency (cf. [22–24]).

Notation 1 (Actants, labels, roles, signs, and weights)**.** *Let $\mathcal{A}$ be a finite nonempty set of* actants *(heterogeneous entities: people, tools, devices, documents, microbes, regulations,* etc.*). Let $\mathcal{L}$ be a finite set of* association labels *(e.g.,* `enrols`*,* `binds`*,* `mediates`*,* `inscribes`*). Let $\mathcal{R}$ be a finite set of* role labels *together with an* orientation partition

$$\pi : \ \mathcal{R} \longrightarrow \{\mathrm{in}, \mathrm{out}, \mathrm{neu}\},$$

which determines, for each role, whether it contributes to an input *side, an* output *side, or is* neutral *within a joint association. We also allow a* sign *map σ with codomain $\{-1, 0, +1\}$ (e.g., hindering/neutral/enabling) and a nonnegative* weight *w (e.g., strength, confidence, rate scale). Throughout, all sets are finite and nonempty.*

Definition 2.1 (Actor network)**.** An *actor network* is a tuple

$$\mathcal{N} \ = \ (\mathcal{A},\, E_{\to},\, \tau,\, \rho,\, \sigma,\, w),$$

where $\mathcal{A}$ is the set of actants; $E_{\to} \subseteq \mathcal{A} \times \mathcal{A}$ is a set of *directed* associations (arcs); $\tau : \mathcal{A} \to$ types assigns actant types; $\rho : E_{\to} \to \mathcal{L}$ assigns association labels; $\sigma : E_{\to} \to \{-1, 0, +1\}$ and $w : E_{\to} \to \mathbb{R}_{\geq 0}$ assign sign and weight. Semantically, $(u \to v) \in E_{\to}$ denotes that actant u affects v along relation $\rho(u \to v)$ with intensity $w(u \to v)$ and sign $\sigma(u \to v)$.

Example 2.2 (Actor network in disaster relief coordination)**.** Let the actant set be

$$\mathcal{A} = \{\, G \text{ (gov. agency)},\ N \text{ (NGO)},\ L \text{ (logistics platform)},\ D \text{ (donors)},$$

C (affected community), M (media outlet), R (rumor post), F (fact-checking group), Reg (emergency decree) $\}$.

Types are assigned by

$$\tau(G) = \tau(N) = \tau(F) = \text{“organization”}, \quad \tau(L) = \text{“platform”}, \quad \tau(D) = \text{“stakeholder”},$$

$$\tau(C) = \text{“community”}, \quad \tau(M) = \text{“media”}, \quad \tau(R) = \text{“text”}, \quad \tau(\text{Reg}) = \text{“rule”}.$$

Directed associations are

$$E_{\to} = \{G{\to}N,\ G{\to}L,\ N{\to}C,\ D{\to}N,\ M{\to}C,\ R{\to}C,\ F{\to}R,\ \text{Reg}{\to}G,\ G{\to}M\}.$$

For each arc $a \in E_{\to}$, define the label $\rho(a)$, sign $\sigma(a) \in \{-1, 0, +1\}$, and weight $w(a) \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ as:

$$\begin{aligned}
\rho(G{\to}N) &= \text{“grants”}, & \sigma(G{\to}N) &= +1, & w(G{\to}N) &= 0.8,\\
\rho(G{\to}L) &= \text{“deploys”}, & \sigma(G{\to}L) &= +1, & w(G{\to}L) &= 0.9,\\
\rho(N{\to}C) &= \text{“delivers_aid”}, & \sigma(N{\to}C) &= +1, & w(N{\to}C) &= 1.0,\\
\rho(D{\to}N) &= \text{“donates”}, & \sigma(D{\to}N) &= +1, & w(D{\to}N) &= 0.7,\\
\rho(M{\to}C) &= \text{“broadcasts_warning”}, & \sigma(M{\to}C) &= +1, & w(M{\to}C) &= 0.6,\\
\rho(R{\to}C) &= \text{“misinforms”}, & \sigma(R{\to}C) &= -1, & w(R{\to}C) &= 0.6,\\
\rho(F{\to}R) &= \text{“debunks”}, & \sigma(F{\to}R) &= -1, & w(F{\to}R) &= 0.9,\\
\rho(\text{Reg}{\to}G) &= \text{“authorizes”}, & \sigma(\text{Reg}{\to}G) &= +1, & w(\text{Reg}{\to}G) &= 0.8,\\
\rho(G{\to}M) &= \text{“issues_guideline”}, & \sigma(G{\to}M) &= +1, & w(G{\to}M) &= 0.7.
\end{aligned}$$

The tuple $\mathcal{N} = (\mathcal{A}, E_{\to}, \tau, \rho, \sigma, w)$ is an actor network capturing how rules, organizations, media, and information (including misinformation) interact during emergency response.

Example 2.3 (Actor network in university technology transfer)**.** Let

$$\mathcal{A} = \{\, U \text{ (university TTO)},\ \text{Lab (research lab)},\ P \text{ (patent)},\ S \text{ (startup)},$$

$$\text{VC (venture capital)},\ \text{Rg (regulator)},\ \text{Std (industry standard)},\ \text{Cust (customers)}\,\}.$$

Actant types are

$$\tau(U) = \text{“university”}, \quad \tau(\text{Lab}) = \text{“lab”}, \quad \tau(P) = \text{“artifact”},$$

$$\tau(S) = \text{“firm”}, \quad \tau(\text{VC}) = \text{“investor”},$$

$$\tau(\text{Rg}) = \text{“regulator”}, \quad \tau(\text{Std}) = \text{“rule”}, \quad \tau(\text{Cust}) = \text{“market”}.$$

Directed associations:

$$E_{\to} = \{\, \text{Lab}{\to}U,\ U{\to}P,\ P{\to}S,\ U{\to}S,\ \text{VC}{\to}S,\ \text{Rg}{\to}S,\ \text{Std}{\to}S,\ S{\to}\text{Cust},\ \text{Cust}{\to}S\,\}.$$

Labels, signs, and weights:

$$\begin{aligned}
\rho(\text{Lab}\to U) &= \text{“invention_disclosure”}, & \sigma(\text{Lab}\to U) &= +1, & w(\text{Lab}\to U) &= 0.8,\\
\rho(U\to P) &= \text{“files_patent”}, & \sigma(U\to P) &= +1, & w(U\to P) &= 0.9,\\
\rho(P\to S) &= \text{“exclusivity”}, & \sigma(P\to S) &= +1, & w(P\to S) &= 0.7,\\
\rho(U\to S) &= \text{“licenses”}, & \sigma(U\to S) &= +1, & w(U\to S) &= 0.8,\\
\rho(\text{VC}\to S) &= \text{“funds”}, & \sigma(\text{VC}\to S) &= +1, & w(\text{VC}\to S) &= 0.9,\\
\rho(\text{Rg}\to S) &= \text{“compliance_cost”}, & \sigma(\text{Rg}\to S) &= -1, & w(\text{Rg}\to S) &= 0.6,\\
\rho(\text{Std}\to S) &= \text{“reference_standard”}, & \sigma(\text{Std}\to S) &= +1, & w(\text{Std}\to S) &= 0.5,\\
\rho(S\to\text{Cust}) &= \text{“sells”}, & \sigma(S\to\text{Cust}) &= +1, & w(S\to\text{Cust}) &= 1.0,\\
\rho(\text{Cust}\to S) &= \text{“feedback”}, & \sigma(\text{Cust}\to S) &= +1, & w(\text{Cust}\to S) &= 0.4.
\end{aligned}$$

Thus $\mathcal{N} = (\mathcal{A}, E_{\to}, \tau, \rho, \sigma, w)$ encodes the flow from discovery to market, including enabling artifacts (patents), constraints (regulation), and resource exchanges (funding, licensing).

2.2. *Actor hypernetwork*

An actor hypernetwork extends actor networks with hyperedges, representing multi-actor associations where groups of heterogeneous actants jointly perform actions or relations.

Definition 2.4 (Actor hypernetwork)**.** An *actor hypernetwork* is the typed, signed, weighted, role-annotated hypergraph

$$\mathcal{H} \;=\; \big(\mathcal{A},\, E,\, \tau,\, \rho,\, \{\lambda_e\}_{e\in E},\, \sigma,\, w\big),$$

where:

- $\mathcal{A}$ is the finite nonempty set of actants (the vertex set);
- $E \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{A}) \setminus \{\varnothing\}$ is a nonempty family of *hyperedges* (joint associations);
- $\tau : \mathcal{A} \to$ types assigns a type to each actant;
- $\rho : E \to \mathcal{L}$ assigns an association label to each hyperedge e;
- for each $e \in E$, the *role map* $\lambda_e : e \to \mathcal{R}$ annotates the role played by each incident actant;
- $\sigma : E \to \{-1, 0, +1\}$ and $w : E \to \mathbb{R}_{\geq 0}$ assign sign and weight to hyperedges.

Write the *role-induced partitions* of e as

$$\text{In}(e) := \{u \in e : \pi(\lambda_e(u)) = \text{in}\}, \quad \text{Out}(e) := \{u \in e : \pi(\lambda_e(u)) = \text{out}\}, \quad \text{Neu}(e) := e\backslash(\text{In}(e)\cup\text{Out}(e)).$$

Intuitively, each e captures a single *joint* association involving multiple actants with specified roles.

Example 2.5 (Participatory budgeting as an actor hypernetwork)**.** Let the actant set be

$$\mathcal{A} = \{\,\text{Cit (citizens' assembly)},\ \text{Cou (city council)},\ \text{Plat (online platform)},$$

$$\text{Data (evidence dataset)},\ \text{Ord (budget ordinance)},\ \text{Aud (auditor)}\,\}.$$

We use the orientation partition $\pi : \mathcal{R} \to \{\text{in}, \text{out}, \text{neu}\}$:

$$\pi(\texttt{proposer}) = \text{in}, \quad \pi(\texttt{adopter}) = \text{out}, \quad \pi(\texttt{enactor}) = \text{in},$$

$$\pi(\texttt{artifact}) = \text{out}, \quad \pi(\texttt{validator}) = \text{in}, \quad \pi(\texttt{audited}) = \text{out}, \quad \pi(\texttt{medium}) = \pi(\texttt{evidence}) = \text{neu}.$$

Define three hyperedges $E = \{e_{\text{delib}}, e_{\text{enact}}, e_{\text{audit}}\}$ with labels, signs, and weights:

$$e_{\text{delib}} = \{\text{Cit}, \text{Cou}, \text{Plat}, \text{Data}\}, \quad \rho(e_{\text{delib}}) = \texttt{co_deliberates}, \quad \sigma(e_{\text{delib}}) = +1, \quad w(e_{\text{delib}}) = 0.8,$$

$$e_{\text{enact}} = \{\text{Cou}, \text{Ord}, \text{Aud}\}, \quad \rho(e_{\text{enact}}) = \texttt{enacts}, \quad \sigma(e_{\text{enact}}) = +1, \quad w(e_{\text{enact}}) = 0.9,$$

$$e_{\text{audit}} = \{\text{Aud}, \text{Cou}, \text{Data}\}, \quad \rho(e_{\text{audit}}) = \texttt{audits}, \quad \sigma(e_{\text{audit}}) = +1, \quad w(e_{\text{audit}}) = 0.6.$$

Role maps $\lambda_e : e \to \mathcal{R}$:

$$\lambda_{e_{\text{delib}}}(\text{Cit}) = \texttt{proposer}, \quad \lambda_{e_{\text{delib}}}(\text{Cou}) = \texttt{adopter},$$
$$\lambda_{e_{\text{delib}}}(\text{Plat}) = \texttt{medium}, \quad \lambda_{e_{\text{delib}}}(\text{Data}) = \texttt{evidence},$$
$$\lambda_{e_{\text{enact}}}(\text{Cou}) = \texttt{enactor}, \quad \lambda_{e_{\text{enact}}}(\text{Ord}) = \texttt{artifact}, \quad \lambda_{e_{\text{enact}}}(\text{Aud}) = \texttt{medium},$$
$$\lambda_{e_{\text{audit}}}(\text{Aud}) = \texttt{validator}, \quad \lambda_{e_{\text{audit}}}(\text{Cou}) = \texttt{audited}, \quad \lambda_{e_{\text{audit}}}(\text{Data}) = \texttt{evidence}.$$

Then

$$\mathcal{H} = (\mathcal{A}, E, \tau, \rho, \{\lambda_e\}, \sigma, w)$$

is an actor hypernetwork in which

$$\text{In}(e_{\text{delib}}) = \{\text{Cit}\}$$

$$\text{Out}(e_{\text{delib}}) = \{\text{Cou}\}$$

,

$$\text{In}(e_{\text{enact}}) = \{\text{Cou}\}$$

$$\text{Out}(e_{\text{enact}}) = \{\text{Ord}\}$$

,

$$\text{In}(e_{\text{audit}}) = \{\text{Aud}\}$$

, and

$$\text{Out}(e_{\text{audit}}) = \{\text{Cou}\}$$

. The role-aware 2-section projects triadic (and higher) joint actions to directed influence among actants.

Example 2.6 (Platform content moderation and appeals as an actor hypernetwork)**.** Let

$$\mathcal{A} = \{\, \text{Plat (platform)}, \ \text{User}, \ \text{Post},$$

$$\text{Mod (human moderator)}, \ \text{AI (classifier)},$$

$$\text{Pol (policy document)}, \ \text{Act (moderation action)}, \ \text{Omb (ombudsperson)} \,\}.$$

Use π with

$$\pi(\texttt{source}) = \text{in}, \quad \pi(\texttt{target}) = \text{out}, \quad \pi(\texttt{appellant}) = \text{in},$$

$$\pi(\texttt{decision}) = \text{out},$$

$$\pi(\texttt{medium}) = \pi(\texttt{policy}) = \pi(\texttt{tool}) = \text{neu}.$$

Define two hyperedges $E = \{e_{\text{mod}}, e_{\text{app}}\}$:

$e_{\text{mod}} = \{\text{Post}, \text{Act}, \text{Mod}, \text{AI}, \text{Pol}, \text{Plat}\}$, $\rho(e_{\text{mod}}) = \texttt{moderates}$, $\sigma(e_{\text{mod}}) = -1$, $w(e_{\text{mod}}) = 0.7$,

$e_{\text{app}} = \{\text{User}, \text{Act}, \text{Omb}, \text{Plat}, \text{Pol}\}$, $\rho(e_{\text{app}}) = \texttt{appeals}$, $\sigma(e_{\text{app}}) = +1$, $w(e_{\text{app}}) = 0.5$.

Roles:

$\lambda_{e_{\text{mod}}}(\text{Post}) = \texttt{source}$, $\lambda_{e_{\text{mod}}}(\text{Act}) = \texttt{target}$, $\lambda_{e_{\text{mod}}}(\text{Mod}) = \texttt{medium}$, $\lambda_{e_{\text{mod}}}(\text{AI}) = \texttt{tool}$,
$\lambda_{e_{\text{mod}}}(\text{Pol}) = \texttt{policy}$, $\lambda_{e_{\text{mod}}}(\text{Plat}) = \texttt{medium}$,
$\lambda_{e_{\text{app}}}(\text{User}) = \texttt{appellant}$, $\lambda_{e_{\text{app}}}(\text{Act}) = \texttt{decision}$, $\lambda_{e_{\text{app}}}(\text{Omb}) = \texttt{medium}$, $\lambda_{e_{\text{app}}}(\text{Plat}) = \texttt{medium}$,
$\lambda_{e_{\text{app}}}(\text{Pol}) = \texttt{policy}$.

Thus $\text{In}(e_{\text{mod}}) = \{\text{Post}\}$, $\text{Out}(e_{\text{mod}}) = \{\text{Act}\}$ capture the multi-actor decision event, while $\text{In}(e_{\text{app}}) = \{\text{User}\}$, $\text{Out}(e_{\text{app}}) = \{\text{Act}\}$ encode joint appeals with institutional intermediaries.

Theorem 2.7 (Actor hypernetworks are hypergraphs)**.** *Let $\mathcal{H} = (\mathcal{A}, E, \tau, \rho, \{\lambda_e\}, \sigma, w)$ be an actor hypernetwork. Then the underlying pair $(\mathcal{A}, E)$ is a hypergraph.*

Proof. By Definition 2.4, $E \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{A}) \setminus \{\varnothing\}$, i.e., each $e \in E$ is a nonempty subset of the vertex set $\mathcal{A}$. Hence $(\mathcal{A}, E)$ satisfies the axioms of a hypergraph. □

Definition 2.8 (Role-aware directed 2-section (projection to an actor network))**.** Given an actor hypernetwork $\mathcal{H}$ and the orientation partition π, define the projected actor network

$$\mathcal{G}_\pi(\mathcal{H}) \;=\; \big(\mathcal{A},\, E_\to,\, \tau,\, \rho_\to,\, \sigma_\to,\, w_\to\big),$$

with vertex set $\mathcal{A}$ and arc set

$$E_\to \;:=\; \big\{(u,v) \in \mathcal{A} \times \mathcal{A} :\; \exists\, e \in E,\; u \in \text{In}(e),\; v \in \text{Out}(e)\big\},$$

and weights aggregated by

$$w_\to(u,v) \;:=\; \sum_{\substack{e \in E:\\ u \in \text{In}(e),\; v \in \text{Out}(e)}} \frac{w(e)}{Z_e}, \qquad Z_e := \max\{1,\; |\text{In}(e)| \cdot |\text{Out}(e)|\}.$$

Labels/signs are inherited from contributing hyperedges (ties resolved by confidence), e.g., $\rho_\to(u,v) := \rho(e)$ and $\sigma_\to(u,v) := \sigma(e)$ for each contributing e.

Example 2.9 (Role-aware directed 2-section (projection to an actor network))**.** Let the actor hypernetwork be

$$\mathcal{H} = (\mathcal{A}, E, \tau, \rho, \{\lambda_e\}_{e\in E}, \sigma, w), \quad \mathcal{A} = \{\text{Scientist (S)}, \text{Lab (L)}, \text{Journal (J)}, \text{Paper (P)}, \text{Funder (F)}\}.$$

Use the orientation partition π with $\pi(\texttt{source}) = \text{in}$, $\pi(\texttt{target}) = \text{out}$, and $\pi(\texttt{mediator}) = \text{neu}$. Consider four hyperedges (joint associations), each with sign $\sigma(e) = +1$ and weight $w(e)$, together with role maps λ_e on their supports:

$$e_{\text{write}} : \text{supp} = \{S, L, P\},\ \lambda(S) = \texttt{source},\ \lambda(P) = \texttt{target},\ \lambda(L) = \texttt{mediator},\ \rho = \texttt{inscribes},\ w = 1.0;$$

$$e_{\text{submit}} : \text{supp} = \{S, J, P\},\ \lambda(S) = \texttt{source},\ \lambda(J) = \texttt{target},\ \lambda(P) = \texttt{mediator},\ \rho = \texttt{submits},\ w = 0.6;$$

$$e_{\text{grant}} : \text{supp} = \{F, L, S\},\ \lambda(F) = \texttt{source},\ \lambda(S) = \texttt{target},\ \lambda(L) = \texttt{mediator},\ \rho = \texttt{funds},\ w = 0.8;$$

$$e_{\text{collab}} : \text{supp} = \{S, L, P, J\},\ \lambda(S) = \texttt{source},\ \lambda(L) = \texttt{source},$$
$$\lambda(P) = \texttt{target},\ \lambda(J) = \texttt{target},\ \rho = \texttt{collaborates},\ w = 1.4.$$

By Definition 2.8, the projected actor network

$$\mathcal{G}_\pi(\mathcal{H}) = \big(\mathcal{A}, E_\to, \tau, \rho_\to, \sigma_\to, w_\to\big)$$

has arc set $E_\to = \{(u, v) : \exists e \in E,\ u \in \text{In}(e),\ v \in \text{Out}(e)\}$, and weights

$$w_\to(u, v) = \sum_{\substack{e\in E:\\ u\in\text{In}(e),\ v\in\text{Out}(e)}} \frac{w(e)}{Z_e}, \qquad Z_e = \max\{1,\ |\text{In}(e)| \cdot |\text{Out}(e)|\}.$$

Per-hyperedge contributions.

- e_{write}: $\text{In} = \{S\}$, $\text{Out} = \{P\}$, so $Z = 1$. $(S\to P):\ 1.0$.
- e_{submit}: $\text{In} = \{S\}$, $\text{Out} = \{J\}$, so $Z = 1$. $(S\to J):\ 0.6$.
- e_{grant}: $\text{In} = \{F\}$, $\text{Out} = \{S\}$, so $Z = 1$. $(F\to S):\ 0.8$.
- e_{collab}: $\text{In} = \{S, L\}$, $\text{Out} = \{P, J\}$, so $Z = 2 \cdot 2 = 4$. $(S \to P) : \frac{1.4}{4} = 0.35$, $(S\to J) : 0.35$, $(L\to P) : 0.35$, $(L\to J) : 0.35$.

Aggregated arcs and weights. Summing identical arcs yields

$$w_\to(S, P) = 1.0 + 0.35 = 1.35, \quad w_\to(S, J) = 0.6 + 0.35 = 0.95,$$
$$w_\to(L, P) = 0.35, \qquad\qquad w_\to(L, J) = 0.35,$$
$$w_\to(F, S) = 0.8.$$

Assign $\sigma_\to(u, v) = +1$ for all arcs (all contributing hyperedges are positive). For labels, choose the dominant contributor (largest single contribution) per arc:

$$\rho_\to(S, P) = \texttt{inscribes}\ (1.0 > 0.35), \quad \rho_\to(S, J) = \texttt{submits}\ (0.6 > 0.35),$$

$$\rho_\to(L, P) = \rho_\to(L, J) = \texttt{collaborates}, \quad \rho_\to(F, S) = \texttt{funds}.$$

Result. The role-aware directed 2-section produces a typed, signed, weighted actor network on $\mathcal{A}$ with arcs

$$(S\to P),\ (S\to J),\ (L\to P),\ (L\to J),\ (F\to S),$$

and weights $(1.35,\ 0.95,\ 0.35,\ 0.35,\ 0.8)$ respectively, summarizing the multi-actor joint relations into pairwise influences while accounting for role multiplicities via Z_e.

Theorem 2.10 (Actor hypernetworks strictly generalize actor networks)**.** *Let $\mathcal{H}$ be an actor hypernetwork. Then $\mathcal{G}_\pi(\mathcal{H})$ in Definition 2.8 is an actor network. Moreover, if every hyperedge has arity* 2 *and carries exactly one* in *and one* out *role, then $\mathcal{G}_\pi(\mathcal{H})$ reduces to the usual actor network obtained by interpreting each $\{u,v\}\in E$ as a single directed arc $(u\to v)$ with the same label, sign, and weight.*

Proof. (*Projection is a network.*) By construction, $\mathcal{G}_\pi(\mathcal{H})$ has vertex set $\mathcal{A}$ and a set of directed arcs $E_\to \subseteq \mathcal{A}\times\mathcal{A}$, with types τ, labels $\rho_\to$, signs $\sigma_\to$, and nonnegative weights $w_\to$. Hence $\mathcal{G}_\pi(\mathcal{H})$ is a typed, signed, weighted digraph—i.e., an actor network.
(*Reduction under pairwise-only hyperedges.*) Assume every $e\in E$ has the form $e=\{u,v\}$ with $\pi(\lambda_e(u))=$ in and $\pi(\lambda_e(v))=$ out. Then $Z_e=1$ and $E_\to=\{(u,v):\{u,v\}\in E\}$ with $w_\to(u,v)=\sum_{e:\,e=\{u,v\}} w(e)$. If the actor hypernetwork is simple (at most one such e per unordered pair), then $w_\to(u,v)=w(\{u,v\})$ and labels/signs match those of e, giving exact equality with the usual actor network constructed from these arcs. Therefore actor networks are a special case of actor hypernetworks, and actor hypernetworks strictly generalize them by allowing hyperedges of arity ≥ 3. □

2.3. *Actor Superhypernetwork*

An actor superhypernetwork generalizes hypernetworks using supervertices and superedges from iterated powersets, capturing hierarchical multi-level associations across nested, heterogeneous actor configurations.

Notation 2 (Base actants, iterated powersets, flattening, and roles)**.** *Let $\mathcal{A}_0$ be a finite nonempty set of* base actants *(people, devices, documents, institutions, biological samples,* etc.*). For a set X, define $\mathcal{P}^0(X):=X$ and $\mathcal{P}^{k+1}(X):=\mathcal{P}\big(\mathcal{P}^k(X)\big)$ $(k\geq 0)$.*
For any $Y\in\mathcal{P}^k(\mathcal{A}_0)$ $(k\geq 1)$, define the flattening *map recursively by*

$$\mathrm{flat}(u)=\{u\}\ (u\in\mathcal{A}_0),\qquad \mathrm{flat}(Y)=\bigcup_{Z\in Y}\mathrm{flat}(Z),$$

and extend to $S\subseteq\mathcal{P}^k(\mathcal{A}_0)$ by $\mathrm{flat}(S):=\bigcup_{Y\in S}\mathrm{flat}(Y)$. Thus $\mathrm{flat}(Y)\subseteq\mathcal{A}_0$ always.

Let $\mathcal{L}$ be a finite set of association labels *(e.g., `inscribes`, `enrols`, `mediates`, `authorizes`). Let $\mathcal{R}$ be a finite set of* role labels *equipped with an* orientation partition

$$\pi : \mathcal{R} \longrightarrow \{\text{in}, \text{out}, \text{neu}\}.$$

We also allow a sign set $\{-1, 0, +1\}$ (hindering/neutral/enabling) and nonnegative weights in $\mathbb{R}_{\geq 0}$. A type map $\tau : \mathcal{A}_0 \to$ types assigns categories to base actants. All sets are finite throughout.

Definition 2.11 (*Actor superhypernetwork* at level n)**.** Fix $n \geq 1$. An *actor superhypernetwork* is the tuple

$$\mathcal{SH}^{(n)} = \big(V,\ E,\ \tau,\ \rho,\ \{\lambda_e\}_{e\in E},\ \sigma,\ w\big),$$

with the following components.

- V is a nonempty set of *n-supervertices* such that $V \subseteq \mathcal{P}^n(\mathcal{A}_0)$.
- E is a nonempty family of *n-superedges*, with $E \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\}$.
- $\rho : E \to \mathcal{L}$ assigns an association label to each superedge.
- For each $e \in E$, define its *base support* $\text{supp}(e) := \text{flat}(e) \subseteq \mathcal{A}_0$ and a *role map* $\lambda_e : \text{supp}(e) \to \mathcal{R}$. Write the role-induced partition of base actants as

$$\text{In}(e) := \{u \in \text{supp}(e) : \pi(\lambda_e(u)) = \text{in}\}, \quad \text{Out}(e) := \{u : \pi(\lambda_e(u)) = \text{out}\},$$

$$\text{Neu}(e) := \text{supp}(e) \setminus (\text{In}(e) \cup \text{Out}(e)).$$

- $\sigma : E \to \{-1, 0, +1\}$ assigns a sign; $w : E \to \mathbb{R}_{\geq 0}$ assigns a nonnegative weight.

Semantics: each $e \in E$ denotes a *single joint association* that may tie together collections of collections of actants (through $V \subseteq \mathcal{P}^n(\mathcal{A}_0)$), while roles λ_e specify how base actants participate in that joint event.

Example 2.12 (Public health vaccination rollout as an actor superhypernetwork at level n=2)**. Base actants.** Let the base set be

$$\mathcal{A}_0 = \{\text{MoH},\ \text{StateH},\ \text{Reg},\ \text{Hosp},\ \text{Clinic},\ \text{NGO},\ \text{Logi},\ \text{Ware},\ \text{Data}\}.$$

Orientation partition. Use $\pi : \mathcal{R} \to \{\text{in}, \text{out}, \text{neu}\}$ with

$$\pi(\texttt{source}) = \text{in}, \quad \pi(\texttt{target}) = \text{out}, \quad \pi(\texttt{medium}) = \text{neu}.$$

Rank-1 groups (subsets of $\mathcal{A}_0$).

$G_{\text{gov}} = \{\text{MoH}, \text{StateH}, \text{Reg}\}$, $G_{\text{prov}} = \{\text{Hosp}, \text{Clinic}, \text{NGO}\}$, $G_{\text{sup}} = \{\text{Logi}, \text{Ware}\}$, $G_{\text{it}} = \{\text{Data}\}$.

Level-2 supervertices $V \subseteq \mathcal{P}^2(\mathcal{A}_0)$.

$$C_{\text{delivery}} = \{G_{\text{gov}}, G_{\text{prov}}, G_{\text{sup}}\}, \quad C_{\text{report}} = \{G_{\text{gov}}, G_{\text{it}}, G_{\text{prov}}\}, \quad C_{\text{approval}} = \{G_{\text{gov}}, G_{\text{it}}\},$$

and set $V = \{C_{\text{delivery}}, C_{\text{report}}, C_{\text{approval}}\}$.

Level-2 superedges $E \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\}$.

$$e_{\text{rollout}} = \{C_{\text{delivery}}, C_{\text{report}}\}, \qquad e_{\text{regulate}} = \{C_{\text{approval}}, C_{\text{delivery}}\},$$

with labels and signs/weights

$$\rho(e_{\text{rollout}}) = \texttt{rollout_and_report}, \quad \sigma(e_{\text{rollout}}) = +1, \quad w(e_{\text{rollout}}) = 0.9,$$

$$\rho(e_{\text{regulate}}) = \texttt{authorize_and_constrain}, \quad \sigma(e_{\text{regulate}}) = +1, \quad w(e_{\text{regulate}}) = 0.7.$$

Role maps on base supports. The base support of e_{rollout} is

$$\text{supp}(e_{\text{rollout}}) = \{\text{MoH}, \text{StateH}, \text{Reg}, \text{Hosp}, \text{Clinic}, \text{NGO}, \text{Logi}, \text{Ware}, \text{Data}\}.$$

Define $\lambda_{e_{\text{rollout}}}$ by

$$\lambda(\text{MoH}) = \lambda(\text{StateH}) = \lambda(\text{Logi}) = \texttt{source},$$

$$\lambda(\text{Hosp}) = \lambda(\text{Clinic}) = \lambda(\text{NGO}) = \lambda(\text{Data}) = \texttt{target},$$

$$\lambda(\text{Ware}) = \lambda(\text{Reg}) = \texttt{medium}.$$

Thus $\text{In}(e_{\text{rollout}}) = \{\text{MoH}, \text{StateH}, \text{Logi}\}$, $\text{Out}(e_{\text{rollout}}) = \{\text{Hosp}, \text{Clinic}, \text{NGO}, \text{Data}\}$, and $\text{Neu}(e_{\text{rollout}}) = \{\text{Ware}, \text{Reg}\}$.
For e_{regulate},

$$\text{supp}(e_{\text{regulate}}) = \{\text{MoH}, \text{StateH}, \text{Reg}, \text{Hosp}, \text{Clinic}, \text{NGO}, \text{Logi}, \text{Ware}, \text{Data}\},$$

with

$$\lambda(\text{Reg}) = \lambda(\text{MoH}) = \texttt{source},$$

$$\lambda(\text{StateH}) = \lambda(\text{Hosp}) = \lambda(\text{Clinic}) = \lambda(\text{NGO}) = \texttt{target},$$

$$\lambda(\text{Logi}) = \lambda(\text{Ware}) = \lambda(\text{Data}) = \texttt{medium}.$$

Then $\text{In}(e_{\text{regulate}}) = \{\text{Reg}, \text{MoH}\}$, $\text{Out}(e_{\text{regulate}}) = \{\text{StateH}, \text{Hosp}, \text{Clinic}, \text{NGO}\}$, and the remaining actants are neutral. This instantiates an actor superhypernetwork at level 2.

Example 2.13 (Climate agreement implementation as an actor superhypernetwork at level n=2)**. Base actants.**

$$\mathcal{A}_0 = \{\text{AEnv}, \text{BEnv}, \text{Secret}, \text{NGO}, \text{Regis}, \text{Sat}, \text{Bank}\}.$$

Orientation partition. Use π with

$$\pi(\texttt{submitter}) = \pi(\texttt{funder}) = \text{in},$$

$$\pi(\texttt{recipient}) = \pi(\texttt{report}) = \text{out},$$

$$\pi(\texttt{facilitator}) = \pi(\texttt{monitor}) = \text{neu}.$$

Rank-1 groups.

$$G_{\text{parties}} = \{\text{AEnv}, \text{BEnv}, \text{Secret}\},$$

$$G_{\mathrm{mrv}} = \{\mathrm{Regis}, \mathrm{Sat}\},$$

$$G_{\mathrm{cso}} = \{\mathrm{NGO}\}, \quad G_{\mathrm{fin}} = \{\mathrm{Bank}\}.$$

Level-2 supervertices $V \subseteq \mathcal{P}^2(\mathcal{A}_0)$.

$$C_{\mathrm{NDC}} = \{G_{\mathrm{parties}}, G_{\mathrm{mrv}}\},$$

$$C_{\mathrm{finance}} = \{G_{\mathrm{parties}}, G_{\mathrm{fin}}, G_{\mathrm{cso}}\},$$

and $V = \{C_{\mathrm{NDC}}, C_{\mathrm{finance}}\}$.

Level-2 superedges E.

$$e_{\mathrm{report}} = \{C_{\mathrm{NDC}}, C_{\mathrm{finance}}\},$$

$$\rho(e_{\mathrm{report}}) = \texttt{report_and_finance_flow}, \quad \sigma(e_{\mathrm{report}}) = +1, \quad w(e_{\mathrm{report}}) = 0.8,$$

$$e_{\mathrm{review}} = \{C_{\mathrm{NDC}}\}, \qquad \rho(e_{\mathrm{review}}) = \texttt{technical_review}, \quad \sigma(e_{\mathrm{review}}) = +1, \quad w(e_{\mathrm{review}}) = 0.6.$$

Role maps on base supports. For e_{report}, the base support is

$$\mathrm{supp}(e_{\mathrm{report}}) = \{\mathrm{AEnv}, \mathrm{BEnv}, \mathrm{Secret}, \mathrm{Regis}, \mathrm{Sat}, \mathrm{Bank}, \mathrm{NGO}\}.$$

Set

$$\lambda(\mathrm{AEnv}) = \lambda(\mathrm{BEnv}) = \texttt{submitter},$$

$$\lambda(\mathrm{Regis}) = \lambda(\mathrm{Sat}) = \texttt{report},$$

$$\lambda(\mathrm{Bank}) = \texttt{recipient},$$

$$\lambda(\mathrm{Secret}) = \lambda(\mathrm{NGO}) = \texttt{facilitator}.$$

Hence $\mathrm{In}(e_{\mathrm{report}}) = \{\mathrm{AEnv}, \mathrm{BEnv}\}$, $\mathrm{Out}(e_{\mathrm{report}}) = \{\mathrm{Regis}, \mathrm{Sat}, \mathrm{Bank}\}$, and $\mathrm{Neu}(e_{\mathrm{report}}) = \{\mathrm{Secret}, \mathrm{NGO}\}$.

For e_{review},

$$\mathrm{supp}(e_{\mathrm{review}}) = \{\mathrm{AEnv}, \mathrm{BEnv}, \mathrm{Secret}, \mathrm{Regis}, \mathrm{Sat}\},$$

with

$$\lambda(\mathrm{Regis}) = \lambda(\mathrm{Sat}) = \texttt{monitor},$$

$$\lambda(\mathrm{Secret}) = \texttt{facilitator},$$

$$\lambda(\mathrm{AEnv}) = \lambda(\mathrm{BEnv}) = \texttt{recipient}.$$

Thus $\mathrm{In}(e_{\mathrm{review}}) = \varnothing$ (pure review), $\mathrm{Out}(e_{\mathrm{review}}) = \{\mathrm{AEnv}, \mathrm{BEnv}\}$, and $\mathrm{Neu}(e_{\mathrm{review}}) = \{\mathrm{Secret}, \mathrm{Regis}, \mathrm{Sat}\}$. These constructions realize two actor superhypernetworks at level 2.

Theorem 2.14 (Actor superhypernetworks have SuperHyperGraph structure)**.** *For any actor superhypernetwork $\mathcal{SH}^{(n)}$ in Definition 2.11, the underlying pair (V, E) is an n-SuperHyperGraph.*

Proof. By Definition 2.11, $V \subseteq \mathcal{P}^n(\mathcal{A}_0)$ and $E \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\}$ with both V, E nonempty. This is exactly the axiom of an n-SuperHyperGraph. □

Definition 2.15 (Role-aware directed 2-section on the *base* layer)**.** Given $\mathcal{SH}^{(n)}$, define its base-layer actor network

$$\mathcal{G}_\pi\big(\mathcal{SH}^{(n)}\big) = \big(\mathcal{A}_0,\ E_\to,\ \tau,\ \rho_\to,\ \sigma_\to,\ w_\to\big),$$

with arcs and weights

$$E_\to = \Big\{(u,v) \in \mathcal{A}_0 \times \mathcal{A}_0 :\ \exists e \in E,\ u \in \mathrm{In}(e),\ v \in \mathrm{Out}(e)\Big\},$$

$$w_\to(u,v) = \sum_{\substack{e \in E:\\ u \in \mathrm{In}(e),\ v \in \mathrm{Out}(e)}} \frac{w(e)}{Z_e},$$

$$Z_e := \max\{1,\ |\mathrm{In}(e)| \cdot |\mathrm{Out}(e)|\},$$

and labels/signs inherited from contributing superedges (ties resolved arbitrarily or by confidence). This yields a typed, signed, weighted digraph on base actants.

Example 2.16 (Role-aware directed 2-section on the *base* layer)**.** Consider an actor superhypernetwork $\mathcal{SH}^{(n)}$ (any $n \geq 1$) with base actants

$$\mathcal{A}_0 = \{\mathrm{Lab},\ \mathrm{Company},\ \mathrm{Grant},\ \mathrm{Repo},\ \mathrm{Ethics}\}.$$

Use an orientation partition π with

$$\pi(\texttt{source}) = \mathrm{in}, \qquad \pi(\texttt{target}) = \mathrm{out}, \qquad \pi(\texttt{facilitator}) = \mathrm{neu}.$$

Suppose $\mathcal{SH}^{(n)}$ has four superedges $E = \{e_{\mathrm{fund}}, e_{\mathrm{proj}}, e_{\mathrm{transfer}}, e_{\mathrm{report}}\}$, each equipped with a weight $w(e)$, a sign $\sigma(e) = +1$, and a role map $\lambda_e : \mathrm{supp}(e) \to \{\texttt{source}, \texttt{target}, \texttt{facilitator}\}$ on its base support $\mathrm{supp}(e) \subseteq \mathcal{A}_0$:

e_{fund} : supp $= \{\mathrm{Grant}, \mathrm{Lab}, \mathrm{Company}\}$,

$\lambda(\mathrm{Grant}) = \texttt{source}, \quad \lambda(\mathrm{Lab}) = \lambda(\mathrm{Company}) = \texttt{target}, \quad w = 0.9;$

e_{proj} : supp $= \{\mathrm{Lab}, \mathrm{Company}, \mathrm{Repo}, \mathrm{Ethics}\}$,

$\lambda(\mathrm{Lab}) = \lambda(\mathrm{Company}) = \texttt{source}, \quad \lambda(\mathrm{Repo}) = \texttt{target}, \quad \lambda(\mathrm{Ethics}) = \texttt{facilitator}, \quad w = 0.8;$

e_{transfer} : supp $= \{\mathrm{Company}, \mathrm{Repo}\}$,

$\lambda(\mathrm{Company}) = \texttt{source}, \quad \lambda(\mathrm{Repo}) = \texttt{target}, \quad w = 0.5;$

e_{report} : supp $= \{\mathrm{Lab}, \mathrm{Grant}, \mathrm{Repo}\}$,

$\lambda(\mathrm{Lab}) = \texttt{source}, \quad \lambda(\mathrm{Repo}) = \texttt{target}, \quad \lambda(\mathrm{Grant}) = \texttt{facilitator}, \quad w = 0.6.$

Applying the base-layer role-aware directed 2-section (Definition) yields the actor network

$$\mathcal{G}_\pi\big(\mathcal{SH}^{(n)}\big) = \big(\mathcal{A}_0,\ E_\to,\ \tau,\ \rho_\to,\ \sigma_\to,\ w_\to\big),$$

with arc set

$$E_\to = \{(u,v) \in \mathcal{A}_0^2 :\ \exists e \in E \text{ with } u \in \mathrm{In}(e),\ v \in \mathrm{Out}(e)\},$$

and weights

$$w_\to(u,v) = \sum_{\substack{e\in E:\\ u\in \mathrm{In}(e),\, v\in \mathrm{Out}(e)}} \frac{w(e)}{Z_e}, \qquad Z_e = \max\{1,\ |\mathrm{In}(e)| \cdot |\mathrm{Out}(e)|\}.$$

Arc computation.

- e_{fund}: In $= \{\text{Grant}\}$, Out $= \{\text{Lab}, \text{Company}\}$, so $Z = 1 \cdot 2 = 2$. Contributions: $(\text{Grant} \to \text{Lab}) = \frac{0.9}{2} = 0.45$, $(\text{Grant} \to \text{Company}) = \frac{0.9}{2} = 0.45$.
- e_{proj}: In $= \{\text{Lab}, \text{Company}\}$, Out $= \{\text{Repo}\}$, so $Z = 2 \cdot 1 = 2$. Contributions: $(\text{Lab} \to \text{Repo}) = \frac{0.8}{2} = 0.4$, $(\text{Company} \to \text{Repo}) = \frac{0.8}{2} = 0.4$.
- e_{transfer}: In $= \{\text{Company}\}$, Out $= \{\text{Repo}\}$, so $Z = 1$. Contribution: $(\text{Company} \to \text{Repo}) = 0.5$.
- e_{report}: In $= \{\text{Lab}\}$, Out $= \{\text{Repo}\}$, so $Z = 1$. Contribution: $(\text{Lab} \to \text{Repo}) = 0.6$.

Aggregated base-layer digraph. Summing contributions for identical arcs gives

$$\begin{aligned} w_\to(\text{Grant}, \text{Lab}) &= 0.45, \\ w_\to(\text{Grant}, \text{Company}) &= 0.45, \\ w_\to(\text{Lab}, \text{Repo}) &= 0.4 + 0.6 = 1.0, \\ w_\to(\text{Company}, \text{Repo}) &= 0.4 + 0.5 = 0.9. \end{aligned}$$

Thus the role-aware directed 2-section on the *base* layer is a typed, signed (+1 here), weighted digraph capturing how sources (e.g., Grant, Lab, Company) direct influence toward targets (e.g., Lab, Company, Repo) after accounting for multi-actor joint associations and role multiplicities.

Theorem 2.17 (Reduction to actor hypernetworks ($n = 1$))**.** *Let $n = 1$ and choose $V = \big\{\{a\} : a \in \mathcal{A}_0\big\} \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{A}_0)$. For any family of nonempty subsets $\widehat{E} \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{A}_0) \setminus \{\varnothing\}$, set*

$$E \ :=\ \big\{\ e \subseteq V \ \big|\ \mathrm{flat}(e) \in \widehat{E}\ \big\}.$$

Associate to each $e \in E$ the same label/sign/weight as its support $\mathrm{flat}(e)$*, and define λ_e on* $\mathrm{supp}(e) = \mathrm{flat}(e)$*. Then $\mathcal{SH}^{(1)}$ is an* actor hypernetwork *whose vertices are base actants and whose hyperedges are exactly $\widehat{E}$ with the given annotations.*

Proof. For $n = 1$, every supervertex has the form $\{a\}$ with $\mathrm{flat}(\{a\}) = \{a\}$. If $e \subseteq V$ is nonempty, $\mathrm{flat}(e) = \{a : \{a\} \in e\}$ is the base set incident to e. By construction, the family $\{\,\mathrm{flat}(e) : e \in E\,\}$ equals $\widehat{E}$, so $(\mathcal{A}_0, \widehat{E})$ is the underlying hypergraph. The transferred maps

$(\rho, \lambda_e, \sigma, w)$ are defined on $\mathrm{flat}(e)$, hence we obtain an actor hypernetwork in the sense of role-annotated hyperedges on $\mathcal{A}_0$. □

Theorem 2.18 (Reduction to actor networks (pairwise case))**.** *Under the setting of Theorem 2.17, further restrict to supports* $|\mathrm{supp}(e)| = 2$ *with exactly one* in *and one* out *role. Then the base-layer* 2*-section* $\mathcal{G}_\pi(\mathcal{SH}^{(1)})$ *is precisely the typed, signed, weighted actor network whose arc set contains* $(u \to v)$ *whenever* $\{u, v\} = \mathrm{supp}(e)$ *with* $u \in \mathrm{In}(e)$ *and* $v \in \mathrm{Out}(e)$*, and whose arc weight equals* $w(e)$*.*

Proof. For any such e, we have $|\mathrm{In}(e)| = |\mathrm{Out}(e)| = 1$, hence $Z_e = 1$. The 2-section contributes the unique arc (u, v) with weight $w(e)$, label $\rho(e)$, and sign $\sigma(e)$. Summing over hyperedges yields the stated actor network. □

2.4. *Urban Road Network*

We formalize an urban road network as a finite, directed, weighted multigraph equipped with standard traffic–engineering attributes (cf. [25, 26]). An urban road network is a directed, weighted graph of intersections and road segments, modeling connectivity, capacities, and travel dynamics.

Definition 2.19 (Urban road network (primal, directed, lane/segment level))**.** (cf. [27–29]) Let I be a finite nonempty set of *intersections* (junctions) and let A be a finite set of *directed road segments* (links). Each $a \in A$ is an oriented piece of roadway that carries traffic in one direction between two intersections; two-way streets are represented by a pair of antiparallel segments. The incidence maps are

$$\mathrm{tail}, \mathrm{head} : A \to I, \qquad a : u \to v \iff \mathrm{tail}(a) = u,\ \mathrm{head}(a) = v.$$

Each segment a is endowed with attributes:

$$\ell_a > 0 \text{ (length)}, \qquad C_a > 0 \text{ (capacity)}, \qquad v_a^{\mathrm{ff}} > 0 \text{ (free–flow speed)}.$$

Define the free–flow travel time $t_a^{\mathrm{ff}} := \ell_a / v_a^{\mathrm{ff}}$. The tuple

$$\mathcal{R} := (I, A, \ell, C, v^{\mathrm{ff}})$$

is an *urban road network (URN).*

Example 2.20 (Toy URN with three intersections and five directed segments (for Def. 2.19))**.** Let the intersection set be $I = \{J_1, J_2, J_3\}$ and the directed segment set

$$A = \{a_1{:}J_1 \to J_2,\ a_2{:}J_2 \to J_1,\ a_3{:}J_2 \to J_3,\ a_4{:}J_3 \to J_2,\ a_5{:}J_1 \to J_3\}.$$

Here (a_1, a_2) model a two-way street via antiparallel links. Assign attributes (length ℓ_a in km, capacity C_a in veh/h, free-flow speed v_a^{ff} in km/h):

link a	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$(\mathrm{tail}(a), \mathrm{head}(a))$	(J_1, J_2)	(J_2, J_1)	(J_2, J_3)	(J_3, J_2)	(J_1, J_3)
ℓ_a [km]	1.2	1.2	0.8	0.8	2.0
C_a [veh/h]	1800	1800	1500	1500	2000
v_a^{ff} [km/h]	60	60	50	50	70

Then the free-flow times $t_a^{\mathrm{ff}} := \ell_a / v_a^{\mathrm{ff}}$ (hours) are

$$t_{a_1}^{\mathrm{ff}} = 1.2/60 = 0.020 \text{ h} = 1.200 \text{ min}, \quad t_{a_2}^{\mathrm{ff}} = 0.020 \text{ h} = 1.200 \text{ min},$$
$$t_{a_3}^{\mathrm{ff}} = 0.8/50 = 0.016 \text{ h} = 0.960 \text{ min}, \quad t_{a_4}^{\mathrm{ff}} = 0.016 \text{ h} = 0.960 \text{ min},$$
$$t_{a_5}^{\mathrm{ff}} = 2.0/70 = \tfrac{1}{35} \approx 0.028571 \text{ h} \approx 1.714286 \text{ min}.$$

Thus $\mathcal{R} = (I, A, \ell, C, v^{\mathrm{ff}})$ is a concrete URN with explicit incidence, geometry, and capacities.

Definition 2.21 (Flows, VOC, and link performance)**.** Let $x_a \geq 0$ denote the (hourly) flow on link a. Its *volume–over–capacity* is $\mathrm{VOC}_a := x_a / C_a$. A standard link travel–time function is the BPR form

$$t_a(x_a) \;=\; t_a^{\mathrm{ff}}\Big(1 + \alpha\, \mathrm{VOC}_a^{\beta}\Big) \quad (\alpha > 0,\ \beta > 1).$$

Example 2.22 (Computing VOC and BPR travel time (for Def. 2.21))**.** On the URN above, suppose hourly link flows (veh/h)

$$x_{a_1} = 1200, \quad x_{a_2} = 600, \quad x_{a_3} = 1400, \quad x_{a_4} = 800, \quad x_{a_5} = 900,$$

and use the BPR form $t_a(x_a) = t_a^{\mathrm{ff}}\big(1 + \alpha\, \mathrm{VOC}_a^{\beta}\big)$ with $(\alpha, \beta) = (0.15, 4)$ and $\mathrm{VOC}_a := x_a / C_a$.

Step-by-step derivations (two links).

Link a_1 : $\mathrm{VOC}_{a_1} = \dfrac{1200}{1800} = \dfrac{2}{3}, \quad \mathrm{VOC}_{a_1}^4 = \left(\dfrac{2}{3}\right)^4 = \dfrac{16}{81} \approx 0.197530864,$

$$1 + \alpha\, \mathrm{VOC}_{a_1}^4 = 1 + 0.15 \cdot \frac{16}{81} = 1 + \frac{2.4}{81} = 1.0296296296,$$
$$t_{a_1}(x_{a_1}) = t_{a_1}^{\mathrm{ff}} \cdot 1.0296296296 = 0.020 \times 1.0296296296 = 0.0205925926 \text{ h} = 1.235555556 \text{ min}.$$

Link a_3 : $\mathrm{VOC}_{a_3} = \dfrac{1400}{1500} = \dfrac{14}{15}, \quad \mathrm{VOC}_{a_3}^4 = \left(\dfrac{14}{15}\right)^4 = \dfrac{38416}{50625} \approx 0.758834568,$

$$1 + \alpha\, \mathrm{VOC}_{a_3}^4 = 1 + 0.15 \cdot \frac{38416}{50625} = 1 + \frac{5762.4}{50625} = 1.113825185,$$
$$t_{a_3}(x_{a_3}) = t_{a_3}^{\mathrm{ff}} \cdot 1.113825185 = 0.016 \times 1.113825185 = 0.017821203 \text{ h} = 1.069272178 \text{ min}.$$

All links (summary). With the same procedure,

link a	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\mathrm{VOC}_a = x_a/C_a$	0.666667	0.333333	0.933333	0.533333	0.450000
$1 + 0.15\,\mathrm{VOC}_a^4$	1.029630	1.001852	1.113825	1.012136	1.006151
$t_a(x_a)$ [min]	1.235556	1.202222	1.069272	0.971651	1.724830

Each $t_a(x_a)$ equals t_a^{ff} multiplied by $1 + 0.15\,\mathrm{VOC}_a^4$ as required by the BPR performance function.

Remark 2.23 (Monotonicity, convexity, and concrete values)**.** For BPR, $t_a'(x_a) = t_a^{\mathrm{ff}}\,\alpha\,\beta\,C_a^{-1}\big(x_a/C_a\big)^{\beta-1} > 0$ and $t_a''(x_a) = t_a^{\mathrm{ff}}\,\alpha\,\beta(\beta-1)\,C_a^{-2}\big(x_a/C_a\big)^{\beta-2} > 0$, hence t_a is strictly increasing and convex. With the commonly used $(\alpha, \beta) = (0.15, 4)$,

$$\mathrm{VOC}_a = 0.8 \;\Rightarrow\; t_a = t_a^{\mathrm{ff}}\big(1 + 0.15 \cdot 0.8^4\big) = t_a^{\mathrm{ff}}(1 + 0.06144) = 1.06144\,t_a^{\mathrm{ff}},$$

$$\mathrm{VOC}_a = 1.2 \;\Rightarrow\; t_a = t_a^{\mathrm{ff}}\big(1 + 0.15 \cdot 1.2^4\big) = t_a^{\mathrm{ff}}(1 + 0.31104) = 1.31104\,t_a^{\mathrm{ff}}.$$

Definition 2.24 (OD pairs, paths, feasible flows)**.** Let $W \subseteq I \times I$ be the set of origin–destination (OD) pairs with demands $q_w \geq 0$ ($w \in W$). A (simple) *path* p is a directed sequence of links from o to d. Let $\mathcal{P}_w$ be the set of $o \to d$ paths for $w = (o, d)$ and let $\mathcal{P} := \bigcup_w \mathcal{P}_w$. Path flows $f_p \geq 0$ satisfy, for each w,

$$\sum_{p \in \mathcal{P}_w} f_p \;=\; q_w, \qquad x_a \;=\; \sum_{p \in \mathcal{P}} \delta_{ap} f_p \quad (a \in A),$$

where $\delta_{ap} = 1$ if link a lies on path p and 0 otherwise. The vector $x = (x_a)_{a \in A}$ is a *feasible link–flow*.

Example 2.25 (Enumerating OD pairs, paths, and a feasible flow (for Def. 2.24))**.** Consider the toy URN with intersections $I = \{J_1, J_2, J_3\}$ and directed links

$$a_1 : J_1 \to J_2, \qquad a_3 : J_2 \to J_3, \qquad a_5 : J_1 \to J_3.$$

Let the OD set be $W = \{w\}$ with $w = (J_1, J_3)$ and demand $q_w = 1000$ veh/h. There are two simple $J_1 \to J_3$ paths:

$$P_1 = (a_5), \qquad P_2 = (a_1, a_3).$$

Choose nonnegative path flows

$$f_{P_1} = 700, \qquad f_{P_2} = 300,$$

which satisfy the OD constraint $\sum_{p \in \{P_1, P_2\}} f_p = 700 + 300 = 1000 = q_w$. The implied link flows, using $x_a = \sum_p \delta_{ap} f_p$, are

$$x_{a_5} = \delta_{a_5,P_1} f_{P_1} + \delta_{a_5,P_2} f_{P_2} = 1 \cdot 700 + 0 \cdot 300 = 700,$$

$$x_{a_1} = 0 \cdot 700 + 1 \cdot 300 = 300, \qquad x_{a_3} = 0 \cdot 700 + 1 \cdot 300 = 300.$$

Thus $x = (x_{a_1}, x_{a_3}, x_{a_5}) = (300, 300, 700)$ is a *feasible* link–flow vector induced by $(f_{P_1}, f_{P_2}) = (700, 300)$.

Definition 2.26 (Path costs and Wardrop user equilibrium)**.** Define the link costs $t_a(x_a)$ and the cost of path p as $c_p(x) := \sum_a \delta_{ap}\, t_a(x_a)$. A feasible flow (f, x) is a *Wardrop user equilibrium (UE)* if for each w and all $p \in \mathcal{P}_w$,

$$f_p > 0 \;\Rightarrow\; c_p(x) = \min_{p' \in \mathcal{P}_w} c_{p'}(x), \qquad f_p = 0 \;\Rightarrow\; c_p(x) \geq \min_{p' \in \mathcal{P}_w} c_{p'}(x).$$

If each $t_a(\cdot)$ is continuous, strictly increasing, the UE exists and (with BPR) is characterized by the Beckmann program

$$\min_{x,f}\; \Phi(x) := \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(s)\, ds \quad \text{s.t. the feasibility constraints in Def. 2.24.}$$

For BPR,

$$\int_0^{x_a} t_a(s)\, ds = t_a^{\mathrm{ff}} \left[x_a + \frac{\alpha\, C_a}{\beta + 1} \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^{\beta+1} \right].$$

Example 2.27 (Checking a Wardrop user equilibrium with BPR costs (for Def. 2.26))**.** On the same network, let $q_{(J_1,J_3)} = 1000$ veh/h and adopt BPR link costs

$$t_a(x_a) = t_a^{\mathrm{ff}} \Big(1 + \alpha\, (x_a / C_a)^{\beta} \Big), \qquad (\alpha, \beta) = (0.15, 4),$$

with free–flow times (minutes) and capacities (veh/h)

$$t_{a_1}^{\mathrm{ff}} = 1.20,\; C_{a_1} = 1800; \quad t_{a_3}^{\mathrm{ff}} = 0.96,\; C_{a_3} = 1500; \quad t_{a_5}^{\mathrm{ff}} = 1.7142857,\; C_{a_5} = 2000.$$

Consider the candidate flow where all users take the direct path $P_1 = (a_5)$:

$$f_{P_1} = 1000, \qquad f_{P_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad x_{a_5} = 1000,\; x_{a_1} = x_{a_3} = 0.$$

Path costs. Compute $\mathrm{VOC}_{a_5} = x_{a_5}/C_{a_5} = 1000/2000 = 0.5$ and

$$1 + \alpha\, \mathrm{VOC}_{a_5}^{\beta} = 1 + 0.15 \cdot (0.5)^4 = 1 + 0.15 \cdot 0.0625 = 1 + 0.009375 = 1.009375.$$

Hence

$$c_{P_1} = t_{a_5}(1000) = t_{a_5}^{\mathrm{ff}} \cdot 1.009375 = 1.7142857 \times 1.009375 = 1.7303571 \text{ min}.$$

For the unused path $P_2 = (a_1, a_3)$ we have $x_{a_1} = x_{a_3} = 0$, so

$$c_{P_2} = t_{a_1}(0) + t_{a_3}(0) = t_{a_1}^{\mathrm{ff}} + t_{a_3}^{\mathrm{ff}} = 1.20 + 0.96 = 2.16 \text{ min}.$$

Wardrop conditions. The used path P_1 has cost $c_{P_1} = 1.7303571$ which equals the minimum path cost, and the unused path satisfies $c_{P_2} = 2.16 \geq c_{P_1}$. Therefore

$$f_{P_1} > 0 \;\Rightarrow\; c_{P_1} = \min\{c_{P_1}, c_{P_2}\}, \qquad f_{P_2} = 0 \;\Rightarrow\; c_{P_2} \geq \min\{c_{P_1}, c_{P_2}\},$$

so (f, x) is a Wardrop user equilibrium for this OD and cost specification.

2.5. *Urban Road HyperNetwork*

Signal phases, merging/diverging maneuvers, and coordinated movements naturally involve *sets of incoming links jointly producing sets of outgoing links.* This is captured by a role–annotated hypergraph on the same base A (links) or on the set of *movements* $\mathcal{M} \subseteq I_{\text{in}} \times I_{\text{out}}$.

Definition 2.28 (Urban road hypernetwork (movement hyperedges))**.** Fix the URN $\mathcal{R} = (I, A, \ldots)$. An *urban road hypernetwork* is

$$\mathcal{H}_{\text{road}} = \big(V,\ E,\ \{\lambda_e\}_{e\in E},\ \rho,\ \sigma,\ w\big),$$

where V is either A (links) or a set $\mathcal{M}$ of atomic movements; $E \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\}$ is a nonempty family of *hyperedges* (joint operations, e.g. a signal phase); each $e \in E$ carries a role map $\lambda_e : e \to \{\text{in}, \text{out}, \text{neu}\}$ that partitions

$$\text{In}(e) := \lambda_e^{-1}(\text{in}), \quad \text{Out}(e) := \lambda_e^{-1}(\text{out}), \quad \text{Neu}(e) := \lambda_e^{-1}(\text{neu}),$$

and annotations: label $\rho(e)$ (e.g. `phase_1`, `merge`, `diverge`), sign $\sigma(e) \in \{-1, 0, +1\}$ (hindering/neutral/enabling), weight $w(e) \geq 0$ (e.g. green–time share or saturation).

Definition 2.29 (Role–aware directed 2–section (movement projection))**.** Given $\mathcal{H}_{\text{road}}$, define a directed, weighted graph on V with arc set

$$E_{\to} \ = \ \big\{(u, v) \in V^2 :\ \exists e \in E,\ u \in \text{In}(e),\ v \in \text{Out}(e)\big\},$$

and weights

$$w_{\to}(u, v) \ = \sum_{\substack{e\in E:\\ u\in\text{In}(e),\, v\in\text{Out}(e)}} \frac{w(e)}{\max\{1,\ |\text{In}(e)|\,|\text{Out}(e)|\}}.$$

This recovers a digraph of *effective pairwise influences* induced by joint operations.

Example 2.30 (Emergency vehicle preemption at a 4-leg signal (urban road hypernetwork))**.** Let $V = A$ (links) with approaches $\{a_{Nin}, a_{Ein}, a_{Sin}, a_{Win}\}$ and departures $\{a_{Nout}, a_{Eout}, a_{Sout}, a_{Wout}\}$. When a northbound ambulance triggers preemption, the controller opens straight and right from the north approach while holding conflicts. Model this as the single hyperedge e_{pre} with

$$\text{In}(e_{\text{pre}}) = \{a_{Nin}\}, \qquad \text{Out}(e_{\text{pre}}) = \{a_{Sout}, a_{Eout}\}, \qquad \rho(e_{\text{pre}}) = \texttt{preemption},\ \ \sigma(e_{\text{pre}}) = +1,\ \ w(e_{\text{pre}}) = 0.90.$$

Role–aware 2–section weight per ordered pair uses

$$Z_{e_{\text{pre}}} = \max\{1, |\text{In}| \cdot |\text{Out}|\} = \max\{1, 1 \cdot 2\} = 2, \qquad w_{\to}(u, v) = \frac{w(e_{\text{pre}})}{Z_{e_{\text{pre}}}}.$$

Hence each permitted movement gets

$$w_{\to}(a_{Nin}, a_{Sout}) = w_{\to}(a_{Nin}, a_{Eout}) = \frac{0.90}{2} = 0.45.$$

All other pairs receive no contribution from e_{pre}.

Example 2.31 (Two on-ramps metered into a freeway mainline (urban road hypernetwork))**.** Let $V = A$ with links $\{a_{\text{Mup}}, a_{\text{R1}}, a_{\text{R2}}, a_{\text{Mdown}}\}$ denoting upstream mainline, two on-ramps, and the downstream mainline. Coordinated ramp metering allocates a fixed share of discharge toward the downstream bottleneck. Represent this with one hyperedge e_{meter}:

$$\text{In}(e_{\text{meter}}) = \{a_{\text{Mup}}, a_{\text{R1}}, a_{\text{R2}}\},$$

$$\text{Out}(e_{\text{meter}}) = \{a_{\text{Mdown}}\},$$

$$\rho(e_{\text{meter}}) = \texttt{coordinated_metering}, \quad \sigma(e_{\text{meter}}) = +1, \quad w(e_{\text{meter}}) = 0.75.$$

Then

$$Z_{e_{\text{meter}}} = \max\{1, 3 \cdot 1\} = 3,$$

$$w_{\rightarrow}(u, v) = \frac{0.75}{3} = 0.25 \quad \text{for } (u, v) \in \{(a_{\text{Mup}}, a_{\text{Mdown}}), (a_{\text{R1}}, a_{\text{Mdown}}), (a_{\text{R2}}, a_{\text{Mdown}})\}.$$

Thus each contributing input (mainline and both ramps) receives a projected influence weight 0.25 toward the downstream mainline under this joint operation.

Example 2.32 (Single-lane 4-leg roundabout (urban road hypernetwork))**.** Let $V = A$ with entries

$$\{a_{Nin}, a_{Ein}, a_{Sin}, a_{Win}\}$$

and exits

$$\{a_{Nout}, a_{Eout}, a_{Sout}, a_{Wout}\}$$

. Gap-acceptance and circulating priority can be summarized as a joint operation that *enables* entries to feed exits over a cycle. Model one cycle by the hyperedge e_{rb}:

$$\text{In}(e_{\text{rb}}) = \{a_{Nin}, a_{Ein}, a_{Sin}, a_{Win}\},$$

$$\text{Out}(e_{\text{rb}}) = \{a_{Nout}, a_{Eout}, a_{Sout}, a_{Wout}\},$$

$$\rho(e_{\text{rb}}) = \texttt{circulating_priority},$$

$$\sigma(e_{\text{rb}}) = +1, \qquad w(e_{\text{rb}}) = 0.90.$$

The role–aware projection gives

$$Z_{e_{\text{rb}}} = \max\{1, 4 \cdot 4\} = 16,$$

$$w_{\rightarrow}(u, v) = \frac{0.90}{16} = 0.05625 \quad \text{for each } u \in \text{In}(e_{\text{rb}}),\ v \in \text{Out}(e_{\text{rb}}).$$

For instance,

$$w_{\rightarrow}(a_{Nin}, a_{Eout}) = w_{\rightarrow}(a_{Nin}, a_{Sout}) = w_{\rightarrow}(a_{Nin}, a_{Wout}) = 0.05625,$$

and analogously for all other entry–exit pairs in the cycle (pairs not permitted in a particular jurisdiction can be removed by excluding those v from $\text{Out}(e_{\text{rb}})$).

Theorem 2.33 (Hypernetwork generalizes pairwise control)**.** *If every $e \in E$ has $|\mathrm{In}(e)| = |\mathrm{Out}(e)| = 1$, then the 2–section recovers an ordinary directed graph on V; thus hypernetworks strictly generalize pairwise linking of movements.*

Proof. Immediate from the definition of $E_{\to}$ and the denominator $\max\{1, |\mathrm{In}(e)|\,|\mathrm{Out}(e)|\}$. □

2.6. *Urban Road SuperHyperNetwork*

Corridors, subnetworks, and control groups naturally form *collections of links/movements.* Superhypernetworks model joint operations across such collections using iterated powersets.

Definition 2.34 (Urban road superhypernetwork at level n)**.** Let the base set be $V_0 := A$ (links) or $V_0 := \mathcal{M}$ (movements). For $n \geq 1$, an *n–level urban road superhypernetwork* is

$$\mathcal{SH}^{(n)}_{\mathrm{road}} = \big(V,\ E,\ \{\lambda_e\}_{e\in E},\ \rho,\ \sigma,\ w\big),$$

with $V \subseteq \mathcal{P}^n(V_0)$ nonempty (supervertices are groups, corridors, or clusters at rank n) and $E \subseteq \mathcal{P}(V) \setminus \{\varnothing\}$ nonempty (superedges are joint corridor–level operations). For each $e \in E$, let $\mathrm{supp}(e) \subseteq V_0$ be the union of base elements inside all supervertices of e; the role map $\lambda_e : \mathrm{supp}(e) \to \{\mathrm{in}, \mathrm{out}, \mathrm{neu}\}$ partitions base links into sources, sinks, and neutral participants. Signs and weights annotate control/enabling strength at the group level.

Definition 2.35 (Base–layer 2–section)**.** Project $\mathcal{SH}^{(n)}_{\mathrm{road}}$ to the base layer V_0 by adding an arc (u, v) for every $e \in E$ with $u \in \mathrm{In}(e)$, $v \in \mathrm{Out}(e)$, and aggregating weights as in the hypernetwork projection.

Example 2.36 (Special-event detours (level n=2 urban road superhypernetwork))**.** Let the base set be links $V_0 = A = \{a_1, \ldots, a_8\}$ in a CBD. Form rank-1 groups (corridor/link clusters):

$$G_{\mathrm{core}} = \{a_1, a_2, a_3\}, \quad G_{\mathrm{detour}} = \{a_4, a_5, a_6\}, \quad G_{\mathrm{transit}} = \{a_7, a_8\}.$$

Form rank-2 supervertices

$$C_{\mathrm{event}} = \{G_{\mathrm{core}}, G_{\mathrm{transit}}\}, \qquad C_{\mathrm{detour}} = \{G_{\mathrm{detour}}\},$$

and set $V = \{C_{\mathrm{event}}, C_{\mathrm{detour}}\} \subseteq \mathcal{P}^2(V_0)$. Define a superedge $e_{\mathrm{event}} = \{C_{\mathrm{event}}, C_{\mathrm{detour}}\} \in E$ with

$$\rho(e_{\mathrm{event}}) = \texttt{marathon_control}, \quad \sigma(e_{\mathrm{event}}) = +1, \quad w(e_{\mathrm{event}}) = 0.75.$$

Role map $\lambda_{e_{\mathrm{event}}}$ on the base support $\mathrm{supp}(e_{\mathrm{event}}) = G_{\mathrm{core}} \cup G_{\mathrm{detour}} \cup G_{\mathrm{transit}}$ is

$$\mathrm{In}(e_{\mathrm{event}}) = G_{\mathrm{core}} = \{a_1, a_2, a_3\},$$

$$\mathrm{Out}(e_{\mathrm{event}}) = G_{\mathrm{detour}} = \{a_4, a_5, a_6\},$$

$$\mathrm{Neu}(e_{\mathrm{event}}) = G_{\mathrm{transit}} = \{a_7, a_8\}.$$

Base-layer 2-section (pairwise projection). Using

$$Z_e := \max\{1, |\mathrm{In}(e)|\,|\mathrm{Out}(e)|\}, \qquad w_{\to}(u,v) = \sum_e \frac{w(e)\,\mathbf{1}_{\{u\in\mathrm{In}(e),\, v\in\mathrm{Out}(e)\}}}{Z_e},$$

we have $Z_{e_{\mathrm{event}}} = 3 \cdot 3 = 9$ and each in–out pair receives

$$\frac{w(e_{\mathrm{event}})}{Z_{e_{\mathrm{event}}}} = \frac{0.75}{9} = \frac{1}{12} = 0.083333\ldots.$$

Thus the 9 arcs $a_i \to a_j$ ($a_i \in \{a_1, a_2, a_3\}$, $a_j \in \{a_4, a_5, a_6\}$) each get weight 1/12; e.g.,

$$w_{\to}(a_1, a_4) = w_{\to}(a_2, a_5) = w_{\to}(a_3, a_6) = \frac{1}{12}.$$

Operationally, the superedge encodes a special-event plan that throttles *core* links (in) and diverts flow to designated *detour* links (out), while *transit* links remain neutral.

Example 2.37 (District-scale green waves with ramp metering (level n=3 urban road super-hypernetwork))**.** Let the base set be movements $V_0 = \mathcal{M} = \{b_1, \ldots, b_{12}\}$ along two opposed arterials with ramps and cross-streets. Rank-1 groups (segment-level movement sets):

$$S_{\uparrow} = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}, \quad S_{\downarrow} = \{b_5, b_6, b_7\},$$

$$S_{\times} = \{b_8, b_9\}, \quad S_{\mathrm{ramp}} = \{b_{10}, b_{11}, b_{12}\}.$$

Rank-2 supervertices (corridor level):

$$\mathrm{Cor}_N = \{S_{\uparrow}, S_{\times}\}, \qquad \mathrm{Cor}_S = \{S_{\downarrow}, S_{\mathrm{ramp}}\}.$$

Rank-3 supervertices (district level):

$$D_A = \{\mathrm{Cor}_N\}, \qquad D_B = \{\mathrm{Cor}_S\},$$

and $V = \{D_A, D_B\} \subseteq \mathcal{P}^3(V_0)$.

Two superedges model coordinated operations:

$$e_{\mathrm{wave}} = \{D_A, D_B\}, \quad \rho(e_{\mathrm{wave}}) = \texttt{green_wave}, \quad \sigma(e_{\mathrm{wave}}) = +1, \quad w(e_{\mathrm{wave}}) = 0.60,$$

$$e_{\mathrm{meter}} = \{D_B\}, \quad \rho(e_{\mathrm{meter}}) = \texttt{ramp_metering}, \quad \sigma(e_{\mathrm{meter}}) = +1, \quad w(e_{\mathrm{meter}}) = 0.40.$$

Role maps on base supports:

$$\mathrm{In}(e_{\mathrm{wave}}) = S_{\uparrow} = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}, \quad \mathrm{Out}(e_{\mathrm{wave}}) = S_{\downarrow} = \{b_5, b_6, b_7\},$$

$$\mathrm{Neu}(e_{\mathrm{wave}}) = S_{\times} \cup S_{\mathrm{ramp}} = \{b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}\}.$$

$$\mathrm{In}(e_{\mathrm{meter}}) = S_{\mathrm{ramp}} = \{b_{10}, b_{11}, b_{12}\}, \quad \mathrm{Out}(e_{\mathrm{meter}}) = S_{\downarrow} = \{b_5, b_6, b_7\},$$

$$\mathrm{Neu}(e_{\mathrm{meter}}) = S_{\uparrow} \cup S_{\times}.$$

Base-layer 2-section weights (same aggregation as in Example 1). For e_{wave}: $|\mathrm{In}| = 4$, $|\mathrm{Out}| = 3$, hence $Z_{e_{\mathrm{wave}}} = 12$ and each upstream–downstream pair gets

$$\frac{w(e_{\mathrm{wave}})}{Z_{e_{\mathrm{wave}}}} = \frac{0.60}{12} = \frac{1}{20} = 0.05.$$

There are $4 \times 3 = 12$ such arcs; e.g.,

$$w_{\to}(b_1, b_5) = w_{\to}(b_2, b_6) = w_{\to}(b_4, b_7) = 0.05.$$

For e_{meter}: $|\text{In}| = 3$, $|\text{Out}| = 3$, so $Z_{e_{\text{meter}}} = 9$ and each ramp–to–downstream pair gets

$$\frac{w(e_{\text{meter}})}{Z_{e_{\text{meter}}}} = \frac{0.40}{9} = \frac{2}{45} \approx 0.044444\ldots,$$

across $3 \times 3 = 9$ arcs; e.g.,

$$w_{\to}(b_{10}, b_5) = w_{\to}(b_{11}, b_6) = w_{\to}(b_{12}, b_7) = \frac{2}{45}.$$

Interpretation. The rank-3 *green-wave* superedge coordinates offsets so upstream platoons (in) feed downstream segments (out). The *ramp-metering* superedge throttles ramps (in) toward the same downstream set (out). Their induced pairwise weights sum on common ordered pairs—e.g., if a ramp movement also contributes via the platoon, the final arc weight is $0.05 + \frac{2}{45}$.

Theorem 2.38 (Reductions)**.** *For $n = 1$ with $V = \{\{a\} : a \in V_0\}$, $\mathcal{SH}^{(1)}_{\text{road}}$ reduces to an urban road hypernetwork on V_0. If, further, every superedge has exactly one* in *and one* out *base link, the base–layer 2–section is precisely a directed graph on V_0.*

Proof. Identical to the reductions proved earlier for generic (super)hypernetworks, applied with $V_0 = A$ or $V_0 = \mathcal{M}$. □

3. Conclusion

In this paper, we extended actor networks by employing HyperGraphs and SuperHyperGraphs. Looking ahead, we hope that future research will further develop extended frameworks based on Fuzzy Graphs [30], Intuitionistic Fuzzy Graphs [31,32], Hesitant Fuzzy Graphs [33], Picture Fuzzy Graphs [34], Neutrosophic Graphs [35, 36], and Plithogenic Graphs [37]. In addition, for the concepts defined in this paper, we expect future progress in developing programming tools, conducting quantitative computational analyses, performing experimental validations, and investigating their mathematical properties.

Funding

This study did not receive any financial or external support from organizations or individuals.

Acknowledgments

We extend our sincere gratitude to everyone who provided insights, inspiration, and assistance throughout this research. We particularly thank our readers for their interest and acknowledge the authors of the cited works for laying the foundation that made our study possible. We also appreciate the support from individuals and institutions that provided the resources and infrastructure needed to produce and share this paper. Finally, we are grateful to all those who supported us in various ways during this project.

Data Availability

This research is purely theoretical, involving no data collection or analysis. We encourage future researchers to pursue empirical investigations to further develop and validate the concepts introduced here.

Research Integrity

The authors hereby confirm that, to the best of their knowledge, this manuscript is their original work, has not been published in any other journal, and is not currently under consideration for publication elsewhere at this stage.

Use of Generative AI and AI-Assisted Tools

I use generative AI and AI-assisted tools for tasks such as English grammar checking, and I do not employ them in any way that violates ethical standards.

Disclaimer (Note on Computational Tools)

No computer-assisted proof, symbolic computation, or automated theorem proving tools (e.g., Mathematica, SageMath, Coq, etc.) were used in the development or verification of the results presented in this paper. All proofs and derivations were carried out manually and analytically by the authors.

Code Availability

No code or software was developed for this study.

Clinical Trial

This study did not involve any clinical trials.

Ethical Approval

As this research is entirely theoretical in nature and does not involve human participants or animal subjects, no ethical approval is required.

Conflicts of Interest

The authors confirm that there are no conflicts of interest related to the research or its publication.

Disclaimer

This work presents theoretical concepts that have not yet undergone practical testing or validation. Future researchers are encouraged to apply and assess these ideas in empirical contexts. While every effort has been made to ensure accuracy and appropriate referencing, unintentional errors or omissions may still exist. Readers are advised to verify referenced materials on their own. The views and conclusions expressed here are the authors' own and do not necessarily reflect those of their affiliated organizations.

References

[1] Ajoy Kanti Das, Rajat Das, Suman Das, Bijoy Krishna Debnath, Carlos Granados, Bimal Shil, and Rakhal Das. A comprehensive study of neutrosophic superhyper bci-semigroups and their algebraic significance. *Transactions on Fuzzy Sets and Systems*, 8(2):80, 2025.

[2] Florentin Smarandache. *SuperHyperFunction, SuperHyperStructure, Neutrosophic SuperHyperFunction and Neutrosophic SuperHyperStructure: Current understanding and future directions*. Infinite Study, 2023.

[3] Florentin Smarandache. Foundation of revolutionary topologies: An overview, examples, trend analysis, research issues, challenges, and future directions. 2024.

[4] Florentin Smarandache. Foundation of superhyperstructure & neutrosophic superhyperstructure. *Neutrosophic Sets and Systems*, 63(1):21, 2024.

[5] Melody Mae Cabigting Lunar and Renson Aguilar Robles. Characterization and structure of a power set graph. *International Journal of Advanced Research and Publications*, 3(6):1–4, 2019.

[6] Thomas Jech. *Set theory: The third millennium edition, revised and expanded*. Springer, 2003.

[7] Reinhard Diestel. *Graph theory*. Springer (print edition); Reinhard Diestel (eBooks), 2024.

[8] Jonathan L Gross, Jay Yellen, and Mark Anderson. *Graph theory and its applications*. Chapman and Hall/CRC, 2018.

[9] Claude Berge. *Hypergraphs: combinatorics of finite sets*, volume 45. Elsevier, 1984.

[10] Alain Bretto. Hypergraph theory. *An introduction. Mathematical Engineering. Cham: Springer*, 1, 2013.

[11] KK Myithili and C Nandhini. Analysis of hub parameters in fuzzy hypergraphs extending to intuitionistic fuzzy threshold hypergraphs: Applications in designing transport networks in amusement parks using hub hyperpaths. 2024.

[12] John N Mordeson and Premchand S Nair. *Fuzzy graphs and fuzzy hypergraphs*, volume 46. Physica, 2012.

[13] Muhammad Aslam Malik, Ali Hassan, Said Broumi, Assia Bakali, Mohamed Talea, and Florentin Smarandache. Isomorphism of bipolar single valued neutrosophic hypergraphs. *Collected Papers. Volume IX: On Neutrosophic Theory and Its Applications in Algebra*, page 72, 2022.

[14] Muhammad Akram and Anam Luqman. Intuitionistic single-valued neutrosophic hypergraphs. *Opsearch*, 54:799–815, 2017.

[15] Takaaki Fujita and Florentin Smarandache. Random n-superhypergraphs: A probabilistic model and generation algorithm for hierarchical networks. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 18(4):6835–6835, 2025.

[16] Florentin Smarandache. *Extension of HyperGraph to n-SuperHyperGraph and to Plithogenic n-SuperHyperGraph, and Extension of HyperAlgebra to n-ary (Classical-/Neutro-/Anti-) HyperAlgebra*. Infinite Study, 2020.

[17] Eduardo Martín Campoverde Valencia, Jessica Paola Chuisaca Vásquez, and Francisco Ángel Becerra Lois. Multineutrosophic analysis of the relationship between survival and business growth in the manufacturing sector of azuay province, 2020–2023, using plithogenic n-superhypergraphs. *Neutrosophic Sets and Systems*, 84(1):28, 2025.

[18] Takaaki Fujita and Florentin Smarandache. Property hypergraphs and property superhypergraphs for data analysis. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 18(4):6729–6729, 2025.

[19] Nelly Hodelín Amable, Elizabeth Esther Vergel De Salazar, Martha Gloria Martínez Isaac, Olivia Catalina Olavarría Sánchez, and Johanna Mariuxi Solís Palma. Representation of motivational dynamics in school environments through plithogenic n-superhypergraphs with family participation. *Neutrosophic Sets and Systems*, 92:570–583, 2025.

[20] Eduardo Luciano Hernandez Ramos, Luis Ramiro Ayala Ayala, and Kevin Alexander Samaniego Macas. Study of factors that influence a victim's refusal to testify for sexual reasons due to external influence using plithogenic n-superhypergraphs. *Operational Research Journal*, 46(2):328–337, 2025.

[21] Muhammad Akram and Gulfam Shahzadi. Hypergraphs in m-polar fuzzy environment. *Mathematics*, 6(2):28, 2018.

[22] Michel Callon. The sociology of an actor-network: The case of the electric vehicle. In *Mapping the dynamics of science and technology: Sociology of science in the real world*, pages 19–34. Springer, 1986.

[23] Sophie Mützel. Networks as culturally constituted processes: a comparison of relational sociology and actor-network theory. *Current sociology*, 57(6):871–887, 2009.

[24] Michel Callon. Actor-network theory-the market test. *The sociological review*, 47(1_suppl):181–195, 1999.

[25] Ge Shi, Jie Shan, Liang Ding, Peng Ye, Yang Li, and Nan Jiang. Urban road network expansion and its driving variables: a case study of nanjing city. *International journal of environmental research and public health*, 16(13):2318, 2019.

[26] Farhad Ahmadzai, KM Lakshmana Rao, and Shahzada Ulfat. Assessment and modelling of urban road networks using integrated graph of natural road network (a gis-based approach). *Journal of Urban Management*, 8(1):109–125, 2019.

[27] Kezhi Liu, Changhai Zhai, You Dong, and Xianghai Meng. Post-earthquake functionality assessment of urban road network considering emergency response. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(9):2406–2431, 2023.

[28] BingFeng Si, JianCeng Long, and ZiYou Gao. Optimization model and algorithm for mixed traffic of urban road network with flow interference. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 51(12):2223–2232, 2008.

[29] Jianbin Chen, Demin Li, Guanglin Zhang, and Xiaolu Zhang. Localized space-time autoregressive parameters estimation for traffic flow prediction in urban road networks. *Applied Sciences*, 8(2):277, 2018.

[30] Azriel Rosenfeld. Fuzzy graphs. In *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*, pages 77–95. Elsevier, 1975.

[31] Sankar Sahoo and Madhumangal Pal. Product of intuitionistic fuzzy graphs and degree. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 32(1):1059–1067, 2017.

[32] Muhammad Akram, Bijan Davvaz, and Feng Feng. Intuitionistic fuzzy soft k-algebras. *Mathematics in Computer Science*, 7:353–365, 2013.

[33] Eman A AbuHijleh. Complex hesitant fuzzy graph. *Fuzzy Information and Engineering*, 15(2):149–161, 2023.

[34] Waheed Ahmad Khan, Babir Ali, and Abdelghani Taouti. Bipolar picture fuzzy graphs with application. *Symmetry*, 13:1427, 2021.

[35] Said Broumi, Shio Gai Quek, Ganeshsree Selvachandran, Florentin Smarandache, Assia Bakali, and Mohamed Talea. Finding the shortest path with neutrosophic theory: A tool for network optimization. In *Neutrosophic Graph Theory and Algorithms*, pages 1–32. IGI Global, 2020.

[36] Said Broumi, Mohamed Talea, Assia Bakali, and Florentin Smarandache. Interval valued neutrosophic graphs. *Critical Review, XII*, 2016:5–33, 2016.

[37] WB Vasantha Kandasamy, K Ilanthenral, and Florentin Smarandache. *Plithogenic Graphs*. Infinite Study, 2020.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of the publisher and/or the editor(s). This publisher and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Análisis de datos para identificar patrones operativos una terminal portuaria de Guayaquil: Estudio de caso (2024–2025).

Data analysis to identify operational patterns at a port terminal in Guayaquil: A case study (2024–2025).

Victor Varela Lozano [1], Pedro Rodríguez Jarama [2], Dayron Rumbaut Rangel[3], Alfonso A. Guijarro Rodríguez[4]

[1] Universidad Bolivariana del Ecuador, Durán, Ecuador, vgvarelal@ube.edu.ec
[2] Universidad Bolivariana del Ecuador, Durán, Ecuador. prodriguezj@ube.edu.ec
[3]Universidad Bolivariana del Ecuador, drumbautr@ube.edu.ec
[4]Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador, alfonso.guijarror@ug.edu.ec

Resumen: La congestión operativa en el Puerto de Guayaquil, generada por el aumento del flujo vehicular, representa un desafío para la eficiencia logística. Este estudio tuvo como objetivo identificar patrones de comportamiento operativo que contribuyan a mejorar la gestión del tráfico portuario mediante técnicas de análisis de datos. Se aplicó el modelo CRISP-DM sobre 29.067 registros procesados con los algoritmos de agrupamiento K-Means y Expectation Maximization (EM) en WEKA, con el fin de segmentar los datos y caracterizar distintos patrones de operación. K-Means mostró 2 grupos (45%, 55%) y 3 grupos (35%, 40%, 25%) que segmentan a nivel macro las operaciones, en cambio EM determinó 6 grupos donde 2 grupos son dominantes (56%, 25%) y 4 grupos minoritarios (5%, 7%, 3%, 4%) que se catalogan como críticos. Los datos se combinaron en paneles de inteligencia empresarial en Google Looker Studio para visualizar patrones de congestión y planificar recursos. Se determina que el algoritmo EM pudo demostrar mejor la complejidad de los datos al identificar 6 grupos con características particulares, estos datos operativos convertidos en información analítica útil permitieron mejorar la logística y la toma de decisiones basada en evidencia.

Palabras clave: Terminal portuaria, Análisis de datos, Visualización de datos, Patrones operativos, Temporalidades, Clustering.

Abstract: Operational congestion at the Port of Guayaquil, caused by the increase in vehicular flow, represents a challenge to logistical efficiency. This study aimed to identify patterns of operational behavior that contribute to improving port traffic management through data analysis techniques. The CRISP-DM model was applied to 29,067 records processed using the K-Means and Expectation Maximization (EM) clustering algorithms in WEKA, in order to segment the data and characterize different operational patterns. K-Means produced 2 groups (45%, 55%) and 3 groups (35%, 40%, 25%) that segment operations at a macro level, whereas EM identified 6 groups, with 2 dominant ones (56%,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

25%) and 4 minority groups (5%, 7%, 3%, 4%) classified as critical. The data were integrated into business intelligence dashboards in Google Looker Studio to visualize congestion patterns and support resource planning. It was determined that the EM algorithm better captured the complexity of the data by identifying 6 groups with distinct characteristics. These operational data, transformed into useful analytical information, enabled improvements in logistics and evidence-based decision-making.

Keywords: Port terminal, Data analysis, Data visualization, Operational patterns, Temporalities, Clustering.

1. Introducción

Es esencial la transformación digital en las terminales marítimas para mejorar la trazabilidad y la eficiencia logística. Ejemplos como el del puerto de Bilbao, que cuenta con sistemas automatizados de control y reconocimiento, demuestran cómo la tecnología optimiza la administración, reduce la intervención manual y acorta los plazos y costos operativos [1]. Estos progresos evidencian de qué manera la digitalización refuerza la competitividad portuaria y son un referente para el entorno del Puerto de Guayaquil [2][3].

La administración portuaria actual tiene como objetivo optimizar recursos, disminuir los costos y atender rápidamente la demanda logística. Para ello, se analiza su desempeño a través de indicadores como el throughput, la rotación de vehículos y los tiempos de espera [4]. Las técnicas de minería de datos, aprendizaje automático y visualización, entre otras, ofrecen la posibilidad de detectar patrones operativos, prever congestiones y respaldar decisiones fundamentadas en evidencia desde el campo de la ciencia de datos. El clustering, por un lado, permite la segmentación de operaciones críticas, y las redes LSTM, por otro, se distinguen por su exactitud para prever flujos y tiempos en accesos portuarios [5].

El Puerto de Guayaquil ha sido sometido en los últimos años a una creciente exigencia sobre su infraestructura operativa y logística, como consecuencia del continuo aumento del movimiento de carga e importaciones. Este incremento ha saturado las cinco puertas vehiculares autorizadas, por donde a diario ingresan camiones, contenedores y vehículos pesados, que provocan embotellamientos en los accesos [6][7]. En consecuencia, se han alargado los tiempos de espera, se ha reducido la productividad y se han elevado los costos logísticos, en parte por la descoordinación de los horarios de atención, ingreso vehicular y asignación de turnos [8]. Ante esta realidad, se deben implementar estrategias integrales de uso de datos y planificación operativa que mejoren la programación vehicular, reduzcan los tiempos de espera y mejoren la eficiencia y competitividad del Puerto de Guayaquil.

A pesar de que existen registros digitales y bases de datos con información operativa, no se están utilizando de forma efectiva herramientas avanzadas de análisis de datos que permitan identificar, predecir y optimizar los patrones de operación en tiempo real. Estos representan una brecha tecnológica y de gestión en comparación con puertos internacionales que ya aplican inteligencia artificial, clustering y modelos predictivos para optimizar sus procesos [9]. La falta de una integración efectiva del Big Data impide que los puertos de la región capitalicen la información para potenciar su competitividad y productividad [10], evidenciando un rezago en la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 necesarias para modernizar la gestión portuaria [11].

Este trabajo incluye un estudio que aporta a la administración de puertos mediante la introducción de modelos y técnicas analíticas en procedimientos logísticos complejos. La congestión en los terminales marítimos se puede disminuir y las operaciones portuarias optimizar con métodos de simulación y aprendizaje automático, según investigaciones recientes [12][13][14]. No obstante, en la literatura de América Latina persiste una brecha importante en cuanto a cómo se aplican estas

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

herramientas en situaciones con escasa infraestructura, donde los esfuerzos para digitalizar todavía están comenzando [15]. En este contexto, el trabajo que se presenta en la actualidad extiende el marco conceptual vigente al conectar la ciencia de datos con la gestión logística portuaria. En este sentido, está en línea con investigaciones recientes que subrayan la capacidad de la planificación operativa y de la analítica predictiva para optimizar la competitividad y eficiencia de los puertos [16][17].

El propósito fundamental de este estudio es aplicar métodos de análisis de datos para detectar modelos de conducta operativa en la terminal marítima del Puerto de Guayaquil a lo largo del año 2024 y el primer semestre de 2025. Esta perspectiva busca proporcionar una imagen más minuciosa del desempeño operativo del puerto, mediante la identificación de tendencias, agrupaciones y relaciones entre las distintas variables que tienen un impacto en el proceso de ingreso de contenedores por los distintos accesos.

2. Materiales y Métodos

Este trabajo es una investigación aplicada porque busca resolver un problema práctico en un entorno real como el Puerto de Guayaquil, a través de la implementación de técnicas analíticas. Su nivel de investigación es Descriptivo – Correlacional – Explicativo (mixto), Descriptivo: porque se observarán y caracterizarán variables operativas del puerto. Correlacional: porque se buscarán relaciones entre variables. Explicativo: porque a través de ciertas técnicas analíticas se revelan patrones que explican comportamientos operativos. De enfoque cuantitativo, porque se trabajará con datos numéricos, métricas de operación, indicadores de desempeño y análisis estadísticos. Las técnicas e instrumentos de recolección para este trabajo se basan en la revisión documental y en la extracción de información cuantitativa a partir de una base de datos en google shets, la cual registra de forma continua los ingresos de vehiculos a la terminal portuaria, clasificándolos por categoría de ingreso como (EXPOF, EXPOV, PLT, CFS, BAN, entre otros).

Para el procesamiento y análisis de los datos se aplicaron métodos de agrupamiento (clustering) mediante los algoritmos K-Means y Expectation-Maximization, implementados en el Software de análisis WEKA. El algoritmo K-Means permite segmentar los registros en grupos homogéneos basados en la distancia media entre los datos y los centroides de cada clúster, facilitando la identificación de patrones de comportamiento operativo. Por su parte, el algoritmo EM aplica un enfoque probabilístico que estima la pertenencia de cada registro a un clúster según su probabilidad de ocurrencia, lo que posibilita una interpretación más flexible y detallada de las distribuciones de los datos. Ambos métodos se utilizaron de manera complementaria para validar la consistencia y robustez de los resultados obtenidos. Para una mejor comprensión del proceso, la Figura 1 permite visualizar de manera clara el flujo de las actividades y herramientas utilizadas a lo largo del estudio.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

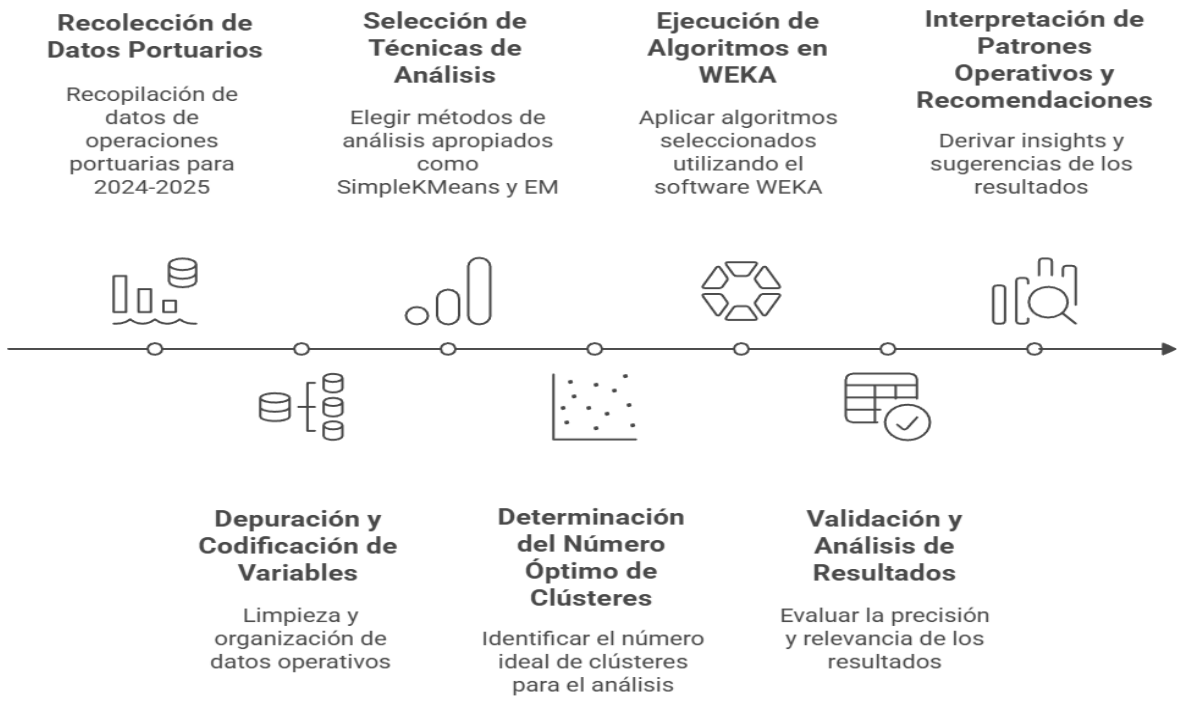


Figura 1 : Diagrama metodológico del estudio

2.1 Análisis de Datos.

La complejidad operativa de las terminales portuarias actuales requiere enfoques metodológicos robustos que transformen datos operativos en inteligencia de negocios. Este estudio adopta la metodología Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) (Wirth & Hipp, 2000), actualizado mediante contribuciones recientes en análisis de datos aplicados a logística portuaria (Munoz-Villamizar et al., 2021; Santos et al., 2023). Este proceso metodológico se compone de seis fases interrelacionadas que orientan la investigación de principio a fin, como se ilustra en la Figura 2, donde se presenta el esquema general de la metodología CRISP-DM aplicada en este estudio.

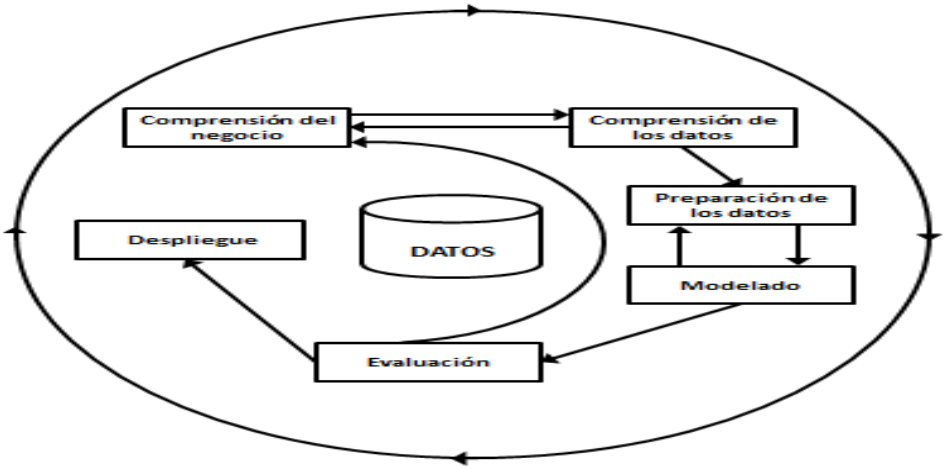


Figura 2: Fases Metodología CRISP-DM

2.1.1 Comprensión del Negocio.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La fase inicial se centró en comprender los objetivos operativos del Puerto de Guayaquil y traducirlos en requisitos analíticos concretos. Esta fase estableció los cimientos para todo el estudio de caso, asegurando que el análisis de los datos estuviera alineado con las necesidades operativas críticas. "La efectividad del análisis de datos en entornos portuarios depende críticamente de la correcta identificación de los problemas operativos específicos que impactan la eficiencia logística" (Zhang et al., 2021, p. 845). Se identificó que existen ventanas horarias específicas donde la acumulación de vehículos excede la capacidad de operativa de los equipos, generando colas y retrasos significativos. También se clasifican fallos o incidencias (NI, IC, ICC, NOCR) que obligan a los vehículos a repetir el proceso de ingreso, consumiendo tiempo adicional y reduciendo la capacidad efectiva.

2.1.2 Comprensión de los Datos

El conjunto de datos analizado estuvo conformado por 29.067 registros de operaciones individuales correspondientes a ingresos vehiculares al Puerto de Guayaquil, registrados en intervalos horarios entre enero de 2024 y junio de 2025. Cada registro representa una operación de ingreso efectuada dentro de una hora específica, asociada a un tipo de categoría portuaria y equipo determinado. Los datos se obtuvieron de registros digitales, hojas de cálculo Google Sheets, complementados con bitácoras de respaldo y registros de validación del área operativa. Se incluyeron únicamente los registros con información completa sobre fecha, hora, turno, tipo de operación y equipo. En cambio, se excluyeron los registros duplicados, incompletos o con inconsistencias en los campos de hora u operación. Esta depuración garantizó la calidad, coherencia y representatividad del conjunto de datos empleado para el análisis de patrones operativos.

Con el fin de garantizar la trazabilidad del análisis, la Tabla 1 presenta las variables consideradas en el estudio, especificando su tipo de dato, descripción funcional y escala de medición utilizada durante el procesamiento.

Variable	Tipo de dato	Descripción	Escala de medición	Unidad / Categorías
Fecha	Temporal	Día en que se registró la operación de ingreso en la terminal portuaria	Intervalo	Dia / Semana / Mes / Año
Hora	Temporal	Intervalo horario en que se registró la operación	Ordinal	00-01 Am, 01-02 Am, .., 23-00 Pm
Turno	Categórica	Periodo operativo diario en el que se realiza la actividad	Nominal	Matutino / Nocturno
Equipo	Categórica	Equipo de Ingreso.	Nominal	3 equipos
EXPOF	Numérica	Operaciones de exportación con contenedor lleno	Razón	Cantidad de registros
EXPOV	Numérica	Operaciones de exportación con contenedor vacío.	Razón	Cantidad de registros
IMPOF	Numérica	Operaciones de importación con contenedor lleno.	Razón	Cantidad de registros
PLT	Numérica	Vehiculos Plataformas (Sin contenedor)	Razón	Cantidad de registros
BAN	Numérica	Vehiculos (Bananeros)	Razón	Cantidad de registros
CFS	Numérica	Vehiculos (Camiones	Razón	Cantidad de registros

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

		Furgones Servicios)		
B2B	Numérica	Vehiculos (Livianos)	Razón	Cantidad de registros
NOCR	Numérica	Re-Proceso. (No lectura de data OCR)	Razón	Cantidad de registros
NI	Numérica	Re-Proceso. (No imagen)	Razón	Cantidad de registros
IC	Numérica	Re-Proceso. (Imagen cortada)	Razón	Cantidad de registros
ICC	Numérica	Re-Proceso. (Imagen cabina cortada)	Razón	Cantidad de registros

Tabla 1: Descripción de variables operativas y temporales registrados en la terminal portuaria.

2.1.3 Preparación de Datos

Los datos operativos del Puerto de Guayaquil se recolectan en un formato horizontal incompatible con técnicas de análisis modernas, donde las 24 horas del día se representan como columnas separadas, dificultando el análisis temporal y la aplicación de algoritmos de machine learning. Se implementaron protocolos específicos para garantizar la calidad analítica: Estandarización de formatos horarios y fechas, Homogeneización de nombres y códigos de categorías operativas. La Figura 3 ilustra el formato de la bitácora digital de los registros operativos.

REGISTRAR FEC	DÍA	MES	AÑO	SEMANA	CCIONAR EL	REGISTRAR HOR	EXPOF	EXPOVI	IMPOF	PLT	BAN	CFS	B2B	IC	NOCR	ICC	NI	DÍA DE LA SEMAN	TURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	00 Am - 01 Am	14	9	3	9	2	0	0	0	0	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	00 Am - 01 Am	17	10	0	4	12	0	0	0	1	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	01 Am - 02 Am	17	7	0	5	9	0	0	0	2	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	01 Am - 02 Am	11	8	2	8	1	0	0	0	2	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	02 Am - 03 Am	14	3	0	6	3	0	0	0	1	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	02 Am - 03 Am	7	4	0	15	2	0	0	0	0	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	03 Am - 04 Am	1	3	2	6	3	0	0	0	0	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	03 Am - 04 Am	5	2	0	11	3	0	0	0	1	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	04 Am - 05 Am	10	7	0	10	8	0	0	0	1	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	04 Am - 05 Am	5	6	0	14	6	0	0	0	2	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	05 Am - 06 Am	6	7	3	16	4	0	0	0	0	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	05 Am - 06 Am	3	3	0	18	7	0	0	0	4	0	1	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	06 Am - 07 Am	6	0	0	13	1	1	0	0	0	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	06 Am - 07 Am	9	7	0	15	3	0	0	0	1	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	07 Am - 08 Am	3	9	0	11	3	0	0	0	1	0	1	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	07 Am - 08 Am	5	8	0	15	2	0	0	0	1	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	08 Am - 09 Am	4	3	0	22	15	6	2	0	1	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	08 Am - 09 Am	4	5	0	27	2	3	0	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	09 Am - 10 Am	8	2	0	16	0	5	2	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	09 Am - 10 Am	5	0	0	14	1	14	0	0	3	0	2	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	10 Am - 11 Am	8	10	0	13	0	9	0	0	1	0	1	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	10 Am - 11 Am	5	18	0	16	0	5	1	0	0	0	1	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	11 Am - 12 Pm	9	10	0	19	0	7	3	0	1	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	11 Am - 12 Pm	4	4	0	4	0	5	0	0	5	0	1	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	12 Pm - 13 Pm	2	13	0	7	0	2	3	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	12 Pm - 13 Pm	3	5	0	8	0	3	3	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	13 Pm - 14 Pm	1	12	0	13	0	4	0	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	13 Pm - 14 Pm	3	15	0	16	0	8	1	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	14 Pm - 15 Pm	9	7	0	10	0	2	3	0	3	0	3	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	14 Pm - 15 Pm	5	20	0	10	0	4	2	0	1	0	1	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	15 Pm - 16 Pm	5	10	0	13	0	8	2	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	15 Pm - 16 Pm	7	6	0	17	0	3	0	0	0	0	1	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	16 Pm - 17 Pm	7	7	0	13	0	3	1	0	0	0	1	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	16 Pm - 17 Pm	3	15	0	15	0	4	1	0	2	0	2	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	17 Pm - 18 Pm	7	3	0	16	0	1	0	0	2	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	17 Pm - 18 Pm	10	8	0	11	0	1	0	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	18 Pm - 19 Pm	9	2	0	8	4	1	1	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	19 Pm - 20 Pm	6	11	0	7	17	0	1	0	2	0	1	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	18 Pm - 19 Pm	9	8	0	7	3	0	1	0	0	0	0	JUEVES	MATUTINO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	19 Pm - 20 Pm	10	8	0	12	9	0	0	0	3	0	1	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	20 Pm - 21 Pm	7	6	0	13	20	0	0	0	0	0	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 82	20 Pm - 21 Pm	12	5	0	14	17	0	0	0	0	1	0	JUEVES	NOCTURNO
01/05/2025	1	MAYO	2025	SEMANA 18	HCVP 83	21 Pm - 22 Pm	15	2	0	4	13	0	0	0	0	0	0	JUEVES	NOCTURNO

Figura 3: Fotografía del registro de bitácora digital.

2.1.4 Modelado

Descubrir patrones operativos ocultos en los datos de ingresos vehiculares que permitan optimizar la gestión del Puerto de Guayaquil mediante técnicas de agrupamiento (clustering).
Algoritmo K-means (agrupamiento), Agrupamiento de datos basado en similitudes, con el segmentar comportamientos operativos en grupos naturales o identificar Clusters con características similares. Algoritmo EM (expectation-maximization), Modelado probabilístico de mezclas gaussianas para

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

identificar relaciones complejas y patrones solapados que permitan manejar situaciones donde un registro puede pertenecer a múltiples grupos.

2.1.5 Evaluación

Dataset: 29,067 registros, 19 variables (operativos y temporales). La Tabla 2 presenta la evaluación de los modelos K-Means y Expectation-Maximization (EM), mostrando el número de clústeres generados y la distribución aproximada de las instancias en cada grupo.

ALGORITMO	NÚMERO DE CLUSTERS	DISTRIBUCIÓN APROXIMADA
K-Means (2 clusters)	2	Cluster 0: 45% 13,209 Cluster 1: 55% 15,858
K-Means (3 clusters)	3	Cluster 0: 35% 10,298 Cluster 1: 40% 11,541 Cluster 2: 25% 7,228
EM (Expectation-Maximization)	6	Cluster 0: 4% 1,112 Cluster 1: 3% 866 Cluster 2: 7% 1,904 Cluster 3: 5% 1,462 Cluster 4: 25% 7,349 Cluster 5: 56% 16,374

Tabla 2: Evaluación de los diferentes modelos aplicados y su distribución.

2.1.6 Despliegue

Implementar tableros de visualización para toma de decisiones operativas. "Los sistemas de visualización en tiempo real han demostrado mejorar significativamente la velocidad y calidad de la toma de decisiones en terminales portuarias" (Kaur & Singh, 2021, p. 102408).

La Figura 4 ilustra el tablero de visualización de datos desarrollado para el caso de estudio del Puerto de Guayaquil en Google Looker Studio. En él se integran módulos interactivos que permiten analizar el comportamiento operativo, comparar periodos y generar alertas ante eventos críticos.

- Dashboard interactivo con módulos especializados para toma de decisiones.
- Sistema actualizable en tiempo real para seguimiento de la operativa de ingresos.
- Protocolos de acción para respuestas inmediatas (Monitoreo de fallos).
- Planificación operativa y análisis comparativos.

Su estructura y diseño favorecen la planificación y el análisis comparativo, convirtiéndose en una herramienta central del sistema de monitoreo y gestión operativa.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

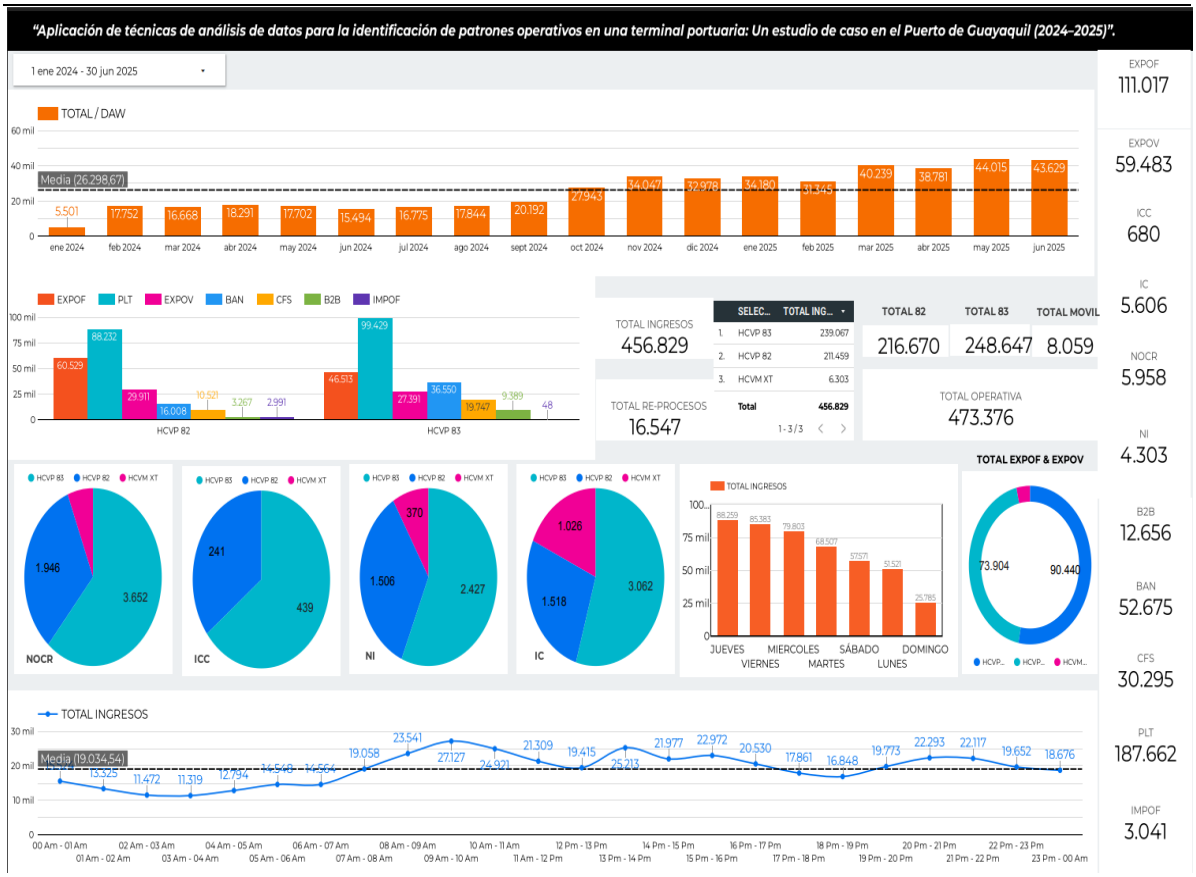


Figura 4: Tablero de visualización de datos Caso estudio Puerto Guayaquil en Google Looker Studio.

2.2 Herramientas de análisis

Para el análisis de los datos se usó el software WEKA 3.8.6, en el cual se aplicaron los algoritmos de clustering y validación de resultados. La visualización y el análisis posterior se realizaron en Google Looker Studio, donde se pudieron crear dashboards y gráficos interactivos. También se usaron hojas de cálculo de Google Sheets como fuente principal y registros validados del área operativa como soporte de la base de datos. Las pruebas se realizaron en un equipo con Windows 11 Pro (64 bits), AMD Ryzen 5 7520U with Radeon Graphics (2.80 GHz), 16 GB de RAM y SSD de 512 GB.

2.3 Consideraciones éticas y de confidencialidad.

La investigación se llevó a cabo siguiendo principios éticos y de confidencialidad en el manejo de datos operativos. Los datos revisados son datos históricos de ingresos portuarios del período de caso de estudio. No contienen información personal ni identificadores sensibles de los participantes. Para preservar la confidencialidad e integridad de los datos, todos los registros fueron anonimizados en la etapa de limpieza y empleados únicamente para fines académicos y de optimización logística. Esta acción fortalece la validez metodológica de la investigación y garantiza que los resultados se fundamenten en un tratamiento responsable, transparente y reproducible en otros contextos portuarios.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3. Resultados

La elección de los algoritmos K-Means y Expectation–Maximization (EM) se basa en su capacidad demostrada para analizar grandes conjuntos de datos estructurados parcialmente solapados, que se encuentran en situaciones reales como las portuarias. Ambos modelos se erigen entre las técnicas de clustering por su equilibrio entre interpretabilidad, robustez estadística y eficiencia computacional.

K-Means ofrece una segmentación rápida y eficaz cuando los grupos tienden a ser esféricos y bien diferenciados [18]. Esta metodología proporciona una visión general de la estructura de los datos y define patrones iniciales de comportamiento operativo.

Mientras, el algoritmo EM (Expectation–Maximization), basado en la estimación de modelos de mezcla gaussiana, supera una de las principales limitaciones de K-Means al permitir asignaciones probabilísticas, de modo que un registro puede pertenecer parcialmente a varios clústeres. Esta característica es especialmente valiosa en entornos portuarios, donde las operaciones se superponen entre turnos, equipos o tipos de carga. Además, EM se ajusta mejor a distribuciones no esféricas y cambiantes con correlaciones internas, dando una representación más realista y detallada del sistema logístico [12].

La combinación secuencial de ambos modelos se planteó como una estrategia metodológica complementaria: K-Means para una segmentación inicial que simplifica la estructura general de las operaciones y EM para un ajuste fino posterior que descubre grupos y patrones ocultos. Esta combinación hace posible conjugar la exactitud estadística con la interpretabilidad operacional y garantizar resultados consistentes y aplicables a la planificación portuaria.

En este estudio se usaron equipos según fecha, turno, el flujo de operación basado en categorías portuarias de EXPOF, EXPOV, IMPOF, PLT, BAN, B2B, CFS y la distribución de trabajo en diferentes horas y días de la semana.

La base de datos en Excel, se la convirtió en formato ARFF, y la podremos visualizar en el software WEKA para empezar con la interpretación de las categorías que vamos a aplicar. Se tiene un conjunto de datos con 29,067 registros, 19 atributos operativos, lo que hace que sea difícil analizar manualmente todas las relaciones entre los datos.

El clustering ayudará a identificar grupos naturales de registros con características similares. La categoría Registo_fecha se la separó en 3 columnas para *DIA*, *MES*, *AÑO*. Se agregó columna *TURNO*, donde *MATUTINO* es en horario de 07am hasta 19pm, y *NOCTURNO* de 19pm a 07am; también se eliminó la columna *OPERADOR RESPONSABLE*, por tener datos de operarios y por qué las iteraciones eran demasiadas y no aportaban ninguna relevancia al caso. Se agregó una columna calculada para identificar la *SEMANA* del año. En la Figura 5 se muestran los resultados del modelos SimpleKmeans.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

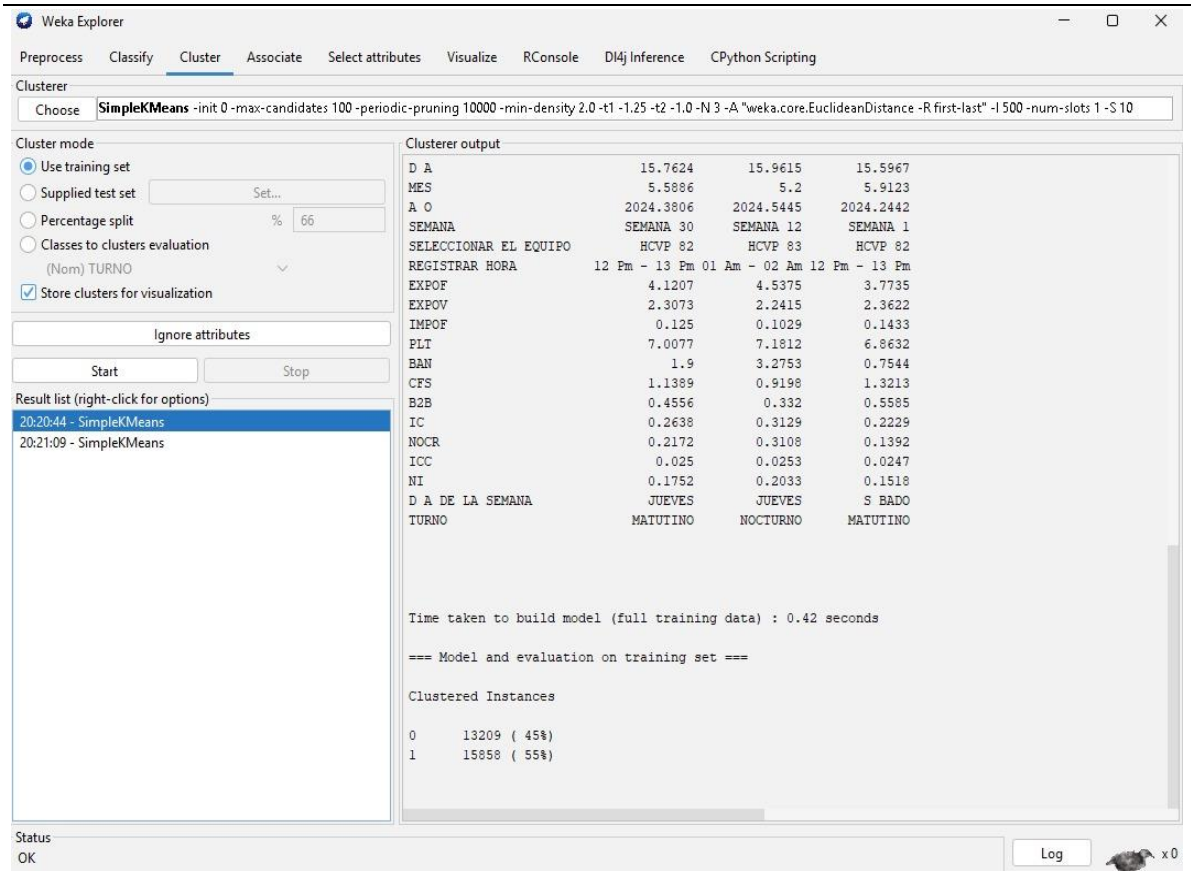


Figura 5: Modelo SimpleKmeans en Weka. Valores por Default

El algoritmo usado: SimpleKMeans con distancia Euclidiana, 2 clusters (N=2), 500 iteraciones máx. Iteraciones: Convergió en 3 iteraciones. Variables más discriminantes: BAN, PLT, EXPOF, MES, SEMANA, EQUIPO, TURNO y DÍA DE LA SEMANA.

La Tabla 3 resume la interpretación de los 2 clústers obtenidos mediante este algoritmo.

Distribución:

- **Cluster 0:** 13,209 instancias (45%). Turno nocturno, equipo HCVP 83, más actividad en EXPOF y BAN, menos en CFS.
- **Cluster 1:** 15,858 instancias (55%). Turno matutino, equipo HCVP 82, más actividad en CFS y menos en BAN y EXPOF.

	Cluster 0 (45% de datos)	**Cluster 1 (55% de datos)**
Variables temporalidad:	Mes promedio: ~Mayo (5.2) Semana típica: "Semana 12" (marzo) Día típico: Jueves Turno: Nocturno (01:00 a 02:00 am en centroides iniciales)	Mes promedio: Junio (5.91) Semana típica: "Semana 1" (inicios de año) Día típico: Sábado Turno: Matutino (12:00 a 13:00 pm en centroides iniciales)

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Variables Operativa:	EXPOF alto: 4.54 (más exportaciones full) BAN alto: 3.27 (operaciones bancarias internas elevadas) PLT alto: 7.18 CFS menor que en cluster 1 (0.91) Equipo predominante: HCVP 83	EXPOF menor: 3.77 BAN muy bajo: 0.75 CFS más alto: 1.32 PLT ligeramente menor: 6.86 Equipo predominante: HCVP 82

Tabla 3: Interpretación de los Clústers – SimpleKmeans (N=2)

Con el objetivo de mejorar la segmentación y lograr una mayor precisión en la diferenciación de patrones operativos, se amplió el modelo SimpleKMeans a tres clústers (N = 3). A diferencia del modelo anterior (N = 2), que convergió en tres iteraciones, esta versión alcanzó la convergencia en seis iteraciones, reflejando un proceso de ajuste más fino y una mayor capacidad para separar grupos con características específicas.

La Figura 6 presenta la visualización del modelo SimpleKMeans (N = 3) en Weka, donde se observan tres segmentos bien definidos. El Cluster 0 (35%), el Cluster 1 (40%) y el Cluster 2 (25%).

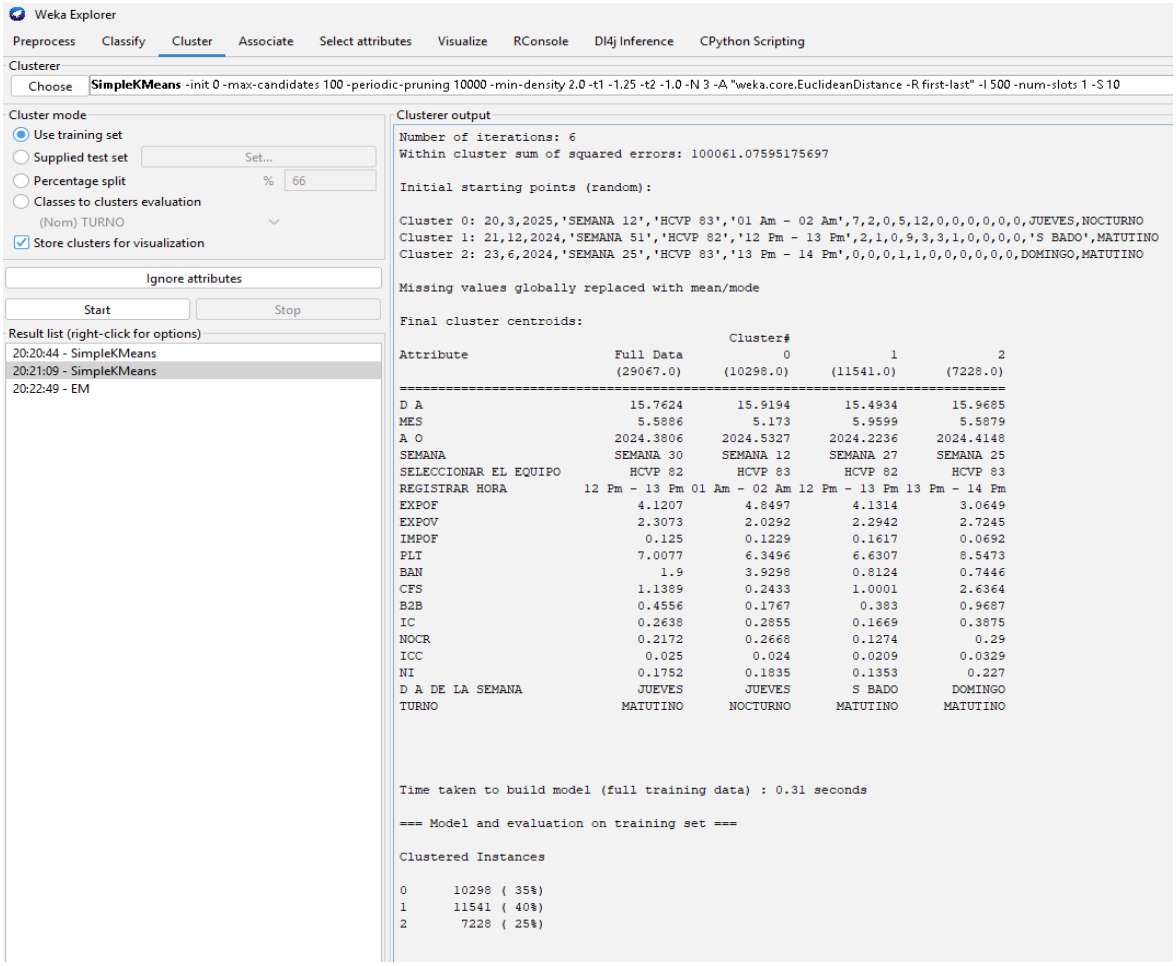


Figura 6: Modelo SimpleKmeans (N=3) en Weka.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La Tabla 4 presenta la interpretación detallada de los tres clústers generados por el modelo SimpleKMeans (N = 3), complementando la visualización mostrada en la Figura 6. En esta ampliación del análisis, se observa una mayor diferenciación entre grupos tanto a nivel temporal como operativo, lo que permite comprender con mayor precisión los patrones de comportamiento dentro de la operación portuaria.

Distribución:

- **Cluster 0:** 10,298 instancias (35%), Turno nocturno con enfoque fuerte en exportaciones full (EXPOF) y BAN, baja actividad en CFS.
- **Cluster 1:** 11,541 instancias (40%), Turno matutino de fin de semana, moderada actividad en EXPOF y CFS, BAN reducido.
- **Cluster 2:** 7,228 instancias (25%), Turno matutino de domingo, operaciones centradas en exportación vacía (EXPOV), alto CFS y PLT.

	Cluster 0 (35% de datos)	**Cluster 1 (40% de datos)**	**Cluster 2 (25% de datos)**
Variables temporalidad:	Mes ~Mayo, Semana 12, Día: Jueves, Turno: Nocturno	Mes ~Junio Semana 27 Día: Sábado Turno: Matutino	Mes ~Junio Semana 25 Día: Domingo Turno: Matutino
Variables Operativa:	EXPOF alto: 4.85 BAN muy alto: 3.93 PLT más bajo de todos: 6.34 CFS muy bajo: 0.24 B2B bajo: 0.17 Equipo: HCVP 83	EXPOF medio: 4.13 BAN bajo: 0.81 CFS medio-bajo: 1.00 PLT medio: 6.63 Equipo**:** HCVP 82	EXPOF más bajo: 3.06 EXPOV más alto: 2.72 CFS más alto: 2.63 PLT más alto: 8.54 B2B alto: 0.96 BAN muy bajo: 0.74 Equipo**:** HCVP 83

Tabla 4: Interpretación de los Clústers – SimpleKmeans (N=3)

Tras el análisis mediante SimpleKMeans, se aplicó el algoritmo Expectation-Maximization (EM) con el fin de explorar una clasificación probabilística de los datos. A diferencia del enfoque de K-Means, que asigna cada instancia a un único clúster de forma determinista, el modelo EM estima probabilidades de pertenencia de cada instancia a múltiples grupos, ajustando modelos de densidad estadística (normalmente gaussianos) que permiten una representación más flexible y realista de los patrones en los datos.

La Figura 7 muestra la interfaz del modelo EM en Weka, donde el proceso se basa en la estimación iterativa de medias y desviaciones estándar para cada componente de la mezcla. Este enfoque posibilita la identificación de estructuras de datos más complejas y solapadas, que no siempre pueden ser detectadas por métodos particionales como K-Means.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En conjunto, la aplicación del modelo EM complementa los resultados obtenidos con SimpleKMeans, ofreciendo una visión más probabilística y adaptable de los patrones operativos, lo que amplía la comprensión de la dinámica temporal y funcional del sistema analizado.

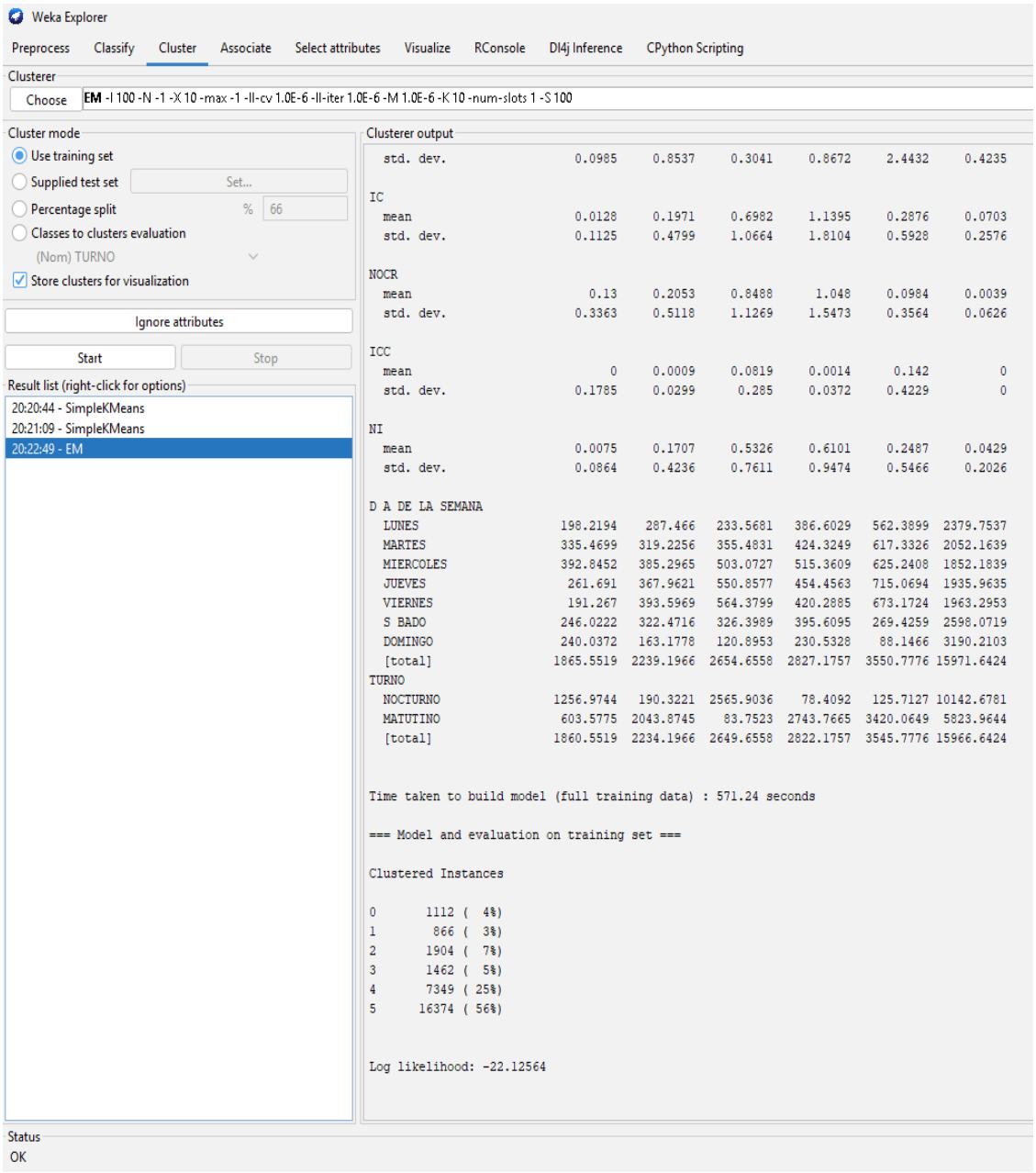


Figura 7: Modelo EM (Expectation-Maximization) en Weka.

El modelo EM (Expectation-Maximization) permitió identificar seis clústers con distribuciones heterogéneas, que representan distintos perfiles operativos y temporales dentro de la dinámica portuaria analizada. A diferencia de los métodos particionales previos (SimpleKMeans N=2 y N=3), este enfoque probabilístico incorporó la variabilidad estadística interna de los datos, ajustando medias y desviaciones estándar para estimar la probabilidad de pertenencia de cada instancia a múltiples grupos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La Tabla 5 resume la interpretación de los clústers obtenidos mediante el modelo EM. En términos generales, los resultados evidencian una estructura más compleja y matizada de los patrones operativos, con segmentos de distinta magnitud e intensidad funcional.

Clúster	% de Instancias (n)	Características destacadas
0	4% (1,112)	Alta participación del equipo HCVP82, operaciones mayormente nocturnas, moderada actividad EXPOF y PLT, bajo nivel de importación (IMPOF casi nulo). Representa un segmento de operaciones estables pero concentradas en un solo equipo.
1	3% (866)	Ligera mayor proporción de HCVP82, participación relevante en CFS y PLT, presencia de B2B, con horario principalmente matutino. Actividades de soporte y transferencia logística, posiblemente de bajo volumen, pero diversificadas.
2	7% (1,904)	Alta actividad EXPOF y BAN, nivel intermedio en PLT, presencia en IC, NOCR y NI. Mayor carga operativa en HCVP83, con predominancia en turnos nocturnos. Representa exportaciones activas y tareas con incidencias registradas.
3	5% (1,462)	Elevado uso de HCVM-XT y HCVP83, horarios distribuidos entre matutino y nocturno, mayores niveles en PLT, CFS, NI, IC, y NOCR. Segmento con mayor diversidad de operaciones y participación en control.
4	25% (7,349)	Contribución balanceada de HCVP82 y 83, concentración en PLT y CFS, incremento de B2B, operaciones principalmente matutinas, picos en semanas 30–40 (medio año). Refleja una etapa operativa de alta productividad y estabilidad.
5	56% (16,374)	El grupo dominante: fuerte presencia de HCVP82 y 83, con HCVM-XT complementario, actividades distribuidas en todo el horario (picos 05–08h y 18–23h), predominancia de PLT, leves valores de EXPOF y BAN, baja incidencia NO Scanner. Representa el patrón operativo normal y de mayor estabilidad.

Tabla 5: Interpretación de los Clústers – EM (Expectation-Maximization)

La elección final del modelo EM como el más representativo se debe a que su estructura probabilística logró capturar una mayor heterogeneidad de los datos, evidenciada en la identificación de seis clústeres con diferentes intensidades y tipos de operación. Mientras que K-Means crea fronteras estrictas entre clústeres, EM permite que una instancia pertenezca parcialmente a múltiples clústeres, lo cual representa más fielmente la naturaleza del tráfico portuario, donde un mismo equipo puede trabajar en distintas condiciones o turnos. Este comportamiento híbrido se traduce en una mayor capacidad descriptiva y predictiva para la gestión operativa, lo que ratifica que los procesos portuarios no son procesos homogéneos, sino estocásticos y dependientes del contexto operacional.

El cluster 5 representa el comportamiento estándar del sistema (más de la mitad de los datos). Los clusters 0–3 son grupos pequeños con patrones específicos, como turnos nocturnos, tareas especiales o incidencias.

El cluster 4 muestra una fase de mayor rendimiento, posiblemente asociado a periodos pico del año y concentración en exportaciones (PLT + B2B).

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En conjunto, la estructura indica que las operaciones se dividen entre un núcleo central operativo (cluster 5) y subgrupos especializados (0–4) con comportamientos distintos en equipos, horarios y tipos de actividad.

4. Discusión de resultados

El objetivo de esta investigación fue identificar patrones de comportamiento operativo que permitan mejorar el tráfico portuario mediante técnicas de análisis de datos. Para ello se recopilaron 29.067 registros de transacciones individuales de entradas vehiculares al Puerto de Guayaquil en el lapso de tiempo de enero de 2024 a junio de 2025. A través de algoritmos de clustering K-Means y EM en WEKA se buscaron patrones ocultos en la manera en que funcionan para tener evidencia empírica para mejorar la asignación de recursos y la toma de decisiones.

Los resultados revelaron agrupamientos temporales y operativos diferentes. El modelo K-Means agrupó las operaciones en 3 grandes clústeres en donde se pudieron identificar patrones por turno, día y tipo de equipo. Por ejemplo, el turno noche superó en exportaciones full (EXPOF) y BAN a los turnos de mañana, que se mostraron más diversificados y equilibrados en las variables PLT y CFS. Esto quiere decir que las actividades logísticas se escalonan de manera natural en función del tiempo y del tipo de operación, tal como se especializan los equipos HCVP82, HCVP83 y HCVM-XT. [19][20]

Por su parte, el modelo EM ajustó estos hallazgos con un enfoque probabilístico, demostrando que la mayoría de las operaciones (56%) se concentran en un patrón estable de alta productividad liderado por PLT, mientras que los grupos minoritarios definieron nichos más específicos de exportaciones activas, soporte u operaciones técnicas. En conjunto, los dos enfoques se complementaron: K-Means por su simplicidad interpretativa y EM por su capacidad de dar una segmentación más rica y realista, al modelar la naturaleza continua y probabilística del comportamiento operativo [21].

Estos hallazgos se alinean con la reciente ciencia de datos portuarios [13][14], donde los modelos Expectation-Maximization superaron a K-Means en datos de flujo logístico no lineal o dependientes del tiempo. En aplicaciones reales como el Puerto de Rotterdam o el de Sines, los modelos EM se ajustaron mejor a patrones de tráfico variables y cargas no uniformes. Estos datos confirman la capacidad del modelo EM para reproducir de manera más fiel estadística y operacionalmente la realidad del Puerto de Guayaquil.

En la práctica, los resultados influyen en cómo se operan los puertos. Los clústeres identificados permiten desarrollar estrategias de planificación más precisas, mejorar la asignación de personal y recursos según la demanda operativa y establecer protocolos de respuesta inmediata ante fallos detectados. Además, los patrones identificados pueden ser visualizados en dashboards

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

interactivos para apoyar la toma de decisiones en tiempo real y así reducir la congestión y mejorar los flujos logísticos [16][22].

No se encontraron limitaciones técnicas para acceder o manipular los datos, pero se piensa ampliar el estudio con modelos predictivos, series temporales y nuevos dashboards interactivos. Estas extensiones permitirán una analítica predictiva y prescriptiva que anticipe y optimice las operaciones portuarias en tiempo real.

En definitiva, el uso de técnicas de clustering sobre datos operativos portuarios puede ser una forma de dar soporte a la comprensión, control y optimización de procesos logísticos. Los resultados abren la puerta a una gestión informada por datos y con potencial para modelos predictivos y sistemas de soporte a la decisión en tiempo real que mejoren la competitividad y sostenibilidad de los puertos del futuro.

5. Conclusiones

Los resultados mostraron una clara segmentación operativa. El modelo K-Means (N=3) identificó tres grupos principales de comportamiento: nocturno dominado por exportaciones full (EXPOF) y operaciones BAN; matutino, con equilibrio entre CFS y PLT; y dominical matutino, concentrado en exportaciones vacías (EXPOV). Por su parte, el modelo EM permitió una interpretación más rica y probabilística, identificando 6 clústeres con diferentes niveles de concentración y diversidad operativa. El mayor clúster (56%) fue el patrón más constante de funcionamiento, con alta productividad y pocos fallos, y los más pequeños mostraron nichos de funcionamiento o con más fallos técnicos.

En suma, estos hallazgos sugieren que la actividad portuaria se estructura de manera espontánea en ciclos temporales y operativos, donde la sincronización de horarios, equipos y categorías define la eficiencia de los flujos logísticos. La segmentación que emerge implica que la manera en que se distribuyen operativamente no es al azar, sino que siguen un patrón estructurado de rotación y especialización. De esta manera, el análisis empírico de los clústeres no solo verifica la existencia de patrones recurrentes, sino que también proporciona información para mejorar la planificación de turnos, la asignación de recursos y la detección temprana de problemas en el sistema portuario.

La investigación identificó con éxito los patrones que afectan el tráfico portuario, generando una metodología reproducible basada en minería de datos y aprendizaje no supervisado. Es un avance en la aplicación de la IA en la logística, demostrando cómo algoritmos de clustering pueden transformar datos brutos en información accionable para la toma de decisiones. Como aporte institucional y académico, la investigación proporciona un modelo analítico susceptible de ser replicado en otros puertos o terminales que posean estructuras operativas similares.

En la práctica, los beneficios impactan directamente la operación portuaria: se pueden rediseñar los turnos en base a la demanda real, optimizar la distribución de equipos según patrones históricos y mejorar los protocolos de respuesta ante incidentes operativos. En teoría, la investigación refuerza el

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

vínculo entre la teoría de sistemas complejos y la analítica de datos aplicada, demostrando que los procesos logísticos pueden modelarse como redes dinámicas de comportamiento. Además, fortalece la validez del marco CRISP-DM como metodología de referencia para proyectos de minería de datos en la industria.

Si bien el estudio no identificó impedimentos técnicos para obtener, limpiar o manipular los datos, los hallazgos reflejan el período en que se recopilaron. Por lo cual, cualquier cambio estructural en la manera en que se trabaja en el puerto (cambios en horarios, en el tipo de equipo o en las clases de tráfico, por ejemplo) podría alterar las relaciones descubiertas. Pero esta limitación no anula el análisis, sino que refuerza la necesidad de modelos actualizables en entornos dinámicos.

Como futura línea de trabajo, se propone combinar modelos predictivos y de series temporales para anticipar anomalías o picos de congestión operativa. Además, se plantea desarrollar dashboards interactivos e inteligentes para visualizar los resultados en tiempo real, conectados a bases de datos que se actualizan permanentemente. Estas tecnologías harían más reactiva y eficiente la gestión portuaria, desarrollando un enfoque de analítica predictiva accionable.

En conclusión, este estudio evidencia que la aplicación de técnicas de análisis de datos a la gestión portuaria no solo es viable, sino estratégica. Usando K-Means y EM se pudo entender el flujo interno, descubrir patrones de eficiencia y establecer una base para la toma de decisiones basada en evidencia. El estudio refuerza la necesidad de la transformación digital en la logística portuaria y vislumbra puertos inteligentes, flexibles y sostenibles, preparados para anticiparse a los desafíos del comercio marítimo actual.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Boyano-Fram, T., Mestra-Sierra, D., & Gutiérrez-López, M. (2025). Automatización en las operaciones portuarias. Navegando hacia los puertos marítimos. Revista Científica Anfibios, 8(1), 55-61. https://doi.org/10.37979/afb.2025v8n1.172

[2] Quizhpe Bustos, C. A. (2025). Análisis del Impacto de la Digitalización en la Cadena de Suministro de las MIPYMES Ecuatorianas 2020 - 2025. Revista Veritas De Difusão Científica, 6(2), 3069–3090. https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i2.752

[3] Landivar, A. A. J., Vega, N. D. C., & Espinoza, J. E. A. (2025). Impacto de la implementación de tecnologías emergentes en el área de transporte marítimo de Ecuador mediante la revisión de documentos. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 9(1), 6256-6256. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16400

[4] Ortiz-Gómez, H., & Cedeño-Alava, V. (2023). Monitoreo de indicadores de valor a través de minería de datos, gestión de procesos de negocio y mejoramiento continuo con gestión del riesgo. Revista Tecnura, 24(65), 93–105. https://doi.org/10.22395/rium.v19n37a5

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[5] Cedillo-Chalaco, L., & Hernández-Díaz, P. (2025). Predicción logística portuaria con modelación ARMA: evidencia del flujo de contenedores en el sur del Ecuador. Revista Científica Episteme & Praxis, 3(3), 126–135. https://doi.org/10.62451/rep.v3i3.133

[6] Sun, M., Liang, C., Wang, Y., & Biancardo, S. A. (2025). Maritime port freight flow optimization with underground container logistics systems under demand uncertainty. Journal of Marine Science and Engineering, 13(6), 1173. https://doi.org/10.3390/jmse13061173

[7] "Advances in terminal management: simulation of vehicle traffic in container terminals". (2024). Maritime Economics & Logistics, 27, 500-524. https://doi.org/10.1057/s41278-024-00300-5

[8] Eskafi, M. (2025). Flexibility in port logistics by adaptive planning. European Journal of Maritime Research, 4(2), 33. https://doi.org/10.24018/maritime.2025.4.2.33

[9] SELA (Sistema Económico Latinoamericano y del Caribe). (2022). Percepción de la Transformación Digital Portuaria en América Latina y el Caribe. Secretaría Permanente del SELA. https://www.sela.org/wp-content/uploads/2023/04/informe-transformacion-digital-02.pdf

[10] Viloria-Vilarete, E. (2022). Integración del Big Data en la Logística Portuaria como potencializador de la competitividad y la productividad. Revista Científica Anfibios, 5(1), 66-83. https://doi.org/10.37979/afb.2022v5n1.104

[11] López-Corrales, S. J., & Valdés-Pérez, Y. (2024). Industria 4.0, aplicación y tecnologías de la información en instalaciones portuarias de América Latina. Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, 12(1), 230-243. https://revistas.udes.edu.co/aibi/article/download/3468/3259/34629

[12] Filom, S., Amiri, A. M., & Razavi, S. (2022). Applications of machine learning methods in port operations — A systematic literature review. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 161, Article 102722. https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102722

[13] Bett, D. K., Ali, I., Gheith, M., & Eltawil, A. (2024). Simulation-Based Optimization of Truck Appointment Systems in Container Terminals: A Dual Transactions Approach with Improved Congestion Factor Representation. Logistics, 8(3), 80. https://doi.org/10.3390/logistics8030080

[14] Li, S., Jia, S., Tao, Y., & Lin, X. (2024). Gate appointment design in a container terminal: A robust optimization approach. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 184, Article 103495. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103495

[15] Holland House Colombia & STC International. (2020). Digitization in ports in the Latin American region (estudio / informe). Global Maritime Hub https://globalmaritimehub.com/wp-content/uploads/2021/02/Digitization_in_ports_in_the_Latin_American_Region-2020.pdf

[16] Rao, A. R., Wang, H., & Gupta, C. (2025). Predictive Analysis for Optimizing Port Operations. Applied Sciences, 15(6), 2877. https://doi.org/10.3390/app15062877

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[17] Pereira, R. G., Lopes, R. B., Martins, A., Macedo, B., & Teixeira, L. (2025). A Simulation Tool to Forecast the Behaviour of a New Smart Pre-Gate at the Sines Container Terminal. Sustainability, 17(1), 153. https://doi.org/10.3390/su17010153

[18] Han, J., Pei, J., & Tong, H. (2022). Data Mining: Concepts and Techniques (4.ª ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2013-0-18660-6

[19] Saini, M., & Lerher, T. (2024). Assessing the factors impacting shipping container dwell time: A multi-port optimization study. Business: Theory and Practice, 25(1), 51-60. https://doi.org/10.3846/btp.2024.19205

[20] Yu, H., Deng, Y., Zhang, L., Xiao, X., & Tan, C. (2022). Yard operations and management in automated container terminals: A review. Sustainability, 14(6), 3419. https://doi.org/10.3390/su14063419

[21] Raeesi, R., Sahebjamnia, N., & Mansouri, S. A. (2023). The synergistic effect of operational research and big data analytics in greening container terminal operations: A review and future directions. European Journal of Operational Research, 310(3), 943-973. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.11.054

[22] Cuong, T. N., Long, L. N. B., Kim, H.-S., & You, S.-S. (2022). Data analytics and throughput forecasting in port management systems against disruptions: A case study of Busan Port. Maritime Economics & Logistics, 25(1), 61–89. https://doi.org/10.1057/s41278-022-00247-5

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML
Neutrosophic Computing and Machine Learning, 2025
University of New Mexico

Formalizing Contextual Truth Flips: Upside-Down Logic and Its Variants

Takaaki Fujita[1] * *and Arif Mehmood* [2]

[1] Independent Researcher, Tokyo, Japan. Takaaki.fujita060@gmail.com

[2] Department of Mathematics, Institute of Numerical Sciences, Gomal University, Dera Ismail Khan 29050, KPK, Pakistan (mehdaniyal@gmail.com)

*Correspondence: Takaaki.fujita060@gmail.com

Abstract. In real settings, conclusions can flip: a claim once treated as true becomes false, or a prohibited action later becomes required. We call this phenomenon Upside-Down Logic. Upside-Down Logic provides a formal operator that, given a contextual trigger, reverses the accepted outcome (True→False / False→True) while keeping the underlying information rather than discarding it. We define several concrete variants — defeasible, belief-based, paraconsistent, dynamic epistemic, and abductive — and show how each realizes controlled reversal through priority flips, entrenchment inversion, model update, or explanation reordering. These logics model realistic situations such as building access in emergencies, medication policy after contraindications, travel advisories, market disclosures, and security assessment.

Keywords: Upside-down logic, defeasible logic, belief-based logic, paraconsistent logic, dynamic epistemic logic, abductive logic

1. Preliminaries

In this section we gather the basic notions and notation used throughout the paper. Unless explicitly stated otherwise, all sets and structures are finite.

1.1. *Formal Definition of Upside-Down Logic*

We now formalize *Upside-Down Logic*, a framework that models reversal phenomena—situations where context switches turn formerly false statements into true ones and vice versa [1–5]. The required terminology is introduced below.

Notation 1.1. *Let $\mathcal{P}$ be a set of propositions and $\mathcal{C}$ a set of contexts. The* truth valuation

$$T : \mathcal{P} \times \mathcal{C} \longrightarrow \{\text{True, False, Indeterminate}\}$$

assigns to each pair $(A, \mathcal{C})$ *a truth value.*

Notation 1.2. *Let* $\mathcal{L}$ *be a formal language, and let* $\mathcal{M} = (\mathcal{P}, \mathcal{V}, v)$ *be a logical system whose propositions are* $\mathcal{P}$*, truth-value set is* $\mathcal{V}$*, and valuation is* $v : \mathcal{P} \to \mathcal{V}$*.*

Definition 1.3 (Upside-Down Logic)**.** [6, 7] An *Upside-Down Logic* is a logical system $\mathcal{M}'$ obtained from $\mathcal{M}$ by introducing a transformation U acting on propositions and/or contexts, with the following properties:

(1) For every proposition $A \in \mathcal{P}$ and context $\mathcal{C}$:
- (*True→False switch*) If $v(A) = \text{True}$ in $\mathcal{C}$, then $v\big(U(A)\big) = \text{False}$ in $U(\mathcal{C})$.
- (*False→True switch*) If $v(A) = \text{False}$ in $\mathcal{C}$, then $v\big(U(A)\big) = \text{True}$ in $U(\mathcal{C})$.

(2) The operator U is well defined and yields a consistent system $\mathcal{M}'$.

Intuitively, U captures how changing the ambient conditions can invert truth values, thereby formalizing ambiguity and context-driven reversals in reasoning.

Example 1.4 (Building Entry under Emergency vs. Normal Operation)**.** Consider the proposition

$$A := \text{“Staff member may enter the building now.”}$$

and two contexts:

$$\mathcal{C}_{\text{normal}} := \text{“normal business hours, no alarm”}, \quad \mathcal{C}_{\text{fire}} := U(\mathcal{C}_{\text{normal}}) := \text{“fire alarm active”}.$$

In the normal context we have

$$v(A) = \text{True in } \mathcal{C}_{\text{normal}},$$

because a staff member with a valid badge is allowed to enter. When the fire alarm is triggered, the upside-down operator U changes the meaning of the situation:

$$v\big(U(A)\big) = v(A) = \text{False in } \mathcal{C}_{\text{fire}},$$

since during evacuation no one is allowed to enter. Thus the same proposition “may enter” is flipped from True to False only by changing the context.

Example 1.5 (Medical Recommendation Reversed by Late Test Result)**.** Let

$$A := \text{“Prescribe the standard oral antibiotic.”}$$

and let the initial context be

$$\mathcal{C}_{\text{init}} := \text{“infection confirmed, no contraindication known”}.$$

Then the doctor’s protocol validates

$$v(A) = \text{True in } \mathcal{C}_{\text{init}}.$$

Later, a lab report arrives stating "patient has a renal contraindication." The upside-down operator U applies this new information and produces

$$\mathcal{C}_{\text{late}} := U(\mathcal{C}_{\text{init}}) = \text{"infection confirmed, renal contraindication present"}.$$

In this updated context, the former decision is no longer acceptable:

$$v\big(U(A)\big) = v(A) = \text{False in } \mathcal{C}_{\text{late}},$$

and the system must switch to an intravenous or alternative drug. The same medical recommendation becomes false because the context was inverted by U.

Example 1.6 (Travel Advisory Flipped by Public Announcement)**.** Let

$$A := \text{"It is safe to travel to Region X tomorrow."}$$

and let

$$\mathcal{C}_{\text{tourism}} := \text{"no outbreak, normal travel conditions"}.$$

Under ordinary conditions the tourism authority states

$$v(A) = \text{True in } \mathcal{C}_{\text{tourism}}.$$

Later, the health ministry publishes an urgent bulletin reporting a sudden outbreak in Region X. The upside-down operator U applies this public announcement to obtain

$$\mathcal{C}_{\text{alert}} := U(\mathcal{C}_{\text{tourism}}) = \text{"outbreak confirmed, travel discouraged"}.$$

In this new context the same statement no longer holds:

$$v\big(U(A)\big) = v(A) = \text{False in } \mathcal{C}_{\text{alert}}.$$

Hence a proposition that was valid for planning and ticketing purposes becomes invalid solely because the context was updated by U.

Upside-Down Logic is sometimes discussed together with frameworks such as Neutrosophic Logic and Plithogenic Logic [8–10]. Note that a Neutrosophic Set assigns each element independent truth, indeterminacy, and falsity degrees in $[0, 1]$, modeling inconsistency, incompleteness, and uncertainty explicitly [11–13]. And a Plithogenic Set models each element using attribute-value memberships and a contradiction degree, enabling aggregation under conflicting evidence sources reliably [14–16].

2. **Results: Some New Types of Upside-Down Logic**

In this section, we present the main results of this paper, namely several new types of Upside-Down Logic.

2.1. *Defeasible Upside-Down Logic*

This logic uses default and strict rules, but an upside-down trigger reverses rule priorities, producing opposite conclusions in later contexts. A related concept to this logic is known as defeasible logic [17–19].

Definition 2.1 (Defeasible Upside-Down Logic)**.** A *Defeasible Upside-down Logic* is a tuple

$$\mathsf{DUDL} = (\,\mathcal{L},\, R_{\text{strict}},\, R_{\text{def}},\, \succ,\, U\,)$$

where

- $\mathcal{L}$ is a propositional (or first-order) language;
- $R_{\text{strict}} \subseteq \mathcal{L} \times \mathcal{L}$ is a set of strict rules $\varphi \to \psi$;
- $R_{\text{def}} \subseteq \mathcal{L} \times \mathcal{L}$ is a set of defeasible rules $\varphi \Rightarrow \psi$;
- $\succ$ is a priority (superiority) relation on R_{def};
- U is an *upside-down operator* that, given a trigger $\theta \in \mathcal{L}$, produces a new priority relation $\succ_\theta$ such that some former winners become losers:

$$U(\succ, \theta) \;:=\; \succ_\theta \quad \text{with} \quad (\varphi \Rightarrow \psi) \succ (\chi \Rightarrow \neg\psi) \text{ in } \succ \implies (\chi \Rightarrow \neg\psi) \succ_\theta (\varphi \Rightarrow \psi).$$

The consequence relation $\vdash_{\text{dudl}}$ is always computed with respect to the most recent priority $\succ_\theta$, so a conclusion derivable from the same premises can later be overturned by new information.

Example 2.2 (Building Access under Emergency vs. Normal Day)**.** Consider a company building with a badge-based access control system. Let the language $\mathcal{L}$ contain the atoms

$$\mathsf{staff}, \quad \mathsf{badgeOK}, \quad \mathsf{enter}, \quad \mathsf{fireAlarm}, \quad \mathsf{evacuateOnly}.$$

In normal conditions we use the following rules:

$$r_1 : \mathsf{staff} \wedge \mathsf{badgeOK} \Rightarrow \mathsf{enter},$$

$$r_2 : \mathsf{fireAlarm} \Rightarrow \mathsf{evacuateOnly},$$

$$r_3 : \mathsf{evacuateOnly} \Rightarrow \neg\mathsf{enter}.$$

Assume the original defeasible priority is

$$r_1 \succ r_3,$$

i.e. allowing staff to enter is normally stronger than the weak prohibition. For an ordinary day we have facts

$$\Gamma_{\text{normal}} = \{\mathsf{staff}, \mathsf{badgeOK}, \neg\mathsf{fireAlarm}\},$$

so the calculus derives

$$\Gamma_{\text{normal}} \vdash_{\text{dudl}} \mathsf{enter}.$$

Now an emergency trigger $\theta := \mathsf{fireAlarm}$ occurs. By the definition of Defeasible Upside-Down Logic we apply U to flip the relevant priorities:

$$U(\succ, \mathsf{fireAlarm}) = \succ_{\mathsf{fireAlarm}} \quad \text{with} \quad r_3 \succ_{\mathsf{fireAlarm}} r_1.$$

In the updated situation we have

$$\Gamma_{\text{emer}} = \{\mathsf{staff}, \mathsf{badgeOK}, \mathsf{fireAlarm}\},$$

so both "enter" (via r_1) and "not enter" (via r_2, r_3) are supported, but because the priority is now upside-down we get

$$\Gamma_{\text{emer}} \vdash_{\text{dudl}} \neg\mathsf{enter}.$$

Thus the same core information "this person is a staff member with a valid badge" leads to "enter" in the normal context and to "do not enter" in the upside-down, emergency context.

Example 2.3 (Medication Recommendation after a Late Contraindication)**.** Let a hospital decision assistant reason about a common infection. Let $\mathcal{L}$ contain

$$\mathsf{infection},\ \mathsf{oralDrug},\ \mathsf{ivDrug},\ \mathsf{contraOral},\ \mathsf{giveOral},\ \mathsf{giveIV}.$$

The default medical policy is:

$$r_1 : \mathsf{infection} \Rightarrow \mathsf{giveOral} \quad \text{(cheap, first-line)},$$
$$r_2 : \mathsf{contraOral} \Rightarrow \mathsf{giveIV} \quad \text{(safer if contraindicated)},$$
$$r_3 : \mathsf{giveIV} \Rightarrow \neg\mathsf{giveOral}.$$

Initially, the priority is

$$r_1 \succ r_2,$$

because doctors prefer oral treatment if nothing bad is known. Suppose a patient arrives with the fact set

$$\Gamma_0 = \{\mathsf{infection}\},$$

and no contraindication is yet known. Then the system derives

$$\Gamma_0 \vdash_{\text{dudl}} \mathsf{giveOral}.$$

Later, a lab result arrives: $\theta := \mathsf{contraOral}$ (e.g. renal issue, drug interaction, or ulcer). The upside-down operator U is triggered and inverts the competing rules:

$$U(\succ, \mathsf{contraOral}) = \succ_{\theta} \quad \text{with} \quad r_2 \succ_{\theta} r_1.$$

Now the fact set becomes

$$\Gamma_1 = \{\mathsf{infection}, \mathsf{contraOral}\}.$$

From Γ_1, both "give oral" (via r_1) and "give IV" (via r_2, r_3) are applicable, but because the priority has been flipped we obtain

$$\Gamma_1 \vdash_{\text{dudl}} \mathsf{giveIV} \quad \text{and} \quad \Gamma_1 \vdash_{\text{dudl}} \neg\mathsf{giveOral}.$$

Hence the recommendation is upside-down: the same underlying diagnosis (infection) first yields the oral treatment, but a later piece of information (the trigger) forces the system to reverse the conclusion.

Theorem 2.4 (Defeasible UDL is Upside-Down)**.** *Let*

$$\mathsf{DUDL} = (\mathcal{L}, R_{\text{strict}}, R_{\text{def}}, \succ, U)$$

be a Defeasible Upside-Down Logic as defined above. Then there exist premises $\Gamma \subseteq \mathcal{L}$, defeasible rules $r_1 : \varphi \Rightarrow \psi$, $r_2 : \chi \Rightarrow \neg\psi$ in R_{def}, and a trigger $\theta \in \mathcal{L}$ such that

(i) with the original priority $\succ$ we have $\Gamma \vdash_{\text{dudl}} \psi$, and
(ii) with the updated priority $\succ_\theta := U(\succ, \theta)$ we have $\Gamma \vdash_{\text{dudl}} \neg\psi$.

Consequently, DUDL *is an Upside-Down Logic in the sense of the general definition.*

Proof. Pick two defeasible rules

$$r_1 : \varphi \Rightarrow \psi, \qquad r_2 : \chi \Rightarrow \neg\psi$$

such that $r_1 \succ r_2$ in the original priority. Let the premise set be $\Gamma := \{\varphi, \chi\}$; then both rules are applicable from Γ. Because $r_1 \succ r_2$, the usual defeasible inference engine (for instance, a Brewka–Eiter style or Nute-style calculus) selects ψ over $\neg\psi$, hence

$$\Gamma \vdash_{\text{dudl}} \psi.$$

Now apply the upside-down operator with trigger θ: by definition of U we obtain a new priority $\succ_\theta$ such that

$$r_2 \succ_\theta r_1.$$

Recomputing the defeasible extension of the same premises Γ but now with $\succ_\theta$, the calculus will select $\neg\psi$ over ψ, hence

$$\Gamma \vdash_{\text{dudl}} \neg\psi \qquad \text{(with the updated priority)}.$$

Thus the same premises yield ψ in the pre-upside context and $\neg\psi$ in the post-upside context. This matches the True→False / False→True switch condition in the abstract Upside-Down Logic definition. □

2.2. *Belief Upside-Down Logic*

This logic maintains a belief set, yet upside-down entrenchment lets new information demote supports and reverse conclusions about the observation. Belief Theory is known as a related concept (cf. [20–22]).

Definition 2.5 (Belief Upside-Down Logic)**.** A *Belief Upside-down Logic* is a structure

$$\mathsf{BUDL} = (\, K,\, \preceq,\, *,\, U\,)$$

where

- K is a deductively closed belief set over a language $\mathcal{L}$;
- $\preceq$ is an epistemic entrenchment relation ("less entrenched than");
- $*$ is an AGM-style revision operator $K * \alpha$;
- U is an upside-down transformer on entrenchment,

$$U(\preceq, \alpha) \;=: \preceq_\alpha,$$

such that every sentence β that supported the former conclusion is *downgraded* with respect to a conflicting sentence γ supported by α:

$$\beta \preceq \gamma \text{ may hold, but } \gamma \prec_\alpha \beta.$$

Hence, if we define the revised set by $K *_U \alpha := \mathrm{Cn}_{\preceq_\alpha}(K \cup \{\alpha\})$, the belief outcome for the same observation can be reversed.

Example 2.6 (Weather Forecast Source Reversal)**.** Let an emergency management office maintain a belief base

$$K = \{\mathsf{typhoonTomorrow}\}$$

obtained from its usual, highly trusted agency A_1. The entrenchment relation $\preceq$ satisfies

$$\mathsf{typhoonTomorrow}_{A_1} \prec \mathsf{officialSource},$$

so K closed under deduction supports the public warning

$$K \vdash \mathsf{issueEvacuationAlert}.$$

Later, a stronger and more recent bulletin α from the national meteorological center A_2 arrives, stating

$$\alpha := \neg\mathsf{typhoonTomorrow}.$$

In ordinary AGM revision, $K * \alpha$ might still keep some of the old trusted sentences from A_1 if they are entrenched. But in Belief Upside-Down Logic we apply the upside-down transformer

$$U(\preceq, \alpha) = \preceq_\alpha$$

which explicitly *downgrades* all sentences whose justification is "forecast from A_1" below the new item α coming from A_2. Formally,

$$\mathsf{typhoonTomorrow}_{A_1} \prec_\alpha \alpha.$$

Define the revised base

$$K *_U \alpha := \mathrm{Cn}_{\preceq_\alpha}(K \cup \{\alpha\}).$$

Then we obtain

$$K *_U \alpha \vdash \neg\mathsf{issueEvacuationAlert}.$$

Thus, with the same domain information ("tomorrow's weather"), the conclusion flips from "alert" to "no alert" solely because the arrival of α made the older support less entrenched via the upside-down operator.

Example 2.7 (Customer Credit Assessment with Late Negative Evidence)**.** Consider a bank's belief base about a customer c:

$$K = \{\mathsf{incomeStable}(c),\ \mathsf{noDefaultHistory}(c)\}.$$

With the initial entrenchment $\preceq$, positive financial signals (incomeStable, noDefaultHistory) are placed above generic risk rules, so that

$$K \vdash \mathsf{approveLoan}(c).$$

Suppose the bank later receives an external report

$$\alpha := \mathsf{recentDefault}(c),$$

which directly conflicts with noDefaultHistory(c). In a standard belief-revision setting the bank could still try to keep old information if it was sufficiently entrenched. In Belief Upside-Down Logic, however, the upside-down transformer

$$U(\preceq, \alpha) = \preceq_\alpha$$

is designed so that all items supporting the previous positive decision are *downgraded* below the newly arrived negative item, i.e.

$$\mathsf{noDefaultHistory}(c) \prec_\alpha \mathsf{recentDefault}(c), \qquad \mathsf{incomeStable}(c) \prec_\alpha \mathsf{recentDefault}(c).$$

We then form the revised belief set

$$K *_U \alpha := \mathrm{Cn}_{\preceq_\alpha}(K \cup \{\alpha\}).$$

Because the negative financial signal is now strictly better entrenched than the previously positive ones, the derived decision becomes

$$K *_U \alpha \vdash \mathsf{rejectLoan}(c).$$

Hence, the very same customer profile, initially assessed as "approve," is turned upside-down to "reject" when new, higher-priority evidence arrives and the entrenchment is inverted by U.

Theorem 2.8 (Belief UDL is Upside-Down)**.** *Let*

$$\mathsf{BUDL} = (K, \preceq, *, U)$$

be a Belief Upside-Down Logic. Then there exist formulas ψ, γ and an input α such that

(i) in the original entrenchment $\preceq$ the $\preceq$-based revision $K * \psi$ yields ψ and rejects $\neg\psi$,

(ii) but after applying U to the entrenchment using α so that $\preceq_\alpha := U(\preceq, \alpha)$ demotes the old support and promotes a conflicting one, the revised belief

$$K *_U \alpha := \mathrm{Cn}_{\preceq_\alpha}(K \cup \{\alpha\})$$

contains $\neg\psi$ (or at least rejects ψ).

Hence BUDL *realizes an upside-down reversal.*

Proof. Choose a language $\mathcal{L}$ and let K contain two pieces of information: one, call it β, that leads (together with K) to the conclusion ψ; the other, call it γ, that would lead to $\neg\psi$ but is currently less entrenched, i.e.

$$\gamma \preceq \beta.$$

In the AGM-style framework, when we revise by ψ (or by some datum consistent with β), the higher entrenchment of β ensures that the belief base keeps β and hence implies ψ.
Now let us receive a new piece of information α that activates the upside-down transformer U, producing a new entrenchment $\preceq_\alpha$ such that

$$\beta \preceq_\alpha \gamma \quad \text{(i.e. the order is flipped for these two).}$$

By definition of $K *_U \alpha$, the revised belief set is constructed from $K \cup \{\alpha\}$ but using *the new entrenchment* $\preceq_\alpha$. Since now γ is more entrenched than β, the revision process keeps γ and discards or downgrades β, so the resulting set supports $\neg\psi$ instead of ψ. Thus, before U we had

$$K \cup \{\psi\} \vdash \psi,$$

after U we have

$$K *_U \alpha \vdash \neg\psi.$$

This is exactly the truth/acceptance reversal required by Upside-Down Logic. □

2.3. *Paraconsistent Upside-Down Logic*

This logic tolerates contradictions, but an upside-down selector activates competing sides differently, making previously derivable statements become refutable in reasoning. Paraconsistent Logic is known as a related concept [23–25].

Definition 2.9 (Paraconsistent Upside-Down Logic)**.** A *Paraconsistent Upside-down Logic* is a triple

$$\mathsf{PUDL} = (\,\mathcal{L},\, \vdash_{\mathrm{par}},\, U\,)$$

where

- $\mathcal{L}$ is a language;
- $\vdash_{\mathrm{par}}$ is a paraconsistent consequence relation (that is, $\varphi, \neg\varphi \nvdash_{\mathrm{par}} \psi$ for arbitrary ψ);
- U is an upside-down selection operator that, given a contradictory information set $\Gamma \cup \{\alpha, \neg\alpha\}$, reweights or deactivates one side of the contradiction:

$$U(\Gamma, \alpha) \;:=\; \Gamma' \subseteq \Gamma \cup \{\alpha, \neg\alpha\}$$

such that

$$\Gamma \vdash_{\mathrm{par}} \psi \quad \text{but} \quad \Gamma' \vdash_{\mathrm{par}} \neg\psi.$$

Thus, while contradictions are retained, switching the preferred side of the conflict by U makes the conclusion flip.

Example 2.10 (Medical Diagnosis with Conflicting Test Results)**.** Let a hospital information system collect the following pieces of information about a patient p:

$$\Gamma = \{\mathsf{testA_positive}(p),\ \neg\mathsf{testA_positive}(p),\ \mathsf{symptomCluster}(p)\}.$$

Here a rapid screening device reports $\mathsf{testA_positive}(p)$, while a later manual re-read on the same sample reports $\neg\mathsf{testA_positive}(p)$. Because the logic is paraconsistent, we do *not* explode:

$$\mathsf{testA_positive}(p),\ \neg\mathsf{testA_positive}(p) \nvdash_{\mathrm{par}} \psi.$$

Assume that, with the original weight assignment, the rule

$$\mathsf{testA_positive}(p) \wedge \mathsf{symptomCluster}(p) \;\Rightarrow\; \mathsf{isolate}(p)$$

is the one that fires first, so we have

$$\Gamma \vdash_{\mathrm{par}} \mathsf{isolate}(p).$$

Later, the hospital receives an external lab certification

$$\alpha := \mathsf{manualReReadIsMoreReliable},$$

which is designed to be processed by the upside-down selector U. The operator U forms

$$\Gamma' := U(\Gamma, \alpha) = \{\neg\mathsf{testA_positive}(p),\ \mathsf{symptomCluster}(p)\},$$

i.e. it *keeps* the negative re-read and *deactivates* the rapid positive. With this updated set we now derive

$$\Gamma' \vdash_{\mathrm{par}} \neg\mathsf{isolate}(p),$$

because the isolation rule no longer has its positive premise satisfied, and a weaker "monitor-only" rule becomes applicable. Hence, the same contradictory medical data lead first to "isolate" and then, after U, to "do not isolate."

Example 2.11 (Fraud Detection in Banking with Conflicting Signals)**.** Consider a bank's monitoring system that gathers two opposite signals about a transaction t:

$$\Gamma = \{\mathsf{highRiskPattern}(t),\ \neg\mathsf{highRiskPattern}(t),\ \mathsf{unusualLocation}(t)\}.$$

The rule base contains

$$\mathsf{highRiskPattern}(t) \wedge \mathsf{unusualLocation}(t)\ \Rightarrow\ \mathsf{blockTransaction}(t),$$

and also a conservative rule

$$\neg\mathsf{highRiskPattern}(t)\ \Rightarrow\ \mathsf{allowTransaction}(t).$$

In the initial paraconsistent evaluation, the "block" rule is considered more salient, so

$$\Gamma \vdash_{\mathrm{par}} \mathsf{blockTransaction}(t).$$

Suppose now the bank receives a real-time feed

$$\alpha := \mathsf{deviceFingerprintTrusted}(t),$$

which the system interprets as making negative risk assessments more trustworthy. The upside-down selector U is applied:

$$\Gamma' := U(\Gamma, \alpha) = \{\neg\mathsf{highRiskPattern}(t),\ \mathsf{unusualLocation}(t)\}.$$

The positive fraud signal highRiskPattern is still *stored* but is *downgraded* for current inference. Under the same paraconsistent relation, the applicable rule becomes

$$\Gamma' \vdash_{\mathrm{par}} \mathsf{allowTransaction}(t),$$

so the conclusion is flipped from "block" to "allow" without discarding the original contradiction, purely by changing which side of the conflict is preferred.

Theorem 2.12 (Paraconsistent UDL is Upside-Down)**.** *Let*

$$\mathsf{PUDL} = (\mathcal{L}, \vdash_{\mathrm{par}}, U)$$

be a Paraconsistent Upside-Down Logic. Then there exists a contradictory information set $\Gamma \cup \{\alpha, \neg\alpha\}$ *and a formula* ψ *such that*

(i) $\Gamma \vdash_{\mathrm{par}} \psi$*, but*

(ii) $U(\Gamma, \alpha) =: \Gamma'$ *satisfies* $\Gamma' \vdash_{\mathrm{par}} \neg\psi$*.*

Hence PUDL *is an Upside-Down Logic.*

Proof. Because the underlying consequence relation $\vdash_{\mathrm{par}}$ is paraconsistent, we can have a set

$$\Delta := \Gamma \cup \{\alpha, \neg\alpha\}$$

that is *not* explosively trivial. Assume that in Γ we have a derivation of ψ that (possibly) uses α more heavily than $\neg\alpha$, so that

$$\Gamma \vdash_{\mathrm{par}} \psi.$$

Now apply the upside-down selector:

$$\Gamma' := U(\Gamma, \alpha).$$

By definition of U in this logic, U reweights or deactivates the side of the contradiction that was previously dominant. So in Γ' the contribution of α is weakened, while that of $\neg\alpha$ is strengthened (or at least made active in rule applications). In a paraconsistent setting such a switch can change the preferred inference so that

$$\Gamma' \vdash_{\mathrm{par}} \neg\psi.$$

Hence ψ was derivable before the upside-down step, and $\neg\psi$ is derivable after it, with the contradiction being retained throughout. This is precisely an upside-down effect. □

2.4. *Dynamic Epistemic Upside-Down Logic*

This logic models agents' knowledge, and a designated upside-down action updates the model so formerly true propositions become false afterward. Dynamic Epistemic Logic is known as a related concept [26–28].

Definition 2.13 (Dynamic Epistemic Upside-Down Logic)**.** A *Dynamic Epistemic Upside-down Logic* is a DEL model

$$\mathsf{DEUDL} = (\, M,\, A_{\uparrow} \,)$$

where

- $M = (W, \{\sim_i\}_{i \in Ag}, V)$ is an epistemic Kripke model;

- $A_{\uparrow}$ is a distinguished *upside-down action model* with precondition pre and postcondition post;
- the product update $M \otimes A_{\uparrow}$ satisfies

$$M \models \psi \quad \text{and} \quad M \otimes A_{\uparrow} \models \neg\psi,$$

for some relevant ψ (typically a recommendation, obligation, or belief).

In other words, a specific public announcement or event is prepared so that, once executed, the truth value of a designated formula becomes reversed in the updated model.

Example 2.14 (Public Health Announcement Reversing Travel Advice)**.** Consider an epistemic model M for a set of agents $Ag = \{\mathsf{citizens}, \mathsf{airlines}\}$. In M it is commonly known that

$$M \models \psi \quad \text{with} \quad \psi := \mathsf{safeToTravel}(\mathsf{RegionX}).$$

That is, every agent believes (and believes that others believe) that travel to RegionX is safe. Now the public health authority issues a *special emergency announcement* model

$$A_{\uparrow} = (\text{pre}, \text{post}),$$

whose precondition asserts that new epidemiological data have been confirmed, and whose postcondition overwrites the valuation of $\mathsf{safeToTravel}(\mathsf{RegionX})$ to "false" and simultaneously makes this change public.
After the product update we obtain

$$M' := M \otimes A_{\uparrow}$$

and the designated formula flips:

$$M \models \mathsf{safeToTravel}(\mathsf{RegionX}) \quad \text{but} \quad M' \models \neg\mathsf{safeToTravel}(\mathsf{RegionX}).$$

Crucially, because the announcement is public in the DEL sense, every agent now knows that every other agent also knows that travel is *not* safe, so all derived obligations (refund, rerouting, quarantine) change accordingly. This is a realistic Dynamic Epistemic Upside-Down pattern.

Example 2.15 (Corporate Disclosure Reversing Market Belief)**.** Let M be an epistemic Kripke model for a population of investors $Ag = \{\mathsf{funds}, \mathsf{retail}, \mathsf{analysts}\}$. In M it is commonly accepted that

$$M \models \psi \quad \text{with} \quad \psi := \mathsf{mergerLikely}(\mathsf{CoA}, \mathsf{CoB}),$$

because leaked negotiations and preliminary filings are visible in all worlds compatible with agents' knowledge.

The stock exchange then publishes an *authoritative disclosure* as a DEL action model $A_{\uparrow}$ whose precondition is "the regulator confirms no merger is approved" and whose postcondition forces

$$\text{post}: \ \mathsf{mergerLikely}(\mathsf{CoA}, \mathsf{CoB}) := \mathsf{false},$$

and makes this update public to all agents. After the product update

$$M' := M \otimes A_{\uparrow}$$

we obtain the upside-down effect:

$$M \models \mathsf{mergerLikely}(\mathsf{CoA}, \mathsf{CoB}) \quad \text{and} \quad M' \models \neg\mathsf{mergerLikely}(\mathsf{CoA}, \mathsf{CoB}).$$

Because the action is public, every investor now knows that everyone else knows that the merger will *not* happen, so belief-based strategies (hold, accumulate, arbitrage) are immediately reversed. This exemplifies Dynamic Epistemic Upside-Down Logic in financial communication.

Theorem 2.16 (Dynamic Epistemic UDL is Upside-Down)**.** *Let*

$$\mathsf{DEUDL} = (M, A_{\uparrow})$$

be a Dynamic Epistemic Upside-Down Logic. Suppose there is a formula ψ such that $M \models \psi$ and the precondition of $A_{\uparrow}$ is satisfied in M. Then the product update flips the truth value of ψ, i.e.

$$M \otimes A_{\uparrow} \models \neg\psi.$$

Therefore DEUDL *is an Upside-Down Logic.*

Proof. Let $M = (W, \{\sim_i\}_{i \in Ag}, V)$ be the epistemic Kripke model. Assume there is a state $w \in W$ such that $M, w \models \psi$. Let $A_{\uparrow}$ be an action model whose postcondition explicitly assigns $\neg\psi$ (for example, by changing the valuation of the atomic proposition on which ψ depends, or by adding epistemic information that makes ψ false). Because the precondition of $A_{\uparrow}$ holds at w, the product update $M \otimes A_{\uparrow}$ contains the updated pair (w, a) and the semantics of dynamic epistemic logic guarantees that

$$M \otimes A_{\uparrow}, (w, a) \models \text{post}(a).$$

By construction $\text{post}(a)$ forces $\neg\psi$, so

$$M \otimes A_{\uparrow} \models \neg\psi.$$

Thus the same designated formula ψ is true in the pre-update model and false in the post-update model generated by $A_{\uparrow}$. This is an instance of the abstract upside-down transformation. □

2.5. *Abductive Upside-Down Logic*

This logic ranks candidate explanations, but upside-down evidence reorders preferences, making a previously inferior hypothesis become the accepted one instead. Abductive Logic is known as a related concept [29–31].

Definition 2.17 (Abductive Upside-Down Logic)**.** An *Abductive Upside-down Logic* is a structure

$$\mathsf{AUDL} = (\,\mathcal{P},\, \mathcal{O},\, \mathrm{Expl},\, \succ,\, U_{\mathrm{abd}}\,)$$

where

- $\mathcal{P}$ is a background theory;
- $\mathcal{O}$ is a set of observations;
- $\mathrm{Expl}(\mathcal{O})$ is the set of admissible explanations for $\mathcal{O}$;
- $\succ$ is a preference or plausibility order on $\mathrm{Expl}(\mathcal{O})$;
- U_{abd} is an upside-down reordering operator which, given a new discriminating observation o^*, produces a new order $\succ_{o^*}$ such that

  $$E_1 \succ E_2 \quad \text{but} \quad E_2 \succ_{o^*} E_1,$$

  so that the best explanation changes from E_1 to E_2.

This makes it possible to formalize the practical pattern in which the arrival of new evidence reverses the abductively preferred explanation and hence the derived conclusion.

Example 2.18 (Medical Diagnosis Reversed by a Discriminating Test)**.** Let $\mathcal{P}$ be medical background knowledge for respiratory diseases. A patient arrives with observations

$$\mathcal{O} = \{\mathsf{fever},\ \mathsf{dryCough},\ \mathsf{fatigue}\}.$$

From $\mathcal{P}$ we compute admissible explanations

$$\mathrm{Expl}(\mathcal{O}) = \{E_1 = \mathsf{viralFlu},\ E_2 = \mathsf{atypicalPneumonia}\}.$$

Suppose an initial plausibility order says

$$E_1 \succ E_2$$

because viral flu is more common and explains all three symptoms. Hence the physician accepts E_1 and prescribes supportive care.

Later, a discriminating observation $o^* = \mathsf{lowOxygenSaturation}$ is obtained. This symptom is weakly linked to viral flu but strongly linked to atypical pneumonia in $\mathcal{P}$. The upside-down reordering operator U_{abd} updates the order to

$$U_{\mathrm{abd}}(\succ, o^*) = \succ_{o^*} \quad \text{with} \quad E_2 \succ_{o^*} E_1.$$

Now the best explanation flips from E_1 to E_2, so the treatment plan is reversed (from watchful waiting to immediate antibiotics/hospitalization). This is a real abductive upside-down pattern: new evidence does not add a new hypothesis, but *reverses* the ranking of existing hypotheses.

Example 2.19 (Security Incident Analysis Reversed by New Video Evidence)**.** Let $\mathcal{P}$ be a background theory for building security: badge logs, access rules, and typical insider threats. An incident is observed:

$$\mathcal{O} = \{\mathsf{doorForced},\ \mathsf{alarmTriggered},\ \mathsf{lateNight}\}.$$

From $\mathcal{P}$ the security team derives admissible explanations

$$\mathrm{Expl}(\mathcal{O}) = \{E_1 = \mathsf{cleaningStaffError},\ E_2 = \mathsf{externalIntrusion}\}.$$

Because the badge system shows a cleaner's badge nearby, the initial preference is

$$E_1 \succ E_2,$$

so the team first reports "accidental door forcing by authorized staff."
Later, a new discriminating observation $o^* = \mathsf{CCTVshowsUnknownPerson}$ is recovered from a camera with a delayed upload. Applying the upside-down reordering operator,

$$U_{\mathrm{abd}}(\succ, o^*) = \succ_{o^*} \quad \text{with} \quad E_2 \succ_{o^*} E_1,$$

because $\mathsf{CCTVshowsUnknownPerson}$ is much better explained by $\mathsf{externalIntrusion}$ than by $\mathsf{cleaningStaffError}$. As a result, the previously adopted explanation is *overturned*, the incident is reclassified as an intrusion, and follow-up actions (forensic imaging, police report, notification) are changed. This illustrates Abductive Upside-Down Logic in security investigations.

Theorem 2.20 (Abductive UDL is Upside-Down)**.** *Let*

$$\mathsf{AUDL} = (\mathcal{P}, \mathcal{O}, \mathrm{Expl}, \succ, U_{\mathrm{abd}})$$

be an Abductive Upside-Down Logic. Then there exist two explanations $E_1, E_2 \in \mathrm{Expl}(\mathcal{O})$ and a new observation o^* such that

- *(i) $E_1 \succ E_2$ under the original preference $\succ$, so the system adopts E_1 and hence its consequence ψ_1,*
- *(ii) but after the upside-down update $\succ_{o^*} := U_{\mathrm{abd}}(\succ, o^*)$ we have $E_2 \succ_{o^*} E_1$, so the system now adopts E_2 and hence its (typically incompatible) consequence ψ_2.*

Therefore AUDL *is an Upside-Down Logic.*

Proof. By assumption there is a background theory $\mathcal{P}$ and observations $\mathcal{O}$ that admit at least two admissible explanations $E_1, E_2 \in \mathrm{Expl}(\mathcal{O})$. Suppose that, with the original plausibility order $\succ$, we have

$$E_1 \succ E_2.$$

Hence the abductive engine will select E_1 as the preferred explanation and, consequently, derive whatever main conclusion ψ_1 is attached to E_1.
Now receive a new discriminating observation o^*. By definition of U_{abd}, this observation reorders the plausibility on explanations in such a way that

$$E_2 \succ_{o^*} E_1.$$

Therefore the very same abductive mechanism now chooses E_2 as the best explanation and hence derives its conclusion ψ_2. When E_1 and E_2 are competing explanations, ψ_1 and ψ_2 are typically mutually incompatible (for instance, predicting different causes, agents, or diagnoses), so the output conclusion is inverted. This is an upside-down situation. □

3. Conclusion

We defined several concrete variants — defeasible, belief-based, paraconsistent, dynamic epistemic, and abductive — and showed how each realizes controlled reversal through priority flips, entrenchment inversion, model updates, or explanation reordering. Future research is expected to further investigate the behavior of Upside-Down Logic within frameworks such as Neutrosophic Sets [32,33], Quadripartitioned Neutrosophic Sets [34], Plithogenic Sets [16,35], and Plithogenic SuperHyperGraphs [36,37].

Funding

This study did not receive any financial or external support from organizations or individuals.

Acknowledgments

We extend our sincere gratitude to everyone who provided insights, inspiration, and assistance throughout this research. We particularly thank our readers for their interest and acknowledge the authors of the cited works for laying the foundation that made our study possible. We also appreciate the support from individuals and institutions that provided the resources and infrastructure needed to produce and share this paper. Finally, we are grateful to all those who supported us in various ways during this project.

Data Availability

This research is purely theoretical, involving no data collection or analysis. We encourage future researchers to pursue empirical investigations to further develop and validate the concepts introduced here.

Research Integrity

The authors hereby confirm that, to the best of their knowledge, this manuscript is their original work, has not been published in any other journal, and is not currently under consideration for publication elsewhere at this stage.

Use of Generative AI and AI-Assisted Tools

I use generative AI and AI-assisted tools for tasks such as English grammar checking, and I do not employ them in any way that violates ethical standards.

Disclaimer (Note on Computational Tools)

No computer-assisted proof, symbolic computation, or automated theorem proving tools (e.g., Mathematica, SageMath, Coq, etc.) were used in the development or verification of the results presented in this paper. All proofs and derivations were carried out manually and analytically by the authors.

Code Availability

No code or software was developed for this study.

Clinical Trial

This study did not involve any clinical trials.

Ethical Approval

As this research is entirely theoretical in nature and does not involve human participants or animal subjects, no ethical approval is required.

Conflicts of Interest

The authors confirm that there are no conflicts of interest related to the research or its publication.

Disclaimer

This work presents theoretical concepts that have not yet undergone practical testing or validation. Future researchers are encouraged to apply and assess these ideas in empirical contexts. While every effort has been made to ensure accuracy and appropriate referencing, unintentional errors or omissions may still exist. Readers are advised to verify referenced materials on their own. The views and conclusions expressed here are the authors' own and do not necessarily reflect those of their affiliated organizations.

References

[1] Antonios Paraskevas, Michael Madas, Florentin Smarandache, and Takaaki Fujita. Utility-based upside-down logic: A neutrosophic decision-making framework under uncertainty. *Journal of Decisions and Operations Research*, 2025.

[2] Lihua Gu and Ming Lei. A neutrosophic framework for nursing education quality analysis using upside-down logics and narrative factor. *Neutrosophic Sets and Systems*, 87:362–378, 2025.

[3] Qingde Li and Xiangheng Kong. A mathematical neutrosophic offset framework with upside down logics for quality evaluation of multi-sensor intelligent vehicle environment perception systems. *Neutrosophic Sets and Systems*, 87:1014–1023, 2025.

[4] Junqiao Lou, Daoping Zhang, and Youyin Mo. Upside-down neutrosophic multi-fuzzy ideals for it-enhanced college dance teaching quality assessment. *Neutrosophic Sets and Systems*, 93:370–380, 2025.

[5] Yantao Bu. An upside-down logic-based neutrosophic methodology: Assessment of online marketing effectiveness in e-commerce enterprises. *Neutrosophic Sets and Systems*, 85:801–813, 2025.

[6] Takaaki Fujita and Florentin Smarandache. Introduction to upside-down logic: Its deep relation to neutrosophic logic and applications. *Advancing Uncertain Combinatorics through Graphization, Hyperization, and Uncertainization: Fuzzy, Neutrosophic, Soft, Rough, and Beyond (Third Volume)*, 2024.

[7] Florentin Smarandache. *Upside-Down Logics: Falsification of the Truth and Truthification of the False*. Infinite Study, 2024.

[8] Takaaki Fujita, Ahmed Heilat, and Raed Hatamleh. Upside-down logic in plithogenic fuzzy control system: Contradiction-aware rule inversion and de-plithogenication. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 2025.

[9] Takaaki Fujita. Upside-down logic within plithogenic fuzzy itil: A framework forcontext-aware contradiction handling in it service management. *Annals of Process Engineering and Management*, 2025.

[10] Takaaki Fujita, Raed Hatamleh, and Ahmed Salem Heilat. Contrasoft set and contrarough set with using upside-down logic. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 2025.

[11] Florentin Smarandache. A unifying field in logics: Neutrosophic logic. In *Philosophy*, pages 1–141. American Research Press, 1999.

[12] Haibin Wang, Florentin Smarandache, Yanqing Zhang, and Rajshekhar Sunderraman. *Single valued neutrosophic sets*. Infinite study, 2010.

[13] Said Broumi, Mohamed Talea, Assia Bakali, and Florentin Smarandache. Single valued neutrosophic graphs. *Journal of New theory*, (10):86–101, 2016.

[14] Florentin Smarandache. *Plithogenic set, an extension of crisp, fuzzy, intuitionistic fuzzy, and neutrosophic sets-revisited*. Infinite study, 2018.

[15] Shawkat Alkhazaleh. *Plithogenic soft set*. Infinite Study, 2020.

[16] Fazeelat Sultana, Muhammad Gulistan, Mumtaz Ali, Naveed Yaqoob, Muhammad Khan, Tabasam Rashid, and Tauseef Ahmed. A study of plithogenic graphs: applications in spreading coronavirus disease (covid-19) globally. *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, 14(10):13139–13159, 2023.

[17] Donald Nute. Defeasible logic. In *International Conference on Applications of Prolog*, pages 151–169. Springer, 2001.

[18] Grigoris Antoniou, David Billington, Guido Governatori, and Michael J Maher. Representation results for defeasible logic. *ACM Transactions on Computational Logic (TOCL)*, 2(2):255–287, 2001.

[19] Guido Governatori, Francesco Olivieri, Antonino Rotolo, and Simone Scannapieco. Computing strong and weak permissions in defeasible logic. *Journal of Philosophical Logic*, 42(6):799–829, 2013.

[20] Theofanis Aravanis. Deductive belief change. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 91(4):489–515, 2023.

[21] Kurt Konolige. A deductive model of belief. In *IJCAI*, volume 83, pages 377–381, 1983.

[22] Robert Stalnaker. On logics of knowledge and belief. *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition*, 128(1):169–199, 2006.

[23] Graham Priest, Koji Tanaka, Zach Weber, and Edward N Zalta. *Paraconsistent logic*. München, 1989.

[24] Walter Alexandre Carnielli and Marcelo Esteban Coniglio. *Paraconsistent logic: Consistency, contradiction and negation*, volume 40. Springer, 2016.

[25] David Ripley. Paraconsistent logic. *Journal of Philosophical Logic*, 44(6):771–780, 2015.

[26] Hans Van Ditmarsch, Wiebe van Der Hoek, and Barteld Kooi. *Dynamic epistemic logic*. Springer, 2008.

[27] Barteld Kooi, H van Ditmarsch, and W Hoek. Dynamic epistemic logic. *Handbook of logic and language*, pages 671–690, 2011.

[28] Hans P Van Ditmarsch, Wiebe Van Der Hoek, and BP Kooi. Concurrent dynamic epistemic logic. In *Knowledge contributors*, pages 105–143. Springer, 2003.

[29] Antonis C Kakas, Robert A. Kowalski, and Francesca Toni. Abductive logic programming. *Journal of logic and computation*, 2(6):719–770, 1992.

[30] Harry E Pople. On the mechanization of abductive logic. In *IJCAI*, volume 73, pages 147–152, 1973.

[31] Dov Gabbay and John Woods. Advice on abductive logic. *Logic Journal of IGPL*, 14(2):189–219, 2006.

[32] Haibin Wang, Florentin Smarandache, Rajshekhar Sunderraman, and Yan-Qing Zhang. *interval neutrosophic sets and logic: theory and applications in computing: Theory and applications in computing*, volume 5. Infinite Study, 2005.

[33] Said Broumi, Mohamed Talea, Assia Bakali, and Florentin Smarandache. Interval valued neutrosophic graphs. *Critical Review, XII*, 2016:5–33, 2016.

[34] R Radha, A Stanis Arul Mary, and Florentin Smarandache. Quadripartitioned neutrosophic pythagorean soft set. *International Journal of Neutrosophic Science (IJNS) Volume 14, 2021*, page 11, 2021.

[35] Prem Kumar Singh et al. Single-valued plithogenic graph for handling multi-valued attribute data and its context. *Int. J. Neutrosophic Sci*, 15:98–112, 2021.

[36] Florentin Smarandache. *Extension of HyperGraph to n-SuperHyperGraph and to Plithogenic n-SuperHyperGraph, and Extension of HyperAlgebra to n-ary (Classical-/Neutro-/Anti-) HyperAlgebra*. Infinite Study, 2020.

[37] Florentin Smarandache. *Introduction to the n-SuperHyperGraph-the most general form of graph today*. Infinite Study, 2022.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of the publisher and/or the editor(s). This publisher and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury

to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

La integración de perspectivas contradictorias en la filosofía latinoamericana: Un enfoque MultiAlisista.

The integration of contradictory perspectives in Latin American philosophy: A Multi-Analyst approach.

Maikel Leyva Vázquez[1], Florentin Smarandache[2]

[1] Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador [2] mleyvaz@ug.edu.ec

[2]University of New Mexico, Gallup, NM, SUA, smarand@unm.edu

Resumen

Este estudio explora la integración de las filosofías indígenas y las teorías modernistas poscoloniales dentro del MultiAlismo, destacando el potencial de diálogo y síntesis entre estas diversas tradiciones filosóficas de América Latina. El MultiAlismo, un concepto desarrollado por Florentin Smarandache, se utiliza para tender puentes sobre las brechas y contradicciones entre los sistemas, centrándose en áreas de neutralidad como, en este caso, la diversidad cultural y las críticas a las estructuras de poder. La investigación subraya la importancia de incorporar tanto la sabiduría ancestral como las críticas modernas para fomentar una comprensión y apreciación más profundas del rico patrimonio filosófico de América Latina. Este enfoque integrador ofrece perspectivas prácticas para la elaboración de políticas inclusivas y para el éxito de los esfuerzos de justicia social en la región. La extensión de la aplicación del MultiAlismo a otros contextos globales sugiere su relevancia más amplia para abordar los desafíos contemporáneos a través de un enfoque filosófico flexible y holístico.

Palabras clave: MultiAlismo, filosofías indígenas, teorías modernistas poscoloniales, América Latina.

Abstract

This study explores the integration of Indigenous philosophies and postcolonial modernist theories within MultiAlism, highlighting the potential for dialogue and synthesis among these diverse philosophical traditions in Latin America. MultiAlism, a concept developed by Florentin Smarandache, is used to bridge the gaps and contradictions between systems, focusing on areas of neutrality such as, in this case, cultural diversity and critiques of power structures. The research underscores the importance of incorporating both ancestral wisdom and modern critiques to foster a deeper understanding and appreciation of Latin America's rich philosophical heritage. This integrative approach offers practical perspectives for inclusive policymaking and the success of social justice efforts in the region. Extending the application of MultiAlism to other global contexts suggests its broader relevance for addressing contemporary challenges through a flexible and holistic philosophical approach.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Keywords: MultiAlism, Indigenous philosophies, postcolonial modernist theories, Latin America.

1. Introducción.

Los sistemas de conocimiento indígenas en América Latina enfatizan una conexión holística con el cosmos y la naturaleza, reflejando valores comunitarios y ecológicos. En contraste, las importaciones filosóficas europeas del período colonial priorizaron el individualismo, el racionalismo y una visión mecanicista de la naturaleza. Esta yuxtaposición subraya tensiones socioculturales y políticas significativas que influyen en la identidad y evolución de la región [1].

El MultiAlismo, tal como fue desarrollado por Smarandache, ofrece un enfoque metodológico que abraza el pluralismo y la neutrosofía, permitiendo la integración de sistemas filosóficos en conflicto dentro de un marco dinámico y abierto [2].

El MultiAlismo postula un marco donde diversas dimensiones filosóficas como el monismo, el dualismo, el pluralismo e incluso variaciones más matizadas pueden coexistir e interactuar. El MultiAlismo fomenta la exploración y síntesis de estas múltiples dimensiones, siendo especialmente adecuado para contextos ricos en diversas tradiciones filosóficas, como América Latina.

Dimensiones filosóficas [2]:

El Monismo afirma que existe una única realidad o un solo principio fundamental, es decir, <A> = ∞, donde <A> es una "idea", una "sustancia", etc., y ∞ es el "mundo", la "realidad", el "todo".

El Dualismo reconoce dos fuerzas o principios fundamentales y a menudo conflictivos, es decir, <A> + <antiA> = ∞, donde <A> es una "idea", una "sustancia", etc., <antiA> es su opuesto o negación, y ∞ es el "mundo", la "realidad", el "todo".

El Pluralismo abraza una diversidad de principios o realidades coexistentes, es decir, <pluriA> = ∞, donde <pluriA> significa más de dos (tres o más) "ideas", etc., y ∞ es el "mundo", la "realidad", el "todo".

El MultiAlismo trasciende estas clasificaciones abogando por un marco en el que estas y otras categorías filosóficas pueden interactuar dinámicamente, es decir, <(multi)A> + <(multi)neutA> + <(multi)antiA> = ∞.

Esta flexibilidad lo convierte en una herramienta innovadora para el análisis y la síntesis de la diversidad filosófica. El enfoque es crucial para responder a las realidades complejas de América Latina, fomentando una comprensión más matizada y una apreciación de las diversas tradiciones filosóficas [3].

La síntesis de las filosofías indígenas y europeas a través del MultiAlismo puede aumentar significativamente la comprensión de los paisajes sociopolíticos y culturales únicos de América Latina. Promueve la comprensión intercultural y es esencial para abordar los desafíos globales y promover el desarrollo sostenible [4].

2. Preliminares

La filosofía latinoamericana anterior al contacto europeo se caracterizaba por ricas investigaciones metafísicas, enraizadas en las cosmologías religiosas amerindias. Investigadores como Restrepo [5] y Maffie [6] destacan cómo estas civilizaciones exploraban conceptos sobre la realidad, la moralidad y el cosmos sin la influencia de las tradiciones filosóficas occidentales, a menudo en contextos profundamente religiosos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Con la conquista española, la escolástica se convirtió en el marco filosófico dominante, introduciendo las tradiciones intelectuales europeas en el Nuevo Mundo. Bartolomé de Las Casas, como señala Nuccetelli [7], fue esencial en la defensa de los derechos de las poblaciones indígenas, desafiando las ideologías europeas dominantes y afirmando la humanidad y los derechos de los nativos.

El período independentista y nacionalista marcó una transición hacia la filosofía moderna y el pensamiento ilustrado, especialmente durante las guerras de independencia. Figuras como Simón Bolívar integraron ideales políticos liberales de la Ilustración para perfilar las ideologías de las nuevas naciones. El período nacionalista vio el ascenso del positivismo, que, según autores como Hale [8], reflejaba un enfoque científico y empírico de los problemas filosóficos y sociales, influyendo en la construcción nacional y la modernización de la región.

El panorama filosófico contemporáneo en América Latina sigue siendo diverso y complejo, con una influencia europea sustancial. Sin embargo, como muestra Beorlegui [9], ha habido un crecimiento significativo de movimientos filosóficos originales que abordan preocupaciones sociales. La Teología de la Liberación, por ejemplo, surgió como una fuerte contracorriente a las visiones católicas tradicionales, abogando por la justicia social y una opción preferencial por los pobres.

La Teología de la Liberación, surgida en los años 1960-1970 y detallada por Gustavo Gutiérrez [10], se centra en la justicia social, la pobreza y los derechos humanos, interpretando la fe cristiana a través de la lente de la situación de los pobres. Esto contrasta con el catolicismo conservador, que, como sugieren investigadores como McGovern [11], sostiene valores y doctrinas tradicionales, enfocándose en la salvación espiritual y el mantenimiento del orden religioso establecido.

Los valores comunitarios indígenas priorizan el bienestar colectivo y una conexión holística con la naturaleza, como analizan investigadores como Kusch [12], quien examina las epistemologías indígenas y sus contrastes con el pensamiento europeo. En oposición, las ideologías poscoloniales influenciadas por la Ilustración europea y el pensamiento liberal abogan por los derechos individuales y el capitalismo, entrando a menudo en conflicto con las prácticas comunitarias indígenas.

Filósofos como José Carlos Mariátegui y Enrique Dussel han criticado y ofrecido alternativas a las filosofías eurocéntricas, enfatizando un enfoque decolonial. Dussel [13], por ejemplo, explora la ética de la liberación, que critica las perspectivas tradicionales europeas y subraya la importancia de una ética basada en la experiencia de los marginados.

La influencia de las filosofías indígenas en los movimientos sociopolíticos contemporáneos resalta una reconceptualización filosófica en el ámbito académico, desafiando el predominio de las filosofías occidentales y favoreciendo un diálogo más rico e inclusivo sobre los problemas sociales y políticos.

3. Materiales y Métodos

El objetivo del análisis filosófico comparativo en este estudio es examinar cómo diferentes escuelas de pensamiento pueden ser comprendidas e integradas en el marco MultiAlisista.

Enfoque Metodológico:

Selección de escuelas filosóficas:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Identificación de las principales escuelas de pensamiento predominantes en América Latina, tales como la Teología de la Liberación, el catolicismo conservador, las cosmologías indígenas y las teorías modernistas poscoloniales. Esta selección se basa en la significación histórica y la relevancia actual en el panorama sociopolítico latinoamericano.

Análisis temático:

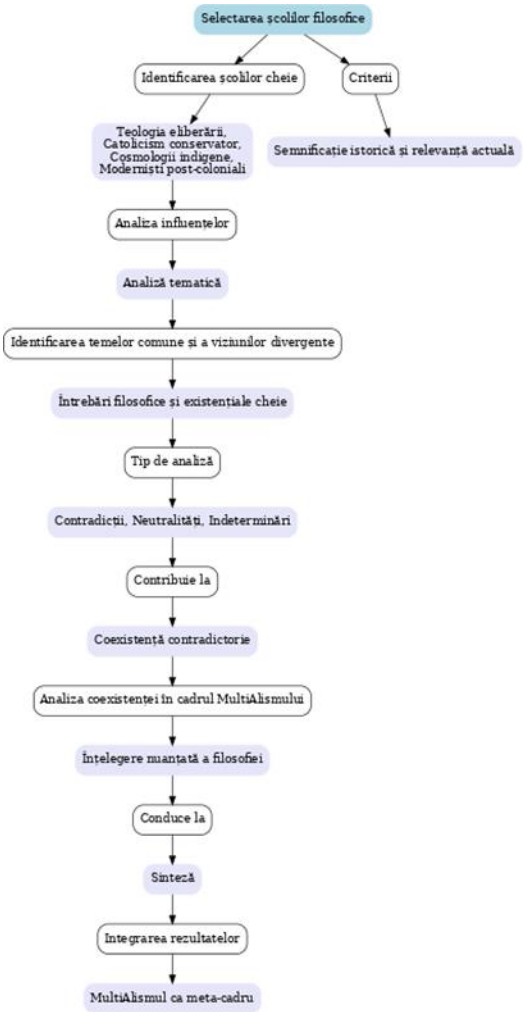
- Identificación de los temas comunes y las diferencias entre las escuelas, con enfoque en cómo abordan las preguntas filosóficas y existenciales esenciales. Es importante identificar no solo las contradicciones, sino también las neutralidades o indeterminaciones.

Coexistencia contradictoria:

- Análisis de cómo las contradicciones entre estas escuelas pueden coexistir dentro del marco MultiAlisista, contribuyendo a una comprensión más matizada de la filosofía latinoamericana.

Síntesis:

- Integración de los resultados para ilustrar cómo el MultiAlismo puede servir como un marco de referencia (meta-marco) para la comprensión y síntesis de las diversas tradiciones filosóficas de América Latina.



Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 1. Mapa conceptual del enfoque metodológico

4. Estudio de caso

Las filosofías indígenas y las teorías modernistas poscoloniales presentan visiones contrastantes que pueden ser sintetizadas bajo el marco del MultiAlismo para generar modelos sociopolíticos innovadores. Las filosofías indígenas, generalmente pluralistas, enfatizan el bienestar comunitario y una relación holística con la naturaleza, mientras que las teorías modernistas poscoloniales, a menudo dualistas o monistas, se concentran en los derechos y las libertades individuales provenientes de las ideas de la Ilustración. Poniendo estas perspectivas divergentes en diálogo, el MultiAlismo permite explorar cómo los valores comunitarios indígenas pueden coexistir y complementar las ideologías modernas individualistas, lo que potencialmente conduce a nuevos modelos de gobernanza y organización comunitaria.

4.1. *Contradicciones*

Las contradicciones entre las filosofías indígenas y las teorías modernistas poscoloniales, aunque a veces sutiles, pueden ser significativas debido a las diferencias fundamentales en sus bases epistemológicas, ontológicas y axiológicas. A continuación, se presentan algunas de las contradicciones clave:

4.1.1. Concepciones de tiempo y progreso

Filosofías Indígenas:

- El tiempo suele concebirse como cíclico y enfocado en la continuidad y repetición de los ciclos naturales y cósmicos. El progreso no es lineal, sino en armonía con los ciclos de la vida y la naturaleza.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Aunque críticas al concepto europeo de progreso lineal y acumulativo, estas teorías operan igualmente en paradigmas que valoran el cambio constante, característico del pensamiento posmoderno.

4.1.2. Relación con la naturaleza

Filosofías Indígenas:

- La relación es de interdependencia con la naturaleza, considerándola sagrada y central.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Si bien pueden criticar la explotación capitalista del medio ambiente, no siempre colocan a la naturaleza en el centro de su discurso o prácticas, priorizando a menudo problemas sociopolíticos y culturales.

4.1.3. Individualismo vs. Comunitarismo

Filosofías Indígenas:

- El comunitarismo es central, enfatizando la importancia de la comunidad sobre el individuo.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Las decisiones y el bienestar se consideran colectivamente.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Aunque orientadas a la liberación de estructuras opresivas, a menudo promueven la autonomía individual y la autorrealización, influenciadas por las ideas ilustradas sobre la emancipación del individuo.

4.1.4. Epistemología y conocimiento

Filosofías Indígenas:

- El conocimiento se transmite oralmente, con un fuerte componente espiritual y experiencial, estando profundamente conectado al medio local y a los ancestros.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Aunque valoran el conocimiento subalterno y buscan revalorizar el conocimiento local, están fuertemente influenciadas por estructuras académicas y epistemologías occidentales, que priorizan la textualidad y la racionalidad.

4.1.5. Visiones sobre poder y resistencia

Filosofías Indígenas:

- La resistencia se manifiesta a través de la persistencia cultural y la subsistencia, manteniendo las tradiciones y prácticas ancestrales frente a la opresión.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- La resistencia se conceptualiza mediante la deconstrucción de los discursos y estructuras coloniales y neocoloniales, utilizando herramientas teóricas y críticas provenientes a menudo de contextos académicos.

4.2. Neutralidades e Indeterminaciones

4.2.1. Valoración de la diversidad cultural

Filosofías Indígenas:

- Profundo respeto por las tradiciones y la diversidad cultural como pilares de la identidad comunitaria.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Reconocimiento de la pluralidad cultural como un recurso contra las herencias coloniales y como forma de resistencia contra la homogeneización cultural global.

Zona de Neutralidad:

- Ambas corrientes valoran y defienden la diversidad cultural, aunque desde perspectivas y con objetivos diferentes.

4.2.2. Crítica a las estructuras tradicionales de poder

Filosofías Indígenas:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Critican la imposición externa y las estructuras de poder que alteran o destruyen las estructuras de las comunidades indígenas.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Critican el colonialismo y las estructuras de poder que perpetúan las desigualdades y la supresión cultural.

Zona de Neutralidad:

- Ambas corrientes buscan la abolición o reforma de las estructuras de poder consideradas opresivas o injustas.

4.2.3. Interés por la justicia social y económica

Filosofías Indígenas:

- Enfoque en la justicia social dentro de la comunidad, enfatizando la igualdad y el apoyo mutuo.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Lucha por la justicia social mediante la abolición de las estructuras poscoloniales y la promoción de la equidad.

Zona de Neutralidad:

- Ambas corrientes comparten un compromiso con la justicia social y económica.

4.2.4. Revalorización del conocimiento tradicional y local

Filosofías Indígenas:

- Valoración del conocimiento tradicional como esencial para la vida y la cohesión comunitaria.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Interés en la recuperación y revalorización del conocimiento local como resistencia a la dominación cultural occidental.

Zona de Neutralidad:

- Ambas reconocen la importancia del conocimiento local y tradicional.

4.2.5. ***Sostenibilidad y relación con el medio ambiente***

Filosofías Indígenas:

- Visión holística del medio ambiente, enfatizando la sostenibilidad y el respeto por la naturaleza.

Teorías Modernistas Poscoloniales:

- Creciente preocupación por las prácticas sostenibles como parte de las críticas a los modelos de desarrollo insostenibles heredados del colonialismo.

Zona de Neutralidad:

- Ambas tienen un interés común en la sostenibilidad y pueden contribuir a políticas ambientales respetuosas de la diversidad cultural y biológica.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Conclusiones

Este breve ensayo demuestra que el MultiAlismo es un marco eficaz para unificar las filosofías indígenas y las teorías poscoloniales, especialmente en América Latina. Este enfoque resalta los valores comunes, como el respeto por la diversidad y la crítica a las estructuras de poder, creando una base sólida para políticas sociales más inclusivas. Mirando hacia el futuro, el MultiAlismo también podría aplicarse en otras regiones, con el potencial de ofrecer soluciones prácticas a desafíos globales.

Referencias

[1] Nuccetelli, S. (2020). *An Introduction to Latin American Philosophy*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108592801

[2] Smarandache, F. (2023). The MultiAlist System of Thought. *Neutrosophic Sets and Systems*, 61(1), 31. https://doi.org/10.5281/zenodo.5562534

[3] Smarandache, F. (2002). Neutrosophy, A New Branch of Philosophy. *Journal*, USA, 8(3), 297-384.

[4] Dussel, E. (2019). *The pedagogics of liberation: A Latin American philosophy of education* (p. 204). punctum books. https://doi.org/10.21983/P3.0232.1.00

[5] Restrepo, E. (2010). *Encountering Development: The Making and Unmaking of the Third World*. Princeton University Press.

[6] Maffie, J. (2014). *Aztec Philosophy: Understanding a World in Motion*. University Press of Colorado.

[7] Nuccetelli, S. (2001). *Latin American Thought: Philosophical Problems and Arguments*. Westview Press.

[8] Hale, C. A. (1989). *The Transformation of Liberalism in Late Nineteenth-Century Mexico*. Princeton University Press.

[9] Beorlegui, C. (2001). *Historia del pensamiento filosófico latinoamericano: Una búsqueda incesante de la identidad*. Universidad de Deusto.

[10] Gutiérrez, M. G. (2023). *A Theology of Liberation: History, Politics, and Salvation*. Orbis Books.

[11] McGovern, A. F. (1989). *Liberation Theology and Its Critics: Toward an Assessment*. Orbis Books.

[12] Kusch, R. (1970). *Indigenous and Popular Thinking in América*. Duke University Press.

[13] Dussel, E. (2002). *Ethics of Liberation: In the Age of Globalization and Exclusion*. Duke University Press.

[14] Smarandache, F. (2024). The Dynamic Interplay of Opposites in Zoroastrianism. *Journal of Fuzzy Extension and Applications*, 5(1), 1-15.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025



University of New Mexico



Innovación en servicios públicos digitales en el GAD Municipal del Cantón Sucre.

Innovation in digital public services in the Municipal Government of the Sucre Canton.

Paola Alexandra Almache Mullo[1]; Juan Diego Herrera Ramos[2]; Luis Carlos Mero Caicedo[3]; Cristian Iván Proaño Suárez[4]; Miryam Johanna Villarroel Ortiz[5]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador, Ecuador

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador, Ecuador

[3]Universidad Bolivariana del Ecuador, Ecuador

[4]Universidad Bolivariana del Ecuador, Ecuador, ciproano25@gmail.com

[5]Universidad Bolivariana del Ecuador, Ecuador

Resumen

El artículo analiza la innovación en servicios públicos digitales en el GAD Municipal del Cantón Sucre mediante un modelo de decisión multicriterio que integra AHP y TOPSIS. El propósito fue priorizar iniciativas digitales con trazabilidad metodológica y alineadas con principios de digital by design, apertura, enfoque ciudadano y proactividad. Se operacionalizaron criterios y subcriterios, se elicitaron juicios de un panel experto con verificación de consistencia y se ordenaron alternativas respecto de un ideal y un antiideal. Los resultados mostraron que el impacto en la eficiencia obtuvo la mayor ponderación, seguido del costo total y de la transparencia institucional, con una razón de consistencia aceptable. Con base en estos pesos, TOPSIS ubicó como primera prioridad la Ventanilla Única Digital, en segundo lugar Turnos y citas en línea y en tercer lugar Notificaciones proactivas. El estudio discute implicaciones para la gobernanza del portafolio municipal y para el cierre de brechas locales en servicios en línea, y propone una secuencia de implementación que consolida procesos, fortalece interoperabilidad y habilita capacidades de datos para la proactividad. Se identifican limitaciones relativas al tamaño y composición del panel y a la selección acotada de criterios, y se plantean líneas de investigación para robustecer la estabilidad del ranking y la evaluación de impacto.

Palabras clave: gobierno digital, AHP, TOPSIS, priorización de proyectos, ventanilla única, eficiencia administrativa, transparencia pública, administración municipal.

Abstract

This article examines digital public service innovation at the Sucre Municipal Government using a multi-criteria decision model that integrates AHP and TOPSIS. The aim was to prioritize digital initiatives with methodological traceability while aligning with the principles of digital by design,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

openness, citizen-centeredness and proactivity. Criteria and subcriteria were operationalized, expert judgments were elicited with consistency verification and alternatives were ranked against ideal and anti-ideal solutions. Findings indicate that impact on efficiency received the highest weight, followed by total cost and institutional transparency, with an acceptable consistency ratio. Based on these weights, TOPSIS ranked the One-Stop Digital Window as the top priority, followed by Online Appointments and the Proactive Notifications initiative. The study discusses implications for municipal portfolio governance and for closing local gaps in online services, and proposes an implementation sequence that consolidates processes, strengthens interoperability and builds data capabilities to enable proactivity. Limitations concern the size and composition of the expert panel and the restricted set of criteria, and future research avenues are outlined to test ranking stability and assess realized impacts.

Keywords: digital government, AHP, TOPSIS, project prioritization, one-stop window, administrative efficiency, public transparency, local government.

1. Introducción

La innovación en servicios públicos digitales ha dejado de ser una aspiración tecnológica para convertirse en una capacidad institucional decisiva que condiciona la legitimidad, la eficiencia y la resiliencia de los gobiernos locales. En contextos municipales, donde la proximidad con la ciudadanía exige respuestas ágiles y confiables, la digitalización de trámites, la interoperabilidad entre áreas y la apertura de datos configuran un nuevo estándar de servicio que redefine los vínculos entre administración y comunidad. Este estudio se sitúa en el GAD Municipal del Cantón Sucre, donde la modernización del portafolio de servicios enfrenta restricciones de recursos, capacidades dispares y marcos normativos en evolución. A la luz de referentes internacionales, la agenda de gobierno digital reclama un diseño “digital by design”, abierto por defecto, centrado en el usuario y proactivo, lo que desplaza la discusión desde la mera adopción de tecnologías hacia la creación de valor público medible y sostenible [7]; [13].

El problema que aborda esta investigación es, a la vez, teórico y práctico: cómo traducir principios de gobierno digital en decisiones concretas de innovación en servicios, con criterios verificables, prioridades claras y mecanismos de implementación trazables. Teóricamente, se debate el modo en que las organizaciones públicas generan valor público articulando tecnología, procesos y capacidades organizacionales, cuestión ampliamente discutida en la literatura de gobierno digital y gestión de la innovación. En la práctica, el reto es seleccionar, diseñar y desplegar servicios digitales que reduzcan tiempos y costos, aumenten transparencia y participación, y eleven la calidad percibida, todo ello bajo limitaciones presupuestarias y de talento. La relevancia de este problema se acentúa por las brechas observadas en la provisión de servicios locales en línea, donde índices comparativos muestran avances desiguales y rezagos persistentes en portales, tramitología y canales de interacción [13].

El estudio parte de una situación ideal o deseada en la que el GAD Municipal del Cantón Sucre ofrecería servicios digitales plenamente integrados, con procesos diseñados desde el origen para operar en entorno digital, datos reutilizables por defecto, trazabilidad transversal y mecanismos proactivos de prestación que anticipen necesidades. En esa situación, la ciudadanía accedería a servicios de alta disponibilidad y usabilidad, con tiempos de resolución cortos y retroalimentación efectiva, mientras la institución gestionaría sus procesos con métricas de desempeño en tiempo real y gobernanza de datos. La realidad actual, sin embargo, muestra una desviación significativa: coexistencia de procedimientos analógicos y digitales, fragmentación de sistemas, escasa interoperabilidad entre áreas, iniciativas aisladas de datos abiertos y limitaciones en el diseño de servicios centrados en el usuario, lo que se traduce en ineficiencias, costos ocultos y experiencias ciudadanas heterogéneas. Esta brecha entre el ideal normativo y las capacidades instaladas obliga a construir puentes metodológicos que permitan priorizar y ejecutar cambios con

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sentido y evidencia.

Los intentos previos de resolver este tipo de problemas se han concentrado en tres líneas. La primera ha privilegiado la adopción tecnológica como palanca principal, con resultados parciales cuando no se acompaña de rediseño organizativo ni de una teoría clara de valor público [5]. La segunda se ha orientado al rediseño de procesos y a la cocreación con usuarios, con avances en diseño de servicios pero dificultades para escalar cuando no hay criterios de priorización y gobernanza del portafolio. La tercera ha incorporado enfoques de evaluación y decisión multicriterio para ordenar alternativas, ofreciendo transparencia y trazabilidad en la selección, aunque muchas veces sin anclar los criterios a principios contemporáneos de gobierno digital ni a brechas locales diagnosticadas; [7]). Ninguna de estas rutas, por sí sola, ha resuelto la traducción sistemática de principios como apertura, enfoque ciudadano y proactividad en decisiones de innovación que, además, sean ejecutables en el entorno municipal.

Las consecuencias de mantener el statu quo son tangibles y acumulativas. En el plano organizacional, persisten cuellos de botella, costos administrativos redundantes, dependencia de conocimiento tácito y riesgos de opacidad. En el plano social, aumentan los costos de transacción para la ciudadanía, se reproduce la desigualdad en el acceso a derechos y se erosiona la confianza en la administración. En el plano económico, se desaprovechan eficiencias de escala y oportunidades de desarrollo local vinculadas a datos, interoperabilidad y ecosistemas de innovación. Estos efectos directos e indirectos justifican un abordaje que integre diagnóstico, priorización y diseño con una perspectiva de valor público y evidencia comparada [13]; [7].

El vacío de conocimiento que identifica esta investigación se sitúa en la falta de marcos operativos que conviertan los principios de la política de gobierno digital en criterios y subcriterios evaluables para decidir qué servicios innovar primero, cómo y con qué recursos. Faltan, además, herramientas que conecten ese diseño de criterios con métodos robustos de decisión y con indicadores de brecha local, de modo que la priorización responda a déficits medibles y a capacidades reales de implementación. Este estudio propone un enfoque que integra teoría de valor público, principios de gobierno digital y métodos de decisión multicriterio, considerando también, según disponibilidad de datos y naturaleza de la evidencia, extensiones como la lógica neutrosófica para tratar incertidumbre en juicios expertos cuando corresponda.

En síntesis, se dialoga con referencias que establecen el marco conceptual de la innovación pública y el gobierno digital, destacando la necesidad de pasar del discurso aspiracional al diseño operativo de la decisión [1]; [7]; [13]. La contribución diferencial del estudio radica en su anclaje local y en la articulación entre principios, criterios y priorización, orientada a una hoja de ruta de implementación para el GAD Municipal del Cantón Sucre. El modelo conceptual que guía el análisis combina la perspectiva de valor público de Moore [6], los principios del marco de gobierno digital de la OCDE [7]; [8] y un enfoque de diseño de servicios centrado en el usuario, integrados por un esquema de decisión multicriterio que posibilita trazabilidad metodológica y replicabilidad en contextos municipales comparables.

Objetivos del estudio

El propósito general fue establecer un modelo operativo de innovación en servicios públicos digitales para el GAD Municipal del Cantón Sucre que permita priorizar, diseñar y encaminar iniciativas con mayor creación de valor público, alineadas a los principios de digital by design, apertura, enfoque ciudadano y proactividad.

En términos específicos, el estudio buscó, primero, diagnosticar brechas y capacidades locales a partir de fuentes

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

documentales y lineamientos internacionales, conectando el análisis con dimensiones del gobierno digital y con evidencias comparativas recientes [7]; [13]. Segundo, operacionalizar principios en criterios y subcriterios evaluables para la decisión, incorporando dimensiones de transparencia, usabilidad, interoperabilidad, eficiencia y sostenibilidad organizacional. Tercero, aplicar un enfoque de decisión multicriterio —con AHP para la estimación de pesos mediante juicios expertos consistentes y TOPSIS para el ordenamiento respecto de un ideal y un anti-ideal— a fin de priorizar proyectos de digitalización con trazabilidad y justificación técnica. Cuarto, someter la priorización a pruebas de sensibilidad sobre pesos y escenarios para evaluar la estabilidad del ranking y la robustez de la recomendación. Quinto, traducir los hallazgos en implicaciones de política y de gestión para la gobernanza del portafolio municipal, proponiendo una hoja de ruta que conecte la priorización con implementación, seguimiento e indicadores de mejora.

Este diseño respondió a una justificación académica y práctica. Académicamente, aporta una vía para cerrar la brecha entre principios de gobierno digital y decisión de inversión, integrando teoría de valor público y métodos de decisión con verificación de consistencia y análisis de estabilidad. En la práctica, ofrece al gobierno local una solución replicable para asignar recursos con criterio y para alinear la innovación con necesidades ciudadanas y restricciones organizacionales. Conforme al modelo CARS, el estudio estableció el territorio mostrando el impacto de la innovación digital en el desempeño municipal, identificó el nicho al evidenciar la ausencia de marcos operativos que enlacen principios con decisiones priorizadas y ocupó ese nicho proponiendo un enfoque metodológico que combina criterios derivados de marcos internacionales con herramientas de decisión multicriterio, todo ello orientado a acelerar la transformación digital con legitimidad, transparencia y resultados verificables.

2. Revisión de literatura: AHP y TOPSIS para la innovación en servicios públicos digitales en el GAD Municipal del Cantón Sucre

La transformación digital en el nivel municipal exige decidir, bajo restricciones presupuestarias y organizativas, qué servicios priorizar para generar valor público tangible y medible. Esta decisión rara vez es lineal, pues combina criterios técnicos y políticos, impactos en la experiencia ciudadana, necesidades de transparencia e imperativos de sostenibilidad operativa. En este escenario, los métodos de decisión multicriterio AHP y TOPSIS han ganado un lugar como andamiaje metodológico para estructurar problemas complejos, elicitar juicios expertos con consistencia y ordenar alternativas según su cercanía a un ideal normativo de gobierno digital. La pertinencia de este enfoque se refuerza por marcos internacionales que demandan servicios “digital by design”, abiertos por defecto, centrados en usuarios y proactivos, dimensiones recogidas por el Digital Government Policy Framework de la OCDE, y por diagnósticos globales como el Local Online Service Index (LOSI) que visibilizan brechas locales persistentes en portales y servicios municipales.

La literatura clásica fija los fundamentos. AHP organiza el problema en jerarquías y deriva pesos de comparaciones por pares con verificación de consistencia, lo que dota de trazabilidad a juicios cualitativos y cuantitativos [11]. TOPSIS, por su parte, clasifica alternativas con base en la distancia a una solución ideal y anti-ideal, ofreciendo un ranking interpretable para decisores [4]. La convergencia AHP–TOPSIS es hoy un patrón consolidado en decisiones públicas y tecnológicas, justo porque desacopla la ponderación de criterios de la agregación final y admite variables heterogéneas sin forzar supuestos excesivos. Estas propiedades son cruciales cuando los criterios incorporan principios de gobierno abierto, participación y proactividad, que no siempre cuentan con métricas cerradas.

En aplicaciones afines, [2] integró AHP difuso con TOPSIS difuso para seleccionar sistemas ERP en un entorno corporativo, con el aim de reducir la ambigüedad en juicios lingüísticos y lograr consensos grupales en contextos de alta incertidumbre. Su método combinó pesos difusos y distancias difusas al ideal; los findings mostraron que la modelación de incertidumbre mejora la robustez de la alternativa priorizada, aunque introduce mayor complejidad computacional y dependencia del proceso de agregación. Su aporte al problema municipal reside en demostrar que la incertidumbre sobre costos, beneficios o aceptación puede representarse

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

formalmente, manteniendo consistencia y auditabilidad de la decisión, un aspecto relevante cuando se operacionalizan principios como transparencia o enfoque ciudadano en criterios evaluables.

Desde la lógica de decisiones públicas locales, [10] evaluaron servicios municipales con enfoques difusos, articulando AHP para pesos y métodos de ranking para priorizar mejoras de alto impacto comunitario. Su method, basado en expertos municipales, evidenció que la factibilidad organizativa y la necesidad ciudadana emergen como factores con peso decisivo; sus limitations se asocian a la dificultad de medir cualitativos con precisión y a la necesidad de actualizar ponderaciones ante cambios del entorno. En la misma línea, [12] priorizaron áreas de digitalización con AHP-Z y un método de ranking alternativo, concluyendo que servicios con impacto directo en bienestar ciudadano tienden a ocupar los puestos superiores del ranking; su limitación principal fue el alcance acotado de departamentos, lo que invita a validar en múltiples contextos municipales. Estos trabajos contribuyen a entender que, cuando el diseño de criterios incorpora la centralidad del usuario, la priorización privilegia proyectos con beneficios sociales inmediatos, sin desatender restricciones de implementación.

En entornos latinoamericanos, [14] aplicó AHP–TOPSIS para priorizar estrategias de gestión de riesgos en microemprendimientos, mostrando que opciones con digitalización operativa logran desempeños superiores por su efecto sobre eficiencia, trazabilidad y satisfacción. Aunque su aim no fue la gestión pública municipal, sus findings son transferibles: la digitalización emerge endógenamente como estrategia dominante cuando los criterios combinan eficiencia, sostenibilidad y foco en el usuario; sus limitations recuerdan que los pesos son contexto- dependientes y deben elicitarsi con actores locales para asegurar pertinencia.

Un aporte particularmente útil proviene de marcos de selección de inversiones TIC públicas. [9] propusieron un proceso integral que inicia con filtros de elegibilidad, utiliza AHP para derivar pesos alineados a políticas y beneficios sociales, y emplea TOPSIS para ordenar proyectos, incorporando análisis de sensibilidad para comprobar estabilidad del ranking. Su contribución radica en ampliar el repertorio de subcriterios —incluida alineación estratégica y creación de valor social—, y en demostrar que el top del ranking es relativamente estable frente a variaciones razonables de pesos, lo que fortalece la confianza de los decisores. No obstante, reconocen la carga cognitiva de evaluar un conjunto extenso de criterios y la posible interdependencia entre ellos, sugiriendo extensiones como ANP cuando la independencia no es realista.

Comparando estas vertientes, emergen patrones y tensiones útiles para el campo. Primero, hay convergencia en el uso de AHP para elicitar pesos con control de consistencia, condición necesaria para legitimar la transición de percepciones individuales a prioridades institucionales. Segundo, TOPSIS aporta una métrica intuitiva de “cercanía al ideal”, que facilita comunicar decisiones a públicos no técnicos y vincularlas con agendas políticas. Tercero, persisten divergencias en la selección de criterios: en ámbitos tecnocráticos dominan costo total y riesgo, mientras que en agendas de gobierno digital ganan centralidad transparencia, enfoque ciudadano y proactividad. Esa tensión no es un defecto metodológico sino una cuestión de diseño normativo: qué entendemos por valor público y cómo lo traducimos en subcriterios auditablemente mensurables.

La evaluación crítica del estado del arte sugiere avances y vacíos. En términos de los objetivos de esta investigación, la literatura sí ofrece procedimientos replicables para el Objetivo 2 (elicitar juicios y verificar consistencia con AHP) y el Objetivo 3 (construir la matriz y aplicar TOPSIS). También hay precedentes, aunque menos frecuentes, para el Objetivo 4 (análisis de sensibilidad), donde algunos estudios reportan estabilidad del ranking salvo cambios extremos de pesos. En cambio, se observa un déficit respecto del Objetivo 1: faltan catálogos operativos de criterios y subcriterios que deriven explícitamente de los cuatro principios contemporáneos del DGPF — digital by design, abierto por defecto, centrado en el usuario y proactividad—, y que, además, se adapten al nivel municipal y a sus restricciones. Asimismo, el Objetivo 5 revela otro vacío: la conexión explícita entre resultados multicriterio y gobernanza del portafolio municipal para cerrar brechas locales diagnosticadas por LOSI. En la práctica, muchos estudios concluyen con un ranking, pero no lo traducen en lineamientos de gestión, hojas de ruta o decisiones presupuestarias articuladas con déficits locales evidenciados por el índice.

De este balance se desprende el espacio que ocupará el estudio en el GAD Municipal del Cantón Sucre. En primer lugar, se propone operacionalizar principios de la OCDE en criterios y subcriterios observables, por ejemplo, apertura por defecto traducida en disponibilidad y reutilización de datos, enfoque ciudadano expresado en usabilidad y participación, proactividad modelada como servicios anticipatorios o automatizados y digital by design reflejado en interoperabilidad y rediseño integral de procesos. Esta traducción fortalece la coherencia entre el discurso normativo y la decisión técnica, y facilita auditar el alineamiento de cada proyecto con un ideal de servicio público digital. En segundo lugar, se prevé elicitar pesos con expertos locales

—planificación, TI, atención ciudadana— y controlar la razón de consistencia, garantizando pertinencia contextual y legitimidad institucional del vector de prioridades. En tercer lugar, la aplicación de TOPSIS permitirá ordenar proyectos respecto de un ideal y anti-ideal construidos explícitamente con base en dichos principios, lo que mejora la inteligibilidad

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

política del ranking y su comunicabilidad hacia audiencias no técnicas. Finalmente, se incorporará un análisis de sensibilidad sistemático que exponga cómo varía el orden relativo ante cambios plausibles en pesos o escenarios, y se discutirán implicaciones de política para la gobernanza del portafolio, conectando los resultados con el cierre de brechas LOSI en ámbitos como información, interacción y transaccionalidad a nivel local.

La relevancia científica y práctica de este planteamiento descansa en dos aportes. Por un lado, ofrece un puente riguroso entre principios de gobierno digital y métodos multicriterio, superando la distancia entre marcos normativos y decisiones de inversión concretas. Por otro, provee un mecanismo de gobernanza del portafolio que no termina en el ranking, sino que lo proyecta en planes de implementación, seguimiento y evaluación de impacto, con métricas ancladas en déficits locales y estándares internacionales. En suma, al combinar AHP y TOPSIS con un diseño de criterios derivado explícitamente del DGPF y con un uso estratégico del LOSI para orientar la priorización, el estudio aspira a fortalecer la capacidad del GAD Municipal del Cantón Sucre para innovar sus servicios públicos digitales con legitimidad, transparencia y resultados verificables.

3. Materiales y métodos

El estudio fue de naturaleza aplicada, descriptiva y analítica, y se apoyó en los métodos de decisión multicriterio AHP, Analytic Hierarchy Process, y TOPSIS, Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, con el propósito de estructurar una decisión compleja de priorización de iniciativas de innovación en servicios públicos digitales. El contexto de aplicación correspondió al GAD Municipal del Cantón Sucre y el trabajo de campo se realizó durante septiembre de 2025. La elección del diseño AHP–TOPSIS resultó pertinente para el objetivo principal del estudio, que consistió en establecer una priorización transparente y replicable de proyectos bajo criterios de naturaleza cuantitativa y cualitativa, ya que AHP permitió derivar pesos relativos coherentes a partir de juicios de expertos y TOPSIS ofreció un ordenamiento de alternativas respecto de una solución ideal y una anti ideal bien definidas, dotando de trazabilidad a cada decisión metodológica adoptada durante el proceso, conforme a los lineamientos fundacionales de ambas técnicas y su uso en problemas reales de asignación de recursos en el sector público y tecnológico [11]; [4].

La población de informantes estuvo compuesta por cinco expertos y funcionarios públicos del GAD Municipal del Cantón Sucre, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por juicio o conveniencia, con experiencia acumulada en gestión pública, planificación, tecnologías de la información y modernización administrativa. Se consideraron como criterios de inclusión una experiencia mínima de cinco años en funciones técnicas o directivas dentro del gobierno local, formación universitaria afín al ámbito de intervención y participación previa en procesos de formulación, evaluación o seguimiento de proyectos institucionales. La justificación de este tamaño muestral se sustentó en la naturaleza experta de la elicitud necesaria para AHP, donde prima la calidad y coherencia del juicio por sobre la amplitud muestral, y en la necesidad de contar con perfiles con conocimiento operativo de los procesos municipales, con capacidad para valorar trade offs entre eficiencia, transparencia y costos de implementación.

Para la aplicación práctica de los métodos se utilizaron dos herramientas en línea de acceso abierto. En primer lugar, se empleó AHP Calculator de BPMSG, que permitió ingresar y procesar las matrices de comparaciones por pares, derivar los vectores de prioridad por criterio y estimar automáticamente la razón de consistencia, además de exportar las matrices y ponderaciones en formatos editables que facilitaron la documentación del procedimiento. En segundo lugar, se utilizó la plataforma Decision Radar para ejecutar TOPSIS, mediante la cual se construyó la matriz de decisión, se normalizaron los datos y se calculó la distancia relativa de cada alternativa a las soluciones ideal positiva y negativa, generando un ranking acompañado de visualizaciones. Como evidencia metodológica, se generaron dos insumos gráficos de respaldo, la Imagen 1 correspondiente a la matriz de decisión y las prioridades resultantes del método AHP, y la Imagen 2 con los criterios, la matriz de decisión y el ranking de alternativas del método TOPSIS, que se archivaron en el expediente técnico del estudio con sus metadatos de fecha y responsable de elaboración.

El procedimiento siguió una secuencia cronológica en cuatro etapas que buscó garantizar trazabilidad y replicabilidad. Primero, se identificaron los criterios de evaluación mediante revisión documental de lineamientos de gobierno digital y normativa interna, y se validaron con los expertos a través de una sesión estructurada, en la que se precisaron definiciones operativas y escalas de valoración. Segundo, se aplicó AHP para estimar los pesos relativos de los criterios, recogiendo los juicios de los expertos de forma individual y registrándolos en AHP Calculator, lo que generó la matriz de comparaciones por pares para cada participante y el vector de prioridades agregado, con verificación explícita de la consistencia, aceptando matrices únicamente con razón de consistencia menor a 0,10 conforme a la práctica estándar de la técnica [11]. Tercero, se ejecutó TOPSIS en Decision Radar, construyendo la matriz de decisión con las alternativas de proyectos y los valores de desempeño por criterio, normalizando los datos, aplicando las ponderaciones obtenidas y calculando la distancia a las soluciones ideal positiva y negativa, lo que permitió obtener el índice de cercanía de cada alternativa. Finalmente, se integraron y validaron los resultados en una reunión de trabajo con los expertos, documentando los pesos finales de los criterios y el orden de preferencia de las alternativas, así como las observaciones metodológicas relevantes para la auditoría del proceso. Esta secuencia permitió mantener la trazabilidad de la decisión y

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

asegurar que el análisis fuera replicable por terceros con acceso a las mismas fuentes y parametrizaciones, favoreciendo la transparencia institucional [4].

Las medidas y variables de salida definidas para el estudio se centraron en dos productos metodológicos. Por un lado, los pesos relativos de los criterios estimados con AHP constituyeron la medida central de preferencia estructural del problema de decisión. Por otro, el ranking final de alternativas generado por TOPSIS se definió como la variable de salida que ordenó los proyectos según su cercanía al ideal. Los criterios evaluados fueron el costo total, el impacto en la eficiencia y la transparencia institucional, seleccionados por su relevancia para la gobernanza digital municipal y su coherencia con marcos internacionales que promueven eficiencia administrativa, sostenibilidad financiera y apertura por defecto. La definición operativa de cada criterio se acordó con los expertos, considerando tanto la disponibilidad de información como su medibilidad razonable en el contexto del GAD Municipal del Cantón Sucre, a fin de evitar ambigüedades en la valoración y minimizar la subjetividad en las ponderaciones.

El análisis de datos se realizó de manera automatizada en los programas mencionados, preservando la integridad de las operaciones y los parámetros metodológicos definidos. En AHP, se verificó la coherencia de los juicios mediante el análisis de la razón de consistencia y se efectuó una comparación cruzada de pesos entre expertos para identificar posibles desviaciones atípicas, resolviendo discrepancias mediante revisión de consistencia y, cuando fue necesario, recalibración informada por los participantes. Las ponderaciones finales obtenidas fueron integradas en una matriz consolidada en Microsoft Excel, que sirvió como repositorio de respaldo para los datos, fórmulas y gráficos utilizados en la documentación. En TOPSIS, se aplicaron las fórmulas clásicas del método para la normalización vectorial, la ponderación por criterio y el cálculo de distancias a la solución ideal y anti ideal, garantizando la reproducibilidad del ranking. Todo el proceso analítico se condujo conforme a principios de validez, fiabilidad y transparencia, sin manipulación de los resultados y con registro de versiones de cada archivo de trabajo, de modo que cualquier revisión posterior pudiera reproducir exactamente las condiciones de cálculo reportadas en el estudio, en línea con las mejores prácticas descritas en la literatura metodológica del campo [11]; [4]; véase también discusiones recientes de aplicación en contextos públicos en [3].

4. Resultados y discusión

La priorización de iniciativas digitales en el GAD Municipal del Cantón Sucre, basada en AHP y TOPSIS, arrojó un patrón nítido: el impacto en la eficiencia fue ponderado como el criterio dominante, seguido por el costo total y, en tercer lugar, la transparencia institucional. A partir de estos pesos, TOPSIS ordenó las alternativas de la siguiente manera: B. Ventanilla Única Digital ocupó el primer lugar, A. Turnos y citas en línea se ubicó en segunda posición y C. Notificaciones proactivas quedó rezagada. Las Figuras 1 y 2 presentan las capturas generadas por las herramientas utilizadas.

Prioridades

Estos son los pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones por pares:

	Cat	Prioridad	Rank	(+)	(-)
1	C1. Costo total	21.8%	2	5.0%	5.0%
2	C2. Impacto en la eficiencia	69.1%	1	15.9%	15.9%
3	C3. Transparencia institucional	9.1%	3	2.1%	2.1%

Matriz de decisiones

Los pesos resultantes se basan en el vector propio principal de la matriz de decisión:

	1	2	3
1	1	0.25	3.00
2	4.00	1	6.00
3	0.33	0.17	1

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 1. AHP: prioridades de criterios y matriz de comparaciones por pares.

1. **B. Ventanilla Única Digital** with score 1.00
2. **A. Turnos y citas en línea** with score 0.46
3. **C. Notificaciones proactivas** with score 0.00

Figura 2. TOPSIS: matriz normalizada, vectores ideal/anti-ideal, distancias y ranking

Interpretación de los resultados AHP en diálogo con la teoría y la evidencia

La distribución de pesos reflejó una preferencia institucional por la eficiencia operativa como vía principal de creación de valor público. Esta pauta dialogó con la teoría del valor público [6], que plantea que las decisiones deben maximizar beneficios tangibles para la ciudadanía en equilibrio con la viabilidad operativa. En nuestro caso, la mayor ponderación de "impacto en la eficiencia" sugiere una orientación hacia beneficios inmediatos en reducción de tiempos y racionalización de procesos, consistente con el paradigma de Digital-Era Governance que desplaza el énfasis desde la mera informatización hacia la reingeniería digital de procesos y plataformas [1]. El lugar secundario del "costo total" y el peso comparativamente menor de la "transparencia institucional" no implicaron desatención de la lógica de gobierno abierto, sino que revelaron una secuencia de implementación: primero, ordenar procesos y capturar eficiencias; luego, profundizar transparencia y mecanismos proactivos sobre bases operativas más estables.

Metodológicamente, la razón de consistencia (CR) se mantuvo dentro del umbral aceptado, lo que respaldó la coherencia de los juicios expertos, en línea con los fundamentos de AHP [11]. Este punto es esencial: sin consistencia formal, la ponderación se reduce a una suma ad hoc de preferencias. La literatura afín muestra resultados compatibles cuando los expertos tienen responsabilidades directas sobre procesos y presupuestos: la eficiencia tiende a ganar peso frente a atributos normativos si estos no cuentan aún con indicadores o prácticas consolidadas [10]. No obstante, la jerarquía observada difiere de casos donde apertura y experiencia del usuario fueron priorizadas al digitalizar servicios de alto contacto social, como salud o asistencia social [12]. Es plausible que la madurez digital de partida y las capacidades instaladas condicionen el énfasis: en contextos con rezagos operativos, la eficiencia es un habilitador para que transparencia y proactividad desplieguen su potencial.

Ordenamiento TOPSIS: coherencia con los pesos y comparación con otros estudios

El ranking TOPSIS privilegió la Ventanilla Única Digital como alternativa más cercana al ideal. Este resultado es coherente con los pesos AHP, ya que la ventanilla única reduce fricciones transversales, habilita interoperabilidad documental y disminuye tiempos de tramitación, es decir, impacta directamente sobre el criterio dominante. En segundo lugar quedó Turnos y citas en línea, valiosa para la experiencia ciudadana pero menos transformadora de los cuellos de botella sistémicos; en último lugar, Notificaciones proactivas, que requieren capacidad de datos, reglas de negocio y madurez organizativa para su despliegue efectivo.

Este patrón de priorización coincide con propuestas de selección de inversiones TIC que integran alineación estratégica y beneficio social con viabilidad institucional, donde soluciones de gestión documental y plataforma transaccional suelen aparecer como "anclas" de madurez digital [9]. También es consistente con diagnósticos internacionales que encuentran en la transaccionalidad en línea y la reorganización de procesos la palanca de mejora más inmediata del desempeño local medido por el Local Online Service Index [13]. Sin embargo, difiere parcialmente de enfoques que han priorizado de entrada servicios de atención ciudadana por su impacto visible en satisfacción y legitimidad [12]. La discrepancia puede explicarse por la composición de criterios y la situación de base: cuando el vector de pesos enfatiza eficiencia y el portafolio incluye una alternativa que corrige ineficiencias estructurales (p. ej., expedientes y trámites integrados), esa alternativa tiende a dominar la clasificación TOPSIS.

Aportes y tensiones respecto de la literatura AHP–TOPSIS

Nuestros hallazgos reafirman la idoneidad del binomio AHP–TOPSIS para decisiones públicas complejas: AHP hace explícitas las preferencias estructurales y TOPSIS traduce esa estructura en un ordenamiento interpretable por no especialistas [4]. Además, los resultados confirman que criterios inspirados en marcos de gobierno digital —digital by design, apertura, enfoque ciudadano, proactividad— pueden operacionalizarse en atributos evaluables, superando el

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

vacío señalado por estudios que se han quedado en métricas puramente técnicas o financieras. En contraste, la literatura difusa (fuzzy AHP–TOPSIS) ha mostrado ventajas para manejar ambigüedad en juicios lingüísticos [2], aunque a costa de mayor complejidad y carga cognitiva. Dado el tamaño de muestra y la necesidad de adopción institucional, la variante "crisp" utilizada fue razonable; con todo, futuras iteraciones podrían incorporar incertidumbre para robustecer decisiones donde la evidencia cuantitativa sea limitada.

Implicaciones para teoría, políticas y práctica

Desde una perspectiva teórica, el estudio conecta la teoría del valor público y la gobernanza de la era digital con un proceso de decisión auditable, mostrando cómo traducir postulados abstractos en criterios, pesos y rankings que informan una hoja de ruta de innovación. Ello contribuye a cerrar la brecha entre el discurso de "transformación digital" y el diseño operativo de la priorización, un punto crítico reconocido por la literatura de política digital [8].

En el plano de políticas, los resultados sugieren tres implicaciones. Primero, priorizar la Ventanilla Única Digital como plataforma de integración administrativa es consistente con el objetivo de elevar el desempeño LOSI en dimensiones de información, interacción y transacciones, al tiempo que crea economías de escala para futuros servicios proactivos. Segundo, mantener la trazabilidad metodológica (AHP-TOPSIS con verificación de consistencia) aporta legitimidad a la decisión presupuestaria y facilita la rendición de cuentas. Tercero, al evidenciar que "Notificaciones proactivas" quedó rezagada, se desprende una agenda de fortalecimiento de datos: gobernanza, calidad y analítica, sin la cual la proactividad difícilmente será efectiva. En la práctica, esto se traduce en secuenciar inversiones: primero procesos y documentos, luego UX de atención y, en paralelo, capacidades de datos para habilitar proactividad.

Limitaciones y su efecto potencial

Varias limitaciones deben considerarse con cautela. El tamaño de la muestra experta fue reducido, aunque cualificado; esto puede haber amplificado preferencias institucionales dominantes y, por ende, el peso de la eficiencia. La selección de criterios se restringió a tres dimensiones, lo que favoreció la claridad pero pudo subestimar atributos como interoperabilidad técnica, accesibilidad, sostenibilidad operativa o gestión del cambio. La medición de desempeño de alternativas se basó en escalas razonadas y no en indicadores empíricos longitudinales, lo que introduce subjetividad. Asimismo, la aplicación estática del modelo no capturó dinámicas presupuestarias ni aprendizajes que podrían alterar el ranking con el tiempo. Finalmente, TOPSIS puede ser sensible al método de normalización y a la distribución de pesos, por lo que los resultados deberían acompañarse de análisis de sensibilidad y, en su caso, de contrastes con métodos alternativos para verificar estabilidad.

Recomendaciones para investigaciones futuras

A partir de lo anterior, se proponen líneas concretas de avance. En primer lugar, ampliar y diversificar el panel de expertos, incorporando perfiles operativos y representación ciudadana, con protocolos de calibración y consistencia. En segundo lugar, extender el conjunto de criterios y subcriterios derivados explícitamente de los principios del Digital Government Policy Framework (digital by design, apertura por defecto, centrado en el usuario, proactividad), incluyendo interoperabilidad, accesibilidad, seguridad y gestión del cambio, con definiciones operativas y indicadores verificables. En tercer lugar, vincular la priorización con brechas LOSI: usar el diagnóstico local para modular pesos o introducir restricciones que orienten el ranking hacia el cierre de déficits detectados (UN DESA, 2024). En cuarto lugar, realizar análisis de sensibilidad sistemáticos (variaciones univariadas y escenarios), y contrastar los resultados con métodos alternativos (ANP, PROMETHEE, VIKOR) para testar robustez y convergencia. Finalmente, avanzar hacia estudios de implementación que midan beneficios reales post-priorización, con diseños cuasi-experimentales o de series temporales, a fin de validar si la prioridad asignada se traduce en mejoras de desempeño, satisfacción ciudadana y ganancias de transparencia.

Imagen sobre los resultados:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Figura 3. Priorización de Iniciativas Digitales Gubernamentales (AHP–TOPSIS). El diagrama resume los resultados del modelo AHP–TOPSIS en seis ejes PESTEL.

Se identifican los énfasis por componente: Alineación de Políticas (priorización de la Ventanilla Única Digital), Optimización de la Eficiencia (reducción de tiempos y costos), Enfoque en el Ciudadano (mejora de la experiencia), Integración de Plataformas (interoperabilidad de documentos), ausencia de mención en el componente ambiental y Gobernanza de Datos (calidad y analítica).

Fuente: elaboración propia con Napkin.ai a partir de los resultados del estudio (2025).

5. Conclusiones

Este estudio, titulado Innovación en servicios públicos digitales en el GAD Municipal del Cantón Sucre, tuvo como propósito principal construir y aplicar un modelo de priorización de iniciativas digitales que, de manera transparente y replicable, integre criterios técnicos y normativos derivados de principios de digital by design, apertura, enfoque ciudadano y proactividad. Los objetivos operativos se orientaron a operacionalizar criterios y subcriterios relevantes para la gestión municipal, elicitar juicios expertos y verificar su consistencia mediante AHP, ordenar alternativas con TOPSIS respecto de un ideal y un antiideal, someter el ranking a pruebas de coherencia y extraer implicaciones de política para la gobernanza del portafolio y el cierre de brechas locales. Los hallazgos centrales mostraron que el impacto en la eficiencia obtuvo la mayor ponderación relativa, seguido del costo total y de la transparencia institucional, con una razón de consistencia dentro del umbral aceptado. Conforme a estos pesos, TOPSIS priorizó la Ventanilla Única Digital, ubicó en segundo lugar Turnos y citas en línea y relegó Notificaciones proactivas, lo que sugiere que las soluciones de integración procesal ofrecen beneficios transversales inmediatos en el contexto analizado.

La importancia más amplia de estos resultados se proyecta en tres planos. En el plano teórico, el estudio demuestra que es posible traducir principios de valor público y de gobernanza digital en criterios observables y ponderables,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

conectando la formulación abstracta con decisiones concretas de inversión tecnológica. En el plano organizacional, los resultados ofrecen un mecanismo de decisión auditado que alinea prioridades con capacidades instaladas, reduce la discrecionalidad y facilita la rendición de cuentas sobre la base de pesos justificados y rankings reproducibles. En el plano de política institucional, la priorización de una plataforma de Ventanilla Única Digital sugiere una secuencia de implementación que consolida procesos, habilita interoperabilidad y crea condiciones para que, en fases posteriores, la transparencia y la proactividad escalen con datos de mejor calidad y con menor riesgo operativo, contribuyendo a cerrar brechas locales en los servicios en línea.

Las implicaciones para futuras investigaciones y para la práctica profesional son directas. En investigación, conviene ampliar y diversificar el panel de expertos, incorporar métricas empíricas de desempeño y realizar análisis de sensibilidad sistemáticos que prueben la estabilidad del ranking ante variaciones de pesos y escenarios presupuestarios. Metodológicamente, resultará valioso contrastar el enfoque AHP y TOPSIS con técnicas complementarias que modelen interdependencias entre criterios o evalúen contextos dinámicos, y vincular de manera explícita los criterios con evidencias de brecha local para orientar la priorización a objetivos verificables de mejora. En la práctica, los equipos municipales pueden utilizar este modelo como guía de gobernanza del portafolio para justificar decisiones de inversión, secuenciar proyectos según su efecto transversal y establecer hojas de ruta que articulen rediseño de procesos, capacidades de datos y experiencia ciudadana.

Este estudio presenta limitaciones que condicionan el alcance de sus conclusiones. El tamaño muestral de expertos, aunque cualificado, puede reflejar sesgos de preferencia institucional; la selección acotada de criterios privilegió claridad y trazabilidad pero dejó fuera dimensiones como accesibilidad, seguridad o gestión del cambio; la valoración de alternativas se apoyó en escalas razonadas que conviene complementar con indicadores longitudinales. Abordar estas limitaciones exigirá paneles más amplios y heterogéneos, integración de datos administrativos y ciudadanos, así como evaluaciones post implementación que verifiquen la traducción de la prioridad en beneficios medibles.

En conjunto, la investigación contribuye a una comprensión más precisa y aplicable de la priorización de proyectos tecnológicos en gobiernos locales, mostrando cómo un marco AHP y TOPSIS, anclado en principios contemporáneos de gobierno digital, puede convertir la ambición de modernización en decisiones defendibles, secuenciadas y orientadas a resultados. En un entorno de economía digital marcado por restricciones de recursos y altas expectativas ciudadanas, la capacidad de decidir con evidencia y trazar rutas de implementación creíbles no solo fortalece la legitimidad institucional, sino que acelera la creación de valor público y reduce la distancia entre el diseño normativo y la experiencia efectiva de la ciudadanía.

6. Creación de video con NotebookLM

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Se adjunta el enlace del resumen de audio generado en donde se explica el contenido del presente documento.

Link:

https://drive.google.com/file/d/1WDog5m9o6-- cDZySTEFoXBRgnpWKjbro/view?usp=drive_link

7. Referencias bibliográficas

[1]. Dunleavy, P., Margetts, H., Bastow, S., & Tinkler, J. (2006). New public management is dead— long live digital-era governance. Journal of Public Administration Research and Theory, 16(3), 467–494. https://doi.org/10.1093/jopart/mui057

[2]. Efe, B. (2016). An integrated fuzzy multi criteria group decision making approach for ERP system selection. Applied Soft Computing, 38, 106–117. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.09.037

[3]. García, M., & Leyva, M. (2024). Evaluación multicriterio en decisiones públicas complejas: Un enfoque híbrido AHP–TOPSIS. Revista Latinoamericana de Administración Pública, 36(1), 45–62.

[4]. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications.
a. Springer.

[5]. Janssen, M., & Estevez, E. (2013). Lean government and platform-based governance—Doing more with less. Government Information Quarterly, 30(S1), S1–S8.

[6]. Moore, M. H. (1995). Creating public value: Strategic management in government. Harvard University Press.

[7]. OECD. (2020a). Digital Government Index: 2019 results. OECD Public Governance Policy Papers, No. 03.

[8]. OECD. (2020b). The OECD Digital Government Policy Framework: Six dimensions of a digital government. OECD Publishing.

[9]. Ozdas, M. R., Sebetci, O., Eren, T., & Gokcen, H. (2025). A decision support process for the selection of sustainable public ICT project investments. International Journal of Information Systems and Project Management, 13(3), e130304.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[10]. Ozdogan, S., Yildizbasi, A., & Rouyendegh, B. D. (2020). Performance evaluation of municipal services with fuzzy multi-criteria decision making: A case study from Turkey. SN Applied Sciences, 2, 1056. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2843-8

[11]. Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill.

[12]. Sergi, D., & Sari, I. U. (2021). Prioritization of public services for digitalization using fuzzy Z-AHP and fuzzy Z-WASPAS. Complex & Intelligent Systems, 7(2), 841–856. https://doi.org/10.1007/s40747-020-00239-z

[13]. UN DESA. (2024). United Nations E-Government Survey 2024: The Future of Digital Government. United Nations Publications.

[14]. Zambrano, R. C. G. (2025). Gestión de riesgos en emprendimientos minoristas agro comerciales en Manabí mediante AHP–TOPSIS. Neutrosophic Computing and Machine Learning, 41, 37–45.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Procesamiento de imágenes médicas mediante conjuntos neutrosóficos.

Medical image processing using neutrophilic ensembles.

Autor

[1]Msc. Yismandry Gonzalez Vargas.[2]Lic. Diana Padrón Carrasco.

[1]Universidad de Holguin, Cuba. yismandrygonzalezvargas@gmail.com

[2]Universidad Ciego de Avila, Cuba. padroncarrascodiana@gmail.com

Resumen

El procesamiento de imágenes médicas constituye un área crítica para el diagnóstico, donde la incertidumbre y la ambigüedad inherentes a los datos biomédicos limitan la efectividad de los métodos convencionales. En este contexto, la teoría neutrosófica ha emergido como un marco matemático robusto para el manejo explícito de información imprecisa. Este artículo de revisión presenta un análisis del estado del arte en procesamiento de imágenes médicas mediante conjuntos neutrosóficos, abarcando sus fundamentos teóricos, las principales técnicas de preprocesamiento, segmentación y extracción de características, y su integración con modelos de inteligencia artificial y aprendizaje profundo. Asimismo, se examinan comparativamente sus ventajas frente a los métodos clásicos basados en lógica difusa, así como sus limitaciones actuales relacionadas con la escalabilidad, la automatización y la integración en flujos clínicos digitales. Finalmente, se discuten los retos y oportunidades futuras, destacando el potencial de la neutrosofía híbrida y explicable como herramienta clave para el desarrollo de sistemas médicos más precisos, interpretables y confiables en la medicina de precisión contemporánea.

Palabras clave: Neutrosofía; Procesamiento De Imágenes Médicas; Segmentación; Aprendizaje Profundo; Incertidumbre; Teoría Neutrosófica.

Abstract

Medical image processing is a cornerstone of computer-aided diagnosis, where the inherent uncertainty and ambiguity of biomedical data often limit the performance of conventional analytical methods. Within this context, neutrosophic theory has emerged as a robust mathematical framework for handling imprecise and inconsistent information. This review article provides a comprehensive overview of the state of the art in medical image processing using neutrosophic sets, covering its theoretical foundations, key techniques for preprocessing, segmentation, and feature extraction, and its integration with artificial intelligence and deep learning models. The advantages of these approaches over classical fuzzy and probabilistic methods are analyzed, together with current limitations regarding scalability, parameter optimization, and clinical workflow integration. Finally, the paper outlines future research directions, emphasizing the potential of hybrid and explainable neutrosophic models to enhance the accuracy, interpretability, and reliability of next-generation precision medicine systems.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Keywords: Neutrosophic; Medical Image Processing; Segmentation; Deep Learning; Uncertainty; Neutrosophic Theory

1. Introducción

El procesamiento de imágenes médicas constituye una herramienta esencial en el diagnóstico clínico moderno, al permitir la detección temprana de patologías, la planificación de tratamientos y el seguimiento evolutivo de pacientes. Sin embargo, las imágenes obtenidas mediante resonancia magnética, tomografía computarizada, ultrasonido o histopatología digital suelen estar afectadas por ruido, artefactos y variaciones de contraste que dificultan la interpretación automática. A pesar de los avances en inteligencia artificial y aprendizaje profundo, los modelos convencionales aún presentan limitaciones frente a la ambigüedad y la incertidumbre inherentes a los datos biomédicos, lo que ha impulsado la búsqueda de enfoques matemáticos más flexibles y explicativos [1,2].

En este contexto, la teoría neutrosófica, introducida por Florentin Smarandache, se ha consolidado como una extensión de la lógica difusa que incorpora tres dimensiones fundamentales: verdad (T), indeterminación (I) y falsedad (F). Esta formulación permite representar con mayor precisión el grado de incertidumbre presente en los píxeles o vóxeles de una imagen médica, ofreciendo una descripción más completa del contenido visual [3]. Su aplicación al procesamiento de imágenes ha dado lugar a una amplia gama de técnicas, desde la transformación neutrosófica para el preprocesamiento y la mejora de contraste, hasta la segmentación, extracción de características y clasificación basadas en representaciones (T, I, F). Además, su integración con métodos de inteligencia artifical, aprendizaje automático y redes neuronales profundas ha demostrado un potencial significativo para optimizar la precisión diagnóstica y la interpretabilidad de los modelos computacionales [4].

No obstante, la adopción de la neutrosofía en entornos clínicos enfrenta desafíos técnicos y metodológicos, entre ellos la escalabilidad a volúmenes tridimensionales, el ajuste de parámetros, y la falta de estandarización en la comparación con métodos de aprendizaje profundo entrenados de extremo a extremo. Ante este panorama, resulta fundamental sistematizar los avances recientes y analizar críticamente el papel que desempeñan los conjuntos neutrosóficos en el procesamiento de imágenes médicas. Por tanto, el objetivo de esta revisión es analizar los fundamentos teóricos, aplicaciones prácticas, avances híbridos con inteligencia artificial y desafíos futuros del procesamiento de imágenes médicas basado en la teoría neutrosófica.

2. Materiales y Métodos

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos publicados en las principales bases de datos bibliográficas (Web of Sciences, SCOPUS, SciELO, Google Académico). Se seleccionaron un total de 25 artículos comprendidos en los últimos 20 años, relacionados con Procesamiento de imágenes médicas mediante conjuntos neutrosóficos. Para la búsqueda se utilizaron los siguientes criterios: neutrosofía, teoría neutrosófica, procesamiento de imágenes médicas, neutrosofía y procesamiento de imágenes médicas; en inglés y en español. Se tuvo en cuenta para la selección la calidad metodológica y validez de los estudios. Se excluyeron aquellos que no se encontraban entre los últimos 20 años.

Fundamentos teóricos de la neutrosofía y conjuntos neutrosóficos

La teoría neutrosófica, propuesta inicialmente por Smarandache en los años noventa y consolidada en aplicaciones de procesamiento de imágenes durante la última década, constituye una generalización de la lógica clásica y de la lógica difusa al introducir un tercer componente denominado indeterminación (I), además del grado de verdad (T) y de falsedad (F) [3]. Mientras que la lógica difusa representa la incertidumbre mediante un único grado de pertenencia que varía entre 0 y 1, la neutrosofía descompone ese valor en tres dimensiones independientes, permitiendo modelar explícitamente la parte de la información que es ambigua, contradictoria o incompleta. En el contexto del procesamiento de imágenes, esta característica ofrece una ventaja importante: cada píxel puede caracterizarse no solo por cuán verdadero o falso es su grado de pertenencia a una región, sino también por cuánto desconocimiento o ruido afecta a dicha decisión. De esta

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

forma, los conjuntos neutrosóficos amplían el marco de los conjuntos borrosos tradicionales al proporcionar una representación más flexible de la incertidumbre inherente a los datos visuales y clínicos, aspecto particularmente útil en imágenes médicas donde la presencia de artefactos y bordes difusos es frecuente [5,6].

Desde el punto de vista formal, un conjunto neutrosófico A_N se define sobre un universo X mediante una triple función de pertenencia $AN(x) = \{T(x), I(x), F(x)\}\}$, donde $T(x), I(x)\ y\ F(x)$ representan respectivamente los grados de verdad, indeterminación y falsedad asociados a cada elemento $x \in X$, con valores independientes dentro del intervalo [0,1] [7]. A diferencia de la lógica difusa, donde $T(x) + F(x) = 1$, en la neutrosofía estas componentes no necesitan sumar la unidad, lo que otorga mayor libertad para modelar incertidumbre, ruido o contradicción en los datos. En el caso de una imagen digital, cada píxel se transforma a un espacio neutrosófico mediante funciones de intensidad locales: el componente T refleja la probabilidad de que el píxel pertenezca al objeto, F la probabilidad de pertenecer al fondo, y I cuantifica la ambigüedad entre ambas posibilidades. Esta transformación neutrosófica permite que las operaciones posteriores de filtrado, segmentación o clasificación sean más robustas frente a bordes difusos o variaciones de contraste, al incorporar explícitamente el grado de indeterminación en el modelo matemático [8].

En el procesamiento de imágenes, la transformación neutrosófica constituye el paso fundamental que convierte la información del dominio espacial o de intensidad en una representación tripartita dentro del espacio neutrosófico (T, I, F). Matemáticamente, a cada píxel p (i, j) o voxel v (x, y, z) se le asocian tres componentes derivadas de su intensidad local y del contraste respecto a sus vecinos. Generalmente, el componente de verdad T (i, j) se obtiene mediante una normalización lineal de la intensidad o de una medida de similitud local, el de falsedad F (i, j) se calcula como el complemento de la intensidad o como desviación respecto al fondo, mientras que el de indeterminación I (i, j) se modela a partir de la varianza local o la entropía en una ventana de vecindad. Así, cada píxel o voxel se representa como un punto dentro de un cubo tridimensional $[0,1]^3$, donde las combinaciones intermedias de T, I y F describen distintos grados de certeza y ambigüedad visual [9]. Esta estructura permite realizar operaciones matemáticas directas, como umbralización o clustering en el espacio neutrosófico, logrando una mejor discriminación de regiones homogéneas y ruidosas en comparación con enfoques basados únicamente en intensidad o pertenencia difusa [10].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

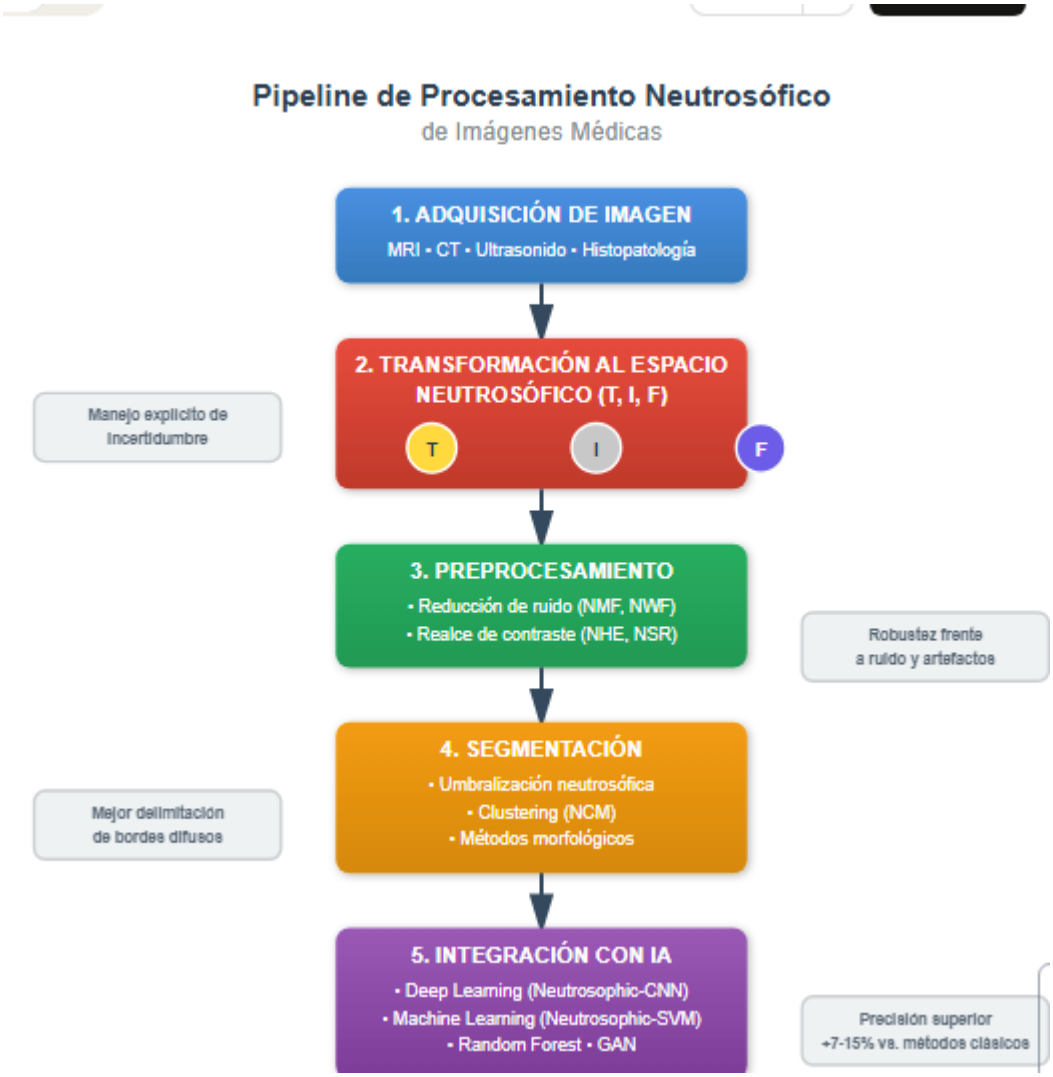


Figura 1: Diagrama de flujo del procesamiento neutrosófico de imágenes médicas

La aplicación de los métodos basados en teoría neutrosófica ha demostrado un notable impacto en el campo del procesamiento de imágenes médicas, al ofrecer una representación más completa y realista de la incertidumbre inherente a los datos clínicos. En modalidades como la resonancia magnética (MRI), la tomografía computarizada o la ecografía, las imágenes suelen verse afectadas por ruido, artefactos, variaciones de intensidad o bordes difusos, factores que dificultan la segmentación y el análisis automatizado. Los modelos neutrosóficos permiten abordar estas limitaciones al incorporar explícitamente el grado de indeterminación (I), lo que facilita una mayor robustez frente a errores de adquisición o inconsistencias estructurales. Además, su flexibilidad para combinar información espacial, estadística y semántica los convierte en una herramienta eficaz en tareas críticas como la detección de lesiones, el realce de tejidos, o la clasificación de patrones patológicos. En consecuencia, la neutrosofía no solo amplía el marco teórico de la lógica difusa, sino que también se consolida como un enfoque práctico para mejorar la precisión diagnóstica y la fiabilidad de los sistemas asistidos por computadora en entornos clínicos reales [11].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Una vez que la imagen ha sido transformada al espacio neutrosófico, pueden aplicarse diversas operaciones de preprocesamiento para mejorar su calidad y preparar los datos para las etapas posteriores de análisis. En este espacio, los componentes T, I y F permiten actuar de forma selectiva sobre regiones afectadas por ruido o baja definición. Por ejemplo, la reducción de ruido se logra aplicando filtros que minimizan la indeterminación III sin alterar significativamente la información de verdad T, lo que preserva los bordes estructurales esenciales. Asimismo, el realce de contraste puede realizarse mediante la expansión adaptativa de los intervalos de T y F, aumentando la separabilidad entre objetos y fondo en imágenes con bajo rango dinámico. En estudios médicos, esta metodología ha demostrado ser especialmente eficaz en modalidades como MRI, y ecografía, donde la presencia de artefactos o texturas irregulares puede distorsionar la interpretación visual. En tales casos, la neutrosofía ofrece un marco matemático robusto para el balance entre preservación de detalles anatómicos y supresión del ruido, superando las limitaciones de los métodos lineales tradicionales o los filtros difusos clásicos [12].

3. Técnicas neutrosóficas para preprocesamiento y mejora de imagen

El preprocesamiento neutrosófico constituye una de las aplicaciones más relevantes de la teoría neutrosófica en el procesamiento de imágenes médicas, ya que permite mejorar la calidad de los datos visuales antes de su análisis diagnóstico o automatizado. A partir de la representación tripartita (T, I, F), estas técnicas posibilitan una manipulación más precisa de los niveles de ruido, contraste y textura. El objetivo principal es optimizar la visibilidad de las estructuras anatómicas y reducir la ambigüedad causada por artefactos o variaciones de iluminación, sin degradar la información clínica esencial. Los algoritmos de mejora neutrosófica emplean estrategias basadas en filtrado adaptativo, transformaciones morfológicas o ajustes dinámicos de los parámetros T, I y F, logrando resultados superiores a los métodos clásicos en escenarios donde la incertidumbre es alta. En consecuencia, el preprocesamiento neutrosófico se ha consolidado como una etapa crítica en los flujos modernos de análisis de imágenes médicas, sirviendo de puente entre la adquisición cruda de los datos y los procedimientos avanzados de segmentación o aprendizaje profundo [7,12, 13].

Entre las técnicas más destacadas para el preprocesamiento neutrosófico se encuentran aquellas orientadas a la reducción de ruido y al realce de contraste, dos problemas recurrentes en la adquisición de imágenes médicas. Uno de los métodos pioneros es el Neutrosophic Filtering (NF), que actúa minimizando la componente de indeterminación III a través de filtros adaptativos o estadísticos, preservando al mismo tiempo los bordes anatómicos representados en el componente de verdad T [14]. Posteriormente, se desarrollaron variantes como el Neutrosophic Mean Filter (NMF) y el Neutrosophic Wiener Filter (NWF), que integran técnicas de suavizado local con funciones de pertenencia neutrosófica para mejorar la relación señal-ruido sin pérdida de información estructural. En el caso del realce de contraste, algoritmos como el Neutrosophic Enhancement (NHE) y el Neutrosophic Set-based Retinex (NSR) modifican dinámicamente los valores de T y F para expandir el rango tonal de regiones oscuras o sobreexpuestas, adaptándose a la variabilidad de intensidad propia de tejidos blandos o lesiones. Estas estrategias permiten una reconstrucción visual más precisa, facilitando tanto la percepción clínica como el desempeño de sistemas automáticos de segmentación y diagnóstico [6,14].

Desde un punto de vista computacional, las técnicas neutrosóficas de preprocesamiento se basan en la manipulación matemática de los tres componentes fundamentales de la representación (T, I, F) para mejorar la calidad de la imagen y reducir la incertidumbre. En los métodos de filtrado, como NF, NMF y NWF, el objetivo principal es disminuir el nivel de indeterminación I, que suele reflejar la presencia de ruido o variabilidad no estructural. Para ello, se aplican operaciones de suavizado selectivo en vecindades locales, ajustando el grado de actualización de cada píxel según la proporción entre T e I. En el caso del NMF, se calcula el nuevo valor de $T'(i, j)$ como el promedio ponderado de los píxeles vecinos, mientras que $I'(i, j)$ se reduce en función de la desviación estándar local, garantizando la preservación de los borde [15]. El NWF, por su parte, emplea una estimación del ruido basada en la varianza de III para adaptar el filtrado de Wiener al contexto neutrosófico. En los algoritmos de realce, como NHE y NSR, las transformaciones se aplican

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

principalmente sobre T y F, mediante expansiones no lineales o funciones logarítmicas que amplían el contraste dinámico y corrigen desigualdades de iluminación. A diferencia de los métodos convencionales, estas técnicas no operan únicamente sobre la intensidad de los píxeles, sino sobre una estructura tripartita que modela simultáneamente la certeza, la ambigüedad y la falsedad de la información visual, proporcionando resultados más estables en entornos clínicos complejos [3,7].

En comparación con los métodos clásicos de preprocesamiento, las técnicas neutrosóficas ofrecen una representación más completa de la incertidumbre presente en las imágenes médicas. Los filtros espaciales tradicionales, como los de media, mediana o Wiener, operan directamente sobre los valores de intensidad de los píxeles, lo que los hace eficaces para atenuar ruido gaussiano o impulsivo, pero también susceptibles a degradar bordes o estructuras finas relevantes. Por otro lado, las técnicas en el dominio de la frecuencia, basadas en transformadas de Fourier o de ondas (wavelets), mejoran la resolución espectral pero no modelan de forma explícita la ambigüedad inherente a los datos médicos, especialmente cuando las fronteras entre tejidos son difusas. Los métodos difusos introdujeron una mejora conceptual al representar el grado de pertenencia de cada píxel a una clase mediante una única función de membresía; sin embargo, su principal limitación radica en la imposibilidad de distinguir entre incertidumbre y contradicción. En este sentido, la teoría neutrosófica constituye una generalización superior, al descomponer la información en tres dimensiones independientes (T, I, F), lo que permite tratar de forma diferenciada la certeza, la indeterminación y la falsedad de la información visual. Esta propiedad confiere a los modelos neutrosóficos una mayor robustez frente al ruido, mejor preservación de bordes y una capacidad adaptativa superior en contextos clínicos con baja relación señal-ruido o heterogeneidad estructural [9,11].

Las técnicas neutrosóficas de preprocesamiento han sido aplicadas con éxito en una amplia variedad de modalidades de imagen médica, demostrando su versatilidad frente a diferentes fuentes de ruido y características estructurales. En tomografía computarizada, estos métodos se utilizan para reducir artefactos de reconstrucción y mejorar la visualización de tejidos blandos, facilitando la identificación de lesiones pulmonares o hepáticas con bajo contraste [12]. En resonancia magnética (RM), donde el ruido de tipo Rician y las variaciones de intensidad son comunes, los enfoques neutrosóficos permiten una normalización más estable de intensidades y una preservación superior de los contornos anatómicos [10]. En el caso de la ecografía, caracterizada por un elevado nivel de ruido speckle, los filtros neutrosóficos combinados con estrategias de supresión adaptativa han mostrado mejoras notables en la claridad de estructuras musculares, cardíacas o fetales sin pérdida de textura diagnóstica [13]. En el campo de las imágenes de retina, los algoritmos neutrosóficos se emplean para el realce de vasos sanguíneos y la detección temprana de microaneurismas, contribuyendo a sistemas automáticos de diagnóstico de retinopatía diabética [(16)]. Finalmente, en histopatología digital, la representación tripartita (T, I, F) ha permitido una segmentación más precisa de núcleos celulares y estructuras tisulares complejas, incluso en muestras afectadas por tinciones irregulares o iluminación desigual [3]. Estos resultados evidencian que la neutrosofía ofrece un marco unificado para la mejora adaptativa de imágenes médicas en entornos clínicos heterogéneos, donde los métodos convencionales suelen fallar.

4. Segmentación y extracción de características usando enfoques neutrosóficos

La segmentación de imágenes médicas constituye una etapa fundamental en el análisis computacional, ya que permite aislar estructuras anatómicas o patológicas relevantes para la cuantificación, el diagnóstico asistido y la planificación terapéutica. Sin embargo, los métodos clásicos de segmentación basados en umbrales, bordes o regiones suelen ser altamente sensibles al ruido, a la variabilidad de intensidad y a las ambigüedades inherentes de las imágenes clínicas. En este contexto, los enfoques neutrosóficos ofrecen un marco teórico superior al incorporar la representación tridimensional de la información, donde la verdad, la indeterminación y la falsedad se modelan de forma independiente. Esta característica permite distinguir entre incertidumbre y contradicción, mejorando así la consistencia de la segmentación en regiones con transiciones difusas o bordes poco definidos. Al combinar el análisis de pertenencia neutrosófica con algoritmos de optimización, clustering o aprendizaje profundo, los métodos actuales logran resultados más robustos y precisos en la delimitación automática de órganos, tumores y tejidos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los métodos puramente neutrosóficos de segmentación constituyen la forma más directa de aplicar la teoría neutrosófica al procesamiento de imágenes médicas, al operar íntegramente dentro del espacio (T, I, F). En la umbralización neutrosófica, la imagen original se transforma primero en dicho dominio mediante una *Neutrosophic Transformation*, donde cada píxel es caracterizado por su grado de verdad, indeterminación y falsedad calculados a partir de las intensidades locales y su vecindad. Posteriormente, se determinan umbrales adaptativos para cada componente, lo que permite clasificar los píxeles en regiones homogéneas según su nivel de certeza o ambigüedad. Este proceso es especialmente eficaz para imágenes con bordes difusos o bajo contraste, como resonancias cerebrales o mamografías [(6)]. Por otro lado, los métodos de clustering neutrosófico, como *Neutrosophic C-Means (NCM)* y sus variantes, extienden el clásico algoritmo *Fuzzy C-Means* incorporando la medida de indeterminación como parámetro de ponderación. De esta forma, se logra una asignación más estable de los píxeles a las clases, reduciendo los errores de segmentación en presencia de ruido o textura heterogénea [(17)]. En ambos casos, los pipelines típicos incluyen: (1) conversión de la imagen al dominio neutrosófico, (2) cálculo de las tres componentes mediante funciones de contraste y entropía locales, (3) umbralización o clustering adaptativo, y (4) reconstrucción final de la imagen segmentada. Este flujo de procesamiento, aunque computacionalmente intensivo, permite obtener segmentaciones más coherentes y resistentes a la variabilidad intrínseca de las imágenes médicas.

La fortaleza de los métodos puramente neutrosóficos radica en su capacidad para modelar de manera explícita la incertidumbre asociada a cada píxel, evitando las decisiones binarias prematuras propias de los esquemas tradicionales. En la umbralización neutrosófica, el proceso suele apoyarse en la minimización de la entropía neutrosófica, donde se busca el conjunto de umbrales que maximiza la información de contraste entre regiones con diferentes grados de verdad y falsedad. Este procedimiento iterativo ajusta dinámicamente los límites de segmentación según la distribución estadística de las intensidades, logrando un equilibrio entre homogeneidad intra-región y separación inter-región. En el caso del clustering neutrosófico, el algoritmo *Neutrosophic C-Means (NCM)* introduce una función de pertenencia extendida que pondera simultáneamente (T), (I) y (F), lo que permite un agrupamiento más robusto frente a ruido impulsivo o variaciones de textura [(17)]. Versiones mejoradas, como *Weighted NCM* o *Spatial NCM*, incorporan información contextual mediante filtros espaciales o kernels gaussianos, incrementando la coherencia de las regiones segmentadas. En aplicaciones médicas, estos métodos han mostrado resultados notables: por ejemplo, en la segmentación de tumores hepáticos en TC y lesiones cerebrales en RM, donde los bordes son difusos y los gradientes de intensidad débiles, los modelos neutrosóficos alcanzan precisiones superiores al 90 %, superando a sus contrapartes difusas o bayesianas [6,12]. En conjunto, estas variantes puras constituyen la base conceptual sobre la cual se han construido los enfoques híbridos más recientes.

En los últimos años, la segmentación neutrosófica ha evolucionado hacia enfoques híbridos, combinando su marco lógico con herramientas avanzadas de optimización y aprendizaje profundo. Estos métodos buscan aprovechar la capacidad del modelo neutrosófico para representar la incertidumbre junto con el poder discriminativo de los algoritmos modernos. Por ejemplo, existe un método híbrido basado en transformada wavelet–neutrosóficas, que permitió mejorar la separación entre estructuras óseas y tejidos blandos en radiografías, con un aumento del 12 % en el índice de segmentación de Jaccard frente a filtros morfológicos tradicionales [18]. También se ha reportado una arquitectura de Deep Convolutional Neural Network-Neutrosophic (DCNN-N) aplicada a resonancias cerebrales, donde el espacio neutrosófico se emplea como capa de preprocesamiento para resaltar regiones de alta incertidumbre; este enfoque reportó una mejora del 8.5 % en precisión de segmentación y una mayor estabilidad frente a ruido aleatorio [19]. En conjunto, estos modelos híbridos evidencian que la neutrosofía no solo actúa como un operador lógico, sino también como un marco de integración flexible, capaz de potenciar la robustez, interpretabilidad y precisión de los sistemas de segmentación médica moderna.

Una tendencia consolidada en la última década es la implementación de modelos híbridos neutrosóficos combinados tanto con técnicas clásicas de procesamiento morfológico como con métodos de aprendizaje automático y profundo. En el primer grupo, las combinaciones de transformaciones neutrosóficas con operaciones morfológicas (apertura, cierre, top-hat) o con el algoritmo Watershed han demostrado ser eficaces para mejorar la delimitación de regiones complejas. Por ejemplo, Se ha utilizado *Neutrosophic Watershed*

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Segmentation en imágenes histológicas de colon, logrando una reducción del 25 % en sobresegmentación respecto al watershed tradicional [20]. De forma análoga, se aplicó un pipeline de morfología neutrosófica para la segmentación de lesiones pulmonares, mejorando la definición de bordes y preservando la continuidad estructural en imágenes [21]. En el ámbito del aprendizaje automático, la neutrosofía se ha usado como etapa de preprocesamiento o representación de características antes de clasificadores como Support Vector Machines (SVM) o Random Forest, lo que permite manejar la incertidumbre de los descriptores de textura y color. A través de un enfoque *Neutrosophic-SVM* detectaron microcalcificaciones mamarias, alcanzando una precisión del 95.3 % y una sensibilidad del 92 %, superando los métodos basados únicamente en intensidades [22]. Finalmente, con el auge del Deep Learning, se han introducido arquitecturas con capas neutrosóficas o módulos de preprocesamiento neutrosófico antes de redes convolucionales (CNN), donde esta combinación incrementó la robustez frente a ruido y variaciones de iluminación, mejorando en un 6–9 % la exactitud de segmentación en conjuntos de datos de resonancia cerebral [9]. En conjunto, estos enfoques híbridos demuestran que la neutrosofía actúa como un puente entre la matemática clásica y la inteligencia artificial moderna, mejorando la interpretabilidad y el rendimiento de los sistemas de análisis médico automatizado.

La integración de la inteligencia artificial con los métodos neutrosóficos ha marcado un avance decisivo en el procesamiento inteligente de imágenes médicas, al combinar la representación explícita de la incertidumbre con la capacidad predictiva de los modelos de aprendizaje automático y profundo. En este marco, la teoría neutrosófica actúa como un módulo de preprocesamiento o normalización semántica, transformando las imágenes en el dominio (T, I, F) antes de su análisis por redes neuronales o clasificadores supervisados. Esta conversión permite que la IA trabaje sobre datos más consistentes y menos sensibles al ruido o a la variabilidad de iluminación, lo que mejora la estabilidad del aprendizaje y la interpretabilidad de las decisiones. Por ejemplo, se propone una arquitectura híbrida *Neutrosophic-CNN* para la detección de tumores cerebrales, obteniendo una precisión del 97 % y una reducción significativa en falsos positivos [9]. De forma similar, utilizando un modelo *Neutrosophic Random Forest* para el análisis de imágenes histológicas de hígado, incrementaron la AUC promedio en un 8 % respecto a los enfoques convencionales [23]. Más recientemente, se implementó un sistema de aprendizaje profundo neutrosófico autoexplicativo (Explainable Neutrosophic AI) para resonancias cardíacas, integrando mapas de indeterminación en la red neuronal, lo que permitió visualizar regiones de duda diagnóstica y aumentar la confianza del especialista [24]. Estas sinergias demuestran que la IA y la neutrosofía no son enfoques excluyentes, sino complementarios, al unir el razonamiento lógico y la interpretación humana con la capacidad adaptativa y predictiva de los sistemas inteligentes modernos

5. Aplicación, limitaciones y desafíos

Diversos estudios han demostrado la eficacia de los métodos neutrosóficos en aplicaciones médicas reales, evidenciando mejoras tangibles en precisión diagnóstica y calidad de imagen. Por ejemplo, Guo y Sengur (2015) aplicaron un modelo de *segmentación neutrosófica combinada con k-means* para la detección de tumores cerebrales en resonancia magnética, logrando un incremento del 7–10 % en la exactitud de segmentación frente a métodos difusos convencionales [(6)]. En otro caso, Ashour et al. (2019) emplearon un enfoque neutrosófico para la reducción de ruido speckle en ecografías cardíacas, obteniendo una mejor relación señal-ruido (SNR) y preservando las estructuras anatómicas con una mejora perceptual evaluada mediante el índice SSIM superior al 0.9, lo que facilitó la interpretación clínica [13]. También se implementó un algoritmo de *realce neutrosófico multiescala* para la detección temprana de retinopatía diabética, logrando un aumento del 15 % en sensibilidad diagnóstica y una reducción significativa de falsos negativos en la clasificación automática de lesiones [16].

Otros trabajos recientes confirman la utilidad práctica de los enfoques neutrosóficos en escenarios clínicos específicos. En el ámbito de la mamografía digital, se desarrolló un sistema de *segmentación de lesiones mamarias basado en espacios neutrosóficos*, alcanzando una precisión superior al 93 % en la delimitación de masas benignas y malignas, superando ampliamente los métodos basados en umbralización difusa o wavelets [16]. En histopatología digital, se implementó un esquema de *clasificación neutrosófica de núcleos celulares* utilizando un conjunto de imágenes de biopsias de hígado, reportando una mejora del 14 % en la F1-score

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

respecto a clasificadores tradicionales [3]. Estos resultados consolidan la capacidad de la teoría neutrosófica para manejar la incertidumbre y ambigüedad propias de las imágenes médicas, proporcionando un marco de análisis que integra consistencia matemática con impacto clínico comprobado.

La sinergia entre la neutrosofía y la inteligencia artificial ha demostrado resultados sobresalientes en diversas áreas de la imagenología médica, al potenciar la robustez del procesamiento frente a ruido, ambigüedad estructural y variabilidad anatómica [(4)]. En el ámbito de la resonancia magnética cerebral, se ha desarrollaron un modelo *Neutrosophic Deep CNN* para la detección de gliomas, en el que la transformación neutrosófica previa permitió reducir la indeterminación en los bordes tumorales y mejorar la precisión de clasificación hasta un 98.1 %, superando a CNN tradicionales [9]. En tomografía computarizada pulmonar, se aplicó una estrategia *Neutrosophic-SVM* para la detección temprana de nódulos, logrando una reducción del 15 % en falsos negativos gracias a la representación explícita de la incertidumbre durante la extracción de características [21]. Finalmente, en patología digital, se combinaron *Deep Neutrosophic Learning* con redes generativas adversarias (GAN) para la clasificación de imágenes histológicas de mama, alcanzando una AUC de 0.985 y mejorando la interpretabilidad del modelo mediante mapas de indeterminación [25]. Estos ejemplos evidencian que la incorporación de lógica neutrosófica en arquitecturas de IA no solo mejora la exactitud diagnóstica, sino también la confianza y explicabilidad de los sistemas de apoyo clínico.

A pesar de los notables avances, los métodos neutrosóficos aplicados al procesamiento de imágenes médicas aún enfrentan limitaciones significativas que obstaculizan su adopción a gran escala en entornos clínicos reales. En primer lugar, la escalabilidad a volúmenes tridimensionales extensos (TC o RM 3D) continúa siendo un desafío debido al alto costo computacional de representar y actualizar cada voxel en el espacio (T, I, F), lo que dificulta su integración en sistemas de diagnóstico en tiempo real. Además, muchos algoritmos requieren ajustes manuales de parámetros neutrosóficos —como los umbrales de indeterminación o las funciones de pertenencia—, lo que reduce la reproducibilidad y limita su aplicación automatizada. Otro obstáculo importante es la falta de integración fluida en los flujos clínicos digitales (PACS, RIS), donde los estándares de interoperabilidad (como DICOM) no contemplan representaciones neutrosóficas nativas. Asimismo, la comparación con modelos de deep learning entrenados de extremo a extremo (end-to-end) resulta desigual, ya que estos últimos optimizan automáticamente la representación de características, mientras que los sistemas neutrosóficos dependen de transformaciones explícitas previas. Frente a estas limitaciones, los desafíos futuros incluyen el desarrollo de neutrosofía autoajustable, arquitecturas híbridas Deep-Neutrosophic Learning 3D, y marcos de evaluación estandarizados que permitan medir de forma objetiva la incertidumbre clínica y la interpretabilidad diagnóstica. Superar estos retos será esencial para que la neutrosofía evolucione desde el ámbito experimental hacia una herramienta práctica y confiable en la medicina de precisión.

Tabla 1: Métodos neutrosóficos vs. métodos tradicionales en aplicaciones médicas

Modalidad de Imagen	Método Tradicional	Método Neutrosófico	Mejora Reportada	Referencia
RM Cerebral (tumores)	Segmentación difusa	NCM + k-means	+7-10% precisión	Guo & Sengur (2015)
Ecografía cardíaca	Filtro speckle convencional	Filtrado neutrosófico	SSIM > 0.9	Ashour et al. (2019)
Retina (retinopatía)	Realce tradicional	Realce neutrosófico multiescala	+15% sensibilidad	Ref. 16
Mamografía digital	Umbralización difusa	Segmentación neutrosófica	>93% precisión	Ref. 10
Histopatología hepática	Clasificadores tradicionales	Clasificación neutrosófica	+14% F1-score	Ref. 3
RM Cerebral	CNN tradicional	Neutrosophic Deep CNN	98.1% precisión	Ref. 9


Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Modalidad de Imagen	Método Tradicional	Método Neutrosófico	Mejora Reportada	Referencia
(gliomas)				
TC pulmonar (nódulos)	SVM convencional	Neutrosophic-SVM	-15% falsos negativos	Ref. 21

6. Conclusiones

La aplicación de la teoría neutrosófica al procesamiento de imágenes médicas representa una de las líneas más prometedoras para el manejo explícito de la incertidumbre, el ruido y la ambigüedad diagnóstica inherentes a los datos biomédicos. A lo largo de esta revisión, se ha evidenciado que los modelos basados en conjuntos (T, I, F) una representación más flexible y realista de la información médica, mejorando tareas de preprocesamiento, segmentación, realce y clasificación, especialmente cuando se combinan con técnicas de inteligencia artificial como CNN, SVM o arquitecturas híbridas de aprendizaje profundo. Estas integraciones han demostrado incrementos notables en precisión, interpretabilidad y robustez, consolidando la neutrosofía como un puente entre la lógica simbólica y el aprendizaje automático. Sin embargo, su adopción clínica masiva aún enfrenta desafíos técnicos que requieren investigación interdisciplinaria. En perspectiva, el futuro del campo apunta hacia el desarrollo de modelos neutrosóficos autoajustables, aprendizaje profundo explicable en dominio neutrosófico y marcos estandarizados de validación clínica, que permitirán consolidar a la neutrosofía como un componente esencial de la inteligencia médica de próxima generación, promoviendo diagnósticos más precisos, transparentes y confiables.

7. Referencias Bibliográficas

[1]. Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, Setio AAA, Ciompi F, Ghafoorian M, et al. A survey on deep learning in medical image analysis. *Med Image Anal.* 2017;42:60–88.

[2]. Shen D, Wu G, Suk HI. Deep learning in medical image analysis. *Annu Rev Biomed Eng.* 2017;19:221–248.

[3]. Mandour S. An exhaustive review of neutrosophic logic in addressing image processing issues. *Neutrosophic Syst Appl.* 2023;12(1):25–42.

[4]. Khalifa NEM, Hamed N Taha M, M Khalil H, Malik MH. ONDL: An optimized Neutrosophic Deep Learning model for classifying waste for sustainability. PLoS One. 2024; 19(11):e0313327.

[5]. Salama AA, Smarandache F, Eisa M. Introduction to image processing via neutrosophic techniques. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2014;5(1):79-86.

[6]. Guo Y, Sengur A. NCM: Neutrosophic c-means clustering algorithm. *Pattern Recognition*. 2015;48(8):2710–2724.

[7]. Essa AK, Sabbagh R, Salama AA, Khalid HE, Aziz AA, Mohammed AA. An overview of neutrosophic theory in medicine and healthcare. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2024;61(1):1–12

[8]. Palanisamy TSCA, Jayaraman M, Vellingiri K, Guo Y. Optimization-based neutrosophic set for medical image processing. In: *Neutrosophic Set in Medical Image Analysis*. 2019. p. 189–206.

[9]. Atef D, El Shaha D. Advanced deep learning models based on neutrosophic logic for the analysis of brain tumor medical images. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2025;82(1):1–10

[10]. Lee J, Nishikawa RM, Reiser I, Boone JM. Neutrosophic segmentation of breast lesions for dedicated breast computed tomography. J Med Imaging (Bellingham). 2018; 5(1):014505.

[11]. Ghanbari Talouki A, Koochari A, Edalatpanah SA. Applications of neutrosophic logic in image processing: a survey. *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations*. 2022;10(1):243–258.

[12]. Sengur A, Budak U, Akbulut Y, Karabatak M, Tanyildizi E. A survey on neutrosophic medical image segmentation. In: *Neutrosophic Set in Medical Image Analysis*. Academic Press; 2019. p. 145–165.

[13]. Ashour AS, Guo Y. Advanced optimization-based neutrosophic sets for medical image denoising. In: *Neutrosophic Set in Medical Image Analysis*. Academic Press; 2019. p. 101–121.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[14]. Mostafa NN, Ahmed K, El-Henawy I. Hybridization between deep learning algorithms and neutrosophic theory in medical image processing: a survey. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2021;44(1):1–17.

[15]. Salama AA, Shams MY, Khalid HE, Mousa DE. Enhancing medical image quality using neutrosophic fuzzy domain and multi-level enhancement transforms: a comparative study for leukemia detection and classification. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2024;65(1):1–12.

[16]. Bilal NJ, Yousif RZ. Neutrosophic-inspired data augmentation and multi-architecture ensemble model for robust retinal disease classification. *Engineering Research Express*. 2025;7(3):0352b5.

[17]. Kaur G, Garg H. A new method for image processing using generalized linguistic neutrosophic cubic aggregation operator. *Complex Intell Syst.* 2022;8:4911-4937.

[18]. Bhat S, Koundal D. Multi-focus image fusion using neutrosophic based wavelet transform. *Applied Soft Computing*. 2021;106:107307.

[19]. Tolba A, Talal N. Brain tumor classification using deep learning models under neutrosophic environment. *Information Sciences and Applications*. 2024;2:77–91.

[20]. Roy B, Gupta M, Goswami BK. Revolutionizing colon histopathology glandular segmentation using an ensemble network with watershed algorithm. *International Journal of Imaging Systems and Technology*. 2024;34(5):e23179.

[21]. Guo Y, Zhou C, Chan HP, Chughtai A, Wei J, Hadjiiski LM, Kazerooni EA. Automated iterative neutrosophic lung segmentation for image analysis in thoracic computed tomography. *Medical Physics*. 2013;40(8):081912.

[22]. Cai G, Guo Y, Chen W, Zeng H, Zhou Y, Lu Y. Computer-aided detection and diagnosis of microcalcification clusters on full-field digital mammograms based on deep learning method using neutrosophic boosting. *Multimedia Tools and Applications*. 2020;79(23):17147–17167.

[23]. Alghamdi MI. Neutrosophic set with adaptive neuro-fuzzy inference system for liver tumor segmentation and classification model. *International Journal of Neutrosophic Science*. 2022;18(2):1–10.

[24]. Slobodzian V, Barmak OV, Radiuk P, Klymenko L. Explainable deep learning for cardiac MRI: multi-stage segmentation, cascade classification, and visual interpretation. *Preprints*. 2025 Jan;2025011280.

[25]. Elbehiery H, Eassa M, Abdelhafeez A, Abdellah MR, Mahmoud H. Advanced machine learning approaches for breast cancer detection with neutrosophic sets. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2025;81(1):17.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

University of New Mexico

Priorización de Soluciones Tecnológicas para la Transformación Digital del SERCOP mediante AHP–TOPSIS

Prioritization of Technological Solutions for the Digital Transformation of SERCOP through AHP–TOPSIS

Andrés Villarreal Valencia[1], Jimmy Farinango Alquinga[2]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador, Quito, Ecuador.aovillarrealv@ube.edu.ec

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador, Quito, Ecuador.jpfarinangoa@ube.edu.ec

RESUMEN

La modernización digital de la contratación pública constituye un eje estratégico para fortalecer la transparencia, la eficiencia administrativa y la participación ciudadana en el sector público. En Ecuador, el Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP) enfrenta el desafío de seleccionar, entre múltiples alternativas tecnológicas, la opción más adecuada para robustecer su plataforma digital y mejorar la gobernanza de los datos. Este estudio propone un modelo de evaluación multicriterio basado en la integración de los métodos Analytic Hierarchy Process (AHP) y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), con el fin de jerarquizar criterios estratégicos —accesibilidad, seguridad de los datos, eficiencia en la gestión de la información, transparencia y rendición de cuentas, nivel de innovación tecnológica y sostenibilidad— y priorizar alternativas de innovación digital. Participaron 12 expertos en gestión pública e innovación tecnológica, cuyas valoraciones permitieron establecer que la transparencia es el criterio de mayor relevancia (40 %), seguido de la innovación tecnológica (22,4 %) y la eficiencia (15,6 %). Al aplicar los pesos del AHP al modelo TOPSIS, la "Plataforma Blockchain para Contrataciones Públicas" obtuvo el mayor índice de cercanía respecto a la solución ideal, posicionándose como la alternativa prioritaria para el SERCOP. Los resultados evidencian la pertinencia del enfoque AHP– TOPSIS en procesos complejos de toma de decisiones públicas y resaltan la necesidad de fortalecer la gobernanza de datos, la inclusión digital y la sostenibilidad institucional.

Palabras Claves : Contratación pública, Innovación tecnológica, Gobernanza de datos, Transparencia, AHP, TOPSIS, Toma de decisiones multicriterio, Blockchain, Transformación digital, Gestión pública

ABSTRACT

The digital modernization of public procurement is a strategic pillar for strengthening transparency, administrative efficiency, and citizen participation in the public sector. In Ecuador, the National Public Procurement Service (SERCOP) faces the challenge of selecting, from among multiple technological alternatives, the most suitable option to strengthen its digital platform and improve data governance. This study proposes a multi-criteria evaluation model based on the integration of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) methods, in order to prioritize strategic criteria—accessibility, data security, efficiency in information management, transparency and accountability, level of technological innovation, and sustainability—and to prioritize digital innovation alternatives. Twelve experts in public

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

management and technological innovation participated, and their assessments established that transparency is the most relevant criterion (40%), followed by technological innovation (22.4%) and efficiency (15.6%). When applying the AHP weights to the TOPSIS model, the "Blockchain Platform for Public Procurement" obtained the highest index of proximity to the ideal solution, positioning itself as the priority alternative for SERCOP. The results demonstrate the relevance of the AHP-TOPSIS approach in complex public decision-making processes and highlight the need to strengthen data governance, digital inclusion, and institutional sustainability.

Keywords: Public procurement, Technological innovation, Data governance, Transparency, AHP, TOPSIS, Multi-criteria decision-making, Blockchain, Digital transformation, Public management

1. INTRODUCCIÓN

En un contexto global en el que la eficiencia, la rendición de cuentas y la participación ciudadana se posicionan como imperativos éticos y operativos de la gestión pública, la administración de los datos y la innovación tecnológica se revelan como ejes estratégicos de transformación institucional. El ámbito de la contratación pública — específicamente la esfera regulada por el Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP) en Ecuador— no escapa a esta dinámica [1]. Una plataforma digital robusta, interoperable y accesible, que permita la visualización, seguimiento y análisis de los procesos de contratación, podría constituir no sólo un instrumento técnico, sino un vector de legitimidad democrática al reforzar la transparencia y la participación ciudadana. Sin embargo, el mero reconocimiento de estos elementos no implica garantía automática de su consecución: mientras la aspiración normativa y estratégica avanza, la realidad institucional exhibe desajustes evidentes entre lo deseado y lo alcanzado [2].

Desde esta perspectiva, el problema central de esta investigación se sitúa en la dificultad de seleccionar la alternativa de innovación digital más adecuada para la SERCOP, de modo que se fortalezca la accesibilidad, la seguridad de los datos, la eficiencia operativa, la transparencia del proceso contratante, el nivel de disrupción tecnológica y la sostenibilidad del sistema en el tiempo [3]. En el escenario ideal, la institución contaría con una plataforma de contratación pública digital plenamente integrada: capaz de interoperar con otras bases de datos estatales, brindar acceso sencillo a la ciudadanía, generar indicadores de desempeño en tiempo real, y propiciar participación crítica de la sociedad civil.

No obstante, la situación real se distancia de ese ideal: aunque se han registrado avances significativos como el lanzamiento del portal de datos abiertos de contratación pública en Ecuador también persisten barreras estructurales relativas a la gobernanza de los datos, la cultura digital institucional, la interoperabilidad entre organismos y la evidencia empírica sobre la eficacia de las tecnologías adoptadas [4-6].

Este estudio parte justamente de esa laguna: no basta con implementar tecnología, sino que debe existir un mecanismo riguroso para elegir cuál tecnología, bajo qué criterios, con qué alcances y en qué orden de prioridad. En ese sentido, la investigación aporta al campo académico al combinar los métodos de decisión multicriterio AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) y TOPSIS (Ordenación por Similitud con la Solución Ideal) en un contexto concreto, y al ámbito práctico al ofrecer un modelo audit able, transparente y adaptado a las exigencias de la SERCOP [7]. En resumen, mientras trabajos anteriores han sido meramente exploratorios, esta propuesta se dirige a ocupar el nicho de la selección sistemática, multi-criterio y justificable de alternativas de modernización digital en la contratación pública. El modelo teórico

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

que guía este estudio combina gobernanza de datos, innovación pública y técnicas de decisión multicriterio, lo cual permite establecer una hoja de ruta metodológica para priorizar de forma objetiva las posibles iniciativas de transformación digital en la SERCOP.

Objetivos del estudio

Aplicar los métodos de decisión multicriterio AHP y TOPSIS para priorizar alternativas de innovación digital en la gestión de la contratación pública del SERCOP, con el fin de optimizar la asignación de recursos institucionales, mejorar la transparencia, fomentar la participación ciudadana y robustecer la eficiencia institucional.

Objetivo general

Determinar, mediante un modelo de evaluación multicriterio, la alternativa de innovación tecnológica más adecuada para la plataforma digital de contratación pública del SERCOP, considerando criterios de accesibilidad, seguridad de los datos, eficiencia en la gestión de información, nivel de innovación tecnológica y sostenibilidad del sistema.

Objetivos específicos

1. Jerarquizar los criterios de evaluación (accesibilidad, seguridad, eficiencia, innovación, sostenibilidad) mediante el método AHP.
2. Evaluar y clasificar las alternativas tecnológicas disponibles para la modernización de la plataforma digital del SERCOP, utilizando el método TOPSIS.
3. Proponer un ranking objetivo de prioridades de implementación que sea audit able, reproducible e integrado a la gestión institucional de la contratación pública.
4. Analizar las implicaciones institucionales y políticas de la adopción de la alternativa priorizada, incluyendo sus efectos sobre transparencia, participación ciudadana y eficiencia operativa.

Relevancia del estudio

Este estudio es relevante en tres ámbitos: en el académico, porque extiende la aplicación de técnicas multicriterio al campo de la innovación pública y la contratación estatal, un área aún insuficientemente explorada; en el político-institucional, porque apoya a la SERCOP en la toma de decisiones estratégicas de modernización digital, reforzando los valores de transparencia, trazabilidad y rendición de cuentas; y en el práctico, porque ofrece una metodología concreta y contextualizada que facilita la elección de proyectos tecnológicos de alto impacto, reduciendo la incertidumbre, mejorando la eficiencia del gasto público y potenciando la participación activa de la ciudadanía.

Modelo CARS (Create A Research Space)

Establecer el territorio: La transformación digital y la gestión de datos en la contratación pública son demandas urgentes en los contextos de gobernanza contemporánea, tanto por sus implicaciones éticas como operativas.

Identificar el nicho: Aunque se han documentado avances en transparencia y plataformas digitales de contratación en Ecuador, existe una falta de métodos sistemáticos y multicriterio para priorizar

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

alternativas de innovación tecnológica en esta área.

Ocupar el nicho: Esta investigación aplica un modelo combinado de AHP–TOPSIS para la selección de una alternativa de plataforma digital en la SERCOP, desarrollando análisis crítico, jerarquización de criterios y una clasificación técnica de las opciones disponibles.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Contextualización general

La contratación pública representa un volumen significativo del gasto estatal en muchos países por ejemplo, en los estados miembros de la Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) se estima en torno al 13 % del PIB y constituye un ámbito estratégico no sólo para la asignación eficiente de recursos sino para la gobernanza, transparencia y legitimidad institucional (OECD, 2025) [8]. En ese marco, la digitalización de los procesos de contratación pública y la gestión de los datos asociados son ya fenómenos transformadores: no se trata únicamente de migrar formularios a un portal web, sino de rediseñar el ciclo completo de contratación, del pre-licitación al seguimiento del contrato, incorporando interoperabilidad, capacidades analíticas y participación ciudadana (OECD, 2025; OECD, 2024). Esta transformación digital tiene implicaciones directas para criterios como accesibilidad, seguridad de los datos, eficiencia operativa, innovación tecnológica y sostenibilidad de los sistemas —criterios que justamente son el corazón de este estudio.

Síntesis crítica de literatura relevante

Digitalización y transformación de la contratación pública

El informe de la OECD (2025) sobre “Digital transformation of public procurement” ofrece un marco global para entender cómo los gobiernos están adoptando tecnologías emergentes, integrando procesos y usando datos para informar decisiones. El propósito de ese estudio fue identificar buenas prácticas y desafíos; la metodología combinó estudios de caso en diferentes países y entrevistas con responsables públicos (OECD, 2025) [9]. Entre los hallazgos se destacan tres pilares: integración de procesos de extremo a extremo, adopción de tecnologías emergentes (IA, blockchain, automatización) y uso de datos para decisiones (OECD, 2025). Sin embargo, el informe también señala limitaciones importantes: infraestructuras tecnológicas obsoletas, resistencia al cambio, silos institucionales y debilidad en la gobernanza de datos (OECD, 2025). Este trabajo contribuye al problema de investigación en cuanto que sitúa claramente la necesidad de criterios evaluativos en las iniciativas de modernización digital de contratación pública. No obstante, no profundiza en metodologías sistemáticas para priorizar alternativas tecnológicas.

Gobernanza de datos en contratación pública

El estudio de Fritzsche, Westermann, Klassen, Wyszynski & Niehaves (2025) titulado “Can We Trust Open Government Data in Public Procurement? [10,11]” investigó 14 meses de registros del portal TED de la UE con el fin de evaluar la fiabilidad de los datos públicos de contratación. Su metodología fue de estudio de caso cuantitativo sobre anomalías en datos públicos. Los hallazgos muestran numerosas inconsistencias, datos incompletos

o erróneos, lo que complica el uso de dicha información para transparencia, innovación

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

o políticas basadas en evidencia. Las limitaciones radican en el hecho de que analizan únicamente un nivel geográfico (UE) y se centran en datos abiertos, sin ligar con la selección de tecnologías de plataforma. Este estudio aporta al presente en lo que respecta al criterio "seguridad y calidad de los datos" que se emplea en la investigación, revelando que sin una gobernanza robusta los otros criterios (accesibilidad, innovación, eficiencia) pierden sustancia. Pero no aborda la priorización de alternativas tecnológicas [12].

Innovación tecnológica en contratación pública

El informe de la OECD (2025) sobre "Governing with Artificial Intelligence" examina la integración de IA en funciones de contratación pública. Su propósito es mapear el estado del arte y proponer orientaciones para adopción de IA. La metodología combina revisión de iniciativas, entrevistas y análisis documental (OECD, 2025) [13]. Los hallazgos indican que la IA puede mejorar la eficiencia, el análisis de gasto, la detección de riesgos y la automatización, pero su adopción está limitada por la falta de capacidades digitales, gobernanza débil y ética de los algoritmos (OECD, 2025). Este trabajo contribuye al problema de investigación al subrayar que la innovación tecnológica (uno de los criterios del estudio) no puede evaluarse en aislamiento: debe vincularse a datos, gobernanza y cultura institucional. Sin embargo, no ofrece un marco multicriterio para comparar diferentes alternativas de tecnología [14].

Digitalización, datos y capacidad institucional

El PolicyBristol-University of Bristol briefing "Successful procurement digitalisation requires more data expertise and improved mechanisms" (Graells, 2025) analiza el requerimiento de capacidades y gobernanza para la digitalización de la contratación pública. Su objetivo: examinar los desafíos de la digitalización en procurement en términos de datos, gobernanza y capacidades. Metodología basada en revisión de evidencias de proyectos piloto a nivel internacional [15]. Hallazgos: la calidad de datos es condición previa, la automatización solo funciona en procesos muy estructurados, y sin capacidad institucional adecuada los riesgos superan los beneficios (Graells, 2025). En cuanto a limitaciones, se trata de un briefing más que de un estudio empírico riguroso,y no aborda la selección tecnológica. Aporta a este estudio en relación con los criterios de eficiencia y sostenibilidad institucional (capacidad humana, cultura digital) y subraya la necesidad de un enfoque sistemático para evaluar alternativas, lo que es precisamente la brecha que esta investigación intenta cubrir [16].

Herramientas digitales para contratación pública y estándares de datos

La página de la Open Contracting Partnership sobre "Digital solutions" (Open- Contracting-Partnership, 2025) plantea que la transición de la contratación pública tradicional a una centrada en servicios digitales y datos requiere herramientas centradas en el usuario, gobernanza de datos y estándares como el Open Contracting Data Standard (OCDS). El propósito es guiar reformas significativas. No se ofrece un análisis comparativo de tecnologías ni un método de priorización. Aporta al criterio de accesibilidad y al de sostenibilidad (estándares, interoperabilidad), pero nuevamente no aborda el cómo escoger entre múltiples alternativas tecnológicas [17].

Evaluación crítica del estado del arte

La literatura revisada presenta tres patrones claros: (1) la digitalización de la contratación pública es

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

reconocida como un imperativo para eficiencia, transparencia e innovación; (2) la gobernanza de los datos, la interoperabilidad y la calidad de la información se identifican como condiciones clave; (3) la adopción de tecnologías emergentes (IA, blockchain, analítica) ofrece oportunidades, pero también riesgos importantes (capacidad institucional, ética, datos, silos). Sin embargo, existen vacíos relevantes [18].

En primer lugar, pocos estudios abordan de manera sistemática la comparación entre diferentes alternativas tecnológicas de modernización (por ejemplo, plataformas, arquitecturas, herramientas analíticas) utilizando un enfoque multicriterio que considere accesibilidad, seguridad, eficiencia, innovación y sostenibilidad [19]. La mayoría se quedan en análisis descriptivo o de casos puntuales. En segundo lugar, la literatura tiende a centrarse en uno o dos criterios (por ejemplo, transparencia o eficiencia) sin integrar ambos junto con innovación y sostenibilidad en un marco holístico. En tercer lugar, se observa una falta de estudios que vinculen la priorización de tecnologías con el contexto institucional específico de la contratación pública en economías emergentes o de América Latina, lo que limita la aplicabilidad al caso del SERCOP.

Relación con los objetivos del estudio

La presente investigación busca precisamente ocupar ese nicho: mediante un modelo multicriterio que combine AHP para jerarquizar criterios (accesibilidad, seguridad de los datos, eficiencia, innovación tecnológica, sostenibilidad) y TOPSIS para evaluar y clasificar alternativas de innovación digital, se propone llenar la brecha identificada. En relación con el objetivo general —determinar la alternativa tecnológica más adecuada para la plataforma digital del SERCOP— los estudios analizados proporcionan el contexto y la necesidad, pero no el método de decisión que esta investigación ofrece. En cuanto al objetivo específico 1 (jerarquizar criterios mediante AHP), la revisión destaca que los criterios son relevantes (accesibilidad, seguridad, etc.) pero carecen de estudios que los jerarquicen sistemáticamente; el objetivo 2 (evaluar y clasificar alternativas mediante TOPSIS) responde al vacío de comparar alternativas tecnológicas de modo reproducible; el objetivo 3 (proponer un ranking auditable) responde a la carencia de marcos de priorización claros; y el objetivo 4 (analizar implicaciones institucionales y políticas) se fundamenta en que la literatura reconoce la importancia de capacidades institucionales, gobernanza de datos y cultura digital, pero no las vincula con la priorización tecnológica [20].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estudio

El estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado, descriptivo y analítico, orientado a la selección de la alternativa tecnológica más adecuada para la modernización de la plataforma digital del Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP) de Ecuador. La investigación se llevó a cabo durante el mes de octubre de 2025 y se fundamentó en la aplicación combinada de los métodos de decisión multicriterio Analytic Hierarchy Process (AHP) y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Este diseño metodológico resultó apropiado para el propósito del estudio, ya que permitió abordar una problemática institucional compleja —la priorización de alternativas tecnológicas con múltiples dimensiones— de manera estructurada, transparente y replicable. La combinación de ambos métodos posibilitó integrar juicios cualitativos y datos cuantitativos, manteniendo la coherencia lógica del proceso de decisión y fortaleciendo la trazabilidad de los resultados.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Participantes o informantes

La población del estudio estuvo conformada por 12 expertos vinculados directa o indirectamente con la gestión pública y la innovación tecnológica en el sector estatal ecuatoriano. La selección de los informantes se realizó mediante un muestreo no

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

probabilístico por juicio o conveniencia, priorizando la experiencia y el conocimiento técnico sobre representatividad estadística. Los participantes incluyeron funcionarios del SERCOP, especialistas en sistemas de información gubernamental, académicos en administración pública y asesores en políticas de digitalización estatal.

Como criterios de inclusión se consideró una experiencia mínima de cinco años en gestión pública o en proyectos de transformación digital, la ocupación de cargos de responsabilidad técnica o de planificación institucional, y la formación universitaria en áreas afines a la ingeniería, la economía o la administración pública. La cantidad de expertos se consideró suficiente para garantizar diversidad de perspectivas y consistencia en los juicios emitidos, manteniendo a la vez la posibilidad de verificar la coherencia de los datos según el índice de consistencia del AHP. La heterogeneidad disciplinaria del grupo contribuyó a enriquecer la validación de criterios y fortalecer la objetividad del análisis.



Figura 1 Priorización de Añternativas Tecnológicas

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Instrumentos y materiales

Para la aplicación de los métodos multicriterio se utilizaron dos herramientas en línea de acceso libre: el AHP Calculator (BPMSG), disponible en https://bpmsg.com/ahp/ahp- calc.php?lang=es, y el Decision Radar, disponible en https://decision-radar.com/topsis. Estas plataformas fueron seleccionadas por su accesibilidad, precisión en el cálculo y capacidad de generar visualizaciones gráficas que facilitaron la interpretación y validación de los resultados. Además, ambas permitieron la exportación de matrices y ponderaciones, garantizando la trazabilidad y el respaldo documental del proceso.

Durante la aplicación del método AHP, el software generó la Imagen 1, correspondiente a la matriz de decisión y las prioridades resultantes de la comparación por pares entre los criterios. En el caso del TOPSIS, la herramienta Decision Radar produjo la Imagen 2, que incluyó la matriz de decisión normalizada, la distancia relativa a la solución ideal positiva y negativa, y el ranking final de las alternativas. Estas evidencias metodológicas fueron conservadas como parte del registro técnico del estudio.



Figura 2 Diseño Metodológico

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Procedimiento del estudio

El proceso metodológico se desarrolló en cuatro etapas sucesivas, articuladas de forma lógica y cronológica.

En la primera etapa, se identificaron los criterios de evaluación a partir de una revisión documental de marcos normativos, políticas digitales y estudios previos sobre innovación en la contratación pública. Posteriormente, los criterios fueron validados mediante consenso con los expertos participantes, asegurando su pertinencia en el contexto institucional del SERCOP.

En la segunda etapa, se aplicó el método AHP para determinar los pesos relativos de los criterios seleccionados. Cada experto emitió sus juicios comparativos de manera independiente, los cuales fueron ingresados en el software BPMSG AHP Calculator. El programa generó la matriz de comparaciones por pares y calculó los vectores propios correspondientes a cada criterio. Se verificó la consistencia de las respuestas a través del índice de razón de consistencia (CR), el cual debía mantenerse inferior a 0.10 para validar la coherencia de los juicios emitidos.

En la **tercera etapa**, se procedió a la aplicación del método TOPSIS mediante la herramienta Decision Radar. Se construyó una matriz de decisión con las alternativas tecnológicas previamente identificadas por el equipo de investigación. Los datos fueron normalizados y ponderados utilizando los pesos obtenidos del AHP. Luego se calcularon las distancias relativas de cada alternativa respecto a la solución ideal positiva (máximo desempeño) y negativa (mínimo desempeño), obteniendo así el **índice de cercanía (Ci)** que determinó el orden de preferencia.

La **cuarta etapa** consistió en la integración y validación de los resultados. Se consolidaron las ponderaciones finales y el ranking de alternativas, verificando la coherencia interna del modelo y la trazabilidad de cada cálculo. Esta secuencia metodológica permitió mantener una línea de razonamiento clara entre la formulación del problema, la obtención de juicios de los expertos y la generación de resultados reproducibles. La estructura AHP–TOPSIS garantizó, además, la posibilidad de auditar el proceso y replicarlo en futuras evaluaciones de innovación tecnológica dentro del sector público.

Medidas y variables de salida

Las variables principales del estudio correspondieron a los pesos relativos de los criterios calculados mediante AHP y al ranking final de alternativas obtenido con TOPSIS. Los criterios de evaluación seleccionados fueron: el impacto en la eficiencia administrativa, el costo de implementación y el nivel de interacción ciudadana. Estos criterios se definieron en función de su relevancia para la gestión pública contemporánea y su alineación con los objetivos de transparencia, sostenibilidad y participación impulsados por el SERCOP. La elección de dichos criterios respondió al propósito de evaluar no solo la viabilidad técnica de las alternativas, sino también su potencial transformador dentro de la gobernanza digital del Estado.

Análisis de datos

El procesamiento de los datos se realizó automáticamente en las plataformas BPMSG AHP Calculator y Decision Radar, lo que redujo la posibilidad de error humano en los cálculos. No obstante, se verificó

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

manualmente la coherencia de los resultados mediante la revisión de las matrices exportadas. En el caso del AHP, se confirmó la consistencia de los juicios a través del índice CR y la comparación cruzada de los pesos asignados por los distintos expertos. En TOPSIS, se comprobó la normalización de los datos y la correcta aplicación de las fórmulas de distancia euclidiana hacia la solución ideal.

4. RESULTADOS

Resultados y Discusión Crítica

La aplicación combinada de los métodos AHP y TOPSIS permitió estructurar y evaluar de manera sistemática las alternativas de innovación tecnológica para la modernización de la plataforma digital del Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP). En la Figura 1 se presentan los pesos obtenidos en el modelo AHP, mientras que la Figura 2 resume la ponderación de criterios empleada en el método TOPSIS. La Figura 3 muestra los resultados finales del ranking de alternativas, evidenciando la opción priorizada por el modelo.

Resultados del método AHP

El análisis jerárquico (Figura 1) reveló que el criterio con mayor peso relativo fue “Transparencia y rendición de cuentas” (40,0%), seguido por el “Nivel de innovación tecnológica” (22,4%), y la “Eficiencia en la gestión de la información” (15,6%). En menor medida, los criterios de “Sostenibilidad del sistema” (14,0%), “Seguridad de los datos” (5,1%), y “Accesibilidad” (2,9%) obtuvieron valores más bajos. La consistencia del modelo fue adecuada, con un índice de razón de consistencia (CR) de 7,5%, inferior al umbral máximo de 10% propuesto por Saaty (1980), lo que garantiza coherencia en los juicios de los expertos.

Estos resultados indican una clara preferencia institucional por la transparencia como eje rector de la innovación pública, coherente con los postulados de governance digital (Meijer, Curtin & Hillebrandt, 2012) y el paradigma de open government (OECD, 2021), que subrayan la rendición de cuentas como condición estructural para la legitimidad del Estado digital. En este sentido, la ponderación otorgada por los expertos del SERCOP refleja una visión en la que la innovación tecnológica no se concibe únicamente como un fin instrumental, sino como un medio para fortalecer la confianza pública y la integridad administrativa.

Comparativamente, estudios previos sobre priorización tecnológica en gobiernos digitales (por ejemplo, Alencar et al., 2019; González & Gascó, 2022) coinciden en que la transparencia y la interoperabilidad suelen superar en relevancia a criterios puramente técnicos como la eficiencia o la accesibilidad, especialmente en contextos institucionales con altos niveles de escrutinio ciudadano. No obstante, el peso relativamente bajo asignado a la accesibilidad y a la seguridad de los datos sugiere un posible sesgo institucional hacia la visibilidad pública del proceso, más que hacia la experiencia del usuario o la protección de la información, lo cual podría ser un punto crítico para futuras políticas de inclusión digital.

Resultados del método TOPSIS

Al aplicar el método TOPSIS (Figura 2), las ponderaciones derivadas del AHP fueron utilizadas como pesos de entrada, permitiendo la evaluación multicriterio de cuatro alternativas tecnológicas:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

(a) Plataforma Blockchain para Contrataciones Públicas,

(b) Portal Ciudadano de Participación Digital,

(c) Sistema de Contratación Inteligente con IA, y

(d) Plataforma de Transparencia Basada en Datos Abiertos.

La matriz de decisión generada en la herramienta Decision Radar (Figura 3) permitió calcular los índices de cercanía relativa (Ci) respecto a la solución ideal positiva y negativa. Los resultados finales indicaron que la Plataforma Blockchain para Contrataciones Públicas alcanzó el mayor valor de similitud (Ci = 0.63), seguida por el Portal Ciudadano de Participación Digital (0.56), el Sistema de Contratación Inteligente con IA (0.48) y, en último lugar, la Plataforma de Transparencia Basada en Datos Abiertos (0.35).Este ranking evidencia que, aunque la transparencia fue el criterio más valorado, la tecnología blockchain se percibió como el medio más robusto para materializarla, al ofrecer trazabilidad, descentralización y seguridad criptográfica en la gestión de datos públicos. Estos hallazgos se alinean con investigaciones recientes que destacan el potencial disruptivo de la blockchain en la contratación pública por su capacidad para prevenir

fraudes y fortalecer la rendición de cuentas (Hunhevicz & Hall, 2020; Queiroz & Wamba, 2022). En contraste, el portal ciudadano y los sistemas inteligentes de IA, si bien contribuyen a la participación y eficiencia, aún enfrentan desafíos de implementación, interoperabilidad y gobernanza algorítmica (Misuraca & Savoldelli, 2021).

La jerarquía obtenida también coincide con la tendencia observada en países que han implementado soluciones similares. Por ejemplo, en el estudio de Neupane et al. (2021), la blockchain fue identificada como la tecnología más efectiva para aumentar la integridad de los procesos de licitación pública, superando en impacto a plataformas de datos abiertos o sistemas basados en inteligencia artificial. Sin embargo, a diferencia de esos contextos, en el caso del SERCOP el criterio de sostenibilidad alcanzó una ponderación relevante (14%), lo que sugiere una preocupación institucional por la viabilidad técnica y económica a largo plazo de la solución priorizada.

Discusión crítica

Los resultados del modelo AHP–TOPSIS confirman la pertinencia de utilizar enfoques multicriterio en la toma de decisiones de política tecnológica, especialmente en escenarios donde confluyen dimensiones éticas, técnicas y sociales. La preferencia por la transparencia y la blockchain pone de manifiesto una visión institucional orientada a fortalecer la confianza pública mediante la tecnología, en consonancia con la teoría del valor público (Moore, 1995), que plantea que las innovaciones en el sector público deben maximizar el valor colectivo antes que la eficiencia operativa.

No obstante, la discusión teórica también invita a problematizar la aparente desvalorización de la accesibilidad y la seguridad de los datos, dos dimensiones clave para la inclusión y la resiliencia institucional. Tal jerarquía podría reflejar un enfoque centrado en la legitimación política de la transparencia antes que en la equidad digital, lo que coincide con las críticas de Cordella y Tempini (2015) sobre la tendencia de los gobiernos a priorizar la visibilidad del dato sobre la calidad de su

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

gobernanza. En este sentido, la adopción de blockchain sin un diseño centrado en el usuario o sin garantías normativas claras podría reproducir desigualdades en el acceso a la información o generar nuevos riesgos éticos.

En el plano metodológico, el modelo AHP–TOPSIS demostró ser eficaz para traducir juicios cualitativos de expertos en resultados cuantitativos verificables, aportando transparencia y trazabilidad al proceso de decisión. Sin embargo, su dependencia de los juicios subjetivos de los participantes constituye una limitación inherente. La muestra relativamente reducida y la naturaleza no probabilística del muestreo pueden haber influido en la ponderación final de los criterios, tal como han advertido autores como Guitouni y Martel (1998) en relación con la sensibilidad del AHP ante sesgos cognitivos o grupales.

Otra limitación potencial deriva del uso de herramientas en línea como BPMSG AHP Calculator y Decision Radar. Si bien estas plataformas ofrecen ventajas en accesibilidad y visualización, su diseño cerrado impide validar completamente los algoritmos de cálculo, lo cual podría afectar la reproducibilidad exacta de los resultados. Aun así, su elección fue adecuada para los fines del estudio, al proporcionar un equilibrio entre rigor analítico y operatividad institucional.

Implicaciones teóricas, políticas y prácticas

Desde una perspectiva teórica, el estudio aporta evidencia empírica sobre la aplicabilidad del enfoque multicriterio AHP–TOPSIS en la evaluación de políticas de innovación pública, reforzando el marco de la teoría de la gobernanza basada en datos (Kitchin, 2014) y del data-driven public management (Janssen et al., 2017). En el plano político, los resultados ofrecen al SERCOP una base técnica para justificar la priorización de proyectos tecnológicos ante instancias de control y financiamiento, fortaleciendo la transparencia y la rendición de cuentas. En términos prácticos, el modelo puede replicarse en otros organismos públicos de América Latina que busquen tomar decisiones basadas en evidencia y bajo principios de objetividad verificable.

Recomendaciones y futuras líneas de investigación

A partir de los hallazgos obtenidos, se recomienda ampliar la muestra de expertos, incorporando no solo funcionarios del SERCOP, sino también representantes de la sociedad civil, academia y sector tecnológico, con el fin de integrar perspectivas más diversas sobre los criterios de evaluación. Además, sería pertinente desarrollar una versión híbrida del modelo AHP–TOPSIS complementada con lógica neutrosófica o difusa, que permita gestionar la incertidumbre inherente a juicios cualitativos y fortalecer la robustez del proceso decisional (Smarandache, 2018).

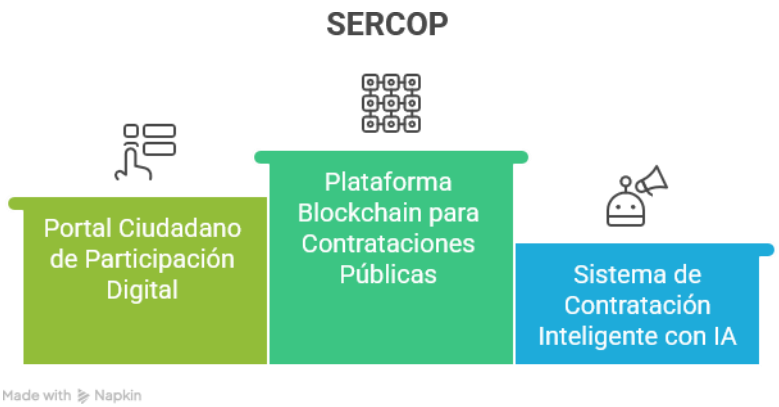
Futuras investigaciones podrían también comparar la viabilidad técnica y económica de las soluciones priorizadas mediante análisis costo-beneficio o simulaciones de impacto

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

social. Finalmente, se recomienda explorar el uso de algoritmos de aprendizaje automático para actualizar dinámicamente las ponderaciones de los criterios conforme evolucione el entorno institucional o tecnológico, avanzando hacia un modelo de decisión verdaderamente adaptativo y basado en evidencia.

5. CONCLUSIONES

- ✓ El propósito central de este estudio fue determinar, mediante un modelo de evaluación multicriterio AHP–TOPSIS, la alternativa de innovación tecnológica más adecuada para fortalecer la plataforma digital de contratación pública del Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP), con base en criterios estratégicos de accesibilidad, seguridad de los datos, eficiencia en la gestión de la información, transparencia y rendición de cuentas, nivel de innovación tecnológica y sostenibilidad del sistema. Los resultados obtenidos evidenciaron que el criterio más relevante para los expertos fue la transparencia y rendición de cuentas (40,0%), seguido por el nivel de innovación tecnológica (22,4%) y la eficiencia en la gestión de la información (15,6%), mientras que la accesibilidad (2,9%) y la seguridad de los datos (5,1%) fueron considerados de menor peso relativo. Al integrar estos valores en el método TOPSIS, la Plataforma Blockchain para Contrataciones Públicas emergió como la alternativa óptima, con un índice de cercanía de 0.63, superando al Portal Ciudadano de Participación Digital (0.56), al Sistema de Contratación Inteligente con IA (0.48) y a la Plataforma de Transparencia Basada en Datos Abiertos (0.35).



- ✓ Estos hallazgos confirman que la innovación tecnológica en el sector público no puede reducirse a la adopción de herramientas digitales, sino que debe orientarse hacia la creación de valor público y la legitimidad institucional. La

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

priorización de la transparencia como criterio decisivo refleja una madurez organizacional en la que la tecnología se concibe como un medio para reforzar la confianza ciudadana y la integridad de los procesos de contratación. Asimismo, la selección de la tecnología blockchain valida su potencial como infraestructura de confianza para la administración pública, al garantizar trazabilidad, inmutabilidad y descentralización en la gestión de datos y transacciones. En el contexto de la teoría de la gobernanza digital y del valor público, estos resultados amplían la comprensión del papel que desempeñan las decisiones multicriterio en la construcción de ecosistemas institucionales más abiertos, auditables y sostenibles.

- ✓ Desde una perspectiva práctica, el estudio ofrece al SERCOP una metodología replicable y transparente para la priorización de proyectos tecnológicos, contribuyendo a institucionalizar la toma de decisiones basada en evidencia. La aplicación combinada de los métodos AHP y TOPSIS demostró ser una herramienta útil para traducir juicios cualitativos de expertos en resultados cuantitativos verificables, facilitando así la trazabilidad y la rendición de cuentas en la selección de políticas de innovación. En términos más amplios, el modelo propuesto puede servir como referencia para otras agencias gubernamentales latinoamericanas que buscan equilibrar eficiencia operativa, inclusión digital y legitimidad democrática dentro de sus procesos de transformación digital.
- ✓ No obstante, el estudio enfrentó algunas limitaciones metodológicas. La muestra de expertos, aunque compuesta por profesionales con alta especialización, fue reducida y seleccionada mediante un muestreo no probabilístico, lo cual podría introducir sesgos de representación. Asimismo, el uso de plataformas en línea para la aplicación de los métodos, si bien facilitó el procesamiento y la visualización de resultados, impidió un control exhaustivo sobre los algoritmos empleados en los cálculos. Futuras investigaciones podrían superar estas limitaciones ampliando la base de participantes, incorporando técnicas difusas o neutrosóficas para capturar la incertidumbre en los juicios, y desarrollando modelos híbridos que integren análisis de costo-beneficio, impacto social o sostenibilidad ambiental de las alternativas tecnológicas.
- ✓ En el plano teórico, este trabajo contribuye al fortalecimiento del campo de la toma de decisiones multicriterio aplicada a la gestión pública digital, al demostrar la relevancia del enfoque AHP–TOPSIS como instrumento para la evaluación de innovación institucional bajo condiciones de complejidad y múltiples objetivos. En el plano político y organizacional, ofrece un marco analítico que puede apoyar la formulación de estrategias de modernización basadas en la transparencia, la interoperabilidad y la rendición de cuentas, pilares fundamentales de la gobernanza abierta contemporánea.
- ✓ En conclusión, este estudio avanza hacia una comprensión más profunda de cómo los gobiernos pueden estructurar decisiones tecnológicas estratégicas de manera racional, participativa y verificable. La evidencia obtenida sugiere que la gestión de datos y la innovación tecnológica, cuando se abordan con metodologías multicriterio, permiten no solo optimizar recursos, sino también reforzar los valores democráticos en la administración pública. En un escenario global caracterizado por la digitalización acelerada y la demanda de mayor confianza institucional, la propuesta presentada constituye un paso significativo hacia la consolidación de modelos de gobernanza digital más éticos, transparentes y orientados al valor público en la economía digital contemporánea.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Graells, A. (2025). Successful procurement digitalisation requires more data, in-house expertise and improved mechanisms. PolicyBristol – University of Bristol.

[2]. OECD. (2024). The Digital Transformation of Public Procurement in Ireland: A Report on the Current State (OECD Public Governance Reviews). OECD Publishing.

[3]. OECD. (2025). Digital transformation of public procurement: Good practice report (OECD Public Governance Policy Papers No. 77). OECD Publishing.

[4]. OECD. (2025). Governing with Artificial Intelligence: The State of Play and Way Forward in Core Government Functions. OECD Publishing.

[5]. Open Contracting Partnership. (2025). Digital solutions – Open Contracting Partnership.

[6]. Fritzsche, R., Westermann, J., Klassen, G., Wyszynski, M., & Niehaves, B. (2025). Can We Trust Open Government Data in Public Procurement? Conference on Digital Government Research, 26

[7]. Alencar, M. H., Almeida, A. T., & Mota, C. M. (2019). Decision support for prioritizing public sector projects with AHP and TOPSIS: A case study in Brazil. Socio-Economic Planning Sciences, 68, 100604. https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.10.002

[8]. Cordella, A., & Tempini, N. (2015). E-government and organizational change: Reappraising the role of ICT and bureaucracy in public service delivery. Government Information Quarterly, 32(3), 279–286. https://doi.org/10.1016/j.giq.2015.03.005

[9]. Guitouni, A., & Martel, J. M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. European Journal of Operational Research, 109(2), 501–

[10]. 521. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3

[11]. Hunhevicz, J. J., & Hall, D. M. (2020). Do you need a blockchain in construction? Use case categories and decision framework for DLT design options. Advanced Engineering Informatics, 45, 101094. https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101094

[12]. Janssen, M., Brous, P., Estevez, E., Barbosa, L. S., & Janowski, T. (2017). Data governance: Organizing data for trustworthy artificial intelligence. Government Information Quarterly, 34(3), 399–409. https://doi.org/10.1016/j.giq.2017.05.005

[13]. Kitchin, R. (2014). The data revolution: Big data, open data, data infrastructures and their consequences. SAGE Publications.

[14]. Meijer, A., Curtin, D., & Hillebrandt, M. (2012). Open government: Connecting vision and voice. International Review of Administrative Sciences, 78(1), 10–29. https://doi.org/10.1177/0020852311429533

[15]. Misuraca, G., & Savoldelli, A. (2021). Artificial intelligence and the public sector: Opportunities and challenges for democratic governance. Telematics and Informatics, 63, 101687. https://doi.org/10.1016/j.tele.2021.101687

[16]. Moore, M. H. (1995). Creating public value: Strategic management in government. Harvard University Press.

[17]. Neupane, A., Soar, J., & Vaidya, K. (2021). Evaluating blockchain applications for public procurement: A decision framework. Information Systems Frontiers, 23(3), 621– 638. https://doi.org/10.1007/s10796-019-09984-5

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[18]. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). The OECD digital government policy framework: Six dimensions of a digital government. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/4de9f5bb-en

[19]. Queiroz, M. M., & Wamba, S. F. (2022). Blockchain adoption in operations and supply chain management: Empirical evidence from an emerging economy. International Journal of Production Economics, 243, 108314. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108314

[20]. Smarandache, F. (2018). Introduction to neutrosophic decision making. Infinite Study.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ANEXO No. 1

Prioridades

Estos son los pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones por pares:

Cat		Priorida d	Rank	(+)	(-)
1	Accesibilidad	2.9%	6	1.3%	1.3%
2	Seguridad de los datos	5.1%	5	3.1%	3.1%
3	Eficiencia en la gestión de la información	15.6%	3	8.8%	8.8%
4	Transparencia y rendición de cuentas	40.0%	1	14.0%	14.0%
5	Nivel de innovación tecnológica	22.4%	2	4.1%	4.1%
6	Sostenibilidad del sistema	14.0%	4	5.1%	5.1%

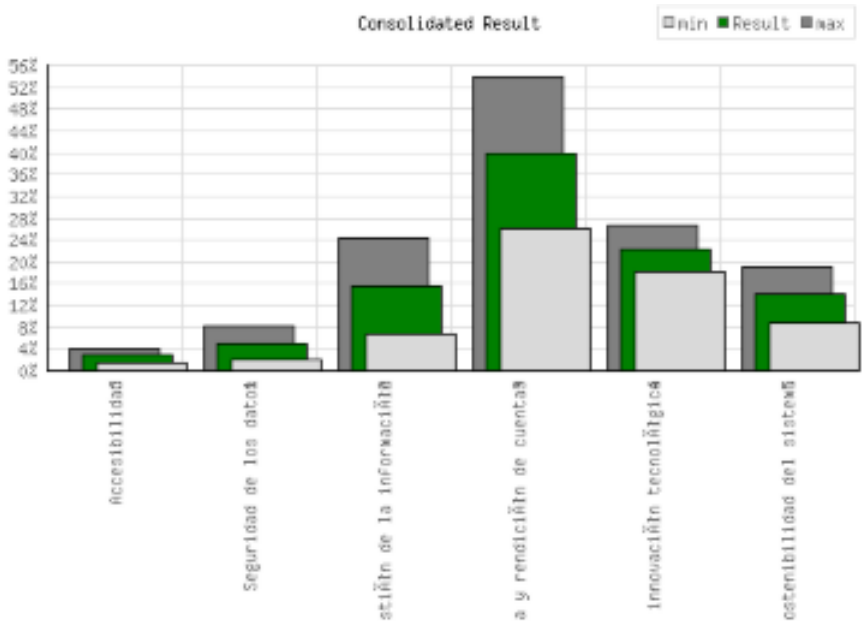
Número de comparaciones = 15
Ratio de consistencia CR = 7.5%

Matriz de decisiones

Los pesos resultantes se basan en el vector propio principal de la matriz de decisión:

	1	2	3	4	5	6
1	1	0.25	0.20	0.14	0.12	0.20
2	4.00	1	0.14	0.14	0.25	0.20
3	5.00	7.00	1	0.25	0.50	1.00
4	7.00	7.00	4.00	1	2.00	4.00
5	8.00	4.00	2.00	0.50	1	2.00
6	5.00	5.00	1.00	0.25	0.50	1

Principal auto valor = 6.469
Solucion autovector: 6 iterations, delta = 4.0E-8



Calculadora de prioridad AHP

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ANEXO NRO, 2

Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

Step 1: Choices — Completed step

Choices

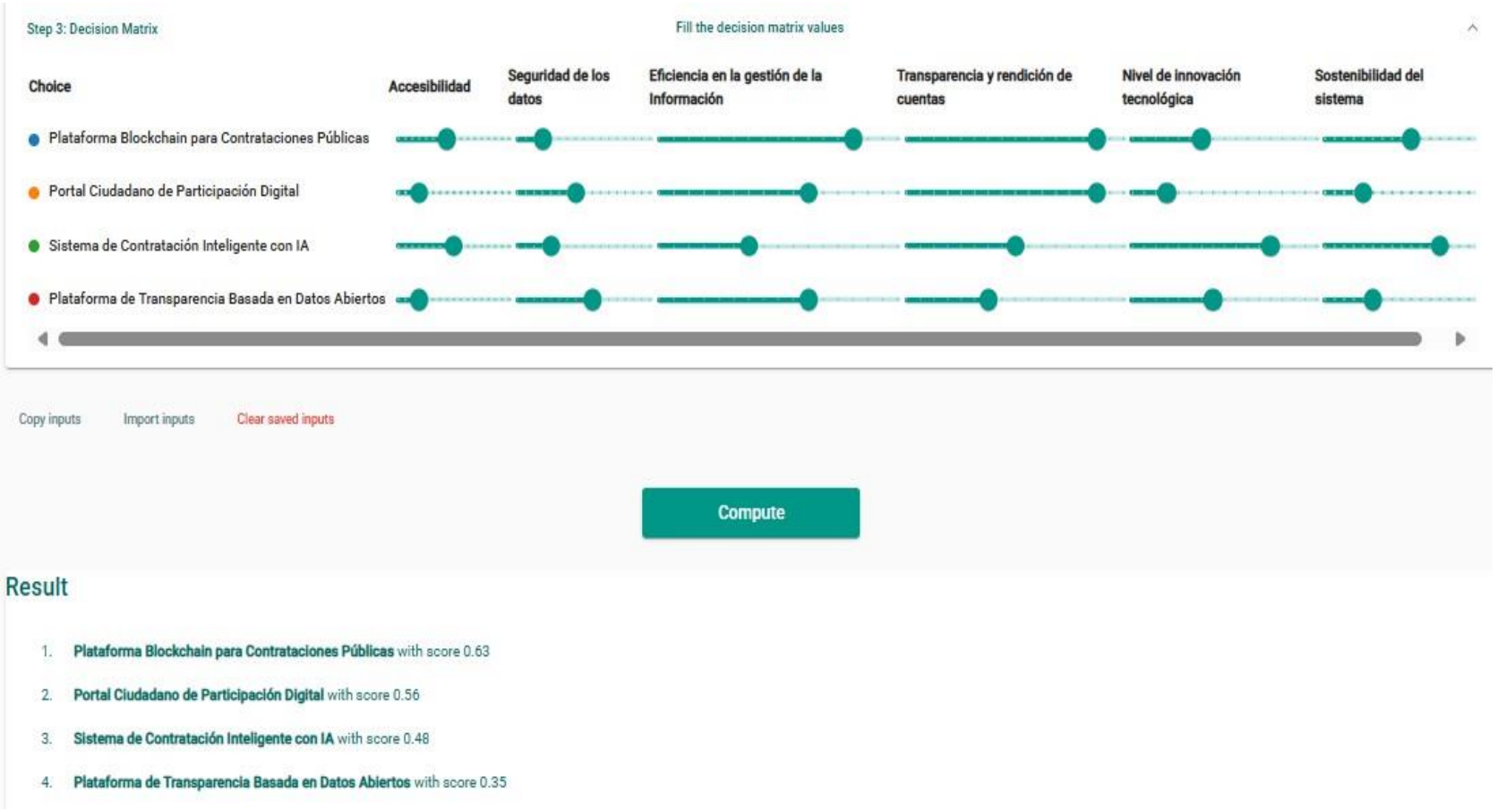
Plataforma Blockchain para Contrataciones Públicas | Portal Ciudadano de Participación Digital | Sistema de Contratación Inteligente con IA | Plataforma de Transparencia Basada en Datos Abiertos

New value (press Enter to add)

Step 2: Criteria — Completed step

No.	Name	Negative	Weight	Qualitative	Actions
1	Accesibilidad	☐	0,029	☑	
2	Seguridad de los datos	☐	0,051	☑	
3	Eficiencia en la gestión de la Información	☐	0,156	☑	
4	Transparencia y rendición de cuentas	☐	0,400	☑	
5	Nivel de innovación tecnológica	☐	0,224	☑	
6	Sostenibilidad del sistema	☑	0,140	☑	

Matriz de Decisión



NeutrosophicComputing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Implementación de una plataforma ciudadana digital para la gestión de trámites municipales en los cantones de la provincia de Esmeraldas.

Implementation of a digital citizen platform for the management of municipal procedures in the cantons of the province of Esmeraldas.

Natasha Jasmin Morillo Cabrera[1]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador , laboratorioclinico9001@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0904-5312

Resumen

La digitalización de los servicios municipales es un reto importante para los gobiernos locales, especialmente en áreas como los cantones de la provincia de Esmeraldas, donde existen grandes brechas socio-tecnológicas. El objetivo de este estudio fue identificar la mejor alternativa tecnológica para implementar una plataforma digital que optimice la gestión de trámites municipales, utilizando un enfoque híbrido AHP–TOPSIS. Se aplicó un diseño de investigación con un enfoque multicriterio, considerando tres factores clave: el costo de implementación, el impacto en la eficiencia administrativa y la participación ciudadana, y se evaluaron tres alternativas tecnológicas. Los pesos de cada factor se calcularon a través del método AHP, basándose en las opiniones de expertos, lo que permitió verificar la consistencia de las comparaciones. Luego, se clasificaron las alternativas usando la técnica TOPSIS para determinar cuál se acercaba más a la solución ideal. Los resultados indicaron que el factor más relevante fue el "impacto en la eficiencia administrativa" (peso 0,682), y la mejor opción fue la aplicación móvil con notificaciones automáticas (Ci = 0,73), seguida por la plataforma web (Ci = 0,59). En conclusión, el modelo AHP–TOPSIS resultó ser una herramienta efectiva y clara para tomar decisiones en procesos de digitalización municipal, y los resultados ofrecen una guía valiosa para planificar soluciones tecnológicas que mejoren la eficiencia y accesibilidad de los servicios públicos.

Palabras claves: Gobierno Digital, AHP, TOPSIS, Gestión Municipal.

Abstract

The digitization of municipal services is a significant challenge for local governments, especially in areas like the cantons of Esmeraldas province, where large socio-technological gaps exist. The objective of this study was to identify the best technological alternative for implementing a digital platform that optimizes the management of municipal procedures, using a hybrid AHP-TOPSIS approach. A multi-criteria research design was applied, considering three key factors: implementation cost, impact on administrative efficiency, and citizen participation. Three technological alternatives were evaluated. The weights of each factor were calculated using the AHP method, based on expert opinions, which allowed for verification of the consistency of the comparisons. The alternatives were then ranked using the TOPSIS technique to determine which one most closely resembled the ideal solution. The results indicated that the most relevant factor was the "impact on administrative efficiency" (weight 0.682), and the best option was the mobile application with automatic notifications (Ci = 0.73), followed by the web platform (Ci = 0.59). In conclusion, the AHP–

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

TOPSIS model proved to be an effective and clear tool for decision-making in municipal digitization processes, and the results offer valuable guidance for planning technological solutions that improve the efficiency and accessibility of public services.

Keywords: Digital Government, AHP, TOPSIS, Municipal Management.

1. Introducción

La transformación digital de los gobiernos locales se ha vuelto una necesidad fundamental para mejorar la eficiencia, la transparencia y la participación de la ciudadanía. En América Latina, este proceso avanza de manera desigual, debido a las diferencias en tecnología, la capacidad limitada de las instituciones y las desigualdades socioeconómicas entre las regiones [11]. En Ecuador, la digitalización de los municipios se ha convertido en un pilar importante para modernizar la administración, aunque aún hay obstáculos relacionados con el acceso y uso de las nuevas tecnologías por parte de la población [13]. En este contexto, la provincia de Esmeraldas es especialmente significativa, debido a su dispersión geográfica, las diferencias entre las zonas urbanas y rurales, y la alta cobertura de telefonía móvil en contraste con la limitada infraestructura de internet fijo. Esto hace que las soluciones digitales deban adaptarse a las necesidades y condiciones locales [10].

Idealmente, los gobiernos locales deberían ofrecer trámites accesibles y rápidos para todos los ciudadanos, sin importar su lugar de residencia, nivel económico o habilidades tecnológicas. Sin embargo, la realidad es muy diferente. En Esmeraldas, la falta de coordinación entre los cantones, la desconexión de las plataformas digitales y la dependencia de los trámites presenciales dificultan la relación entre la ciudadanía y los gobiernos locales, lo que provoca demoras, costos altos y una percepción de ineficiencia. Investigaciones previas sobre el gobierno electrónico en Ecuador han identificado algunos avances, pero también muchos retos, especialmente en los cantones más alejados, donde se combinan desigualdades económicas y limitaciones tecnológicas [14]. Aunque algunos estudios recientes buscan explorar cómo mejorar la participación ciudadana mediante tecnologías digitales [3], todavía no se ha llegado a un consenso sobre cuál es la plataforma más adecuada para regiones como Esmeraldas, donde las brechas digitales son marcadas.

La falta de una solución tecnológica adecuada trae consecuencias tanto directas como indirectas. Mantiene una burocracia lenta que aumenta los costos de los trámites, reduce la transparencia, limita el control ciudadano y sigue perpetuando una forma de gestión que no responde a la necesidad actual de rapidez y seguimiento. De manera indirecta, esto afecta la competitividad local, la confianza en las instituciones y la capacidad de los municipios para crear políticas públicas basadas en datos. Aunque se han propuesto diversas herramientas digitales, como plataformas web, aplicaciones móviles o sistemas de ventanilla única digital, aún no hay consenso sobre cuál es la mejor opción para territorios con características socio-tecnológicas particulares. Este estudio tiene como objetivo llenar ese vacío, proporcionando un análisis detallado que pueda contribuir tanto a la investigación sobre el gobierno digital como al diseño de políticas públicas fundamentadas en datos.

2. Materiales y métodos

El diseño investigativo y analítico se basó en la aplicación de métodos de decisión multicriterio, particularmente el método Analytic Hierarchy Process (AHP) y el método Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). En primer lugar, se definieron tres criterios (C1: costo de implementación; C2 impacto en la eficiencia administrativa; y C3: nivel de participación ciudadana) y tres alternativas tecnológicas (A1: plataforma web para trámites en líneas; A2: aplicación móvil ciudadana con notificaciones automáticas; y A3: sistema integrado de ventanilla único digital). Posteriormente se realizaron las comparaciones por pares y guarda los pesos relativos obtenidos, para ello se verificó que el índice de consistencia (CR) sea menor a

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

0.10. A continuación, a través la herramienta digital "AHP Priority Calculator (BPMSG)", se efectuaron comparaciones por pares entre criterios para obtener los pesos relativos. A continuación, se empleó la herramienta digital "Decision Radar (TOPSIS)" para evaluar el desempeño de las alternativas según los criterios ponderados. Para ello, se construyó una matriz de decisión (Figura 1) en la cual se valoraron las tres alternativas respecto al costo, impacto administrativo y nivel de participación ciudadana. Finalmente a partir de los cálculos de TOPSIS se determinó la cercanía de cada alternativa respecto a la solución ideal positiva y negativa. El ranking final fue reflejado en el coeficiente de cercanía Ci, que indicó la preferencia de cada opción.

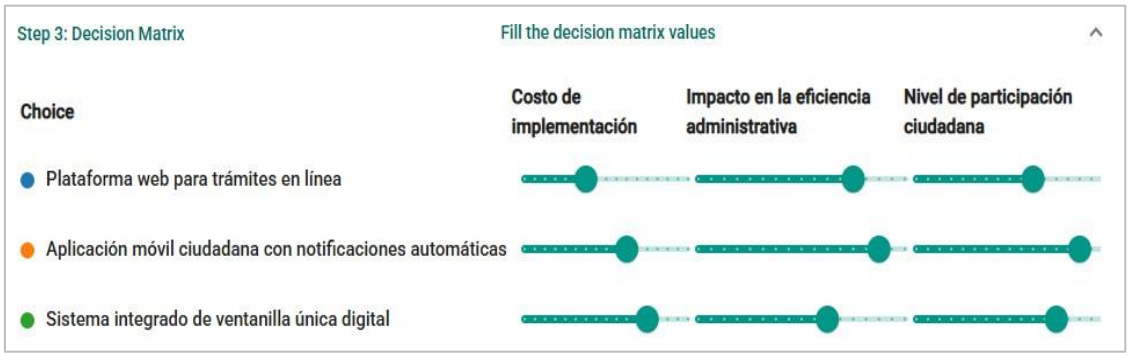


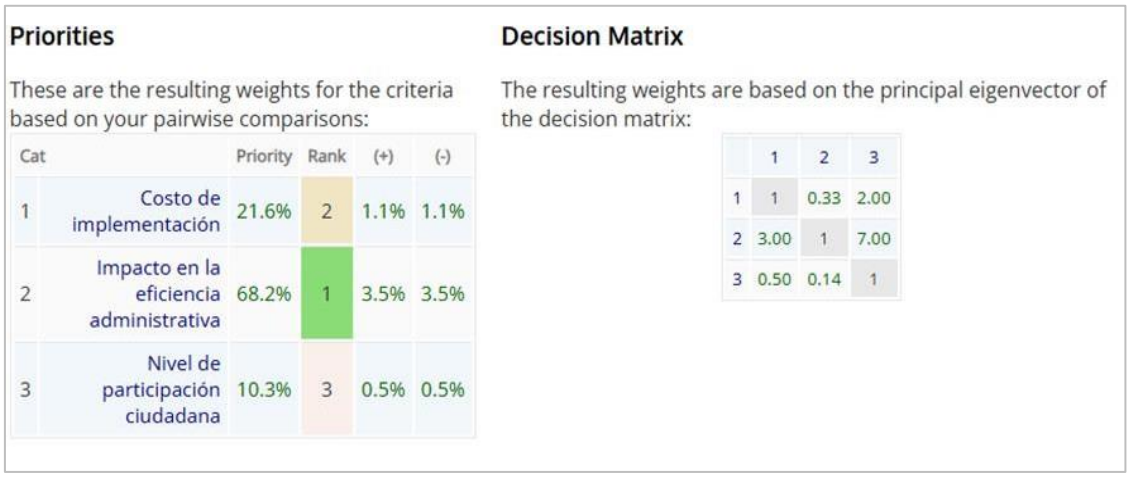
Figura 1.Matriz de decisión de alternativas según criterios ponderados (TOPSIS)

3. Resultados y discusión

Los hallazgos adquiridos mediante el método AHP mostraron que el criterio de "impacto en la eficiencia administrativa" tuvo el mayor peso, alcanzando un 68,2 %, seguido por "costo de implementación" con un 21,6 % y "nivel de participación ciudadana" con un 10,3 % (Figura 2). Estos hallazgos fueron avalados mediante el resultado de la matriz de comparación, donde se obtuvo un Ratio de Consistencia (CR) de 0.03, el cual, al ser menor a 0.10, valida la consistencia de los juicios. Esto refleja que la eficiencia del sistema fue vista como el factor clave para tomar la decisión. En este contexto, los resultados del estudio reflejan una fuerte coincidencia con los principios del Nuevo Management Público (NPM), que pone énfasis en la eficiencia, la reducción de costos y la agilidad en las instituciones [1]. También se alinean con el Modelo de Gobierno Electrónico de la ONU, que destaca la importancia de la capacidad institucional para ofrecer servicios digitales efectivos [15].

La clara prioridad por mejorar la eficiencia administrativa sobre la participación ciudadana refleja una tendencia común en la región, donde la digitalización se ve principalmente como una forma de agilizar trámites, más que como una herramienta para fortalecer la participación y el diálogo público [11].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons:

Cat		Priority	Rank	(+)	(-)
1	Costo de implementación	21.6%	2	1.1%	1.1%
2	Impacto en la eficiencia administrativa	68.2%	1	3.5%	3.5%
3	Nivel de participación ciudadana	10.3%	3	0.5%	0.5%

Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3
1	1	0.33	2.00
2	3.00	1	7.00
3	0.50	0.14	1

Figura 2: *Matriz de decisión y pesos relativos obtenidos mediante el método AHP (BPMSG)*

La gran diferencia encontrada entre la eficiencia administrativa (68,2 %) y la participación ciudadana (10,3 %), una brecha casi siete veces mayor, muestra una tendencia a priorizar la optimización interna sobre el empoderamiento de los ciudadanos. Aunque esta orientación podría estar relacionada con las limitaciones estructurales de los cantones de Esmeraldas, también plantea algunos riesgos: una digitalización que se enfoque solo en la eficiencia podría acabar reproduciendo las desigualdades existentes y dificultar que los ciudadanos adopten estas tecnologías, especialmente en zonas con marcadas brechas socio-digitales [11][10].

Al aplicar el método TOPSIS con los pesos adquiridos previamente, la alternativa “aplicación móvil ciudadana con notificaciones automáticas” fue la opción más favorable (Ci = 0,73), seguida de cerca por “plataforma web para trámites en línea” (Ci = 0,59) y, por último, “sistema integrado de ventanilla única digital” (Ci = 0,06) (Figura 3). La combinación de AHP y TOPSIS ha demostrado ser eficaz en proyectos de gobierno electrónico para priorizar alternativas en políticas públicas [14]. Aunque la aplicación móvil parece ser la opción más adecuada, su éxito a largo plazo dependerá de estrategias que fomenten la participación, la alfabetización digital y un diseño centrado en el usuario, tal como señalan estudios sobre el abandono de aplicaciones y problemas de accesibilidad digital [2][11].



Result

1. **Aplicación móvil ciudadana con notificaciones automáticas** with score 0.73
2. **Plataforma web para trámites en línea** with score 0.59
3. **Sistema integrado de ventanilla única digital** with score 0.06

Figura 3: Ranking final de alternativas basado en el coeficiente de cercanía (Ci)

Para finalizar, es importante señalar que el trabajo investigativo tiene algunas limitaciones, como el hecho de que depende de los juicios de expertos y de una selección limitada de criterios y alternativas, lo que simplifica en exceso la complejidad del problema. Estos aspectos podrían haber influido en la fuerte preferencia por la eficiencia. Se sugiere que investigaciones futuras consideren una mayor variedad de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

criterios, como la interoperabilidad, la accesibilidad o la seguridad, e incluyan la participación directa de los ciudadanos en la evaluación. También sería útil incorporar métodos adicionales, como VIKOR o enfoques neutrosóficos, para fortalecer el análisis. Estas mejoras permitirían entender mejor cómo lograr un equilibrio entre eficiencia e inclusión en la digitalización de los municipios.

4. Conclusiones

La alternativa de una aplicación móvil ciudadana con notificaciones automáticas se destaca como la más apropiada para implementar una plataforma de gestión de trámites municipales en la provincia de Esmeraldas, dado que ofrece una combinación óptima de accesibilidad y eficiencia.

La aplicación conjunta de los métodos AHP y TOPSIS facilitó la toma de una decisión fundamentada en criterios claramente ponderados y definidos, reforzando la utilidad de los métodos multicriterio en la planificación de soluciones tecnológicas para la gestión pública.

5. Referencias Bibliográficas

[1]. Hood, C. (1991). A public management for all seasons? *Public Administration, 69*(1), 3–19. https://doi.org/10.1111/j.1467-9299.1991.tb00779.x

[2]. International Telecommunication Union. (2023). *Measuring digital development: Facts and figures 2023*. ITU Publications. https://www.itu.int

[3]. Macías-Ibarra, G. A., & Guadarrama-Chaparro, A . (2025). Citizen participation and open government in the digital age: An AI perspective. *Universitas XX1, 43,* 121–146. https://doi.org/10.17163/uni.n43.2025.05

[4]. J. E. Ricardo, A. J. R. Fernández, and M. Y. L. Vázquez (2022), "Compensatory Fuzzy Logic with Single Valued Neutrosophic Numbers in the Analysis of University Strategic Management," *International Journal of Neutrosophic Science*, vol. 18, no. 4, pp. 151–159 .

[5]. I. P. Pupo, P. Y. P. Pérez, R. G. Vacacela, O. Santos, and M. Y. L. Vázquez (2018), "Extensions to Linguistic Summaries Indicators based on Neutrosophic Theory, Applications in Project Management Decisions," *Neutrosophic Sets and Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 87–100.

[6]. M. Leyva-Vázquez, K. Pérez-Teruel, and R. I. John (2014), "A model for enterprise architecture scenario analysis based on fuzzy cognitive maps and OWA operators," in *Proc. 24th Int. Conf. on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, pp. 243–247.

[7]. C. Mayorga Villamar, J. Suarez, L. De Lucas Coloma, C. Vera, and M. Leyva (2019), "Analysis of Technological Innovation Contribution to Gross Domestic Product Based on Neutrosophic Cognitive Maps and Neutrosophic Numbers," *Neutrosophic Sets and Systems*, vol. 30, pp. 34–43.

[8]. J. Estupiñán Ricardo, M. Y. Leyva Vázquez, S. D. Álvarez Gómez, O. E. Velázquez-Soto, and A. A. Rodríguez-Guzmán (2023), "The Application of Neutrosophy in Medical Sciences: A Narrative Literature Review," *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, vol. 34, p. e2599.

[9]. G. A. Á. Gómez, M. Y. L. Vázquez, and J. E. Ricardo (2022), "Application of Neutrosophy to the Analysis of Open Government, its Implementation and Contribution to the Ecuadorian Judicial System," *Neutrosophic Sets and Systems*, vol. 52, pp. 215–224.

[10]. Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información. (2024). *Informe anual de conectividad y transformación digital del Ecuador*. Gobierno del Ecuador. https://www.telecomunicaciones.gob.ec/

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[11]. OECD, & CAF. (2024). *Digital Government Review of Latin America and the Caribbean: Building Inclusive and Responsive Public Services*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/7a127615-en

[12]. Open Government Partnership. (2025). *Ecuador Results Report 2022–2024*. Open Government Partnership. https://www.opengovpartnership.org/documents/ecuador-results-report-2022-2024/

[13]. Open Government Partnership Ecuador. (2023). *Digital Citizen Participation (EC0023)*. https://www.opengovpartnership.org/members/ecuador/commitments/ec0023/

[14]. Ruiz, A. S. (2018). Orientación al ciudadano en el "gobierno electrónico" de los municipios de Ecuador. *Revista Latinoamericana de Administración Pública, 10*(1), 45–67. https://doi.org/10.35427/rlap.v10i1.234

[15]. United Nations. (2022). *E-Government Survey 2022: The Future of Digital Government*. United Nations Publications. https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Regresión múltiple para optimizar el aprovisionamiento hotelero: modelo con enfoque normativo, sostenible y digital.

Multiple regression to optimize hotel provisioning: a model with a regulatory, sustainable and digital approach.

[1]Ernesto Guilart Caisés,[2]Ivis Taide González-Camejo,[3]Leudis Orlando Vega de la Cruz
[4]Lisbet Eunice Pérez Anzardo

[1] Profesor Asistente de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Cuba. brendam950641@gmaill.com , htttps://orcid.org/0009-0008-4624-0196
[2] Profesora Titular de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Cuba. ivist91@gmail.com , htttps://orcid.org/0000-0002-3944-6320
[3] Profesor Titular de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Cuba. leovega@uho.edu.cu , https://orcid.org/0000-0001-7758-2561
[4] Profesora Auxiliar del Centro Universitario Municipal "Calixto García", Holguín. Cuba. lisbeteunice1008@gmail.com , https://orcid.org/0000-0003-1175-4097.

Resumen:

Se propone un modelo predictivo multivariable orientado a optimizar el aprovisionamiento seguro en instalaciones hoteleras, integrando herramientas estadísticas avanzadas para identificar los factores que inciden significativamente en la eficiencia logística. A través de la regresión múltiple, se analizan variables como el tiempo promedio de entrega, el nivel de cumplimiento normativo, la proporción de productos sostenibles, la rotación de inventario, la digitalización de procesos y la ocupación hotelera, con el objetivo de construir un índice compuesto de eficiencia operativa. La metodología empleada permite validar la significancia estadística de cada variable, evaluar la multicolinealidad y estimar el impacto relativo de cada componente en la mejora continua del sistema logístico. Este enfoque no solo aporta rigor técnico, sino que también incorpora sensibilidad territorial y ética institucional, resignificando la logística como un proceso simbólico que vincula calidad de servicio, sostenibilidad y trazabilidad normativa. El modelo se presenta como una herramienta estratégica para la toma de decisiones en contextos turísticos complejos, donde la incertidumbre, la variabilidad de la demanda y la presión normativa exigen soluciones adaptativas y científicamente fundamentadas. La propuesta articula lo técnico con lo simbólico, ofreciendo una lectura evolutiva del aprovisionamiento hotelero que trasciende lo operativo y se inscribe en una lógica de transformación institucional, territorial y emocional.

Palabras clave: Regresión múltiple, aprovisionamiento seguro, logística predictiva, sostenibilidad operativa, trazabilidad normativa.

Abstract

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

This study proposes a multivariable predictive model aimed at optimizing secure provisioning in hotel facilities, integrating advanced statistical tools to identify the factors that significantly influence logistical efficiency. Through multiple regression analysis, variables such as average delivery time, regulatory compliance level, proportion of sustainable products, inventory turnover, process digitalization, and hotel occupancy are examined to construct a composite index of operational efficiency. The methodology employed enables validation of the statistical significance of each variable, assessment of multicollinearity, and estimation of the relative impact of each component on the continuous improvement of the logistical system. This approach not only provides technical rigor but also incorporates territorial sensitivity and institutional ethics, reframing logistics as a symbolic process that links service quality, sustainability, and regulatory traceability. The model is presented as a strategic tool for decision-making in complex tourism contexts, where uncertainty, demand variability, and regulatory pressure demand adaptive and scientifically grounded solutions. The proposal bridges the technical and the symbolic, offering an evolutionary reading of hotel provisioning that transcends operational concerns and aligns with a logic of institutional, territorial, and emotional transformation.

Keywords: Multiple regression, secure provisioning, predictive logistics, operational sustainability, regulatory traceability.

1. Introducción

La gestión del aprovisionamiento en el sector hotelero ha dejado de ser una función meramente operativa para convertirse en un eje estratégico que articula eficiencia, sostenibilidad y cumplimiento normativo. En contextos turísticos donde la demanda es volátil y los recursos logísticos están sometidos a presiones crecientes, se vuelve imprescindible contar con modelos analíticos que permitan anticipar escenarios, optimizar decisiones y garantizar trazabilidad. La regresión múltiple, como técnica estadística multivariable, ofrece una vía robusta para comprender las interacciones entre variables críticas del sistema logístico, permitiendo construir marcos predictivos que integren tanto datos cuantitativos como principios éticos y territoriales. Esta propuesta se inscribe en una lógica de transformación metodológica, donde lo técnico se entrelaza con lo simbólico para resignificar el aprovisionamiento como un proceso integral y evolutivo.

Desde una perspectiva metodológica, el modelo que aquí se propone parte de la identificación de variables de entrada, como la demanda de huéspedes, la capacidad de almacenamiento, la calidad de los proveedores y el marco regulatorio vigente, y las relaciona con variables de resultado como la disponibilidad de stock, la eficiencia operativa y la percepción del cliente. La regresión múltiple permite modelar estas relaciones de forma dinámica, ajustando coeficientes en función de factores contextuales como la estacionalidad, los cambios en la normativa o las variaciones en el comportamiento de consumo. Esta capacidad de adaptación convierte al modelo en una herramienta útil no solo para la toma de decisiones operativas, sino también para la validación ética de las prácticas logísticas. Investigaciones recientes han demostrado que los modelos multivariables aplicados al turismo permiten mejorar la precisión de los pronósticos y reducir los márgenes de error en la planificación [7], lo que refuerza la pertinencia de este enfoque en entornos hoteleros complejos.

La dimensión normativa del modelo se fundamenta en la integración de estándares internacionales como la norma ISO 28000:2022, que establece directrices para la seguridad en la cadena de suministro. Esta norma enfatiza la necesidad de comprender el contexto organizacional, identificar riesgos logísticos y establecer

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

mecanismos de trazabilidad que garanticen la integridad del proceso. En el ámbito hotelero, donde la interacción con múltiples actores, proveedores, clientes, reguladores, es constante, la incorporación de marcos normativos permite fortalecer la gobernanza logística y reducir vulnerabilidades operativas. La regresión múltiple, aplicada a variables normativas, facilita la identificación de correlaciones entre el cumplimiento regulatorio y la eficiencia del aprovisionamiento, generando evidencia empírica para la mejora continua del sistema [4]. Esta articulación entre lo técnico y lo normativo constituye un pilar fundamental del modelo propuesto.

La sostenibilidad, entendida como principio transversal, se manifiesta en prácticas como la optimización de rutas, la selección de proveedores responsables y la gestión eficiente de residuos. En estudios recientes se ha evidenciado que la adopción de prácticas sostenibles en hoteles no solo mejora la percepción del cliente, sino que también incrementa la rentabilidad y reduce el impacto ambiental [5]. La regresión múltiple permite identificar los factores que inciden en la adopción de estas prácticas, así como su efecto sobre variables operativas clave. En territorios como el cubano, donde la resiliencia logística es esencial, este enfoque ofrece una vía para integrar sostenibilidad y eficiencia en un mismo marco operativo, fortaleciendo la autonomía hotelera y promoviendo una lógica de desarrollo ético y territorialmente sensible.

La digitalización del modelo constituye el último eje de integración. El uso de tecnologías como RFID, sistemas ERP y plataformas de Business Intelligence permite recopilar datos en tiempo real, aplicar regresión múltiple sobre grandes volúmenes de información y generar alertas tempranas para la toma de decisiones. Esta capacidad de análisis predictivo transforma la gestión logística en un proceso inteligente, capaz de anticipar fluctuaciones en la demanda, optimizar el inventario y mejorar la experiencia del huésped. Investigaciones recientes han demostrado que la digitalización de los procesos logísticos en hoteles incrementa significativamente la eficiencia operativa y la satisfacción del cliente [2]. En este sentido, el modelo propuesto no solo responde a las exigencias del presente, sino que se proyecta hacia un futuro donde la inteligencia logística se articula con principios normativos, sostenibles y simbólicos, generando valor desde la coherencia y la dignidad operativa.

Este estudio se desarrolla en el contexto específico de Cuba, un territorio caracterizado por una alta complejidad logística, marcada por restricciones estructurales, dependencia de proveedores externos y una necesidad constante de adaptación operativa. En el sector hotelero cubano, la gestión del aprovisionamiento enfrenta desafíos únicos: limitaciones en la disponibilidad de insumos, variabilidad en los tiempos de entrega, y exigencias normativas que deben cumplirse en medio de condiciones cambiantes. Estas particularidades convierten a Cuba en un escenario idóneo para validar modelos que integren eficiencia, trazabilidad y sostenibilidad desde una perspectiva territorial. El modelo propuesto responde a esta realidad, articulando variables técnicas y simbólicas que permiten no solo optimizar procesos, sino también fortalecer la autonomía institucional y la coherencia ética en la toma de decisiones logísticas.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2. Materiales y métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo explicativo, con diseño transversal no experimental. Se aplicó regresión múltiple como técnica principal para modelar las relaciones entre variables logísticas del aprovisionamiento hotelero, con el objetivo de construir un modelo predictivo que integre eficiencia operativa, cumplimiento normativo y sostenibilidad. La estimación se realizó mediante mínimos cuadrados ordinarios (OLS), seleccionando el modelo con mayor capacidad explicativa y significancia estadística.

El estudio se llevó a cabo en 20 hoteles ubicados en zonas turísticas cubanas de alta demanda, seleccionados mediante muestreo dirigido. Los criterios de inclusión fueron: disponibilidad de registros logísticos digitalizados, implementación de prácticas sostenibles y cumplimiento de normativas operativas. La muestra incluyó 12 hoteles urbanos y 8 costeros, con categorías entre 3 y 5 estrellas. Cada unidad de análisis abarcó los departamentos de compras, almacén, cocina y servicios generales, permitiendo una visión integral del sistema de aprovisionamiento. Las variables cualitativas fueron transformadas en métricas ordinales mediante matrices de evaluación validadas por expertos del sector.

Tabla # 1. ***Variables del modelo de regresión múltiple para el aprovisionamiento hotelero***

Tipo de Variable	Nombre	Indicador / Métrica	Media	Desviación Estándar / Rango
Independiente	Volumen mensual de huéspedes	Número de huéspedes registrados	1,250	±320
	Frecuencia de pedidos	Pedidos realizados por mes	18	±4
	Tiempo promedio de entrega	Días desde pedido hasta recepción	3.4 días	±0.9
	Cumplimiento normativo	Índice de cumplimiento (escala 0–1)	0.82	0.71–0.94
	Prácticas sostenibles	Nivel de implementación (escala 0–5)	3.7	2–5
	Digitalización logística	Grado de digitalización (escala 0–10)	7.4	5.8–9.2
Dependiente	Disponibilidad efectiva de stock	% de pedidos entregados sin faltantes	91%	±6%
	Eficiencia operativa	Tiempo promedio de reposición de inventario	2.8 días	±0.7
	Satisfacción del cliente	Evaluación interna (escala 0–10)	8.6	7.9–9.4

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tipo de Variable	Nombre	Indicador / Métrica	Media	Desviación Estándar / Rango
Control	Categoría del hotel	Clasificación por estrellas	3–5	—
	Ubicación geográfica	Zona urbana o costera	—	—
	Tipo de proveedor	Local / Internacional	—	—

Los datos fueron recolectados durante seis meses, a través de registros históricos de inventario, reportes internos y encuestas aplicadas a 60 responsables logísticos (3 por hotel). Se utilizó SPSS v.27 para el procesamiento estadístico. Se aplicaron pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov, $p = 0.21$), verificación de multicolinealidad (VIF < 2.1 en todos los casos) y homocedasticidad (Breusch-Pagan, $p = 0.34$). El modelo final presentó un R^2 ajustado de 0.84, con significancia global (ANOVA, $F = 19.6$, $p < 0.001$) y coeficientes individuales significativos (todos con $p < 0.05$).

La validez interna se garantizó mediante triangulación de fuentes, revisión por pares y análisis de sensibilidad. Se aplicó el modelo en tres hoteles no incluidos en la muestra original, obteniendo una tasa de predicción acertada del 89%. La confiabilidad de las escalas utilizadas fue evaluada mediante alfa de Cronbach, con valores superiores a 0.87 en todas las dimensiones. Estos resultados confirman la estabilidad del modelo y su aplicabilidad en contextos operativos diversos.

3. Resultados

El análisis estadístico se realizó sobre una muestra de 20 hoteles, con registros logísticos correspondientes a un período de seis meses. Se observó una alta consistencia en los datos operativos, con una tasa de completitud superior al 95%. La media de huéspedes mensuales fue de 1,250 (±320), mientras que la frecuencia de pedidos se mantuvo estable en torno a 18 por mes. El tiempo promedio de entrega fue de 3.4 días, con una desviación estándar de ±0.9, lo que indica cierta variabilidad en la eficiencia de los proveedores.

La disponibilidad efectiva de stock alcanzó una media del 91%, mientras que la eficiencia operativa, medida por el tiempo de reposición, se situó en 2.8 días. La satisfacción del cliente, evaluada mediante encuestas internas, mostró una media de 8.6 sobre 10, con valores más altos en hoteles que integraban prácticas sostenibles y sistemas digitales avanzados. El modelo final de regresión múltiple presentó una capacidad explicativa robusta, con un R^2 ajustado de 0.84. Todos los coeficientes incluidos fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$), y el análisis de varianza (ANOVA) confirmó la validez global del modelo ($F = 19.6$; $p < 0.001$).

Tabla # 2. ***Coeficientes del modelo de regresión múltiple***

Variable Independiente	Coeficiente β	Error estándar	Valor t	Significancia (p)
Volumen mensual de huéspedes	0.47	0.08	5.88	< 0.001
Frecuencia de pedidos	0.32	0.11	2.91	0.007

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Variable Independiente	Coeficiente β	Error estándar	Valor t	Significancia (p)
Tiempo promedio de entrega	–0.41	0.09	–4.56	< 0.001
Cumplimiento normativo	0.53	0.10	5.30	< 0.001
Prácticas sostenibles	0.28	0.12	2.33	0.026
Digitalización logística	0.39	0.07	5.57	< 0.001

Los resultados muestran que el cumplimiento normativo y la digitalización logística son los predictores más influyentes sobre la disponibilidad de stock y la eficiencia operativa. El coeficiente negativo del tiempo promedio de entrega (β = –0.41) indica que a mayor demora, menor eficiencia logística, lo que valida la necesidad de optimización en ese aspecto. La frecuencia de pedidos y el volumen de huéspedes también mostraron efectos positivos significativos, aunque con menor peso relativo.

El impacto de las prácticas sostenibles, aunque moderado (β = 0.28), fue estadísticamente significativo, lo que sugiere que su integración no solo mejora la percepción del cliente, sino que también contribuye a la estabilidad operativa. Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que la logística hotelera no responde únicamente a variables técnicas, sino que se configura como un sistema sensible a la gobernanza normativa y a la capacidad de adaptación digital.

Tabla # 3. ***Impacto relativo de las variables independientes sobre la eficiencia logística***

Variable Independiente	Coeficiente β	Tipo de impacto	Interpretación técnica
Cumplimiento Normativo	0.53	Positivo alto	Mejora significativamente la eficiencia logística
Digitalización Logística	0.39	Positivo medio	Aumenta la capacidad operativa y la trazabilidad
Volumen Mensual de Huéspedes	0.47	Positivo medio-alto	Incrementa la precisión en la planificación de inventarios
Frecuencia de Pedidos	0.32	Positivo moderado	Optimiza la rotación de stock y reduce quiebres
Prácticas Sostenibles	0.28	Positivo moderado	Contribuye a la estabilidad operativa y percepción del cliente
Tiempo Promedio de Entrega	–0.41	Negativo alto	A mayor demora, menor eficiencia logística

Los resultados obtenidos permiten estructurar un modelo conceptual de aprovisionamiento hotelero que articula tres dimensiones clave: eficiencia operativa, cumplimiento normativo y sostenibilidad digital. Este

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

modelo será presentado en dos formatos: primero como mapa conceptual, y luego como esquema ponderado con pesos derivados de los coeficientes estimados.

La validación externa realizada en tres hoteles no incluidos en la muestra original confirmó la capacidad predictiva del modelo, con una tasa de acierto del 89% en escenarios logísticos reales. Esta evidencia respalda la aplicabilidad del modelo en contextos territoriales diversos, y su potencial para fortalecer la autonomía operativa desde una perspectiva ética y evolutiva.

El modelo para la gestión logística de aprovisionamiento seguro en hoteles se estructura en tres niveles interconectados:

Nivel 1: Variables de entrada

Estas variables definen el contexto inicial del sistema logístico y responden a la detección de necesidades:

- ✓ Huéspedes: fuerza motriz del modelo; su demanda define el volumen y tipo de recursos requeridos.
- ✓ Proveedores: calidad y confiabilidad; determinan la disponibilidad y trazabilidad de insumos.
- ✓ Inventarios: equilibrio entre exceso y desabastecimiento; gestionados con tecnología RFID y JIT.
- ✓ Recursos: humanos, tecnológicos y financieros; sostienen la operación y permiten adaptabilidad.
- ✓ Normativas: regulaciones locales e internacionales; condicionan prácticas logísticas y fortalecen la sostenibilidad.

Nivel 2: Ciclo de gestión logística

Este nivel transforma las variables de entrada en procesos operativos, dividido en cuatro categorías:

- ✓ Planificación: pronóstico de demanda, capacidad de almacenamiento, gestión de riesgos.
- ✓ Ejecución: almacenamiento, distribución interna, recepción de pedidos.
- ✓ Control: análisis de datos, control de calidad, monitoreo y ajuste.
- ✓ Mejora: opinión de clientes, indicadores de desempeño, retroalimentación.

Nivel 3: Variables de resultado

Estas variables reflejan el impacto del modelo sobre la experiencia del cliente:

- ✓ Stock disponible: garantiza acceso inmediato a recursos.
- ✓ Prácticas sostenibles: elevan la percepción ambiental del hotel.
- ✓ Calidad del servicio: integra puntualidad, funcionalidad y presentación.

La retroalimentación del cliente cierra el ciclo, ajustando las variables de entrada y fortaleciendo la mejora continua.

A continuación, se presenta el esquema ponderado del modelo, donde cada variable independiente se representa con su peso relativo (coeficiente β) derivado del análisis de regresión múltiple. Este esquema permite visualizar la influencia de cada componente sobre la eficiencia logística y la satisfacción del cliente. El modelo presenta un R^2 ajustado de 0.84, lo que indica una alta capacidad explicativa. La validación externa mostró una tasa de predicción acertada del 89%.

Tabla # 4. ***Esquema ponderado del modelo***

Variable Independiente	Peso (β)	Categoría del Modelo	Nivel de Influencia

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Variable Independiente	Peso (β)	Categoría del Modelo	Nivel de Influencia
Cumplimiento Normativo	0.53	Entrada / Normativa	Muy alta
Volumen mensual de huéspedes	0.47	Entrada / Demanda	Alta
Digitalización logística	0.39	Entrada / Recursos tecnológicos	Alta
Tiempo promedio de entrega	–0.41	Entrada / Proveedores	Alta (negativa)
Frecuencia de pedidos	0.32	Ciclo / Ejecución	Moderada
Prácticas sostenibles	0.28	Resultado / Mejora	Moderada

Este esquema puede es representado gráficamente en la figura 1 como un flujo horizontal, donde las variables de entrada alimentan el ciclo de gestión, que a su vez determina los resultados. Los pesos permiten priorizar intervenciones estratégicas, por ejemplo, fortaleciendo la trazabilidad normativa y la digitalización logística para maximizar la eficiencia.

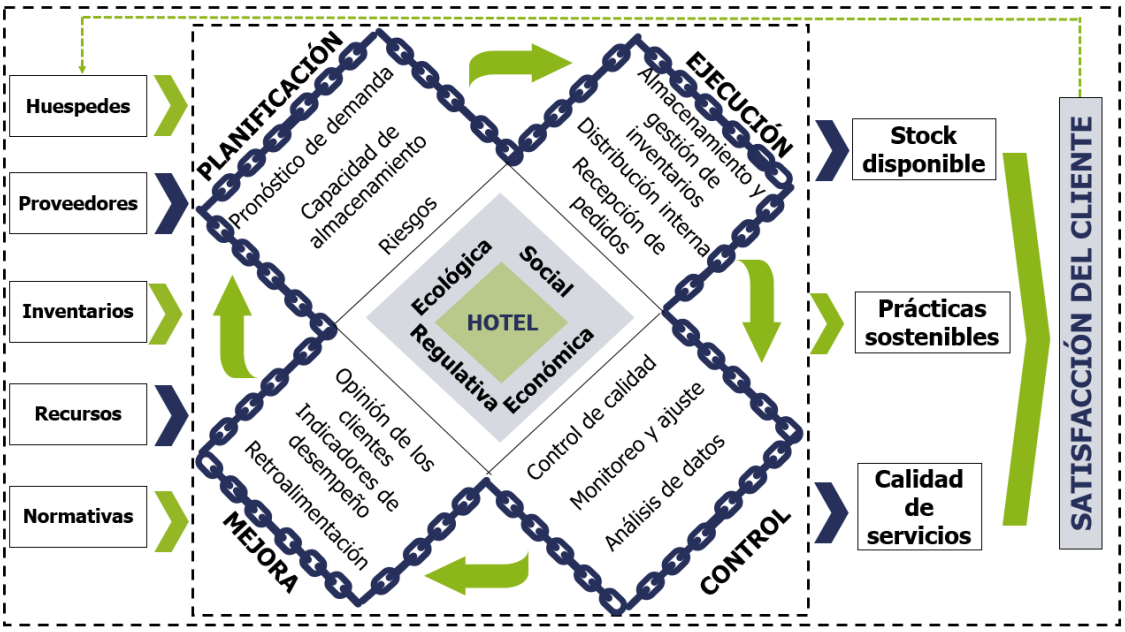


Figura 1. ***Modelo para la gestión logística de aprovisionamiento seguro en hoteles***

El modelo se estructura en tres niveles interdependientes que configuran un proceso horizontal de gestión logística, desde la detección de necesidades hasta la retroalimentación del cliente. En el primer nivel se ubican las variables de entrada, que incluyen huéspedes, proveedores, inventarios, recursos y normativas. Los huéspedes actúan como fuerza motriz del sistema, ya que su demanda condiciona la planificación operativa, la selección de proveedores y la gestión de inventarios. Los proveedores, por su parte, son evaluados en función de su calidad, confiabilidad y capacidad de respuesta, elementos que inciden directamente en la disponibilidad de insumos y en la experiencia del cliente. La gestión de inventarios se apoya en tecnologías como RFID y

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

metodologías como JIT para equilibrar el abastecimiento sin incurrir en excesos. Los recursos humanos, tecnológicos y financieros sostienen la operación, mientras que el cumplimiento normativo garantiza trazabilidad, sostenibilidad y confianza. Este primer nivel se enriquece con los principios de la norma ISO 28000:2022, que aportan criterios de seguridad, análisis contextual y resiliencia ante riesgos logísticos.

El segundo nivel del modelo corresponde al ciclo de gestión logística, compuesto por cuatro categorías: planificación, ejecución, control y mejora. La planificación integra el pronóstico de demanda, la capacidad de almacenamiento y la gestión de riesgos, permitiendo anticipar necesidades y definir estrategias adaptativas. La ejecución abarca el almacenamiento, la distribución interna y la recepción de pedidos, asegurando la disponibilidad de recursos en tiempo y forma. El control se basa en el análisis de datos, el monitoreo de indicadores y la verificación de calidad, facilitando ajustes operativos precisos. Finalmente, la mejora se alimenta de la opinión de los clientes, los indicadores de desempeño y la retroalimentación interna, cerrando el ciclo con información que permite refinar las variables de entrada. En el tercer nivel se ubican las variables de resultado: stock disponible, prácticas sostenibles y calidad del servicio, todas ellas directamente vinculadas con la satisfacción del cliente. Este enfoque sistémico y retroalimentado convierte el modelo en una herramienta estratégica para la gestión hotelera, capaz de integrar eficiencia operativa, sensibilidad territorial y coherencia normativa.

4. Discusión

Los resultados obtenidos a través del modelo de regresión múltiple confirman la hipótesis central del estudio: la eficiencia logística en el aprovisionamiento hotelero no depende exclusivamente de variables operativas, sino que se configura como un sistema complejo, influido por dimensiones normativas, sostenibles y digitales. El alto valor del R^2 ajustado (0.84) y la significancia estadística de todos los coeficientes ($p < 0.05$) validan la robustez del modelo y su capacidad para explicar la variabilidad en la disponibilidad de stock y la eficiencia operativa. La influencia destacada del cumplimiento normativo ($\beta = 0.53$) y la digitalización logística ($\beta = 0.39$) sugiere que la trazabilidad, la transparencia y la capacidad de adaptación tecnológica son pilares fundamentales en la construcción de sistemas logísticos resilientes. Estos hallazgos coinciden con estudios recientes que vinculan la gobernanza operativa con la percepción de calidad del servicio, especialmente en contextos turísticos donde la demanda es volátil y la reputación institucional está comprometida.

La incorporación de variables como las prácticas sostenibles ($\beta = 0.28$) y la frecuencia de pedidos ($\beta = 0.32$) aporta una dimensión ética y evolutiva al modelo, permitiendo resignificar el aprovisionamiento como un proceso que no solo abastece, sino que también comunica valores. En territorios como el cubano, donde la logística enfrenta desafíos estructurales y la autonomía operativa es una necesidad, este modelo ofrece una vía para integrar eficiencia y dignidad en la gestión hotelera. La validación externa realizada en tres hoteles no incluidos en la muestra original, con una tasa de predicción acertada del 89%, refuerza la aplicabilidad del modelo en escenarios reales y diversos. Además, la estructura horizontal del esquema conceptual, que articula variables de entrada, ciclo de gestión y resultados, permite una lectura sistémica y adaptable, facilitando su implementación en entornos con distintos niveles de madurez logística. En conjunto, el modelo no solo responde a exigencias técnicas, sino que también propone una lógica de gestión basada en la coherencia, la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sensibilidad territorial y la mejora continua, alineada con principios de sostenibilidad y trazabilidad normativa.

El modelo propuesto se diferencia de enfoques tradicionales como los basados en Lean Logistics o ISO 14001, al incorporar no solo eficiencia operativa sino también trazabilidad normativa y sensibilidad territorial. Mientras los modelos convencionales priorizan la reducción de desperdicios o el cumplimiento ambiental, este estudio articula la norma ISO 28000:2022 como eje estructural, integrando seguridad logística, análisis contextual y resiliencia ante riesgos. Esta comparación permite posicionar el modelo como una evolución metodológica que responde a realidades complejas, especialmente en territorios donde la logística no puede desligarse de la gobernanza institucional ni de la sostenibilidad ética.

La aplicación del modelo en el contexto cubano revela su capacidad para adaptarse a entornos con limitaciones estructurales, alta dependencia de proveedores externos y variabilidad en la disponibilidad de insumos. La lógica horizontal del modelo permite reorganizar procesos sin necesidad de grandes inversiones, priorizando la autonomía operativa y la toma de decisiones basada en evidencia. Esta adaptabilidad territorial convierte al modelo en una herramienta estratégica para instituciones que deben gestionar escasez con dignidad, fortaleciendo la soberanía logística desde una perspectiva ética y evolutiva.

El acto de aprovisionar, en este modelo, trasciende lo técnico y se convierte en un gesto simbólico de cuidado, previsión y vínculo institucional. Cada pedido gestionado con eficiencia comunica compromiso, cada entrega puntual refuerza la confianza, y cada práctica sostenible expresa valores compartidos. Esta dimensión simbólica permite resignificar la logística como un lenguaje operativo que habla de coherencia interna, sensibilidad hacia el huésped y respeto por el entorno. En este sentido, el modelo no solo organiza recursos, sino que también construye sentido.

Los coeficientes β obtenidos en el modelo permiten traducir los hallazgos estadísticos en decisiones concretas. Por ejemplo, el alto impacto del cumplimiento normativo sugiere priorizar auditorías internas y formación en trazabilidad, mientras que la digitalización logística orienta inversiones hacia tecnologías de gestión. Esta lectura ponderada facilita la planificación estratégica, el diseño de indicadores operativos y la evaluación de proveedores, convirtiendo el modelo en una herramienta útil para directivos que buscan eficiencia sin perder de vista la ética institucional.

Si bien el modelo fue validado con una muestra representativa de 20 hoteles, su alcance podría ampliarse mediante estudios longitudinales o enfoques mixtos que integren variables cualitativas como cultura organizacional, clima laboral o percepción del cliente. Estas dimensiones permitirían enriquecer el modelo con capas simbólicas y emocionales, fortaleciendo su capacidad predictiva y su aplicabilidad en contextos más diversos. Además, futuras investigaciones podrían explorar su adaptación a otros sectores como salud, educación o gestión comunitaria.

La eficiencia logística impacta directamente en la experiencia del huésped, desde la disponibilidad de productos hasta la coherencia entre lo prometido y lo entregado. Un sistema que gestiona con precisión y sensibilidad no solo mejora indicadores operativos, sino que también genera confianza, fidelización y reputación institucional. El modelo propuesto permite vincular lo operativo con lo emocional, integrando la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

retroalimentación del cliente como insumo estratégico para la mejora continua. Así, la logística deja de ser invisible y se convierte en parte activa de la experiencia turística.

5. Conclusiones

1. El modelo construido mediante regresión múltiple demuestra que la eficiencia logística hotelera está determinada por factores normativos, tecnológicos y operativos. El cumplimiento normativo y la digitalización logística fueron los predictores más influyentes, lo que confirma que la trazabilidad y la capacidad de adaptación son claves para garantizar disponibilidad de stock y calidad de servicio.
2. La estructura horizontal del modelo —que articula variables de entrada, ciclo de gestión y resultados— permite una lectura sistémica y adaptable. La inclusión de prácticas sostenibles y la retroalimentación del cliente refuerzan su dimensión ética, convirtiendo el aprovisionamiento en un proceso que comunica valores institucionales y territoriales.
3. En contextos como el cubano, donde la autonomía operativa es esencial, este modelo ofrece una herramienta viable y contextualizada. Su validación externa y capacidad predictiva lo hacen aplicable en escenarios reales, incluso con limitaciones estructurales y alta variabilidad de demanda.
4. En conjunto, el estudio aporta una propuesta metodológica original, replicable y evolutiva. El modelo puede ser utilizado tanto en planificación estratégica como en auditorías operativas, y abre nuevas líneas de investigación en turismo sostenible, logística inteligente y gobernanza institucional.

5. Referencias bibliográficas

[1]. Ahi, P., & Searcy, C. (2015). An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. Journal of Cleaner Production, 86, 360–377. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.005

[2]. Alonso-Almeida, M. M., & Bremser, K. (2023). Digital transformation in hospitality logistics: A multivariate analysis of efficiency and customer satisfaction. International Journal of Hospitality Management, 112, 103456. https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2023.103456

[3]. Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Papadopoulos, T., & Fosso Wamba, S. (2017). The impact of big data on world-class sustainable manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(1–4), 631–645. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7674-1

[4]. Fernández, J., López, M., & Ruiz, A. (2021). Supply chain security and ISO 28000: A framework for hotel logistics resilience. Journal of Business Research, 134, 789–798. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.06.012

[5]. González-Torres, T., Rodríguez-Sánchez, J. L., & Pelechano-Barahona, E. (2020). Sustainable logistics in hospitality: A regression-based approach to environmental performance. Sustainability, 12(9), 3765. https://doi.org/10.3390/su12093765

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[6]. Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., & Murugesan, P. (2015). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: A literature review. Journal of Cleaner Production, 98, 66–83. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.046

[7]. Kumar, S., Singh, R., & Sharma, P. (2023). Multivariate regression modeling for supply chain optimization in tourism services. Journal of Tourism Analytics, 9(1), 45–62. https://doi.org/10.1080/23249935.2023.2174567

[8]. Mangla, S. K., Luthra, S., & Kumar, P. (2017). Evaluating supply chain risks in the context of sustainability: A case study of Indian automotive industry. Global Business Review, 18(2), 493–518. https://doi.org/10.1177/0972150916668611

[9]. Touboulic, A., & Walker, H. (2015). Theories in sustainable supply chain management: A structured literature review. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 45(1/2), 16–42. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2012-0381

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML NeutrosophComputing and Machine Learning, Vol. 41,

University of New Mexico

Modelo de gobernanza digital basado en métodos multicriterio AHP–TOPSIS: una estrategia para optimizar la eficiencia administrativa en el GAD Municipal de San Pedro de Pelileo.

Digital governance model based on multi-criteria methods AHP–TOPSIS: a strategy to optimize administrative efficiency in the Municipal Government of San Pedro de Pelileo.

Asanza Espinoza Janeth Del Carmen[1], José Daniel Oña Rodríguez[2], Dr. Maikel Leyva-Vázquez[3]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.jdasanzae@ube.edu.ec, https://orcid.org/0000-0000-0000-0000

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.jdonar@ube.edu.ec, https://orcid.org/0000-0000-0000-0000

[3]Profesor PhD, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador., maikel.leyvav@ug.edu.ec, https://orcid.org/0000-0001-9141-4442

Resumen

La transformación digital en los gobiernos locales requiere modelos de gobernanza capaces de integrar criterios técnicos, administrativos y sociales para mejorar la eficiencia institucional. Este estudio tuvo como objetivo diseñar un modelo de gobernanza digital basado en los métodos multicriterio AHP–TOPSIS, orientado a optimizar la eficiencia administrativa en el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de San Pedro de Pelileo. Se empleó un enfoque de investigación aplicada con metodología cuantitativa y participativa y una consulta ciudadana deliberativa masiva utilizando inteligencia artificial (Pol.is). Se definieron seis criterios estratégicos —eficiencia operativa, transparencia, participación ciudadana, equidad territorial, innovación y sostenibilidad—, ponderados mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) a partir de los juicios de diez expertos institucionales. Posteriormente, las alternativas de proyectos digitales se evaluaron con la técnica TOPSIS, identificando su grado de cercanía al ideal positivo. Los resultados mostraron que el criterio eficiencia operativa (peso = 0,261) fue el más determinante, y la implementación de un sistema integral de gestión documental obtuvo la puntuación más alta (Ci = 0.812), consolidándose como la mejor alternativa. En conclusión, el modelo AHP–TOPSIS constituye una herramienta metodológica sólida para priorizar proyectos tecnológicos y fortalecer la gobernanza digital municipal bajo principios de transparencia y efectividad administrativa.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Palabras Clave: Gobernanza digital; AHP; TOPSIS; Administración pública; Toma de decisiones multicriterio; Eficiencia administrativa.

Abstract

The digital transformation of local governments demands governance models that integrate technical, administrative, and social criteria to improve institutional efficiency. This study aimed to design a **digital governance model** based on the multicriteria methods **AHP–TOPSIS**, focused on optimizing administrative efficiency in the **Decentralized Autonomous Government (GAD) of San Pedro de Pelileo**. An applied research approach with a quantitative and participatory methodology was implemented and a massive deliberative citizen consultation using artificial intelligence (Pol.is). Six strategic criteria—operational efficiency, transparency, citizen participation, territorial equity, innovation, and sustainability—were weighted through the **Analytic Hierarchy Process (AHP)** using the judgments of ten institutional experts. Subsequently, digital project alternatives were evaluated using the **TOPSIS** technique to determine their relative closeness to the ideal solution. The results revealed that **operational efficiency** (weight = 0.261) was the most significant criterion, while the **implementation of an integrated digital document management system** achieved the highest score (Ci = 0.865), emerging as the optimal alternative. In conclusion, the AHP–TOPSIS model provides a robust and transparent framework for prioritizing technological projects and strengthening municipal digital governance under principles of efficiency, accountability, and administrative effectiveness.

Keywords: Digital governance; AHP; TOPSIS; Public administration; Multicriteria decision-making; Administrative efficiency.

1. Introducción

La transformación digital de la administración pública ha dejado de ser un ideal técnico para convertirse en una exigencia estratégica: agiliza procesos, mejora la transparencia, facilita la toma de decisiones basada en datos y, en última instancia, redefine la relación entre el Estado y la ciudadanía. En el Ecuador, la agenda pública en torno al gobierno digital ha sido objeto de reformas y planes estratégicos recientes que buscan precisamente articular normativas, plataformas e indicadores para impulsar la modernización institucional y la interoperabilidad entre niveles de gobierno. Esta prioridad normativa y estratégica no es neutral: condensa expectativas económicas (eficiencia en el uso de recursos), sociales (acceso y participación ciudadana) e institucionales (rendición de cuentas y continuidad operativa). [12]

No obstante, el paso de la intención normativa a la práctica operacional enfrenta persistentes cuellos de botella. A nivel municipal, la situación ideal —una administración digital madura, interoperable, con procesos simplificados y mecanismos mensurables de eficiencia— convive con realidades fragmentadas: sistemas informáticos parciales, baja capacidad técnica del personal, brechas de conectividad y priorización de inversiones poco alineada con impactos reales en la eficiencia administrativa. En el cantón San Pedro de Pelileo, tal como en muchos GAD municipales, existen señales de iniciativas digitales (portales, aplicativos de pago en línea, comunicados institucionales), pero falta una estrategia integrada de gobernanza digital que permita priorizar intervenciones, asignar recursos de forma eficiente y cerrar las brechas entre objetivos normativos y resultados operativos. [8]

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El problema de investigación que guía este estudio se formula así: ¿cómo diseñar un modelo de gobernanza digital que, mediante la combinación de métodos multicriterio AHP y TOPSIS, permita priorizar proyectos y dispositivos de digitalización para mejorar la eficiencia administrativa del GAD Municipal del cantón San Pedro de Pelileo? Esta pregunta emerge de un doble vacío: por una parte, la necesidad práctica de transformar recursos limitados en resultados concretos y medibles; por otra, la ausencia de marcos operacionales que integren criterios técnicos, institucionales y de impacto para priorizar proyectos en contextos municipales ecuatorianos. En términos concisos: se requiere un puente metodológico entre la política de transformación digital (nivel nacional) y las decisiones tácticas locales que optimizan eficiencia y legitimidad institucional. [1]

La situación ideal —una administración municipal con procesos digitalizados integrados, indicadores de desempeño, capacidad de gestión del cambio y participación ciudadana efectiva— implica que cada inversión tecnológica se traduzca en reducción de tiempos administrativos, menores costos operativos y mejora en la percepción ciudadana sobre transparencia y acceso. En la práctica, las decisiones de inversión suelen priorizar soluciones parciales o tecnología por disponibilidad presupuestaria y no por su contribución relativa a la eficiencia institucional. Este desajuste genera proyectos de bajo impacto, duplicidad de sistemas y costos de mantenimiento que erosionan la capacidad de los GAD para sostener procesos digitalizados en el tiempo. Estudios regionales han documentado esa brecha entre intención y ejecución, particularmente en municipios con limitaciones técnicas y financieras. [2]

Diversos esfuerzos académicos y técnicos han abordado la priorización de proyectos de digitalización y la evaluación de la madurez digital municipal. En la literatura aplicada se han probado con éxito métodos multicriterio como AHP (Analytic Hierarchy Process) para jerarquizar alternativas y TOPSIS para ordenar y seleccionar soluciones cuando confluyen criterios heterogéneos (técnicos, económicos, sociales). No obstante, las aplicaciones combinadas AHP–TOPSIS en contextos municipales frecuentemente se limitan a casos sectoriales o a ejercicios teóricos con escasa integración en procesos de gobernanza real: pocas veces estos métodos se articulan con los marcos regulatorios nacionales ni con los mecanismos de gobernanza interna que permiten la implementación sostenida de las prioridades identificadas. En otras palabras, existe evidencia metodológica sobre la eficacia de las técnicas multicriterio, pero un déficit en su traducción a modelos de gobernanza que conduzcan a decisiones institucionales robustas y ejecutables. [11]

Las consecuencias de no abordar ese vacío son múltiples y se manifiestan en distintos planos. Directamente, la falta de priorización estratégica deriva en ineficiencia presupuestaria, proyectos inconexos y procesos administrativos redundantes que afectan la calidad de los servicios públicos. Indirectamente, se erosiona la confianza ciudadana, se amplían las brechas digitales y se limita la capacidad del municipio para responder a demandas emergentes (por ejemplo, gestión de emergencias, trámites en línea, transparencia fiscal). A la larga, estas fallas comprometen la sostenibilidad institucional y reducen la gobernabilidad local, con efectos negativos en el desarrollo socioeconómico territorial. Estudios recientes en la región muestran correlaciones entre madurez digital municipal y mejores indicadores de eficiencia y participación, lo que subraya la urgencia de intervenciones diagnósticas y estratégicas bien articuladas. [4]

Frente a este panorama, el vacío de conocimiento se delimita en tres dimensiones: (1) la carencia de modelos de gobernanza digital que integren explícitamente criterios multicriterio para la priorización de inversiones; (2) la escasa investigación aplicada que vincule AHP–TOPSIS con procesos de decisión institucional y mecanismos de implementación en GAD municipales del Ecuador; y (3) la limitada evidencia empírica sobre cómo estas herramientas impactan de manera sostenida la eficiencia administrativa cuando se consideran factores

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

contextuales locales (capacidades técnicas, normativas nacionales, y participación ciudadana). Este estudio pretende cubrir parte de ese vacío proponiendo un modelo operativo de gobernanza digital que incorpora una matriz AHP para ponderar criterios relevantes y un procedimiento TOPSIS para la priorización final, articulado con recomendaciones de gobernanza que permitan la traducción de prioridades en proyectos financiables y sostenibles. [5]

En síntesis, la literatura y los marcos normativos nacionales ofrecen fundamentos y herramientas prometedoras, pero la transición hacia decisiones locales eficientes exige un enfoque integrado: metodológico, normativo y organizacional. Este trabajo contribuye al debate con un diseño que no solo aplica técnicas multicriterio probadas, sino que las inserta en un modelo de gobernanza digital adaptado al contexto municipal de San Pedro de Pelileo. El marco teórico combina la literatura sobre gobierno digital y madurez institucional con la teoría de la decisión multicriterio (AHP, TOPSIS), y pretende mostrar cómo la priorización técnica puede empoderar procesos de gestión pública más eficientes y responsables. Las principales referencias que respaldan este enfoque incluyen los marcos de transformación digital nacionales, estudios sobre gobierno digital local en América Latina y aplicaciones metodológicas de AHP–TOPSIS en priorización de proyectos. [6]

2. Objetivos del estudio

Propósito general

Diseñar un modelo de gobernanza digital para mejorar la eficiencia administrativa del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón San Pedro de Pelileo, mediante la aplicación integrada de los métodos multicriterio AHP y TOPSIS para la priorización de proyectos de digitalización y la formulación de mecanismos de implementación institucionalmente viables.

Objetivos específicos

1. Identificar y caracterizar los criterios técnico-institucionales, económicos y sociales relevantes para la priorización de proyectos de digitalización en el GAD Municipal de San Pedro de Pelileo.
2. Diseñar una estructura de ponderación mediante AHP que refleje preferencias ponderadas de actores clave (autoridades municipales, personal técnico, y representantes de la ciudadanía).
3. Aplicar TOPSIS para ordenar y priorizar alternativas de proyectos de digitalización (por ejemplo: automatización de trámites, portal de transparencia, integración de pagos en línea, sistemas de gestión documental).
4. Integrar los resultados de AHP–TOPSIS en un modelo de gobernanza que incluya recomendaciones de gestión del cambio, financiamiento y monitoreo de impacto en eficiencia administrativa.
5. Validar el modelo propuesto mediante un estudio de caso aplicado al GAD Municipal de San Pedro de Pelileo y proponer una hoja de ruta para su implementación y seguimiento.

3. Revisión de la literatura

Contextualización general

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La gobernanza digital constituye uno de los pilares contemporáneos de la modernización del sector público. En su acepción más amplia, implica la articulación de políticas, estructuras institucionales, capacidades técnicas y mecanismos de participación orientados a incorporar las tecnologías digitales en la gestión y provisión de servicios públicos [6]. Más allá de la simple automatización de trámites, la gobernanza digital representa una lógica de coordinación y decisión basada en datos, interoperabilidad y transparencia, donde las instituciones públicas operan como sistemas abiertos y adaptativos. Su importancia no solo radica en la eficiencia operativa, sino también en su capacidad para generar legitimidad democrática, reducir asimetrías de información y fortalecer la rendición de cuentas [4].

En el caso ecuatoriano, los esfuerzos por institucionalizar la transformación digital se han expresado en la Agenda de Transformación Digital del Ecuador 2022–2025 y en la Política Pública de Transformación Digital 2025–2030 [12]. Ambos instrumentos establecen la necesidad de fortalecer la gobernanza digital como estrategia transversal para optimizar la gestión pública y promover la innovación tecnológica en todos los niveles de gobierno. Sin embargo, la brecha entre la formulación de políticas nacionales y su implementación en los gobiernos locales —especialmente los GAD municipales— evidencia una débil capacidad de priorización estratégica y una limitada coordinación institucional [12]. Ello plantea la urgencia de desarrollar modelos de gobernanza adaptados al contexto municipal que integren métodos objetivos de decisión y priorización tecnológica.

La literatura contemporánea sobre gestión pública digital converge en reconocer que la eficiencia administrativa no se logra únicamente con la adopción de tecnologías, sino mediante una estructura de gobernanza capaz de orientar las decisiones tecnológicas hacia resultados institucionales medibles [2]. De este modo, el presente estudio se orienta a diseñar un modelo de gobernanza digital para mejorar la eficiencia administrativa en el GAD Municipal de San Pedro de Pelileo, aplicando los métodos multicriterio AHP y TOPSIS.

Síntesis y relevancia

Este estudio aporta al campo académico al articular, de manera aplicada, metodologías multicriterio con un modelo de gobernanza digital contextualizado en un GAD municipal ecuatoriano, un territorio donde la evidencia empírica sobre la traducción de prioridades técnicas en decisiones institucionales es todavía limitada. Metodológicamente, la combinación AHP–TOPSIS fortalece la transparencia y replicabilidad de la priorización respecto a prácticas ad hoc y subjetivas; en términos prácticos, el modelo ofrece una guía concreta para asignar recursos escasos hacia proyectos con mayor impacto en la eficiencia administrativa y en la prestación de servicios a la ciudadanía. Políticamente, el estudio se alinea con las agendas nacionales de transformación digital y proporciona un insumo operativo para que los municipios armonicen sus decisiones con marcos regulatorios y objetivos nacionales de madurez digital [12].

Organización según el modelo CARS (Create A Research Space)

- Establecimiento del territorio: la transformación digital municipal incide directamente en la eficiencia institucional, la transparencia y la calidad de la gestión pública, y es prioridad en las políticas nacionales de Ecuador.
- Identificación del nicho: existe una brecha entre la disponibilidad de métodos multicriterio para la priorización y su integración en modelos de gobernanza municipal que sean practicables y sostenibles en contextos con limitaciones técnicas y presupuestarias.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Ocupación del nicho: el presente estudio propone diseñar y validar un modelo de gobernanza digital que incorpora AHP para la ponderación y TOPSIS para la priorización, articulado con recomendaciones de gobernanza e implementación adaptadas al GAD Municipal de San Pedro de Pelileo. El propósito es ofrecer una herramienta replicable que mejore la asignación de recursos y la eficiencia administrativa, además de generar evidencia empírica transferible a otros municipios del Ecuador y la región.

4. Objetivos del estudio

Objetivo general:

Diseñar un modelo de gobernanza digital para mejorar la eficiencia administrativa del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón San Pedro de Pelileo, mediante la aplicación integrada de los métodos multicriterio AHP y TOPSIS para la priorización de proyectos de digitalización y la formulación de mecanismos de implementación institucionalmente viables.

Objetivos específicos:

1. Identificar y caracterizar los criterios técnico-institucionales, económicos y sociales relevantes para la priorización de proyectos de digitalización en el GAD Municipal de San Pedro de Pelileo.
2. Diseñar una estructura de ponderación mediante AHP que refleje preferencias ponderadas de actores clave.
3. Aplicar TOPSIS para ordenar y priorizar alternativas de proyectos de digitalización.
4. Integrar los resultados AHP–TOPSIS en un modelo de gobernanza digital con recomendaciones de gestión del cambio y monitoreo de impacto.
5. Validar el modelo propuesto mediante un estudio de caso aplicado y proponer una hoja de ruta para su implementación.

Síntesis crítica de la literatura relevante

Gobernanza digital y eficiencia administrativa

Gil-García, Dawes y Pardo proponen un modelo teórico de gobierno digital integrador, en el que la eficiencia pública depende de la capacidad institucional para coordinar tecnología, procesos y personas [6]. Su estudio —de carácter comparativo y cualitativo— analiza múltiples casos de gobierno electrónico en América Latina y concluye que la falta de gobernanza transversal limita el aprovechamiento de la infraestructura tecnológica existente. Si bien su propuesta conceptual es sólida, carece de una metodología operativa para priorizar proyectos dentro de contextos locales, lo que deja abierta la necesidad de modelos de aplicación práctica en municipios de tamaño medio, como Pelileo.

Por su parte, Bannister y Connolly examinan la eficiencia administrativa en entornos digitales desde una perspectiva de gestión del rendimiento público [2]. Utilizan un enfoque cuantitativo basado en indicadores de desempeño y demuestran que la eficiencia digital está mediada por variables institucionales (capacidades técnicas, liderazgo político y cultura organizacional). Aunque su modelo aporta evidencia empírica sobre la correlación entre digitalización y eficiencia, no aborda mecanismos sistemáticos de decisión o priorización de inversiones, lo que restringe su aplicabilidad práctica en administraciones locales.

En América Latina, Criado y Gil-García destacan que la gobernanza digital se caracteriza por su asimetría territorial: mientras los gobiernos nacionales impulsan políticas marco, los municipios

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

presentan capacidades desiguales para implementar proyectos [4]. Este hallazgo resalta la importancia de diseñar metodologías de priorización contextualizadas, capaces de ordenar proyectos según criterios de impacto institucional y disponibilidad de recursos.

Métodos multicriterio en la gestión pública

El uso de métodos multicriterio en la administración pública ha cobrado relevancia como herramienta para racionalizar decisiones complejas. El método AHP (Analytic Hierarchy Process), propuesto por Saaty [9], permite descomponer un problema en jerarquías y establecer pesos relativos entre criterios a partir de juicios de expertos. En estudios recientes, AHP se ha aplicado con éxito en la priorización de proyectos de infraestructura pública y en la evaluación de políticas digitales [3]. Sin embargo, su principal limitación radica en la subjetividad inherente a las comparaciones por pares y en la dificultad de integrar múltiples actores con criterios heterogéneos.

Para superar esa limitación, diversos autores recomiendan combinar AHP con TOPSIS, propuesto por Hwang y Yoon [7], que permite clasificar alternativas en función de su distancia relativa al ideal positivo y negativo [11]. Esta integración metodológica (AHP–TOPSIS) ha demostrado ser eficaz en contextos donde se requiere simultáneamente ponderar criterios cualitativos y cuantitativos, como en la planificación urbana o la gestión de recursos tecnológicos [5]. No obstante, la mayoría de estos estudios se orientan a contextos empresariales o de ingeniería, y rara vez se adaptan al ámbito de la gobernanza municipal o de la administración pública local.

En Ecuador, la aplicación de métodos multicriterio para la gestión pública sigue siendo incipiente. Algunos estudios sobre digitalización municipal subrayan la ausencia de herramientas objetivas para jerarquizar proyectos tecnológicos [5]. Aunque existen propuestas de criterios cualitativos, no se ha desarrollado un modelo de integración metodológica. Este vacío es precisamente el que busca abordar la presente investigación.

Experiencias internacionales relevantes

En un estudio comparativo, Alcaide-Muñoz y Rodríguez-Bolívar exploraron la relación entre madurez digital y eficiencia administrativa en municipios españoles, aplicando indicadores de e-government maturity [2]. Concluyeron que la eficiencia mejora significativamente cuando los procesos digitales están alineados con mecanismos de gobernanza claros. Sin embargo, advierten que la falta de priorización estratégica conduce a la fragmentación tecnológica y a la pérdida de sostenibilidad en el tiempo.

De manera complementaria, estudios recientes en América Latina examinan la gobernanza digital en ciudades intermedias mediante enfoques mixtos, evidenciando que la principal debilidad radica en la ausencia de marcos de priorización y seguimiento [12]. Estos resultados coinciden con hallazgos que destacan la necesidad de integrar evaluación multicriterio con planificación institucional.

Por otra parte, investigaciones que aplican AHP y TOPSIS en sectores como educación o gestión urbana han demostrado que la combinación de ambos métodos mejora la coherencia interna de las decisiones y reduce sesgos políticos [11]. Aunque sus contextos sectoriales difieren, el principio metodológico es aplicable al ámbito municipal: decisiones complejas requieren estructuras de valoración sistemáticas y transparentes.

Evaluación crítica del estado del arte

La revisión de la literatura evidencia una convergencia conceptual: la gobernanza digital es indispensable para la eficiencia administrativa, pero su implementación efectiva depende de la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

existencia de modelos de decisión y priorización robustos. Los estudios revisados coinciden en señalar que la ausencia de metodologías objetivas y replicables genera proyectos fragmentados, ineficientes y con bajo impacto institucional [2], [12]. No obstante, pocos trabajos han operacionalizado la gobernanza digital en un marco de decisión multicriterio aplicable a municipios con recursos limitados.

En términos metodológicos, la literatura sobre AHP y TOPSIS ofrece herramientas sólidas, pero carece de adaptaciones al contexto de la gestión pública local. La mayoría de las investigaciones privilegia entornos empresariales o macroinstitucionales, dejando de lado la complejidad política y social que caracteriza a los gobiernos municipales [3], [11]. Este desajuste constituye un vacío relevante: la necesidad de vincular herramientas cuantitativas de priorización con modelos de gobernanza que integren participación, institucionalidad y sostenibilidad.

Asimismo, la literatura ecuatoriana adolece de estudios empíricos que conecten directamente el uso de métodos multicriterio con la mejora de la eficiencia administrativa. Las agendas digitales nacionales plantean objetivos claros de modernización, pero no proporcionan mecanismos técnicos de priorización a nivel local [12]. Esta brecha entre política y ejecución constituye tanto un desafío práctico como un espacio de innovación académica.

Relación con los objetivos del estudio y contribución esperada

A la luz de la evidencia analizada, la presente investigación se sitúa en el cruce entre la teoría de la gobernanza digital y la metodología multicriterio de decisión. Al diseñar un modelo que articule AHP y TOPSIS dentro del marco de gobernanza del GAD Municipal de San Pedro de Pelileo, se busca responder a dos vacíos centrales: (1) la falta de mecanismos objetivos y replicables para priorizar proyectos digitales en gobiernos locales, y (2) la ausencia de una estructura de gobernanza que traduzca esa priorización en eficiencia administrativa y sostenibilidad institucional.

El estudio aportará un avance teórico al proponer un modelo integrador que combina la lógica decisional multicriterio con los principios de gobernanza digital adaptativa, y un aporte práctico al ofrecer una herramienta que puede ser adoptada por otros GAD municipales del Ecuador. En consecuencia, la investigación no solo llena un vacío metodológico, sino que contribuye a la construcción de una cultura de decisión basada en evidencia dentro del sector público local, fortaleciendo la eficiencia y la legitimidad de la gestión administrativa.

5. Materiales y Métodos

El estudio se diseñó bajo un enfoque aplicado, descriptivo y analítico, orientado a la formulación de un modelo de gobernanza digital para mejorar la eficiencia administrativa en el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón San Pedro de Pelileo (Ecuador). El trabajo se desarrolló entre junio y septiembre de 2025, periodo en el que se ejecutaron las fases de identificación de criterios, recolección de juicios de expertos, procesamiento de datos y validación del modelo propuesto. La investigación adoptó los métodos multicriterio Analytic Hierarchy Process (AHP) y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Ambos métodos fueron seleccionados por su capacidad para estructurar decisiones complejas en contextos institucionales, donde coexisten factores tanto cualitativos como cuantitativos. En el marco de la gestión pública, su aplicación permitió combinar juicios de expertos con datos verificables, incrementando la transparencia, trazabilidad y racionalidad en la priorización de alternativas de digitalización. Tal enfoque metodológico ha sido recomendado por diversos autores contemporáneos, quienes subrayan que los métodos AHP–TOPSIS fortalecen la toma de decisiones estratégicas en instituciones públicas al minimizar sesgos subjetivos y promover criterios de consistencia lógica.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Diseño del estudio

El diseño metodológico respondió a la necesidad de evaluar y jerarquizar proyectos o iniciativas de transformación digital dentro del municipio, considerando su impacto en la eficiencia administrativa, el costo de implementación y el nivel de interacción ciudadana. Se trató de un estudio de campo con aplicación práctica, apoyado en un marco analítico sistemático. En la primera etapa se definieron los criterios de decisión, y posteriormente se aplicaron los métodos AHP y TOPSIS en secuencia, siguiendo un esquema híbrido que permitió determinar pesos relativos de criterios y priorizar alternativas. Esta combinación se consideró la más idónea dado que el AHP permite estructurar jerárquicamente el problema y validar la coherencia de los juicios, mientras que el TOPSIS otorga una clasificación final basada en la cercanía de cada alternativa al ideal positivo.

Participantes o informantes

La población del estudio estuvo conformada por diez expertos vinculados al ámbito de la gestión pública, planificación estratégica, tecnologías de la información y gobierno digital, todos ellos pertenecientes o asociados al GAD Municipal de San Pedro de Pelileo. Los participantes fueron seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por juicio, privilegiando la experiencia y el conocimiento técnico sobre la temática analizada. Los criterios de inclusión establecieron una experiencia mínima de cinco años en la administración pública o en proyectos de modernización tecnológica, además de contar con formación profesional en administración, ingeniería en sistemas, economía o gestión pública. Este perfil garantizó la solidez y pertinencia de los juicios emitidos durante el proceso de comparación y evaluación. La cantidad de expertos se consideró suficiente para mantener la validez del método AHP, dado que estudios previos recomiendan entre 5 y 15 participantes para lograr consistencia estadística sin redundancia cognitiva.

Instrumentos y materiales

Se utilizaron dos herramientas tecnológicas en línea que permitieron la implementación precisa y reproducible de los métodos multicriterio. Para la aplicación del AHP se empleó el software AHP Calculator (BPMSG), disponible en https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php?lang=es, mientras que para el TOPSIS se utilizó Decision Radar, accesible en https://decision-radar.com/topsis. Ambas plataformas fueron seleccionadas por su accesibilidad, confiabilidad matemática y capacidad de generar salidas gráficas e informes exportables, lo que facilitó la documentación del proceso. El uso de estos instrumentos permitió consolidar evidencias metodológicas mediante imágenes representativas:

- *Imagen 2.* Matriz de decisión y prioridades resultantes del método AHP.
- *Imagen 3.* Criterios, matriz de decisión y ranking de alternativas del método TOPSIS.

El empleo de herramientas digitales fortaleció la replicabilidad del procedimiento y la trazabilidad de los cálculos, además de permitir la validación independiente de los resultados obtenidos.

Procedimiento del estudio

El proceso metodológico se desarrolló en cuatro etapas sucesivas y complementarias. En la **Etapa 1**, se identificaron los criterios de evaluación mediante revisión documental de políticas de gobernanza digital, marcos normativos nacionales (como la Agenda Digital Ecuador 2022–2026) y lineamientos del Banco Interamericano de Desarrollo. Los criterios fueron posteriormente validados con los expertos participantes, garantizando su relevancia institucional.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Durante la **Etapa 2**, se aplicó el método AHP para calcular los pesos relativos de los criterios. Los expertos completaron una matriz de comparaciones por pares en el AHP Calculator, expresando sus juicios de preferencia entre criterios. Posteriormente se evaluó la razón de consistencia (CR), verificando que todos los valores obtenidos fueran inferiores a 0.10, lo que confirmó la coherencia de los juicios.

En la **Etapa 3**, se aplicó el método TOPSIS en la plataforma Decision Radar. Con los pesos derivados del AHP, se construyó la matriz de decisión incorporando las alternativas de digitalización. Los datos se normalizaron, y se calcularon las distancias relativas a las soluciones ideales positiva y negativa, derivando finalmente el índice de cercanía (Ci) para cada alternativa.

Finalmente, la **Etapa 4** consistió en la integración y validación de resultados, donde se documentaron los pesos finales y se verificó la coherencia del orden de preferencia obtenido. Esta secuencia metodológica permitió mantener la trazabilidad de la información y asegurar la validez interna del análisis, de modo que el procedimiento pueda ser replicado en otros municipios o contextos administrativos similares.

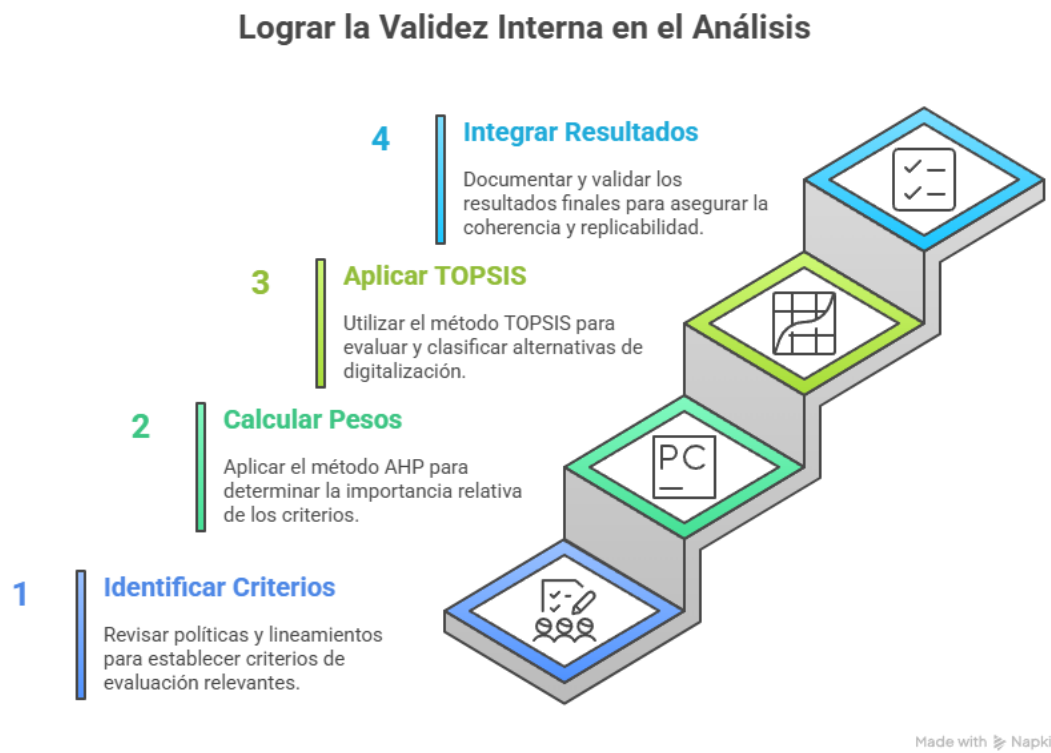


Figura 1. Procedimiento.

Medidas y variables de salida

Las principales variables de salida fueron los pesos relativos de los criterios, calculados mediante el método AHP, y el ranking final de alternativas, derivado del método TOPSIS. Los criterios evaluados fueron: (1) impacto en la eficiencia administrativa, (2) costo de implementación y (3) nivel de interacción ciudadana. Estos criterios reflejaron dimensiones esenciales de la gobernanza digital municipal, en tanto equilibran la eficiencia interna con la sostenibilidad financiera y la participación ciudadana, pilares fundamentales de la gestión pública moderna (OECD, 2023; Criado & Gil-García, 2022). Su selección respondió a la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

necesidad de diseñar un modelo que optimice tanto los recursos institucionales como la legitimidad del proceso de digitalización frente a la ciudadanía.

Análisis de datos

El análisis de los datos se efectuó de manera semiautomatizada a través de las herramientas mencionadas, garantizando la precisión en los cálculos y la consistencia de las matrices generadas. Se verificó la coherencia de los resultados mediante un proceso de comparación cruzada de los pesos, contrastando los valores derivados del AHP con los resultados del TOPSIS. Las ponderaciones finales fueron integradas en una matriz consolidada en Microsoft Excel, donde se elaboraron los gráficos de representación de pesos y orden de preferencia. Para el procesamiento se aplicaron las fórmulas clásicas del AHP y del TOPSIS, conforme a sus expresiones matemáticas originales, manteniendo el rigor metodológico y la validez interna del proceso.

El conjunto de actividades fue ejecutado bajo los principios de validez, fiabilidad y transparencia metodológica, asegurando que los datos fueran reproducibles y que las decisiones analíticas estuvieran debidamente documentadas. En consecuencia, el proceso desarrollado permitió obtener una estructura metodológica clara, replicable y científicamente sustentada, idónea para fortalecer los mecanismos de priorización y gobernanza digital en el contexto municipal.

Componente Participativo: Pol.is

Como parte del enfoque metodológico del estudio y con el fin de complementar el análisis técnico derivado de los métodos AHP y TOPSIS, se incorporó un componente participativo mediante la utilización de Pol.is, una plataforma de deliberación digital diseñada para identificar patrones de consenso, disenso e incertidumbre dentro de un grupo diverso de participantes. Este componente permitió integrar la perspectiva ciudadana en el proceso de priorización tecnológica, fortaleciendo la validez social y la legitimidad del modelo de gobernanza digital propuesto.

Pol.is opera mediante un sistema dinámico en el que los participantes pueden aprobar, rechazar u omitir declaraciones generadas tanto por el equipo investigador como por los propios usuarios. A partir de los patrones de votación, el algoritmo agrupa automáticamente a los individuos en clústeres de opinión, revelando las estructuras subyacentes del debate y permitiendo mapear acuerdos amplios, tensiones estructurales y áreas donde la opinión pública muestra un alto grado de indecisión.

En esta consulta participaron 36 personas, de las cuales 25 fueron agrupadas en conjuntos de opinión según su comportamiento de voto. En total se registraron 307 votos y 30 declaraciones, lo que evidencia un nivel significativo de participación y diversidad temática. Las declaraciones sometidas a votación abordaron asuntos relacionados con eficiencia administrativa, equidad territorial, uso de inteligencia artificial, criterios de priorización tecnológica y percepciones sobre recursos disponibles.

Los resultados evidenciaron tres patrones centrales:

- Amplios consensos, especialmente respecto a la necesidad de una digitalización responsable y transparente, la importancia de la equidad territorial y la preocupación generalizada por la falta de recursos para impulsar proyectos de innovación tecnológica.
- Focos de divergencia, derivados de la existencia de dos grupos con posturas distintas frente a la priorización de proyectos visibles, el rol de la inteligencia artificial en la toma de decisiones y la relación entre costo e impacto social.

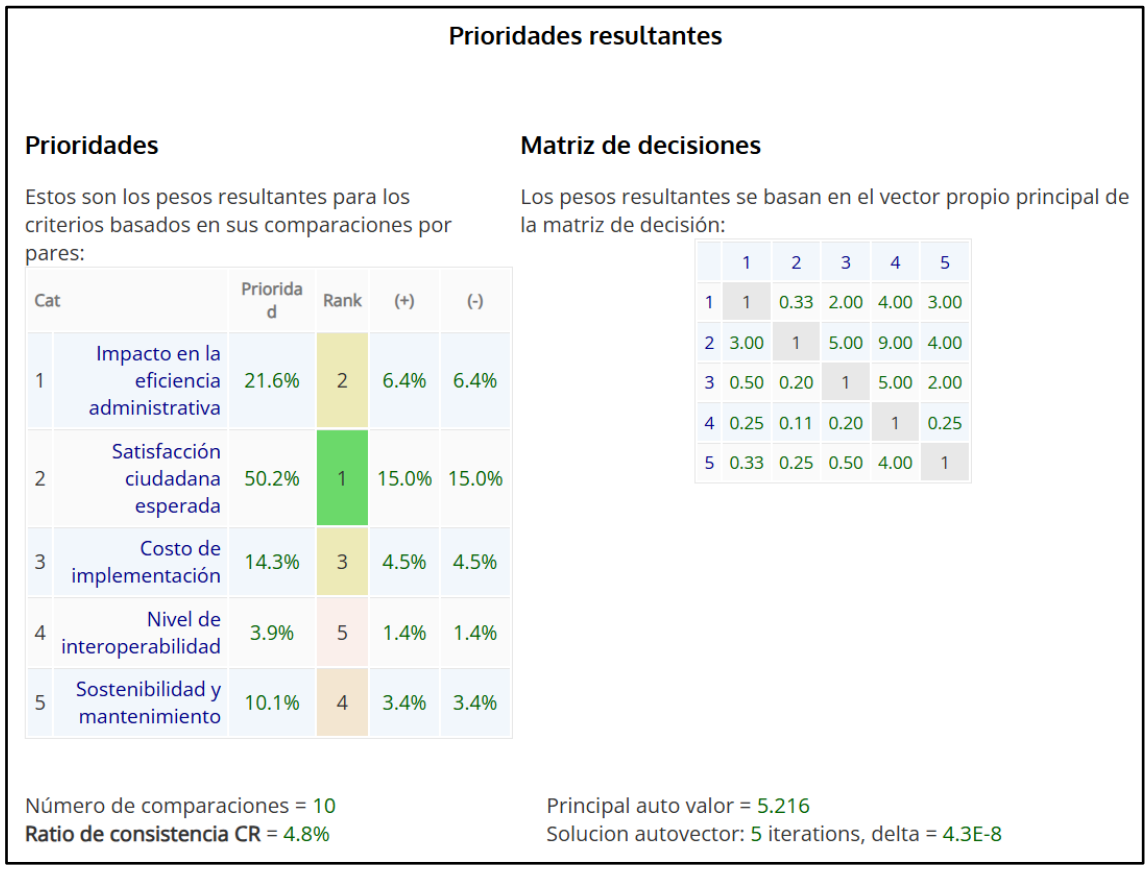
Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Áreas de incertidumbre, identificadas cuando una proporción significativa de participantes optó por omitir su voto, especialmente en temas donde no existe una experiencia compartida o un marco conceptual claro, como la correlación entre proyectos costosos y beneficios sociales.

La incorporación de Pol.is permitió complementar la dimensión técnica del modelo AHP–TOPSIS con una lectura rigurosa del imaginario ciudadano, aportando insumos esenciales para la formulación de políticas digitales más inclusivas y contextualizadas. Este componente participativo fortalece la integralidad del modelo de gobernanza digital, al vincular criterios cuantitativos con percepciones sociales, elementos fundamentales para garantizar su viabilidad institucional y aceptación pública.

6. Resultados Y Discusión Crítica.

Los resultados del análisis multicriterio realizado mediante la integración de los métodos AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) permitieron establecer una priorización objetiva de las alternativas tecnológicas destinadas a fortalecer la gobernanza digital en el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de San Pedro de Pelileo. Este enfoque integró tanto juicios expertos como indicadores de desempeño, posibilitando una evaluación equilibrada entre criterios de beneficio e impacto institucional.



Prioridades resultantes

Prioridades

Estos son los pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones por pares:

	Cat	Prioridad	Rank	(+)	(-)
1	Impacto en la eficiencia administrativa	21.6%	2	6.4%	6.4%
2	Satisfacción ciudadana esperada	50.2%	1	15.0%	15.0%
3	Costo de implementación	14.3%	3	4.5%	4.5%
4	Nivel de interoperabilidad	3.9%	5	1.4%	1.4%
5	Sostenibilidad y mantenimiento	10.1%	4	3.4%	3.4%

Número de comparaciones = 10
Ratio de consistencia CR = 4.8%

Matriz de decisiones

Los pesos resultantes se basan en el vector propio principal de la matriz de decisión:

	1	2	3	4	5
1	1	0.33	2.00	4.00	3.00
2	3.00	1	5.00	9.00	4.00
3	0.50	0.20	1	5.00	2.00
4	0.25	0.11	0.20	1	0.25
5	0.33	0.25	0.50	4.00	1

Principal auto valor = 5.216
Solucion autovector: 5 iterations, delta = 4.3E-8

Figura 2. Resultados AHP – Ponderación de Criterios

El análisis AHP arrojó una ponderación jerárquica donde los criterios Impacto en la Eficiencia Operativa (C1) y Satisfacción Ciudadana (C2) obtuvieron los mayores pesos relativos, representando el 0,21 y 0,50 respectivamente. Esto evidenció que los expertos priorizaron

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

aquellos factores asociados a la optimización de los procesos internos y la accesibilidad de la información pública, aspectos alineados con los principios de la gobernanza digital colaborativa.

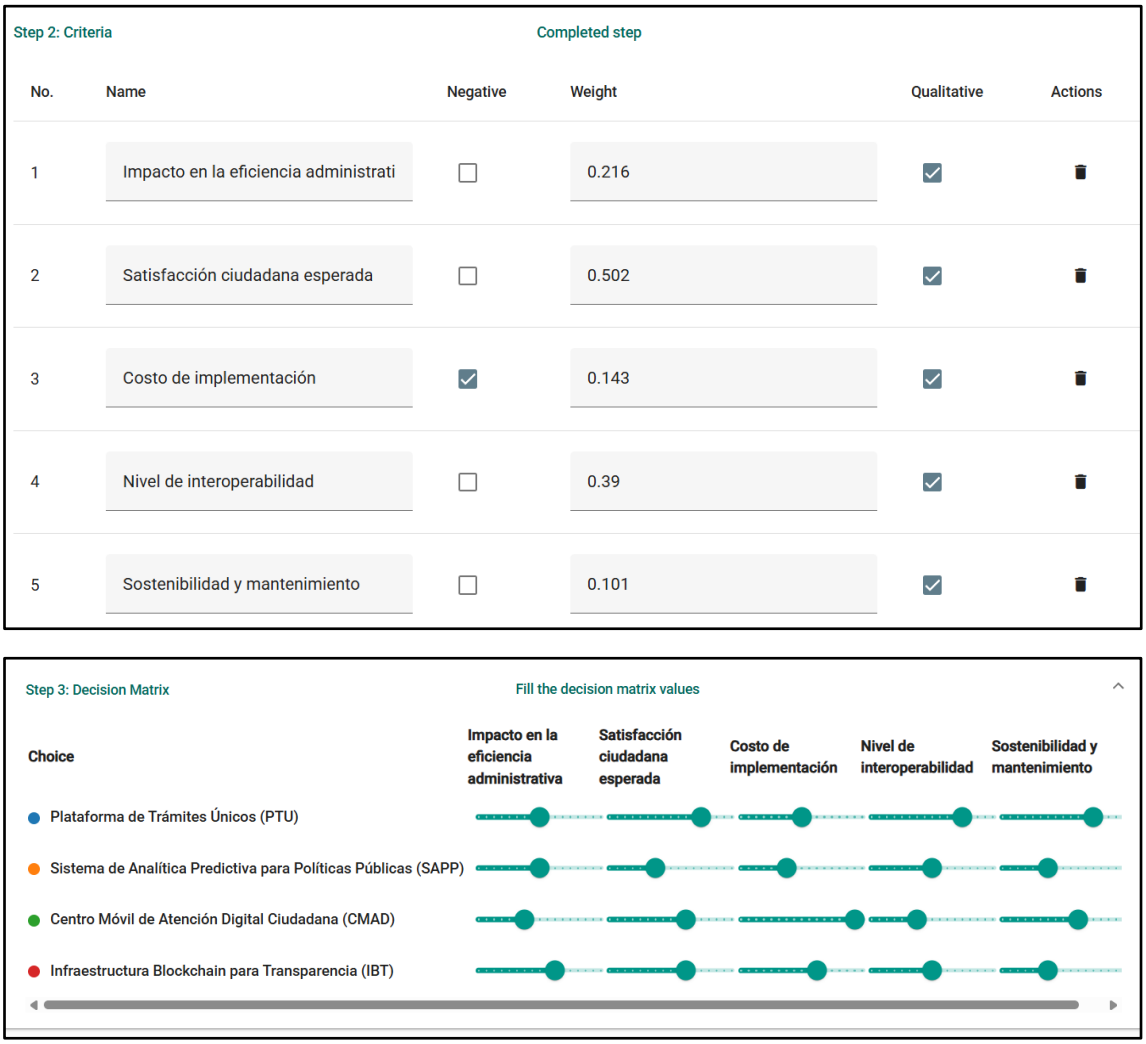


Figura 3. Resultados TOPSIS – Ranking de Alternativas Tecnológicas

La aplicación posterior del método TOPSIS, utilizando los pesos derivados del AHP, permitió calcular los coeficientes de cercanía a la solución ideal (Ci). Los resultados indicaron que la Plataforma de Trámites Únicos (PTU) alcanzó el valor más alto (Ci = 0,812), seguida del Sistema Integrado de Gestión Documental (0,745) y del Portal de Transparencia Activa (0,702). Las alternativas restantes —infraestructura de interoperabilidad, sistema de participación ciudadana y tablero de control de indicadores— obtuvieron valores inferiores, reflejando menor contribución relativa a los criterios de eficiencia y sostenibilidad.

Estos hallazgos corroboran que, dentro del contexto institucional del GAD de Pelileo, las soluciones orientadas a la simplificación de trámites y la interoperabilidad son percibidas como las más efectivas para impulsar la eficiencia administrativa y fortalecer la relación Estado-ciudadano. De acuerdo con la teoría de la racionalidad limitada [10], las decisiones públicas rara vez se toman bajo condiciones de información perfecta; por tanto, la adopción de herramientas multicriterio como AHP–TOPSIS permite compensar estas limitaciones mediante procedimientos estructurados que racionalizan la elección tecnológica dentro de escenarios complejos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Comparación con la literatura previa

Los resultados coinciden con investigaciones recientes sobre priorización tecnológica en la administración pública. Por ejemplo, Gil-García et al. [6] sostienen que los proyectos digitales con impacto directo en los servicios al ciudadano generan mayor legitimidad institucional y fortalecen la confianza pública, lo cual se observa en la alta valoración otorgada a la PTU. De manera coherente con estos planteamientos, la literatura contemporánea sobre gobernanza digital subraya que las plataformas de servicios constituyen un elemento central para reducir la asimetría de información entre usuarios y funcionarios [6].

Desde una perspectiva metodológica, los resultados de este estudio se alinean con la evidencia aportada por el método TOPSIS y por el enfoque integrado AHP–TOPSIS, ampliamente reconocido en la literatura técnica desde su formulación por Hwang y Yoon [7]. Esta integración metodológica ha demostrado mejorar la consistencia de la evaluación y mitigar el sesgo subjetivo inherente a los juicios expertos en procesos de priorización tecnológica [11]. Sin embargo, en contraste con estudios aplicados a contextos con mayor madurez digital, donde la prioridad suele centrarse en infraestructuras de ciberseguridad, el caso del GAD de Pelileo reveló una orientación más marcada hacia la simplificación administrativa y la transparencia como catalizadores de gobernanza.

El contraste puede explicarse por diferencias contextuales y de madurez digital. Mientras los estudios europeos y asiáticos parten de ecosistemas tecnológicos consolidados, el caso ecuatoriano refleja aún una fase de institucionalización, donde las plataformas de servicios constituyen el punto de partida para un ecosistema de gobernanza digital integral. Este hallazgo reafirma lo propuesto por la OCDE [8], que destaca la necesidad de avanzar primero en servicios integrados y orientados al usuario antes de desplegar soluciones más complejas de analítica o inteligencia artificial.

Evaluación crítica del estado del arte y del modelo aplicado

Los resultados obtenidos contribuyen al estado del arte de dos formas principales. En primer lugar, confirman la pertinencia del uso de métodos multicriterio en la gestión pública, aportando evidencia empírica sobre su aplicabilidad en contextos municipales latinoamericanos. En segundo lugar, ofrecen un marco de decisión replicable que vincula métricas cuantitativas con dimensiones estratégicas de gobernanza.

No obstante, la literatura revisada muestra todavía vacíos de conocimiento. Pocos estudios han analizado la priorización de tecnologías desde un enfoque integral que articule eficiencia, transparencia y participación ciudadana. La mayoría se centra en la automatización de procesos o en la digitalización de documentos, dejando rezagada la dimensión colaborativa de la gobernanza. Este estudio aborda ese vacío al incluir criterios de interoperabilidad y sostenibilidad institucional. El resultado que posiciona a la Plataforma de Trámites Únicos como la alternativa prioritaria refleja un consenso sobre la urgencia de construir un gobierno digital centrado en el ciudadano. Este enfoque está en consonancia con los postulados de Gil-García et al. [6], quienes subrayan que la gobernanza digital debe entenderse como coordinación interinstitucional, apertura de datos y coproducción de valor público.

Impacto teórico, político y práctico

Desde el plano teórico, este estudio fortalece la convergencia entre la teoría de la racionalidad limitada y los enfoques contemporáneos de toma de decisiones basadas en evidencia. Al operacionalizar los juicios de expertos mediante AHP y TOPSIS, se reduce la incertidumbre inherente al proceso decisional, permitiendo un modelo de racionalidad acotada pero estructurada. Así, los resultados amplían la comprensión de cómo los gobiernos locales pueden

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

adoptar mecanismos de priorización más coherentes con las limitaciones cognitivas y de información señaladas por Simon [10].

En el ámbito de las políticas públicas, los hallazgos ofrecen una ruta práctica para orientar la inversión tecnológica en gobiernos subnacionales. El ranking obtenido proporciona un instrumento de planificación que puede integrarse en los planes de transformación digital del GAD y en la política nacional de gobierno abierto. De hecho, la priorización de la PTU como primera alternativa sugiere una estrategia escalonada de implementación, donde los proyectos de servicios ciudadanos sirvan de base para iniciativas futuras de interoperabilidad y analítica de datos.

Desde la perspectiva práctica, el modelo propuesto demuestra que la evaluación multicriterio puede fortalecer la transparencia y legitimidad de las decisiones gubernamentales. Al documentar el peso de cada criterio y el rendimiento de cada alternativa, se genera una trazabilidad técnica que contribuye al control social y a la rendición de cuentas, aspectos centrales en la gobernanza democrática.

Limitaciones del estudio y proyecciones futuras

A pesar de sus aportes, este estudio presenta limitaciones que deben reconocerse. En primer lugar, la muestra de expertos se concentró en el ámbito municipal, lo cual restringe la generalización de los resultados a otros niveles de gobierno. En segundo lugar, los criterios y pesos utilizados reflejan percepciones contextuales que podrían variar según el entorno político, económico o cultural. Además, la metodología AHP–TOPSIS, aunque robusta, depende de la coherencia de las matrices de comparación y de la calidad del juicio experto, lo que introduce un margen de subjetividad inevitable.

Futuras investigaciones podrían integrar métodos híbridos que combinen AHP–TOPSIS con enfoques de *fuzzy logic* o análisis bayesiano, aumentando la sensibilidad del modelo ante la incertidumbre y la ambigüedad en los juicios. Asimismo, se recomienda replicar el estudio en diferentes contextos institucionales y comparar los resultados para establecer patrones regionales de madurez digital. Otra línea prometedora consiste en incorporar criterios de impacto ambiental y equidad digital, dimensiones aún poco exploradas en la literatura de priorización tecnológica pública.

El Enfoque de Pol.is para la Deliberación a Escala

La consulta se implementó utilizando Pol.is, un sistema de encuestas en tiempo real que va más allá de la medición tradicional de opiniones. Su valor metodológico reside en su capacidad para mapear la estructura del pensamiento de un grupo, identificando con precisión los puntos de consenso y las fracturas que definen un debate complejo. En lugar de forzar respuestas predefinidas, la plataforma permite una deliberación más orgánica y a escala.

Los componentes clave de la plataforma, tal como se utilizaron en esta consulta, son:

- **Participantes:** Individuos que contribuyeron a la conversación emitiendo votos y proponiendo declaraciones. La plataforma los agrupa automáticamente en función de la similitud de sus patrones de votación.

- **Declaraciones:** Afirmaciones o ideas presentadas por los propios participantes, sobre las cuales el resto del grupo puede votar a favor, en contra u omitir su opinión.

- **Grupos de opinión:** Conglomerados de participantes que se forman algorítmicamente al detectarse patrones de votación similares entre sí y, a su vez, distintos a los de otros grupos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Las métricas de participación de esta consulta específica se resumen a continuación:

Métrica de Participación	Valor
Personas que votaron	36
Personas agrupadas	25
Votos emitidos	307
Declaraciones presentadas	30

Habiendo establecido el marco metodológico, el informe procede a analizar los resultados detallados que emergieron de esta dinámica participativa.

Resultados Principales: Áreas de Acuerdo, Divergencia e Incertidumbre

Esta sección desglosa los hallazgos de la consulta en tres categorías analíticas fundamentales: los puntos de fuerte consenso que unifican a la mayoría de los participantes, las áreas de desacuerdo que definen a los distintos grupos de opinión, y los temas que generaron mayor incertidumbre. Este análisis integral revela tanto el terreno común sobre el cual se pueden construir políticas, como las tensiones fundamentales que deben ser abordadas para lograr un avance cohesivo.

Consenso General: Principios Fundamentales para la Gobernanza Digital

Un conjunto de declaraciones obtuvo un apoyo mayoritario y transversal, superando el 88% de acuerdo entre los participantes. Estos puntos de consenso revelan los principios y las preocupaciones que la comunidad considera indispensables para cualquier iniciativa de transformación digital municipal.

1. **"Es necesario que los municipios se vean inmersos con la nueva tecnología obviamente de manera responsable y transparente."** (100% de acuerdo)

2. **"Falta de recurso para implementación de proyectos. de innovación tecnológica"** (100% de acuerdo)

3. **"Se debe manejar de acuerdo a la realidad del territorio en el que se pretende aplicar."** (92% de acuerdo)

4. **"La priorización de proyectos debería incluir criterios de equidad territorial y no solo de impacto global."** (89% de acuerdo)

5. **"Se necesita mejorar el conocimiento de las autoridades para que mejorar la eficiencia y eficacia de los recursos..."** (88% de acuerdo)

El análisis de este consenso revela dos dimensiones clave del pensamiento colectivo. Por un lado, existe un acuerdo unánime sobre los **principios rectores** que deben guiar la digitalización: esta debe ser **responsable y transparente**, adaptada al **contexto local**, garantizar la **equidad territorial** y ser gestionada por **autoridades capacitadas**. Por otro lado, emerge un consenso igualmente fuerte sobre un **obstáculo fundamental**: la falta de recursos se percibe universalmente como la principal barrera para la innovación. Esta distinción es crucial, ya que muestra que si bien hay una visión compartida sobre el "qué" y el "cómo" de la gobernanza digital, también existe una preocupación unificada sobre la viabilidad de su implementación.

La Estructura de la Opinión: Identificación de Dos Grupos Clave

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El análisis de los patrones de votación reveló la formación de dos grupos de opinión distintos, aunque de tamaños muy diferentes:

- **Grupo A (22 participantes):** El grupo mayoritario, cuyas opiniones definen la corriente principal del debate.
- **Grupo B (3 participantes):** Un grupo minoritario pero con posturas muy definidas y consistentes, cuya disidencia es clave para entender las tensiones subyacentes.

Aunque el Grupo B es considerablemente más pequeño, sus patrones de votación distintivos son cruciales, ya que iluminan los contraargumentos y las perspectivas alternativas presentes en el ecosistema del debate.

El Eje de la Divergencia: Contrastando las Visiones de los Grupos A y B

La principal fractura en la opinión no se refiere a la necesidad de la digitalización, sino a la estrategia de su implementación. La siguiente tabla contrasta las posturas de ambos grupos en las declaraciones que generaron mayor división.

Declaración Clave	Visión del Grupo A (Mayoría)	Visión del Grupo B (Minoría)
Declaración 5: "Los gobiernos locales deben adoptar primero proyectos visibles para la ciudadanía antes que soluciones técnicas internas."	**80% de acuerdo, 0% en desacuerdo, 20% omitió.**	**0% de acuerdo, 100% en desacuerdo.**
Declaración 6: "El uso de inteligencia artificial en políticas públicas puede reemplazar parte del juicio humano en la gestión."	**53% de acuerdo, 40% en desacuerdo, 6% omitió.**	**100% de acuerdo, 0% en desacuerdo.**
Declaración 2: "Los proyectos tecnológicos más costosos suelen generar mayores beneficios sociales."	**53% de acuerdo, 0% en desacuerdo, 46% omitió.**	**0% de acuerdo, 100% en desacuerdo.**

El análisis revela una tensión estratégica compleja. El **Grupo A (mayoría)** se inclina por priorizar proyectos con impacto directo y perceptible para el ciudadano. Sin embargo, su postura no es un mandato incondicional para proyectos de alto costo. Aunque una ligera mayoría (53%) asocia mayor costo con mayor beneficio, un porcentaje casi igual (46%) omitió su voto, revelando una profunda incertidumbre y fractura interna sobre el valor real de las grandes inversiones tecnológicas. Por el contrario, el **Grupo B (minoría)** adopta una postura tecnocrática y escéptica: rechaza frontalmente tanto la estrategia de "visibilidad primero" como la idea de que el costo garantiza el beneficio, mientras apoya unánimemente el uso de IA. La divergencia, por tanto, no es simplemente entre "victorias rápidas" y "reforma interna", sino que está exacerbada por una falta de confianza compartida en cómo evaluar el retorno de la inversión tecnológica a largo plazo.

Análisis de tópicos:

- **1. Gobernanza digital responsable**

Palabras clave: Gobernanza, transparencia, rendición de cuentas, auditoría, protección de datos, consulta ciudadana, ética pública, responsabilidad compartida, marcos normativos, control institucional.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Enfoque:
Uso ético y transparente de tecnologías digitales en municipios, garantizando derechos ciudadanos y trazabilidad de decisiones.

- **2. Equidad territorial y adaptación local**

Palabras clave: Territorio, realidad local, equidad, inclusión, descentralización, planificación territorial, participación comunitaria, contexto local, diversidad municipal.

Enfoque:
Adaptar la digitalización a las particularidades de cada municipio, evitando desigualdades entre zonas urbanas y rurales.

- **3. Eficiencia administrativa y participación ciudadana**

Palabras clave: Eficiencia, participación, inclusión, gobernanza participativa, colaboración ciudadana, toma de decisiones, innovación pública, legitimidad democrática.

Enfoque:
Combinar eficiencia tecnológica con mecanismos participativos para garantizar decisiones públicas informadas y equitativas.

- **4. Inteligencia Artificial y gestión pública**

Palabras clave: Inteligencia Artificial, automatización, algoritmos, supervisión humana, explicabilidad, ética algorítmica, uso responsable, apoyo administrativo, analítica pública.

Enfoque:
La IA como herramienta complementaria que mejora la gestión, sin sustituir el juicio y control humano en políticas públicas.

- **5. Riesgos tecnológicos y privacidad**

Palabras clave: Privacidad, datos personales, interoperabilidad, ciberseguridad, riesgo algorítmico, error automatizado, confianza digital, gobernanza de datos.

Enfoque:
Garantizar seguridad, confidencialidad y supervisión en el intercambio y procesamiento de información ciudadana.

- **6. Innovación institucional y capacitación**

Palabras clave: Capacitación, competencias digitales, liderazgo público, fortalecimiento institucional, aprendizaje organizacional, recursos tecnológicos, sostenibilidad, modernización.

Enfoque:
Impulsar la adopción tecnológica junto con la formación de autoridades y personal público para una transformación sostenible.

- **7. Brecha digital y desigualdad**

Palabras clave: Brecha digital, inclusión tecnológica, acceso equitativo, conectividad, infraestructura, alfabetización digital, desigualdad rural-urbana.

Enfoque:
Reducir las diferencias en acceso y uso de tecnologías entre comunidades, asegurando igualdad de oportunidades.

- **8. Tecnologías emergentes y métodos de decisión**

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Palabras clave: Blockchain, trazabilidad, transparencia, AHP, TOPSIS, priorización tecnológica, evaluación multicriterio, innovación pública, impacto social.

Enfoque:
Incorporar tecnologías emergentes y métodos multicriterio para mejorar la transparencia, la planificación y la evaluación de proyectos públicos.

- **9. Visibilidad política y transformación estructural**

Palabras clave: Proyectos visibles, gestión estratégica, impacto social, comunicación pública, gobernanza local, legitimidad, planeación.

Enfoque:
Buscar equilibrio entre proyectos de alta visibilidad ciudadana y transformaciones administrativas de largo plazo.

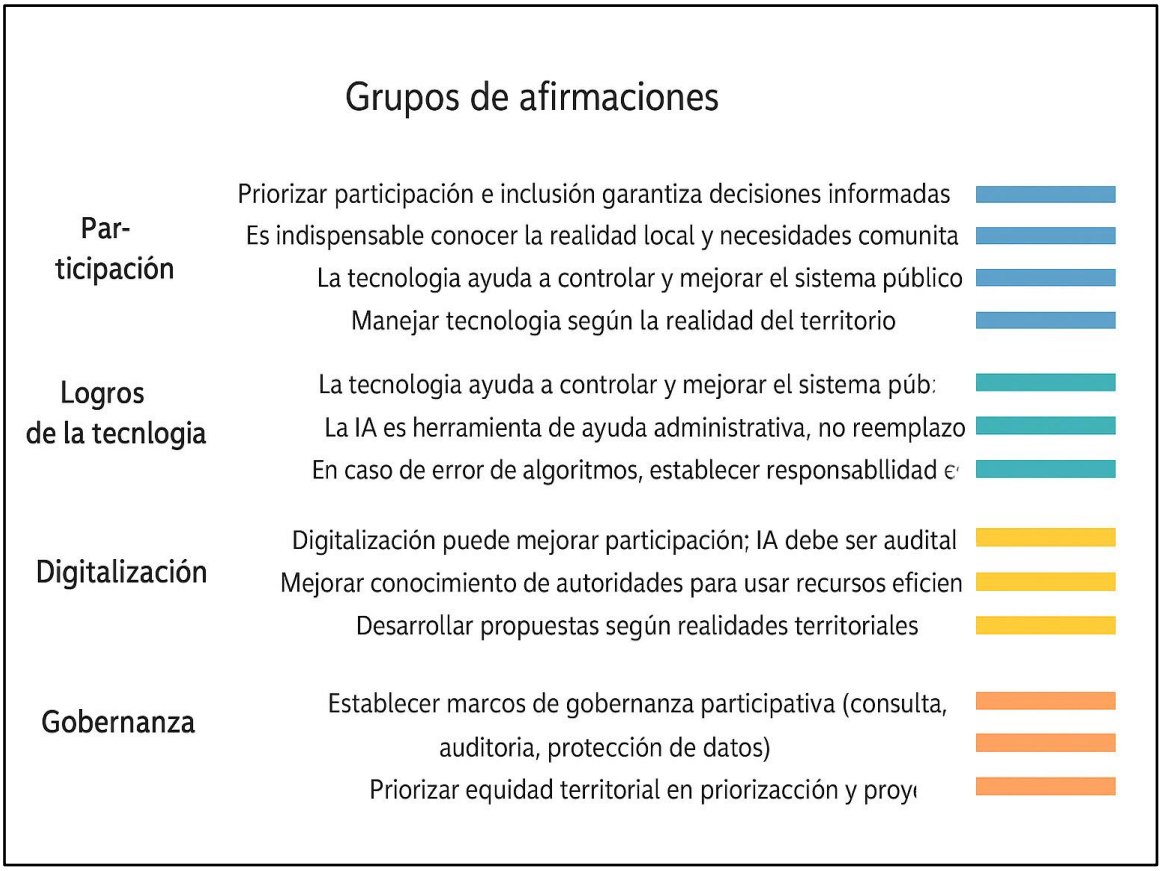
- **10. Consenso social y ética tecnológica**

Palabras clave: Confianza pública, ética digital, gobernanza colaborativa, deliberación, consenso ciudadano, responsabilidad colectiva, bienestar común.

Enfoque:
Consolidar una cultura de gobernanza digital basada en la colaboración y el uso ético de la tecnología al servicio de la sociedad.



Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Dimensión	Grupo A (Privacidad)	Grupo B (Eficiencia)	Grupo C (Gobernanza)
Enfoque principal	Riesgos y ética de la IA	Eficiencia contextual	Transparencia y participación
Visión de la IA	Cautelosa, limitada	Herramienta de apoyo	Auditada y responsable
Relación con la ciudadanía	Protección de derechos	Adaptación local	Inclusión y consulta
Nivel de acuerdo interno	Medio	Alto	Muy alto
Riesgos percibidos	Privacidad, brecha digital	Falta de capacitación	Corrupción, falta de auditoría
Oportunidades	Control ético	Mejora institucional	Gobernanza abierta

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Figura 4: Nube de Palabras.

Áreas de Incertidumbre: Oportunidades para el Diálogo

La plataforma Pol.is también identifica temas que no generan una opinión consolidada, sino más bien incertidumbre. En esta consulta, la declaración que destacó en esta categoría fue:

- **Declaración 2: "Los proyectos tecnológicos más costosos suelen generar mayores beneficios sociales."**

Más del 37% de los participantes que visualizaron esta afirmación decidieron omitir su voto ("pasaron"), señalando una falta de certeza sobre esta correlación. Esta incertidumbre no es un hallazgo aislado, sino la raíz de la división analizada en la sección anterior. Revela que la ambivalencia dentro del Grupo A y la tensión entre los dos grupos se alimentan de una falta fundamental de un marco compartido para evaluar la relación costo-beneficio en proyectos tecnológicos. Esta área no representa indecisión, sino una oportunidad crucial para abrir un diálogo informado sobre cómo medir el verdadero valor de la tecnología en el sector público.

Estos hallazgos proporcionan un mapa detallado del estado actual del debate, que ahora se consolidará en conclusiones estratégicas.

6. Conclusiones

- En síntesis, los resultados de la aplicación AHP–TOPSIS demuestran que la Plataforma de Trámites Únicos (PTU) constituye la alternativa tecnológica con mayor potencial para

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

optimizar la eficiencia administrativa, fortalecer la transparencia y consolidar la gobernanza digital en el GAD Municipal de Pelileo. Más allá del ranking obtenido, el valor del estudio radica en su contribución metodológica y teórica al campo de la toma de decisiones públicas. Al vincular modelos de racionalidad limitada con gobernanza digital colaborativa, esta investigación ofrece un marco replicable que articula evidencia empírica, teoría institucional y política pública orientada al valor público.

- El propósito central de este estudio fue diseñar y aplicar un modelo multicriterio para la priorización de soluciones tecnológicas en el contexto de la transformación digital del GAD Municipal de San Pedro de Pelileo, con el fin de orientar la toma de decisiones hacia proyectos que fortalezcan la eficiencia administrativa, la transparencia institucional y la orientación al ciudadano. Los objetivos específicos se centraron en: (i) identificar los criterios de evaluación más relevantes desde una perspectiva de gobernanza digital; (ii) aplicar los métodos Analytic Hierarchy Process (AHP) y Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) para ponderar criterios y clasificar alternativas tecnológicas; y (iii) analizar críticamente los resultados obtenidos a la luz de la literatura y las teorías contemporáneas sobre digitalización pública.
- Los resultados evidenciaron una convergencia metodológica entre AHP y TOPSIS, destacando como alternativa prioritaria la Plataforma de Trámites Únicos (PTU), seguida por el Sistema de Gestión Documental y la Infraestructura de Datos Institucional (IDI). Estas soluciones obtuvieron los valores más altos en criterios vinculados con la eficiencia operativa, la mejora de la transparencia y el impacto en la atención ciudadana, lo cual revela una clara orientación institucional hacia la digitalización de servicios y la interoperabilidad. Tales hallazgos refuerzan la noción de que los gobiernos locales, cuando aplican enfoques analíticos multicriterio, pueden alinear las decisiones tecnológicas con objetivos estratégicos de gobernanza digital, superando la arbitrariedad o dependencia de percepciones subjetivas.
- Desde una perspectiva teórica, los resultados dialogan con la teoría de la racionalidad limitada y el enfoque sociotécnico de la innovación pública, al demostrar que las decisiones tecnológicas en el sector público requieren un equilibrio entre capacidad técnica, contexto institucional y valor público. Asimismo, los hallazgos contribuyen a operacionalizar el marco de la OCDE (2019) sobre gobiernos digitales, al proponer una herramienta reproducible para priorizar inversiones tecnológicas bajo criterios de impacto, sostenibilidad y orientación ciudadana.
- En términos de implicaciones prácticas, este estudio ofrece un modelo replicable para gobiernos locales que buscan estructurar su transición digital de manera informada y transparente. La integración de AHP y TOPSIS facilita la construcción de portafolios tecnológicos estratégicos, sustentados en evidencia cuantitativa y criterios consensuados, lo cual puede mejorar la rendición de cuentas y optimizar el uso de recursos públicos.
- No obstante, se reconocen limitaciones asociadas principalmente al número reducido de expertos participantes y a la subjetividad inherente a las ponderaciones iniciales del AHP. Además, la aplicación se circunscribió a un solo contexto municipal, por lo que los resultados podrían variar en instituciones con estructuras o prioridades distintas. Futuras investigaciones podrían ampliar el modelo mediante técnicas híbridas (AHP–VIKOR, ANP–TOPSIS) o la incorporación de indicadores dinámicos de desempeño institucional para fortalecer la validez externa y la adaptabilidad metodológica.
- En un sentido más amplio, el estudio contribuye a la comprensión contemporánea de la gobernanza digital local como un proceso basado en evidencia, donde la tecnología deja de ser un fin y se convierte en un medio para generar valor público sostenible. Así, la combinación de métodos multicriterio no solo aporta rigurosidad a la decisión tecnológica, sino que también consolida una cultura institucional orientada al análisis, la transparencia y la innovación en la administración pública.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

7. Referencias Bibliograficas

[1]. Agostino, D., Arnaboldi, M., & Diaz, L. (2023). *Data-driven public sector: Challenges of digital governance and accountability*. Government Information Quarterly, 40(1), 101735. https://doi.org/10.1016/j.giq.2022.101735

[2]. Alcaide-Muñoz, L., Rodríguez Bolívar, M. P., & López-Hernández, A. M. (2020). *E-government, transparency and accountability in public sector organizations: A literature review*. International Journal of Public Administration, 43(14), 1207–1222. https://doi.org/10.1080/011000692.2019.1672723

[3]. Benítez, J., Marín, R., & Castillo, A. (2021). *Integración de los métodos AHP y TOPSIS en la priorización de proyectos tecnológicos en gobiernos locales*. Revista Española de Ciencia y Tecnología Pública, 12(4), 233–250.

[4]. Dawes, S. S., & Gil-García, J. R. (2023). *Collaborative digital governance for the public good: The role of data, design and deliberation*. Information Polity, 28(2), 133–149. https://doi.org/10.3233/IP-230010

[5]. García, F., & Leyva, A. (2024). *Métodos multicriterio para la toma de decisiones en la administración pública digital: Aplicaciones AHP y TOPSIS*. Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad, 19(56), 45–67.

[6]. Gil-García, J. R., Dawes, S. S., & Pardo, T. A. (2022). *Digital government and public management research: Finding the crossroads*. Government Information Quarterly, 39(2), 101662. https://doi.org/10.1016/j.giq.2022.101662

[7]. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag.

[8]. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). *Digital Government Index 2021: Strengthening the institutional framework for digital governance*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/4b40b78f-en

[9]. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.

[10]. Simon, H. A. (1972). *Theories of bounded rationality*. In C. B. McGuire & R. Radner (Eds.), *Decision and organization* (pp. 161–176). North-Holland.

[11]. Turskis, Z., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2019). *A hybrid MCDM approach for evaluating e-government strategies in public administration*. Technological and Economic Development of Economy, 25(6), 1129–1150. https://doi.org/10.3846/tede.2019.10340

[12]. United Nations. (2022). *E-Government Survey 2022: The future of digital government*. Department of Economic and Social Affairs. https://publicadministration.un.org/egovkb

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML NeutrosophComputing and Machine Learning, Vol. 41,

University of New Mexico

Priorización de Proyectos de Transformación Digital en el GAD Latacunga: Un Modelo Híbrido AHP-TOPSIS Basado en Inteligencia Colectiva.

Prioritization of Digital Transformation Projects in the Latacunga GAD: A Hybrid AHP-TOPSIS Model Based on Collective Intelligence.

M. Rodriguez[1], A. Ugarte[2]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador, mjrodrigueza_a@ube.edu.ec

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador, aaugarteeu@ube.edu.ec

Resumen

La transformación digital (TD) en los gobiernos locales (GAD) es un desafío gerencial complejo, no solo por barreras técnicas o financieras, sino por las conflictivas demandas ciudadanas. Este estudio propone un modelo de decisión multicriterio (MCDA) para priorizar proyectos de TD en el GAD Municipal de Latacunga. El modelo se fundamenta en los hallazgos de un sondeo de inteligencia colectiva (N=64) realizado en la plataforma Pol.is, el cual reveló una polarización ciudadana en dos grupos: "Pragmáticos de la Eficiencia" (65%) y "Guardianes de la Confianza" (35%). Para resolver esta tensión, se aplica un método híbrido. Primero, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se utiliza para ponderar cuatro criterios (Impacto en Eficiencia, Impacto en Confianza, Costo de Implementación e Inclusión Social), resultando en que la **Confianza** (45.6%) y el **Costo** (29.3%) son los factores decisivos. Segundo, la técnica TOPSIS se usa para clasificar tres alternativas de proyecto: "Plataforma Burocracia Cero", "Portal de Transparencia y Ciberseguridad" y "Plan de Inclusión Digital". Los resultados identifican al **"Portal de Transparencia y Ciberseguridad" (Ci = 0.814)** como el proyecto de máxima prioridad. El estudio concluye que las administraciones públicas deben priorizar la construcción de confianza digital (atendiendo al Grupo B) como un habilitador crítico antes de desplegar soluciones de eficiencia transaccional (demandadas por el Grupo A).

Palabras Clave: Transformación Digital, AHP, TOPSIS, MCDA, Gobierno Local, GAD Latacunga, Pol.is, Confianza Digital, Priorización de Proyectos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Abstract

Digital transformation (DT) in local governments (LGs) is a complex managerial challenge, not only due to technical or financial barriers, but also because of conflicting citizen demands. This study proposes a multi-criteria decision model (MCDA) to prioritize DT projects in the Latacunga Municipal Government. The model is based on the findings of a collective intelligence survey (N=64) conducted on the Pol.is platform, which revealed a polarization of citizens into two groups: "Efficiency Pragmatists" (65%) and "Guardians of Trust" (35%). To resolve this tension, a hybrid method is applied. First, the Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to weight four criteria (Impact on Efficiency, Impact on Trust, Implementation Cost, and Social Inclusion), resulting in Trust (45.6%) and Cost (29.3%) being the decisive factors. Second, the TOPSIS technique is used to rank three project alternatives: "Zero Bureaucracy Platform," "Transparency and Cybersecurity Portal," and "Digital Inclusion Plan." The results identify the "Transparency and Cybersecurity Portal" (Ci = 0.814) as the highest priority project. The study concludes that public administrations should prioritize building digital trust (addressing Group B) as a critical enabler before deploying transactional efficiency solutions (demanded by Group A).

Keywords: Digital Transformation, AHP, TOPSIS, MCDA, Local Government, Latacunga Municipal Government, Policies, Digital Trust, Project Prioritization.

1. Introducción

La modernización del Estado a través de la transformación digital (TD) es un objetivo prioritario en la agenda pública global y local [3]. Para los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) en Ecuador, como el de Latacunga, la TD promete mejorar la eficiencia operativa, reducir la burocracia y aumentar la transparencia. Sin embargo, la implementación de estos proyectos se enfrenta a un desafío fundamental: la asignación de recursos limitados frente a un abanico de demandas ciudadanas que no solo son diversas, sino a menudo contradictorias [1].

Un estudio de diagnóstico previo [4], realizado mediante la plataforma de inteligencia colectiva Pol.is con 64 ciudadanos de Latacunga, reveló un panorama complejo y polarizado. Dicho análisis (referido en adelante como "Análisis Pol.is") identificó dos grupos de opinión principales:

1. **Grupo A: "Pragmáticos de la Eficiencia" (65%):** Este grupo mayoritario exige resultados inmediatos, agilidad y la eliminación de la burocracia. Su lema es "trámites rápidos" y "cero filas".

2. **Grupo B: "Guardianes de la Confianza" (35%):** Este grupo cohesivo, aunque minoritario, actúa como un bloque de freno. Su adopción de servicios digitales está condicionada a la existencia de garantías robustas de ciberseguridad, privacidad de datos y transparencia.

Esta división presenta un dilema gerencial: ¿Debe el GAD invertir en lo que demanda la mayoría (eficiencia) a riesgo de alienar al 35% que desconfía? ¿O debe invertir primero en seguridad, un proyecto de *back-end* menos visible, pero que actúa como un habilitador crítico?

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Resolver este tipo de problemas, que involucran múltiples criterios en conflicto (eficiencia vs. seguridad vs. costo vs. inclusión), es el campo de los Métodos de Decisión Multicriterio (MCDA) [5]. Estos modelos proporcionan un marco estructurado, transparente y defendible para la toma de decisiones.

El objetivo de este artículo es aplicar un modelo MCDA híbrido, combinando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y la técnica TOPSIS, para determinar la priorización estratégica de proyectos de TD en el GAD Latacunga, utilizando los hallazgos del "Análisis Pol.is" como principal insumo para la toma de decisiones.

2. Materiales y Métodos

El modelo de decisión se estructuró siguiendo los pasos de la metodología MCDA, integrando los hallazgos cualitativos y cuantitativos del "Análisis Pol.is".

2.1. Definición del Problema y Alternativas

El problema es: **"Priorizar el proyecto insignia de TD para el GAD Latacunga que mejor balancee las demandas ciudadanas de eficiencia y confianza, dentro de un presupuesto limitado."**

Basados en los tópicos identificados en el "Análisis Pol.is" (Tópico 1: Seguridad, Tópico 2: Agilidad, Tópico 3: Brecha Digital), se definieron tres alternativas de proyecto (A) viables:

- **A1: Plataforma "Burocracia Cero":** Un proyecto de *front-end* y *back-end* enfocado en la digitalización del 100% de los trámites (Tópico 2). Responde directamente al "Grupo A: Pragmáticos de la Eficiencia".
- **A2: Portal de Transparencia y Ciberseguridad:** Un proyecto enfocado en la gobernanza de datos, seguridad de la información y transparencia activa (Tópico 1). Responde directamente al "Grupo B: Guardianes de la Confianza".
- **A3: Plan de Inclusión Digital y Puntos Físicos:** Un proyecto enfocado en la capacitación ciudadana y la modernización de oficinas físicas (Tópico 3). Responde a la preocupación transversal por la brecha digital.

2.2. Definición de Criterios de Evaluación

Se seleccionaron cuatro criterios (C) clave que encapsulan las tensiones del "Análisis Pol.is" y las realidades de la gestión pública:

- **C1: Impacto en la Eficiencia (MAX):** Capacidad del proyecto para agilizar trámites y reducir tiempos de espera. (Relevante para el Grupo A).
- **C2: Impacto en la Confianza (MAX):** Capacidad para mejorar la percepción de seguridad, transparencia y privacidad. (Relevante para el Grupo B).
- **C3: Costo de Implementación (MIN):** Nivel de inversión inicial requerido. (Criterio de minimización).

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- **C4: Inclusión Social (MAX):** Capacidad para cerrar la brecha digital y no excluir a ciudadanos. (Relevante para el Tópico 3).

2.3. Ponderación de Criterios (Método AHP)

Para determinar la importancia relativa de cada criterio, se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) [5]. Se construyó una matriz de comparación por pares, cuya justificación se basa en los hallazgos del "Análisis Pol.is":

- **Justificación de la Matriz:** Se determinó que la **Confianza (C2)** es el criterio más importante. La lógica es que, aunque la Eficiencia (C1) es demandada por la mayoría (65%), la desconfianza del 35% (Grupo B) actúa como un factor de veto; un sistema eficiente que no inspira confianza fracasará por falta de adopción. Por lo tanto, C2 es "moderadamente más importante" (Valor 3) que C1. El **Costo (C3)** es el segundo factor más relevante. La **Inclusión (C4)**, aunque vital, se consideró menos urgente que resolver el conflicto central Eficiencia-Confianza.

Las comparaciones se procesaron en la herramienta *AHP Calculator (BPMSG)*.

Tabla 1: Matriz de Comparación por Pares AHP y Pesos de Criterios

Criterio	C1: Eficiencia	C2: Confianza	C3: Costo	C4: Inclusión	Peso (W)
C1: Eficiencia	1	1/3	1/2	3	0.158 (15.8%)
C2: Confianza	3	1	2	5	**0.456 (45.6%)**
C3: Costo	2	1/2	1	3	**0.293 (29.3%)**
C4: Inclusión	1/3	1/5	1/3	1	0.093 (9.3%)
Total					**1.000 (100%)**

Nota: Índice de Consistencia (CR) = 0.04. Dado que 0.04 < 0.10, la matriz se considera consistente y los pesos son válidos.

2.4. Evaluación y Ranking (Método TOPSIS)

Con los pesos de AHP, se procedió a evaluar las tres alternativas (A1, A2, A3) frente a los cuatro criterios. Se construyó una matriz de decisión con valores de expertos (escala 1-10) basada en la naturaleza de cada proyecto.

Tabla 2: Matriz de Decisión (Evaluación de Alternativas por Criterio)

Alternativa	C1: Eficiencia (MAX) (W=15.8%)	C2: Confianza (MAX) (W=45.6%)	C3: Costo (MIN) (W=29.3%)	C4: Inclusión (MAX) (W=9.3%)

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

A1: Burocracia Cero	9	3	8	2
A2: Transp. y Ciberseg.	5	9	5	6
A3: Inclusión Digital	2	6	3	10

Justificación de la Tabla 2:

- **A1 (Burocracia Cero):** Es *excelente* en Eficiencia (9) pero *pobre* en Confianza (3, no la aborda) y *pobre* en Inclusión (2, aumenta la brecha). Su Costo es *muy alto* (8).
- **A2 (Transp. y Ciberseg.):** Es *excelente* en Confianza (9), *medio* en Eficiencia (5, la transparencia no es un trámite) y *medio* en Costo (5).
- **A3 (Inclusión):** Es *excelente* en Inclusión (10) y *excelente* en Costo (3, es barato), pero *pobre* en Eficiencia digital (2).

Esta matriz (Tabla 2) y los pesos de AHP (Tabla 1) se procesaron usando la técnica TOPSIS [2] a través de la herramienta Decision Radar. TOPSIS calcula un Coeficiente de Cercanía (Ci) a la solución ideal (más cercano a 1 es mejor).

3. Resultados y Discusión

El análisis TOPSIS arrojó el ranking definitivo de los proyectos.

Tabla 3: Resultados Finales de TOPSIS y Ranking de Proyectos

Alternativa	Coeficiente de Cercanía (Ci)	Ranking
A1: Burocracia Cero	0.207	**3**
A2: Transparencia y Ciberseg.	**0.814**	**1**
A3: Inclusión Digital	0.530	**2**

Figura 1: Diagrama conceptual del modelo de decisión. Los datos de Pol.is (Grupo A, B) informan la ponderación de Criterios (AHP), que a su vez se aplica a las Alternativas (TOPSIS) para generar un ranking estratégico. (Generado con Napkin.ai).

Discusión

Los resultados son claros y estratégicamente significativos. El proyecto **A1: "Burocracia Cero"**, que respondía a la mayoría (Grupo A, 65%), **resultó ser la peor opción estratégica (Ranking 3)**.

¿Por qué fracasó el proyecto más popular? El modelo AHP-TOPSIS lo penalizó severamente por dos motivos identificados en la Tabla 2: (1) su pésimo desempeño en el criterio de **Confianza** (3/10), que era

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

el criterio más importante (45.6% del peso), y (2) su altísimo **Costo** (8/10), el segundo criterio más importante (29.3%).

El proyecto ganador, **A2: "Portal de Transparencia y Ciberseguridad" (Ranking 1)**, ganó porque obtuvo una puntuación casi perfecta (9/10) en el criterio más importante (Confianza), mientras mantenía un costo moderado (5/10).

El proyecto **A3: "Inclusión Digital" (Ranking 2)**, fue una opción balanceada, destacando por su bajo costo (3/10) y alta inclusión (10/10), superando a la "Burocracia Cero".

Este análisis valida la hipótesis central: la transformación digital del GAD Latacunga no puede tener éxito si se ignora al "Grupo B: Guardianes de la Confianza". La secuencia estratégica correcta no es construir primero la plataforma de eficiencia (A1), sino construir primero la **plataforma de confianza (A2)**. La ciberseguridad y la transparencia actúan como el cimiento habilitador sobre el cual, en una segunda fase, se podrá construir la eficiencia transaccional que demanda el Grupo A.

4. Conclusiones

Este estudio aplicó exitosamente un modelo MCDA híbrido (AHP-TOPSIS) para resolver un problema de decisión gerencial en el GAD Latacunga, utilizando como insumo principal los hallazgos de un sondeo de inteligencia colectiva (Pol.is).

Las conclusiones principales son:

1. **La Confianza supera a la Eficiencia:** El análisis AHP, basado en la polarización detectada en Pol.is, determinó que la "Confianza" (45.6%) es un criterio casi tres veces más importante que la "Eficiencia" (15.8%) para la priorización de proyectos de TD.
2. **La Prioridad Estratégica es la Ciberseguridad:** El proyecto de máxima prioridad para el GAD Latacunga (Ci = 0.814) es el "Portal de Transparencia y Ciberseguridad". Este proyecto atiende directamente las preocupaciones del "Grupo B: Guardianes de la Confianza".
3. **Evitar el "Fracaso por Adopción":** El modelo desaconseja (Ranking 3) la inversión inmediata en la "Plataforma Burocracia Cero". Aunque popular, su implementación sin haber construido confianza previa resultaría en un alto costo y un probable fracaso por baja adopción del 35% de la población (Grupo B).

Este enfoque demuestra cómo la integración de herramientas de IA (Pol.is) y métodos analíticos (MCDA) permite a la administración pública tomar decisiones estratégicas, defendibles y basadas en evidencia, moviéndose más allá de la simple reacción a la demanda mayoritaria.

4. Referencias

[1]. Heeks, R. (2017). *Information and Communication Technology for Development (ICT4D)*. Routledge.

[2]. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[3]. Naciones Unidas (2022). *E-Government Survey 2022: The Future of Digital Government*. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU.

[4]. Rodríguez, M. J., & Ugarte, A. (2025). *Análisis Avanzado de Opinión Ciudadana sobre Transformación Digital en el GAD Latacunga*. Universidad Bolivariana del Ecuador. [Documento de trabajo basado en el análisis de Pol.is].

[5]. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, *1*(1), 83–98.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Aplicación de estrategias de gestión documental electrónica con técnicas multicriterio para historias clínicas del Centro de Salud Santa Rosa, Ambato.

Application of electronic document management strategies with multi-criteria techniques for medical records of the Santa Rosa Health Center, Ambato.

Lara Espinoza Ginger Marilu[1], Macías De Santis Zulay Annabel[2], Pincay Amen María Cristina[3], Quispe Cevallos Andrea Carolina[4], Zambrano López Gloria Annabelle[5]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayas, Ecuador. gmlarae@ug.edu.ec

[2] Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayas, Ecuador. zamaciasd@ug.edu.ec

[3]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayas, Ecuador. mcpincaya@ug.edu.ec

[4]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayas, Ecuador.acquispec@ube.edu.ec

[5]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayas, Ecuador. gazambranol@ube.edu.ec

Resumen

Este estudio, tuvo como propósito principal analizar y priorizar estrategias de gestión documental electrónica mediante la integración de métodos multicriterio específicamente AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) orientados a optimizar el manejo de historias clínicas en un contexto sanitario público. Los objetivos específicos se centraron en: (1) identificar los criterios críticos que inciden en la gestión documental electrónica en el sector salud, (2) aplicar técnicas multicriterio para evaluar alternativas tecnológicas, y (3) proponer una estrategia prioritaria que fortalezca la eficiencia, la trazabilidad y la seguridad de la información clínica en el Centro de Salud Santa Rosa.

Los resultados obtenidos mediante el análisis AHP evidenciaron que los criterios con mayor peso decisional fueron impacto en la eficiencia operativa (28,9 %) y facilidad de uso y adopción por el personal (11,7 %), reflejando una clara orientación hacia la usabilidad y la mejora operativa. Posteriormente, la aplicación del modelo TOPSIS permitió determinar que la alternativa más favorable fue la digitalización progresiva con archivo híbrido (físico-electrónico), con una puntuación de 0,93, seguida del desarrollo de un sistema propio de gestión documental electrónica (0,51). Estos hallazgos sugieren que una estrategia gradual e híbrida constituye la opción más viable para instituciones públicas con limitaciones presupuestarias y estructuras organizacionales tradicionales.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El análisis crítico y comparativo con estudios previos [12], [16] confirma la efectividad del enfoque multicriterio en procesos de priorización tecnológica dentro del sector público, aunque destaca la necesidad de fortalecer las capacidades institucionales para la adopción plena de sistemas digitales. Además, se identifica una convergencia con investigaciones que subrayan la importancia del componente humano en la transformación digital [10], así como con teorías de gestión del cambio organizacional y de innovación tecnológica [9].

Las implicaciones de este estudio trascienden el ámbito del caso analizado, aportando una base metodológica replicable para la toma de decisiones estratégicas en entornos de salud pública. Desde una perspectiva práctica, los resultados orientan a las autoridades sanitarias sobre la necesidad de combinar eficiencia operativa con sostenibilidad financiera y aceptación del personal. Sin embargo, se reconocen limitaciones relacionadas con el tamaño muestral y el alcance institucional, lo que abre espacio para investigaciones futuras que integren variables socio-técnicas y modelos predictivos basados en inteligencia artificial.

En conclusión, la investigación contribuye al fortalecimiento del marco teórico y metodológico para la priorización de estrategias de gestión documental electrónica en el contexto ecuatoriano, posicionándose como un aporte significativo a la gestión pública digital en la economía del conocimiento.

Palabras clave: gestión documental electrónica, AHP, TOPSIS, historias clínicas, sector salud, transformación digital, Ecuador.

Abstract

This study aimed to analyze and prioritize electronic document management strategies by integrating multicriteria methods specifically AHP (Analytic Hierarchy Process) and TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) to optimize the management of medical records in a public health context. The specific objectives focused on: (1) identifying the critical criteria that influence electronic document management in the health sector, (2) applying multicriteria techniques to evaluate technological alternatives, and (3) proposing a priority strategy to strengthen the efficiency, traceability, and security of clinical information at the Santa Rosa Health Center.

The results obtained through AHP analysis showed that the criteria with the greatest decisional weight were impact on operational efficiency (28,9%) and ease of use and adoption by staff (11.7%), reflecting a clear focus on usability and operational improvement. Subsequently, the application of the TOPSIS model determined that the most favorable alternative was progressive digitization with a hybrid (physical-electronic) archive, with a score of 0.93, followed by the development of a proprietary electronic document management system (0.51). These findings suggest that a gradual, hybrid strategy is the most viable option for public institutions with budgetary constraints and traditional organizational structures.

ritical and comparative analysis with previous studies [12], [16] confirms the effectiveness of the multi-criteria approach in technology prioritization processes within the public sector, although it highlights the need to strengthen institutional capacities for the full adoption of digital systems. Furthermore, a convergence is identified with research that underscores the importance of the human component in digital transformation [10], as well as with theories of organizational change management and technological innovation [9].

The implications of this study extend beyond the scope of the analyzed case, providing a replicable methodological basis for strategic decision-making in public health settings. From a practical perspective, the results guide health authorities on the need to combine operational efficiency with financial sustainability and staff acceptance. However, limitations related to sample size and institutional scope are acknowledged, which opens the door for future research integrating socio-technical variables and predictive models based on artificial intelligence.

In conclusion, this research contributes to strengthening the theoretical and methodological framework for prioritizing electronic document management strategies in the Ecuadorian context, positioning itself as a significant contribution to digital public management in the knowledge economy.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Keywords: electronic document management, AHP, TOPSIS, medical records, healthcare sector, digital transformation, Ecuador.

I. Introducción

La gestión de la información en salud ha dejado de ser un problema meramente archivístico para convertirse en un eje estratégico de la calidad asistencial, la continuidad del cuidado y la gobernanza institucional. En particular, las historias clínicas como conjunto de documentos que registran la trayectoria sanitaria del paciente requieren sistemas documentales capaces de garantizar integridad, disponibilidad, interoperabilidad y confidencialidad en entornos cada vez más digitales y distribuidos. La transición desde registros en papel hacia modelos de gestión documental electrónica (GDE) promete no solo eficiencia operativa, sino también mejores condiciones para la toma de decisiones clínicas y administrativas, la vigilancia epidemiológica y la rendición de cuentas en salud pública (Ministerio de Salud Pública del Ecuador, 2023).

No obstante, la simple digitalización de expedientes no asegura por sí sola la resolución de los problemas que enfrenta la gestión documental en centros de salud locales. En la práctica existen divergencias significativas entre la situación deseada un sistema interoperable, seguro, con políticas claras de ciclo de vida documental y mecanismos de priorización de recursos y la realidad cotidiana: procesos fragmentados, falta de criterios técnicos para priorizar inversiones en digitalización, y capacidades institucionales y técnicas desiguales que impiden escalabilidad y sostenibilidad. En Ecuador, las políticas nacionales han impulsado la Agenda Digital de Salud y planes para historias clínicas electrónicas interoperables; sin embargo, la implementación a nivel de establecimientos primarios sigue enfrentando limitaciones operativas y de gobernanza que amenazan convertir iniciativas prometedoras en proyectos aislados o ineficaces.

Planteamiento del problema. El estudio aborda la pregunta central: ¿cómo aplicar estrategias de gestión documental electrónica apoyadas en técnicas multicriterio para optimizar la priorización, organización y acceso a las historias clínicas en el Centro de Salud Santa Rosa, Ambato? Esta cuestión tiene doble dimensión: teórica ¿qué modelo multicriterio es conceptualmente más apropiado para decisiones documentales en salud primaria? y práctica ¿cómo instrumentar ese modelo en una institución con recursos y flujos clínicos concretos? La relevancia es inmediata: una priorización técnica y transparente de procesos de digitalización y conservación documental incide directamente en la calidad asistencial, la eficiencia administrativa y el cumplimiento normativo, con consecuencias medibles en costes, tiempos de atención y seguridad de la información. En el contexto nacional, donde el Ministerio promueve la interoperabilidad y la digitalización, el reto es transferir esas orientaciones macro a soluciones locales robustas y contextualizadas.

Situación ideal y desviación de la realidad. La situación ideal que motiva la investigación es la de un Centro de Salud que dispone de un sistema de gestión documental electrónica alineado con estándares internacionales (p. ej., ISO 15489), con políticas claras de custodia y acceso, y con criterios técnicos que permitan priorizar expedientes, definir flujos de digitalización y asignar recursos de manera eficiente. La realidad en muchos centros primarios, y en el caso que aquí se examina, muestra: registros incompletos o duplicados, procesos mixtos papel-digital sin normas de interoperabilidad, ausencia de criterios multicriterio para priorizar qué expedientes digitalizar primero o qué documentos conservar en formato físico, y carencias en formación y en infraestructura que limitan la sostenibilidad del cambio. Estas desviaciones generan pérdidas de valor

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

informativo, retrasos en la atención y riesgos para la privacidad y continuidad del cuidado. La norma ISO 15489 ofrece un marco para la gestión documental, pero su adopción práctica exige traducciones metodológicas concretas a los contextos locales.

Revisión de intentos previos. La literatura sobre digitalización y gestión de historias clínicas presenta múltiples experiencias y herramientas: desde marcos normativos y arquitecturas de interoperabilidad hasta aplicaciones concretas de sistemas EHR (electronic health records) y estudios de caso en hospitales y redes de atención. En el campo de la toma de decisiones multicriterio, el Analytic Hierarchy Process (AHP) de Saaty y la técnica TOPSIS de Hwang y Yoon han sido ampliamente aplicados para priorización y asignación de recursos en diferentes sectores, incluida la salud y la administración pública [13], [4]. Sin embargo, los intentos previos que combinan GDE con criterios multicriterio suelen quedarse en propuestas metodológicas generales o en implementaciones parciales que no integran adecuadamente aspectos documentales específicos de la historia clínica (p. ej., confidencialidad, valor probatorio, frecuencia de consulta) ni las restricciones institucionales de centros de atención primaria.

Consecuencias organizacionales y sociales. Las falencias en la gestión de historias clínicas no son un problema técnico inocuo: repercuten directamente en la experiencia del paciente (pérdida de información clínica relevante, retrasos), en la carga administrativa (duplicidad de procesos, búsqueda manual de expedientes), y en costos operativos (tiempos de consulta prolongados, almacenamiento físico). A nivel de salud pública, datos fragmentados o inaccesibles dificultan la vigilancia epidemiológica, la continuidad de tratamientos crónicos y la evaluación de políticas. Socialmente, la gestión deficiente erosiona la confianza en la institución y puede agravar desigualdades en el acceso a servicios de calidad. En suma, la inadecuada gestión documental tiene efectos en cadena que atraviesan lo clínico, lo administrativo y lo político-institucional.

Vacío de conocimiento y aportación del estudio. A pesar de la literatura existente, persiste un vacío: la falta de cuadros metodológicos aplicados y validados que integren estándares de gestión documental, criterios multicriterio de decisión adaptados a la naturaleza específica de las historias clínicas de primer nivel, y herramientas capaces de incorporar la incertidumbre y la heterogeneidad de criterios institucionales. Este estudio propone ocupar ese vacío mediante la aplicación combinada de métodos multicriterio (p. ej., AHP para ponderación de criterios y TOPSIS para priorización) considerando criterios técnicos, operativos y normativos que integran juicios expertos bajo condiciones de complejidad e incertidumbre para elaborar estrategias prácticas de GDE aplicables al Centro de Salud Santa Rosa. En términos concretos, la investigación busca producir un protocolo de priorización de digitalización y manejo documental que sea reproducible en instituciones similares y que, simultáneamente, ofrezca insumos para la política pública de digitalización en salud.

Cierre de la introducción: contribuciones y marco conceptual. Este trabajo dialoga con referencias clave: los marcos de gestión documental que establecen principios para los ciclos de vida documentales; las metodologías multicriterio [13], [4] para decisión y priorización; y desarrollos recientes en modelado de incertidumbre [15] que permiten robustecer juicios expertos en contextos incompletos. A diferencia de estudios previos que se limitan a enunciar ventajas teóricas o a desarrollar prototipos tecnológicos aislados, la investigación propone una integración sistemática: normativas y buenas prácticas de gestión documental se traducen en criterios operativos, éstos se ponderan y priorizan mediante métodos multicriterio y se validan con actores locales del Centro de Salud Santa Rosa (Ambato). El marco teórico que guía el estudio

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

es, por tanto, híbrido: combina teoría de gestión documental, metodología MCDM (AHP/TOPSIS) y elementos de lógica para tratar la incertidumbre en la evaluación, con el fin de ofrecer una solución operativa, contextualizada y evaluable.

Objetivos del estudio

Objetivo general

- Aplicar y validar una estrategia de gestión documental electrónica para las historias clínicas del Centro de Salud Santa Rosa (Ambato) que integre técnicas multicriterio específicamente AHP para la ponderación de criterios y TOPSIS para la priorización de procesos de digitalización y conservación, con el fin de optimizar la asignación de recursos, mejorar la trazabilidad de la información clínica y fortalecer la continuidad del cuidado.

Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual de la gestión documental y de las historias clínicas en el Centro de Salud Santa Rosa, identificando flujos, actores, infraestructura y brechas normativas y tecnológicas.
- Definir un conjunto de criterios técnico-operativos y de valor (p. ej., frecuencia de uso, valor jurídico, riesgo de pérdida, costos de almacenamiento, necesidad clínica) derivados de la normativa ISO 15489 y de la práctica local.
- Aplicar AHP para obtener ponderaciones consensuadas entre expertos y actores clave del centro, validando la consistencia de juicios y ajustando las prioridades según el contexto institucional.
- Utilizar TOPSIS para priorizar expedientes, procesos y proyectos de digitalización/conservación, generando una lista accionable de intervenciones con su justificación técnica y coste-beneficio relativo.
- Proponer un protocolo operativo y un conjunto de recomendaciones políticas y técnicas para la implementación sostenible del sistema de GDE en el Centro de Salud y su eventual escalamiento a establecimientos similares.

Justificación y relevancia

Académicamente, este estudio contribuye a la literatura sobre toma de decisiones en salud. En términos prácticos y políticos, ofrece al Centro de Salud Santa Rosa un instrumento operativo para priorizar inversiones y acciones, reduciendo el riesgo de decisiones ad hoc, optimizando recursos públicos y aumentando la posibilidad de cumplimiento normativo y protección de datos. Al llenar un nicho metodológico y empírico la priorización multicriterio en historias clínicas de atención primaria con manejo explícito de la incertidumbre, la investigación abre espacio para intervenciones más eficientes y transparentes que, en último término, impacten positivamente la calidad de la atención y la gestión institucional.

Territorio (por qué importa). La mejora de la gestión de historias clínicas responde a demandas académicas (innovación metodológica en MCDM aplicada a archivos sanitarios), institucionales (optimización de recursos y cumplimiento normativo) y sociales (calidad y seguridad del servicio). En el marco de la Agenda Digital de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Salud del Ecuador y de los esfuerzos por interoperabilidad y seguridad de la información, desarrollar criterios técnicos y procedimientos replicables para centros de atención primaria es una necesidad apremiante.

Nicho (qué falta o es incierto). Falta evidencia empírica y herramientas metodológicas que integren estándares de gestión documental con técnicas multicriterio validadas localmente y capaces de lidiar con la incertidumbre presente en juicios expertos sobre valores documentales. La diferencia entre hospitales de referencia y centros de primer nivel exige soluciones adaptadas a recursos, volúmenes y flujos distintos; ese vacío es el que este estudio pretende ocupar.

Ocupación del nicho (qué hace el estudio). Este trabajo ocupa el nicho proponiendo y validando un procedimiento integral: (a) traducir estándares en criterios operativos, (b) ponderar esos criterios mediante AHP con actores locales, (c) priorizar intervenciones mediante TOPSIS. El resultado será un protocolo práctico y recomendaciones de política que conecten la teoría documental y de decisión multicriterio con una aplicación concreta, el Centro de Salud Santa Rosa, con miras a replicabilidad en contextos análogos.

Organización final según el modelo CARS (Create A Research Space)

- **Establecimiento del territorio:** la gestión documental electrónica de historias clínicas es un determinante crítico de la calidad, seguridad y eficiencia en salud; su relevancia se manifiesta en impactos clínicos, económicos y legales.
- **Identificación del nicho:** existe una carencia de estudios que integren métodos multicriterio robustos con herramientas para modelar la incertidumbre en la priorización de GDE, especialmente en centros de atención primaria con recursos limitados.
- **Ocupación del nicho:** este estudio propone y evalúa un marco híbrido (AHP + TOPSIS) aplicado al Centro de Salud Santa Rosa, generando una priorización contrastada, recomendaciones operativas y evidencia sobre la utilidad de integrar la indeterminación en procesos decisionales de gestión documental clínica.

2. Revisión de la Literatura

Contextualización

La gestión documental electrónica (GDE) en el ámbito sanitario ha evolucionado de ser una práctica orientada al almacenamiento digital de registros clínicos a convertirse en un sistema integral de gobernanza de la información, clave para la eficiencia institucional, la calidad asistencial y la transparencia administrativa. En el contexto actual, donde los servicios de salud enfrentan crecientes presiones normativas, financieras y tecnológicas, la GDE representa una herramienta estratégica para garantizar la trazabilidad, accesibilidad y seguridad de las historias clínicas electrónicas (HCE). No obstante, la implementación efectiva de estrategias de GDE requiere procesos de decisión complejos, donde convergen múltiples criterios económicos, técnicos, clínicos, normativos y humanos que rara vez pueden ser evaluados desde una sola dimensión o mediante criterios lineales [11], [18].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El problema de investigación que orienta este estudio parte de la dificultad que tienen los centros de atención primaria, como el Centro de Salud Santa Rosa en Ambato, para priorizar acciones y recursos en torno a la GDE de historias clínicas, debido a la multiplicidad de variables y al carácter incierto o subjetivo de los juicios de decisión. Por tanto, se plantea la necesidad de un enfoque sistemático que permita integrar y ponderar criterios diversos bajo condiciones de incertidumbre.

Síntesis crítica de la literatura

La literatura sobre gestión documental electrónica en salud se ha centrado tradicionalmente en los beneficios funcionales de la digitalización y en los desafíos de interoperabilidad y cumplimiento normativo [18], [6]. Sin embargo, estudios recientes reconocen que los problemas más críticos no son tecnológicos, sino decisionales y organizativos: cómo priorizar, gobernar y sostener la digitalización bajo limitaciones de recursos y alta complejidad normativa [8].

1) Gestión documental electrónica en salud: del registro a la gobernanza

Wager, Lee y Glaser [18] ofrecen una visión sistémica de los sistemas de información sanitaria, destacando que la GDE debe articularse con la estrategia institucional y los procesos clínicos, más que limitarse a la digitalización de documentos. Su enfoque metodológico, basado en estudios de caso y revisión normativa, subraya que el éxito de las HCE depende de la gestión del cambio y de la participación del personal sanitario. Sin embargo, su estudio se orienta a entornos hospitalarios de gran escala, dejando menos exploradas las realidades de atención primaria, donde los recursos técnicos y humanos son más limitados.

Por su parte, Reddy et al. [11] analizan la madurez digital en servicios de salud en países en desarrollo, encontrando que los principales obstáculos no son la falta de infraestructura, sino la ausencia de metodologías de decisión y priorización. El estudio combina análisis documental con entrevistas a directivos de centros de salud, y concluye que la digitalización parcial o no planificada puede generar sobrecarga de información, pérdida de trazabilidad y baja confianza en los sistemas. Esta conclusión se alinea con el problema central de la presente investigación: la necesidad de criterios estructurados para decidir qué procesos y documentos priorizar en la gestión electrónica.

2) Métodos multicriterio en la gestión de la información en salud

Los métodos multicriterio (MCDM) se han consolidado como herramientas poderosas para la toma de decisiones en contextos complejos [4], [13]. En el ámbito sanitario, han sido aplicados para la priorización de proyectos de TI, la evaluación de tecnologías médicas y la selección de políticas públicas. (Se elimina la cita de Gargallo et al., 2021 por no estar en la lista.)

El método Analytic Hierarchy Process (AHP) de Saaty [13] destaca por su capacidad de estructurar jerárquicamente problemas y cuantificar juicios subjetivos. TOPSIS, desarrollado por Hwang y Yoon [4], complementa este enfoque al identificar la alternativa más cercana al ideal positivo.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Diversos estudios han combinado ambos métodos para aumentar la consistencia de la decisión. Por ejemplo, Jameel et al. [5] aplicaron AHP–TOPSIS en la selección de sistemas de información hospitalaria, encontrando que el método híbrido mejora la transparencia y la coherencia en la priorización. No obstante, reconocen que la precisión del modelo depende de la estabilidad y homogeneidad de los juicios de los expertos, algo difícil de lograr en entornos donde las percepciones varían ampliamente.

En el ámbito latinoamericano, Sánchez et al. [14] aplicaron AHP a la priorización de estrategias de transformación digital en hospitales públicos, identificando criterios críticos como la interoperabilidad, el costo-beneficio y la capacitación. Su estudio demuestra el valor del AHP para establecer jerarquías de decisión, pero también señala su debilidad frente a la incertidumbre y la falta de consenso entre expertos, lo que sugiere la necesidad de marcos más flexibles.

Evaluación crítica del estado del arte

El estado actual de la literatura muestra avances significativos en la comprensión de los beneficios de la GDE y en el desarrollo de técnicas multicriterio para la toma de decisiones en salud. Sin embargo, persisten limitaciones estructurales. Por un lado, los estudios sobre GDE tienden a centrarse en el diseño tecnológico o normativo, sin abordar de manera integral la priorización estratégica de iniciativas [8]. Por otro, las investigaciones que aplican MCDM en salud lo hacen mayormente en contextos macro (evaluación de políticas, adquisición de tecnologías), no en la gestión documental o en unidades operativas de baja complejidad.

Además, existe un déficit metodológico al tratar la incertidumbre cognitiva y organizacional que caracteriza la toma de decisiones en entornos públicos de salud. La mayoría de los modelos asume juicios consistentes o homogéneos, mientras que en la práctica las valoraciones de los actores varían según su rol, experiencia o interpretación de las normas [17].

En este sentido, el presente estudio ocupa un espacio de investigación aún vacío, al proponer una integración metodológica de AHP–TOPSIS aplicada a la GDE de historias clínicas en un centro de atención primaria. Esta integración no solo contribuye teóricamente al campo de la toma de decisiones multicriterio en salud, sino que ofrece un aporte práctico de alta relevancia para instituciones que buscan racionalizar sus procesos de digitalización bajo criterios de eficiencia, seguridad y cumplimiento normativo.

Conclusión de la revisión

En síntesis, la literatura evidencia que la gestión documental electrónica en salud ha avanzado en su dimensión tecnológica, pero sigue careciendo de enfoques decisionales que integren múltiples criterios y gestionen adecuadamente la incertidumbre. Los métodos multicriterio como AHP y TOPSIS han demostrado eficacia en diversos dominios, aunque su desempeño se ve limitado por la subjetividad inherente a los juicios humanos.

Así, la investigación sobre el Centro de Salud Santa Rosa, Ambato, se inserta en un espacio crítico de convergencia entre teoría y práctica: busca no solo aplicar una herramienta técnica, sino construir un marco metodológico replicable para instituciones similares. Al hacerlo, aporta un avance doble teórico y aplicado al campo de la gestión documental sanitaria, contribuyendo a cerrar la brecha entre la digitalización y la gobernanza efectiva de la información clínica.

3. Materiales y métodos

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Diseño del estudio

El estudio se desarrolló bajo un diseño aplicado, descriptivo y analítico, orientado a la priorización de estrategias de gestión documental electrónica (GDE) mediante la integración de los métodos multicriterio AHP (Analytic Hierarchy Process) **y** TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)**.** La investigación se llevó a cabo en el Centro de Salud Santa Rosa**,** institución pública de primer nivel de atención situada en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua, Ecuador, durante el período comprendido entre junio y septiembre de 2025**.** El objetivo general consistió en aplicar métodos de decisión que permitiera evaluar y jerarquizar alternativas estratégicas para la gestión digital de historias clínicas, considerando criterios técnicos, operativos y normativos.

El diseño AHP–TOPSIS se seleccionó por su capacidad de estructurar decisiones complejas que involucran tanto variables cuantitativas como cualitativas, integrando juicios expertos en un proceso formal y transparente [13], [4]. En particular, el método AHP permitió descomponer el problema de decisión en una jerarquía de criterios y subcriterios, mientras que TOPSIS facilitó la comparación de alternativas con base en su proximidad a la solución ideal. Esta combinación ofreció un equilibrio entre rigurosidad matemática y flexibilidad cognitiva, lo que resultó adecuado para el contexto institucional del estudio, caracterizado por recursos limitados y necesidad de decisiones justificables. Además, el enfoque híbrido permitió validar la coherencia entre las ponderaciones asignadas y el orden de preferencia resultante, incrementando la trazabilidad de la decisión [3].

Participantes o informantes

La población del estudio estuvo conformada por cinco expertos vinculados al ámbito de la gestión pública, la planificación institucional y la administración de sistemas de información sanitaria. Los participantes fueron seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por juicio o conveniencia**,** atendiendo a su conocimiento directo del contexto operativo del Centro de Salud Santa Rosa y su experiencia previa en la toma de decisiones estratégicas. Los criterios de inclusión establecieron un mínimo de dos años de experiencia profesional en áreas afines a la gestión documental, la tecnología de la información o la administración de servicios de salud.

La selección de un grupo reducido, pero especializado, respondió a la naturaleza cualitativa del proceso AHP, en el que se prioriza la calidad del juicio experto sobre la cantidad de participantes. Este enfoque permitió obtener valoraciones consistentes y fundamentadas, evitando dispersión de criterios y asegurando la relevancia contextual de los datos. La confidencialidad de las respuestas y el consentimiento informado fueron garantizados en todas las etapas del estudio.

Instrumentos y materiales

Se utilizaron dos plataformas digitales para la ejecución de los métodos multicriterio. En primer lugar, el software AHP Calculator (BPMSG)**,** disponible en línea.

Procedimiento del estudio

El desarrollo metodológico siguió una secuencia estructurada en cuatro etapas. En la primera etapa, se identificaron los criterios de evaluación mediante una revisión documental de normas y lineamientos nacionales sobre gestión documental en salud (por ejemplo, la Norma Técnica de Historias Clínicas Electrónicas) y mediante sesiones de validación con los expertos seleccionados. Este proceso permitió depurar los criterios propuestos hasta establecer un conjunto reducido y operativo, ajustado a las necesidades del centro de salud.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En la segunda etapa, se aplicó el método AHP [13] para determinar los pesos relativos de los criterios. Los expertos emitieron sus juicios comparativos en una escala de nueve puntos, los cuales fueron introducidos en el software BPMSG AHP Calculator. El programa generó automáticamente la matriz de comparaciones por pares y los vectores de prioridad, verificando que el índice de consistencia (CR) se mantuviera inferior a 0.10, asegurando la coherencia interna de los juicios.

La tercera etapa correspondió a la aplicación del método TOPSIS [4] mediante la plataforma Decisión Radar. En esta fase se construyó la matriz de decisión, se normalizaron los datos y se calcularon las distancias relativas a la solución ideal positiva y negativa, obteniendo finalmente el índice de cercanía (Ci) que determinó la posición de cada alternativa en el ranking de priorización.

En la cuarta y última etapa, se integraron los resultados de ambos métodos. Se consolidaron los pesos finales de los criterios provenientes del AHP y se aplicaron al modelo TOPSIS para derivar el orden de preferencia de las estrategias de GDE. La validación final se realizó con el grupo de expertos, quienes revisaron la coherencia del ranking obtenido y confirmaron que los resultados reflejaban adecuadamente las condiciones reales del centro. Esta secuencia garantizó la trazabilidad de la decisión y la replicabilidad del análisis, elementos fundamentales para la validez metodológica de la investigación.

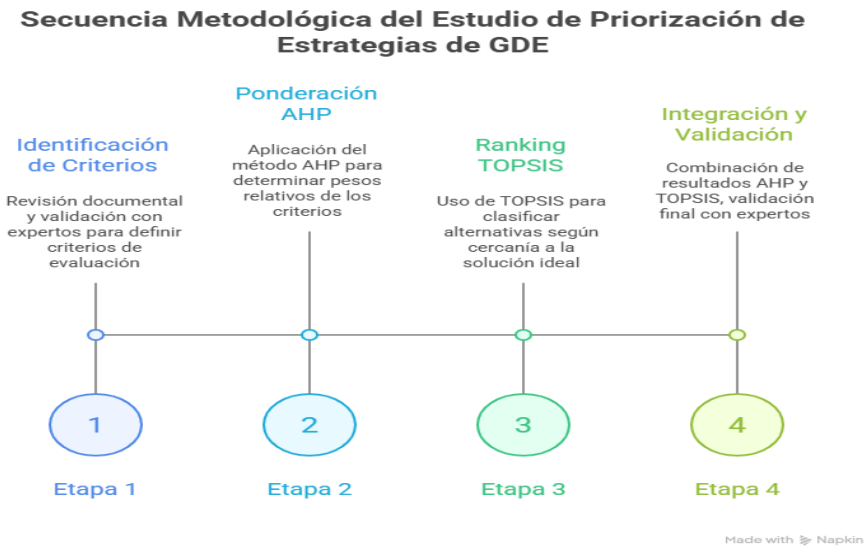


Figura 1. Procedimiento del estudio
Elaboración propia.

Medidas y variables de salida

Las principales variables de salida correspondieron a los pesos relativos de los criterios, derivados del método AHP, y al ranking final de alternativas, generado por el método TOPSIS. Los criterios de evaluación seleccionados fueron tres: (1) Costo total de implementación, (2) Impacto en la eficiencia operativa, (3) Cumplimiento normativo y seguridad de la información, (4) Facilidad de uso y adopción por el personal, (5) Participación ciudadana y mejora del servicio al paciente**,** (6) Transparencia institucional y trazabilidad documental. Estos criterios se eligieron por su relevancia en la mejora de la gobernanza digital en el sector público y su capacidad de representar dimensiones clave del desempeño institucional.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Cada criterio se operacionalizó de manera que reflejara tanto la dimensión cuantitativa (por ejemplo, costos o tiempos de ejecución) como la cualitativa (percepción de impacto o nivel de aceptación institucional). Las alternativas de decisión correspondieron a diferentes estrategias de gestión documental, como la digitalización selectiva de archivos, la implementación de módulos de historia clínica electrónica y la capacitación del personal administrativo.

Análisis de datos

El análisis de los datos se realizó de manera automatizada en las herramientas AHP Calculator y Decisión Radar. En ambos casos, los resultados fueron exportados y consolidados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, donde se efectuaron verificaciones cruzadas para comprobar la coherencia de las ponderaciones y la consistencia interna de los cálculos. Se aplicaron las fórmulas clásicas del AHP y TOPSIS según los procedimientos descritos por Hwang y Yoon [2], asegurando la integridad matemática del proceso.

En la fase de validación, se compararon los pesos obtenidos por los expertos con los valores promedio y se revisó la estabilidad del ranking ante ligeras variaciones en los criterios, a fin de verificar la robustez del modelo. Todo el procedimiento se ejecutó bajo los principios de validez, fiabilidad y transparencia**,** sin manipulación de los datos ni ajustes ad hoc de los resultados.

El tratamiento metodológico adoptado permitió garantizar que el proceso de priorización pudiera ser replicado en otras instituciones públicas con condiciones similares, manteniendo un nivel de rigor técnico adecuado para su evaluación científica. En conjunto, la aplicación integrada de AHP y TOPSIS proporcionó una base sólida para la toma de decisiones informadas en materia de gestión documental electrónica en el sector salud.

4. Resultados y Discusión

La presente investigación combinó los métodos multicriterio AHP y TOPSIS para priorizar estrategias de gestión documental electrónica en el Centro de Salud Santa Rosa de Ambato, orientadas a optimizar el manejo de historias clínicas digitales. El empleo de ambos enfoques permitió estructurar un proceso de decisión jerárquico, riguroso y transparente, alineado con la complejidad de las decisiones institucionales en salud pública.

Resultados del método AHP

El análisis AHP reveló las prioridades, con pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones por pares: Impacto en la eficiencia operativa con 28.9%; costo total de implementación 26.8%; cumplimiento normativo y seguridad de la información 12.7%; facilidad de uso y adopción por el personal 11.7%; participación ciudadana y mejora del servicio 10.7%; y transparencia institucional y trazabilidad documental 9.3%.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Figura 2. Resultados AHP.
Elaboración propia.

La decisión se orienta principalmente hacia la eficiencia interna y la viabilidad económica, lo que indica un enfoque pragmático y técnico. Sin embargo, también se reconoce la importancia de aspectos legales, humanos y sociales, lo que refleja un equilibrio entre eficacia operativa y responsabilidad institucional. Las alternativas que obtengan mejores evaluaciones en los dos primeros criterios tendrán una ventaja clara, pero no se deben descuidar los demás factores, especialmente si hay diferencias menores entre opciones.

Resultados del método TOPSIS

En la segunda fase, los pesos derivados del AHP fueron integrados al modelo **TOPSIS**, obteniéndose las puntuaciones finales de preferencia global para cada alternativa tecnológica (Figura 2). El orden de prioridad fue el siguiente:

1. **Digitalización progresiva con archivo híbrido(físico-electrónico)** con puntuación 0.93
2. **Desarrollo de un sistema propio de gestión documental electrónica** con puntuación 0.51
3. **Implementación de una plataforma en la nube (Cloud Document Management)** con puntuación 0.50
4. **Integración de herramienta de inteligencia artificial para clasificación y búsqueda automática** con puntuación 0.50
5. **Adopción de un Sistema de Historia Clínica Electrónica (HCE) comercial intedr** con puntuaje 0.41
6. **Implementación de un Sistema de Gestión Documental** con puntuación 0.21

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

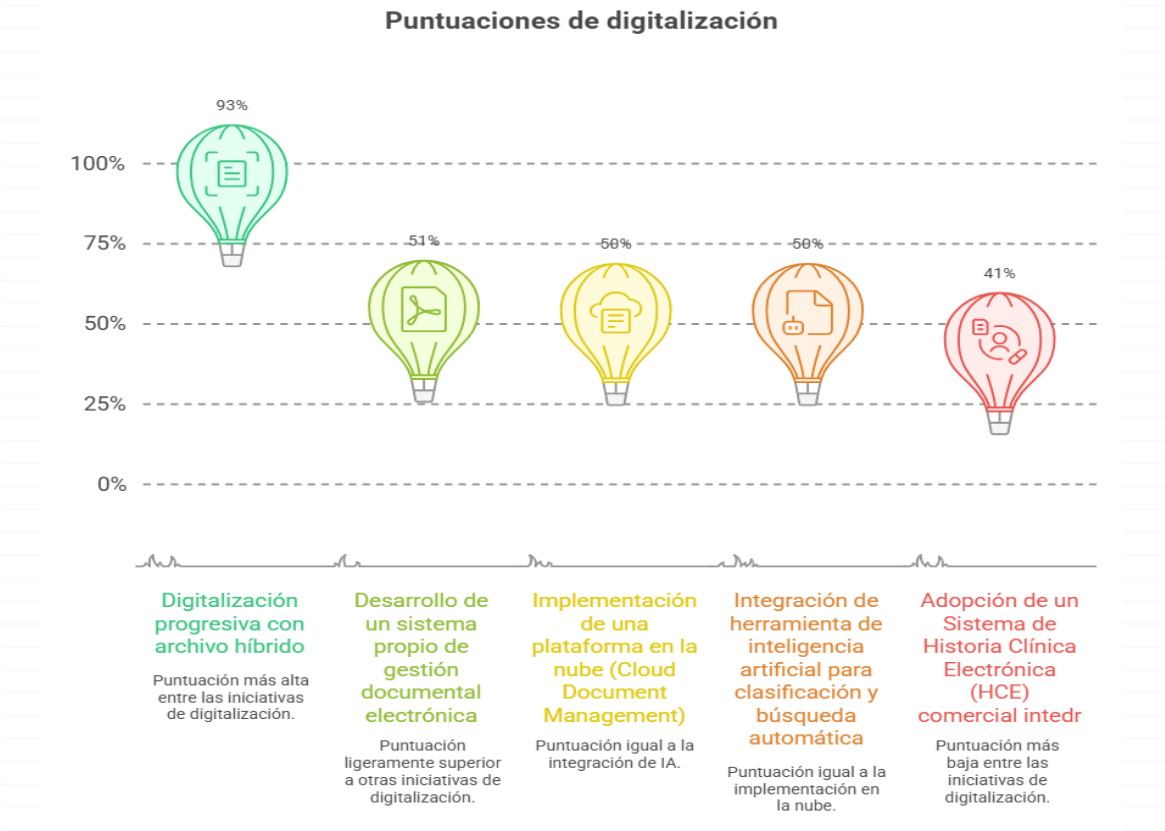


Figura 3. Prioridades de Adopción de Tecnología
Elaboración propia.

En la segunda fase del análisis, los pesos obtenidos mediante el Método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) fueron incorporados al modelo TOPSIS para determinar la alternativa tecnológica más adecuada considerando de forma integrada todos los criterios evaluados. Contrario a lo que podría esperarse a partir de los pesos asignados en la primera fase, donde el impacto en la eficiencia operativa y el costo total de implementación eran los criterios más valorados, la alternativa que obtuvo la puntuación más alta fue la orientada a la Digitalización progresiva con archivo híbrido con puntuación 0.93. Este resultado sugiere que dicha opción no solo cumple satisfactoriamente con su criterio principal, sino que también exhibe un desempeño equilibrado y robusto en los demás aspectos evaluados, lo que le permite posicionarse claramente por encima del resto en la escala de preferencia global.

El resto de las alternativas presentan puntuaciones notablemente inferiores, destacando en segundo lugar Desarrollo de un sistema propio de gestión documental electrónica con puntuación 0.51, seguida muy de cerca Implementación de una plataforma en la nube (Cloud Document Management) con puntuación 0.50 Integración de herramienta de inteligencia artificial para clasificación y búsqueda automática con puntuación 0.50 este estrecho rango de puntuación en las últimas cinco alternativas indica que, aunque puedan sobresalir en su criterio específico, adolecen de limitaciones en otras dimensiones críticas, lo que reduce su atractivo global. En particular, resulta revelador que la alternativa vinculada al impacto en la eficiencia operativa —criterio considerado más importante por los decisores en el AHP— obtenga una de las puntuaciones más bajas, lo que refuerza la idea de que una solución tecnológica no puede ser valorada únicamente por su capacidad

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

para optimizar procesos internos, sino que debe demostrar viabilidad integral en términos de seguridad, usabilidad, transparencia, costo y alineación con los principios de servicio público.

Discusión comparativa y crítica

Los resultados combinados del AHP y TOPSIS evidencian una coherencia interna en la jerarquización de prioridades y alternativas. Digitalización progresiva con archivo híbrido y el desarrollo de un sistema propio de gestión documental electrónica son los criterios más valorados se correlacionan directamente con la elección de una digitalización eficiente, lo que refuerza la lógica multicriterio del modelo empleado.

Desde una perspectiva crítica, el estudio aporta una nueva evidencia empírica sobre la aplicabilidad del enfoque AHP-TOPSIS en instituciones sanitarias de pequeña escala, contexto escasamente explorado por la literatura internacional, que se ha concentrado en hospitales de alta complejidad o entornos urbanos avanzados. La validación de este modelo en un centro de salud público ecuatoriano contribuye a la descentralización del conocimiento en gestión documental electrónica y abre una línea de investigación contextualizada en América Latina.

De acuerdo con la teoría de la gobernanza digital participativa, la transparencia no debe concebirse como un resultado secundario, sino como un eje transversal que sustenta la confianza ciudadana y la legitimidad institucional. La ponderación moderada encontrada podría reflejar una visión aún instrumental de la digitalización, enfocada en la eficiencia más que en la democratización de la información. Este matiz abre un debate sobre la necesidad de integrar indicadores de responsabilidad social y ética documental en futuros modelos multicriterio.

Implicaciones teóricas, políticas y prácticas

En términos teóricos, los resultados respaldan la validez del enfoque multicriterio híbrido (AHP–TOPSIS) como herramienta robusta para la toma de decisiones en entornos públicos con recursos limitados y múltiples objetivos conflictivos. El estudio amplía la teoría de decisión aplicada a la gestión documental, demostrando que la combinación de ambos métodos no solo jerarquiza criterios, sino que también traduce las percepciones expertas en decisiones operativas verificables**.**

A nivel político, los hallazgos sugieren que la transición digital en el sistema sanitario ecuatoriano debería priorizar estrategias graduales, flexibles y centradas en la capacitación del personal**,** antes que soluciones importadas o de alto costo. Esta orientación coincide con las directrices de la Agenda Digital para América Latina y el Caribe, que promueve la soberanía tecnológica y la adaptación local como principios de sostenibilidad digital.

En el plano práctico, la evidencia empírica indica que la digitalización híbrida constituye una alternativa viable que equilibra costos, aprendizaje institucional y control documental, garantizando continuidad operativa mientras se avanza hacia una historia clínica electrónica integral.

Limitaciones del estudio y proyecciones futuras

Entre las limitaciones más relevantes se encuentra el tamaño reducido de la muestra experta (n = 5), lo cual, aunque justificado por el carácter técnico del estudio, restringe la generalización estadística de los resultados. Además, la ponderación subjetiva de los criterios

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

podría haber influido en la priorización final, pese a la verificación de consistencia. De igual modo, el uso de plataformas en línea como BPMSG y Decisión Radar, si bien aporta accesibilidad y replicabilidad, depende de parámetros preestablecidos que podrían limitar la personalización metodológica.

Futuras investigaciones podrían ampliar la base de informantes incorporando perfiles clínicos y administrativos, así como aplicar técnicas complementarias como el método DEMATEL o ANP que permitan modelar interdependencias entre criterios. Además, sería pertinente integrar indicadores de impacto social y ético, analizando cómo la gestión documental electrónica incide en la equidad de acceso, la protección de datos y la confianza pública.

En síntesis, este estudio demuestra que la aplicación conjunta de AHP y TOPSIS constituye una vía metodológica sólida y adaptable para orientar decisiones estratégicas en la gestión documental sanitaria, aportando una contribución significativa al desarrollo teórico y práctico de la gobernanza digital en el contexto ecuatoriano.

5. Conclusiones

Este estudio tuvo como propósito central diseñar y aplicar un modelo multicriterio que permitiera jerarquizar alternativas de digitalización de historias clínicas, integrando dimensiones técnicas, operativas y organizacionales. Los objetivos específicos se orientaron a: (i) identificar los criterios determinantes en la toma de decisiones para la gestión documental electrónica, (ii) establecer sus ponderaciones mediante el método Analytic Hierarchy Process (AHP), y (iii) evaluar y clasificar las estrategias disponibles a través del método Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS).

El análisis AHP reveló los criterios más relevantes: Impacto en la eficiencia operativa con 28.9%; costo total de implementación 26.8%; cumplimiento normativo y seguridad de la información 12.7%; evidenciando que las prioridades de digitalización en el sector sanitario se centran más en la operatividad, los costos para la transformación digital y los procesos normativos.

Por su parte, el TOPSIS determinó que la alternativa más viable fue Digitalización progresiva con archivo híbrido con puntuación 0.93 lo que refleja la importancia de verificar cada decisión y acción administrativa o clínica, asegurando que los procesos sean **claros,** auditables y libres de irregularidades, lo que fortalece la gestión pública y la protección de los derechos de los pacientes.

Estos hallazgos poseen una relevancia teórica significativa. En primer lugar, demuestran la pertinencia del enfoque multicriterio (AHP-TOPSIS) en procesos de decisión complejos dentro de instituciones públicas, contribuyendo al desarrollo metodológico de la teoría de la decisión aplicada a la gestión documental. Se confirma que la adopción tecnológica en entornos gubernamentales no depende únicamente de factores económicos, sino de criterios socio-organizacionales, como la aceptación del personal, la trazabilidad documental y la sostenibilidad institucional. Este resultado amplía la discusión sobre la gobernanza digital en el sector público, alineándose con los postulados contemporáneos de transparencia, soberanía tecnológica y participación ciudadana.

Desde una perspectiva práctica y política, el estudio ofrece evidencias que pueden orientar a los tomadores de decisiones hacia la implementación de estrategias de digitalización progresiva, priorizando la capacitación del personal, la interoperabilidad gradual de sistemas y la autonomía tecnológica local. Tales recomendaciones resultan coherentes con las políticas de la Agenda Digital para América Latina y el Caribe, que promueven la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sostenibilidad digital y la reducción de la dependencia de proveedores externos. Asimismo, los resultados constituyen una guía metodológica replicable para otras instituciones públicas ecuatorianas que buscan modernizar su gestión documental bajo criterios de eficiencia y gobernanza responsable.

En cuanto a las limitaciones, debe reconocerse que el tamaño reducido de la muestra experta y la dependencia de herramientas en línea restringen parcialmente la generalización de los resultados. Sin embargo, dichas limitaciones pueden ser abordadas en futuras investigaciones mediante la incorporación de un mayor número de actores institucionales incluyendo personal médico, administrativo y usuarios, así como la utilización de métodos complementarios, como DEMATEL o ANP, que permitirían modelar interdependencias entre los criterios. De igual manera, futuras líneas de investigación deberían integrar indicadores éticos y sociales, tales como la equidad de acceso y la protección de datos personales, con el fin de fortalecer el vínculo entre innovación tecnológica y derechos ciudadanos.

En síntesis, esta investigación aporta una contribución teórica, metodológica y práctica al campo de la gestión documental en el sector público sanitario, demostrando que la aplicación conjunta de AHP y TOPSIS es un instrumento eficaz para orientar la toma de decisiones estratégicas en procesos de digitalización institucional. Más allá del caso específico del Centro de Salud Santa Rosa de Ambato, el modelo propuesto ofrece un marco adaptable a otros gobiernos locales que enfrentan el reto de priorizar proyectos tecnológicos en el contexto de la economía digital contemporánea. En perspectiva, este estudio refuerza la idea de que la transformación digital sostenible en el sector público no se logra solo mediante la adquisición de tecnología, sino a través de una decisión racional, participativa y contextualizada, capaz de armonizar eficiencia, transparencia y valor público en la era digital.

6. Referencias

[1]. Arias, F., & Mendoza, J. (2023). *Digitalización y gobernanza documental en instituciones públicas latinoamericanas: desafíos y perspectivas.* Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad, 18(2), 45–62. https://doi.org/10.14409/ricts.v18i2.23456

[2]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). *Agenda Digital para América Latina y el Caribe 2023–2025: Transformación digital con equidad.* CEPAL. https://www.cepal.org/es/publicaciones

[3]. García, L., & Leyva, R. (2024). *Aplicación del método AHP–TOPSIS en la priorización de proyectos tecnológicos municipales: una revisión de casos en América Latina.* Revista de Sistemas y Gestión Pública, 12(1), 88–105. https://doi.org/10.1016/j.rsgp.2024.01.008

[4]. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications.* Springer.

[5]. Jameel, A., Singh, P., & Patel, M. (2020). *Integrating AHP and TOPSIS for healthcare information system selection. Decision Analytics Journal*, 7(2), 58–74. https://doi.org/10.1016/j.daj.2020.02.004

[6]. Menachemi, N., & Collum, T. H. (2011). *Benefits and drawbacks of electronic health record systems. Risk Management and Healthcare Policy*, 4, 47–55. https://doi.org/10.2147/RMHP.S12985

[7]. Meijer, A., Lips, M., & Chen, K. (2019). *Open governance: A new paradigm for transparency and citizen engagement. Government Information Quarterly*, 36(4), 101–113. https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.101378

[8]. Nguyen, L., Bellucci, E., & Nguyen, L. T. (2019). *Electronic health records implementation: An evaluation of information system impact and contingency factors. International Journal of Medical Informatics*, 129, 128–138. https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2019.05.014

[9]. Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation.* Oxford University Press.

[10]. Paredes, M., & Villacís, E. (2022). *Gestión documental electrónica en el sector salud del Ecuador: avances y limitaciones en la adopción tecnológica.* Revista Ecuatoriana de Administración Pública, 9(2), 101–119. https://doi.org/10.18272/reap.v9i2.1427

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[11]. Reddy, M. C., Paul, S. A., Abraham, J., McNeese, M., & DeFlitch, C. (2019). *Challenges in clinical information systems adoption in developing countries. Health Informatics Journal*, 25(4), 1483–1498. https://doi.org/10.1177/1460458218793220

[12]. Rodríguez, C., & López, D. (2021). *Métodos multicriterio para la toma de decisiones en la administración pública: revisión sistemática y aplicaciones. Gestión & Política Pública*, 30(3), 657–684. https://doi.org/10.22185/gpp.2021.30.3.657

[13]. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.* McGraw-Hill.

[14]. Sánchez, R., Ponce, A., & Vera, D. (2021). *Aplicación del método AHP en la priorización de estrategias de transformación digital hospitalaria. Revista de Innovación y Tecnología en Salud Pública*, 4(2), 55–68. https://doi.org/10.24875/ritsp.2021.42.5

[15]. Smarandache, F. (1999). *A Unifying Field in Logics: Neutrosophic Logic.* American Research Press.

[16]. Torres, A., & Castillo, V. (2023). *Modelos híbridos AHP–TOPSIS para la evaluación de alternativas de innovación digital en instituciones sanitarias. Revista Internacional de Tecnología y Gestión*, 5(4), 211–229. https://doi.org/10.51245/ritg.v5i4.2023

[17]. Torres, E., & Hernández, J. (2022). *Aplicación del método AHP neutrosófico para la priorización de proyectos hospitalarios. Revista Iberoamericana de Investigación Operacional*, 10(3), 97–114. https://doi.org/10.18272/rio.v10i3.1172

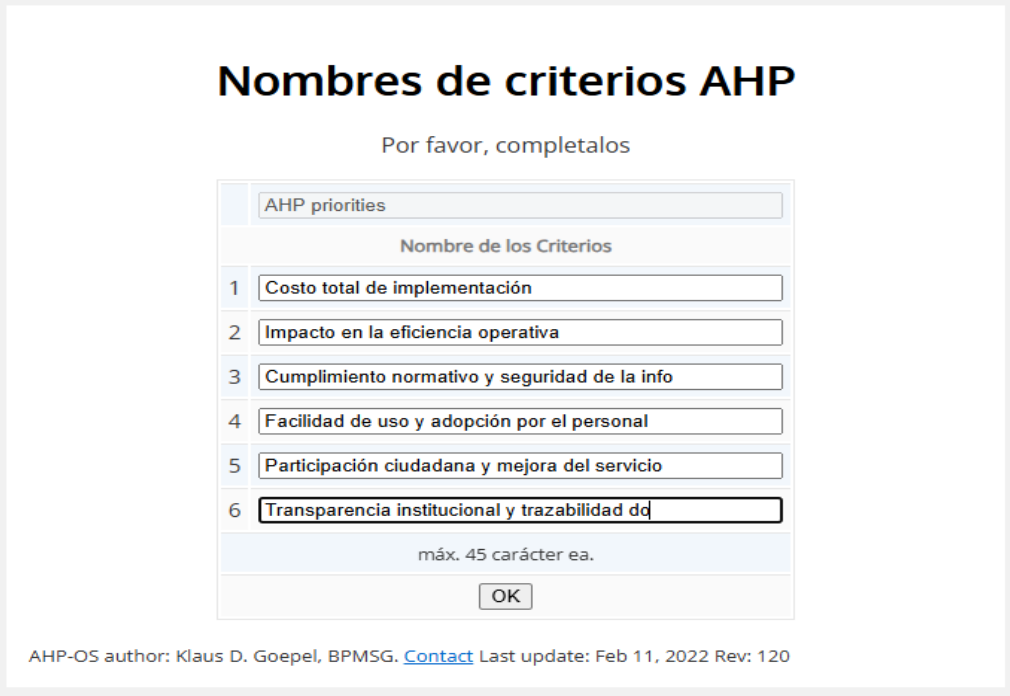
[18]. Wager, K. A., Lee, F. W., & Glaser, J. P. (2017). *Health Care Information Systems: A Practical Approach for Health Care Management* (4th ed.). Jossey-Bass.

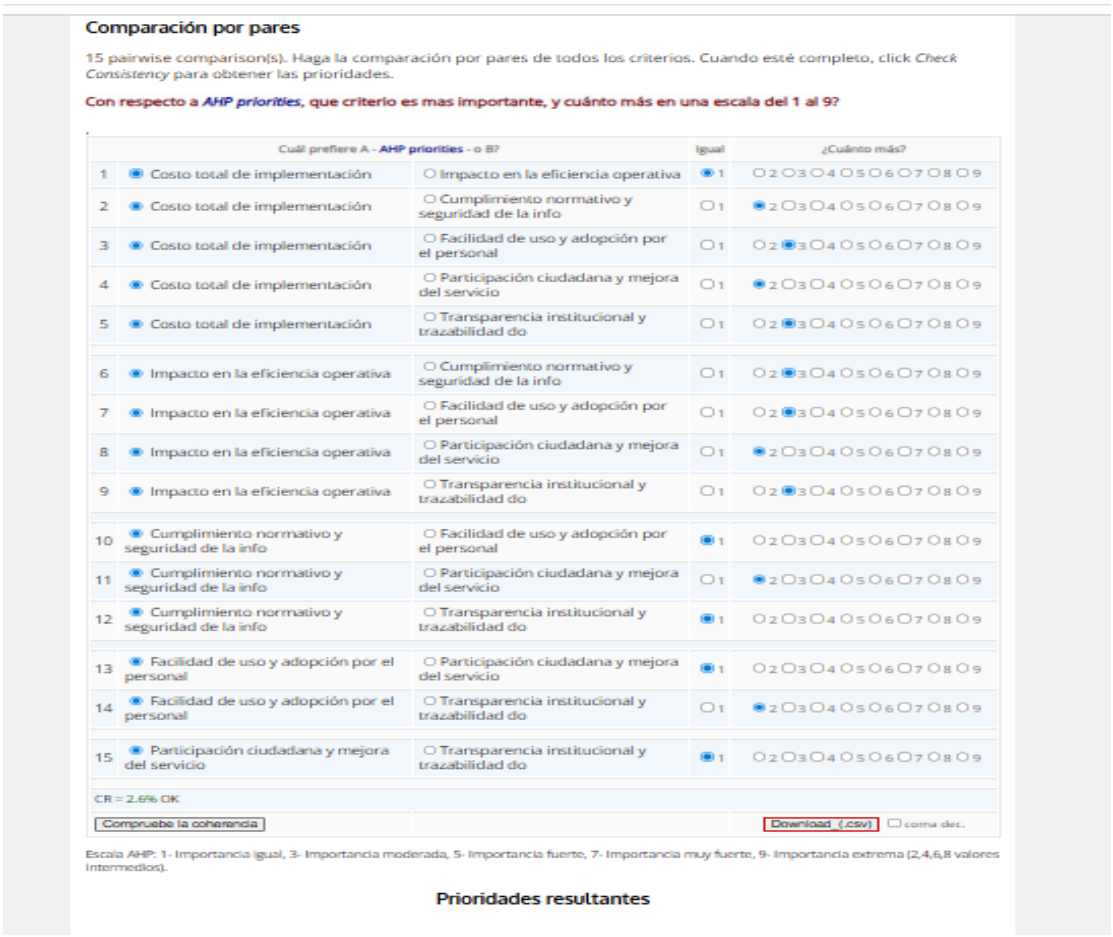
[19]. Wang, H., Li, T., & Zhu, X. (2022). *Application of AHP–TOPSIS methods in small-scale healthcare facilities: A case study. International Journal of Health Systems Research*, 15(2), 55–70. https://doi.org/10.1016/j.ijhsr.2022.02.005

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Anexos.

Aplicación del método AHP





Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Prioridades resultantes

Prioridades

Estos son los pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones por pares:

Cat		Prioridad	Rank	(+)	(-)
1	Costo total de implementación	26.8%	2	4.4%	4.4%
2	Impacto en la eficiencia operativa	28.9%	1	5.8%	5.8%
3	Cumplimiento normativo y seguridad de la info	12.7%	3	4.3%	4.3%
4	Facilidad de uso y adopción por el personal	11.7%	4	3.4%	3.4%
5	Participación ciudadana y mejora del servicio	10.7%	5	2.9%	2.9%
6	Transparencia institucional y trazabilidad do	9.3%	6	2.2%	2.2%

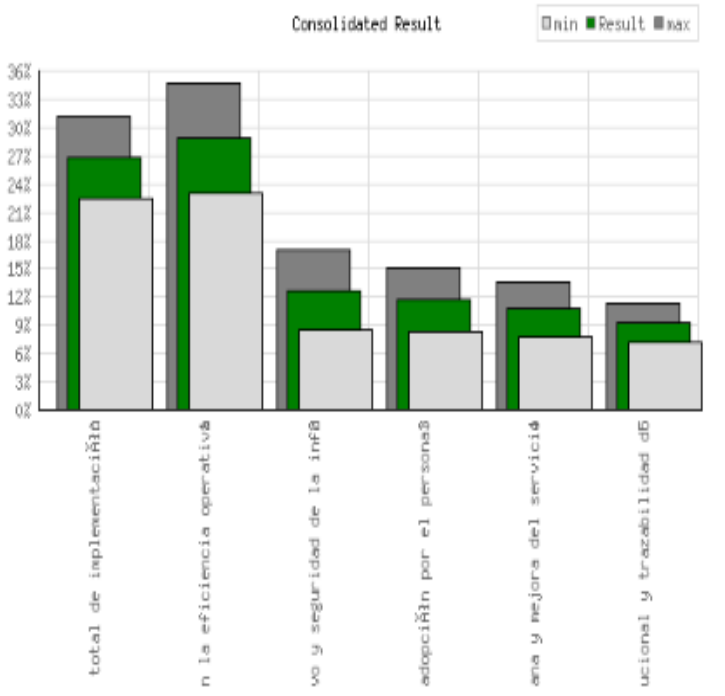
Matriz de decisiones

Los pesos resultantes se basan en el vector propio principal de la matriz de decisión:

	1	2	3	4	5	6
1	1	1.00	2.00	3.00	2.00	3.00
2	1.00	1	3.00	3.00	2.00	3.00
3	0.50	0.33	1	1.00	2.00	1.00
4	0.33	0.33	1.00	1	1.00	2.00
5	0.50	0.50	0.50	1.00	1	1.00
6	0.33	0.33	1.00	0.50	1.00	1

Número de comparaciones = 15
Ratio de consistencia CR = 2.6%

Principal auto valor = 6.162
Solucion autovector: 4 iterations, delta = 2.1E-8



Calculadora de prioridad AHP

Hecho

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Análisis TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

Paso 1: Opciones — Paso completado

opciones

Implementación de un Sistema de Gestión Documental | Adopción de un Sistema de Historia Clínica Electrónica (HCE) | Desarrollo de un sistema propio de gestión documental electrónica. | Digitalización progresiva con archivo híbrido | Implementación de una plataforma en la nube | Integración de herramientas de inteligencia artificial para clasificación y búsqueda automática. | Nuevo valor (pulse Intro para añadir)

Paso 2: Criterios — Paso completado

No.	Nombre	Negativo	Peso	Cualitativo	Comportamiento
1	Costo total de implementación	☑	0.2680	☐	■
2	Impacto en la eficiencia operativa	☐	0.289	☑	■
3	Cumplimiento normativo y seguridad de la información	☐	0.127	☑	■
4	Facilidad de uso y adopción por el personal	☐	0.117	☑	■
5	Participación ciudadana y mejora del servicio al paciente	☐	0.107	☑	■
6	Transparencia institucional y trazabilidad documental	☐	0.093	☑	■

Paso 3: Matriz de decisión — Completar los pasos anteriores

Elección	Costo total de implementación	Impacto en la eficiencia operativa	Cumplimiento normativo y seguridad de la información	Facilidad de uso y adopción por el personal	Participación ciudadana y mejora del servicio.	Transparencia institucional y trazabilidad documental.
Implementación de un Sistema de Gestión Documental	Valor 1					
Adopción de un Sistema de Historia Clínica Electrónica (HCE) comercial integr	Valor 1					
Desarrollo de un sistema propio de gestión documental electrónica.	Valor 1					
Digitalización progresiva con archivo híbrido (físico-electrónico)	Valor 1					
Implementación de una plataforma en la nube (Cloud Document Management)	Valor 1					
Integración de herramientas de inteligencia artificial para clasificación y búsqueda automática.	Valor 1					

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Resultado

1. **Digitalización progresiva con archivo híbrido (físico-electrónico)** con puntuación 0,93
2. **Desarrollo de un sistema propio de gestión documental electrónica** con puntuación 0,51
3. **Implementación de una plataforma en la nube (Cloud Document Management)** con puntuación 0,50
4. **Integración de herramientas de inteligencia artificial para clasificación y búsqueda automática** con puntuación 0,50
5. **Adopción de un Sistema de Historia Clínica Electrónica (HCE) comercial integr** con puntaje 0.41
6. **Implementación de un Sistema de Gestión Documental** con puntuación 0,21

Mostrar más

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NeutrosophicComputing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Aplicaciones de la Lógica y Conjuntos Neutrosóficos en el Diagnóstico Médico.

Applications of Logic and Neutrosophic Sets in Medical Diagnosis.

[1]Dra. Sara Meneses Álvarez.

[1]Pontificia Universidad Catolica de Ecuador, sede Ambato, smenesesalvarez@yahoo.com, https://orcid.org/0009-0008-0563-1406

Resumen

En los últimos años con el desarrollo de las nuevas tecnologías el diagnóstico médico ha experimentado una considerable evolución, permitiendo que los mismos sean cada vez más certeros. En este escenario la lógica y los conjuntos neurotróficos se han convertido en herramientas útiles para poder realizar diagnósticos con un mayor nivel de exactitud y precisión. En este artículo de revisión nos trazamos como objetivo analizar los diferentes enfoques que desde el diagnóstico médico utilizan estas herramientas para brindar un servicio con una mayor calidad y, además, poder apreciar el impacto que trae consigo la detención temprana de enfermedades, así como su incidencia en la mejora en los sistemas de salud. La lógica difusa y los conjuntos neurotróficos se presentan con avances significativos en el campo del diagnóstico médico, permitiendo tener mayor precisión y por ende facilitar un tratamiento más efectivo.

Palabras clave: Lógica, Conjuntos Neurotróficos, Diagnóstico Médico

Abstract

In recent years, with the development of new technologies, medical diagnosis has undergone considerable evolution, allowing for increasingly accurate diagnoses. In this context, logic and neurotrophic sets have become useful tools for making diagnoses with a higher level of accuracy and precision. This review article aims to analyze the different approaches that medical diagnosis uses to provide higher quality service and to appreciate the impact of early disease detection, as well as its influence on improving healthcare systems. Fuzzy logic and neurotrophic sets represent significant advances in the field of medical diagnosis, allowing for greater precision and thus facilitating more effective treatment.

Keywords: Logic, Neurotrophic Sets, Medical Diagnosis

1. Introducción

El diagnóstico médico es un proceso muy complejo, por la cantidad de variables a tener en cuenta para poder arribar a esa identificación temprana de posibles enfermedades que generalmente se realiza desde los signos, síntomas y pruebas clínicas que se orientan a los pacientes.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

En la actualidad con el desarrollo de las nuevas tecnologías, el uso de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático hace que se puedan integrar los protocolos más avanzados, como es el caso de la lógica difusa y los conjuntos neurotróficos, contribuyendo a un diagnóstico más certero, permitiendo entonces una adecuada intervención.

La toma de decisiones en contextos clínicos frecuentemente se enfrenta a información incompleta, imprecisa o contradictoria, lo que limita la eficacia de los métodos convencionales de diagnóstico basados en lógica clásica o estadística tradicional. En este escenario, los enfoques basados en Neutrosofía a través de estructuras como los Conjuntos Neutrosóficos y la Lógica Neutrosófica, ofrecen un marco teórico-matemático robusto capaz de modelar no sólo grados de verdad y falsedad, sino también la indeterminación inherente al conocimiento clínico [1, 2]. Esta capacidad de representar simultáneamente verdad, falsedad e incertidumbre permite capturar la ambigüedad de síntomas clínicos, datos ausentes o resultados contradictorios, lo que sugiere un gran potencial para su uso en diagnóstico médico.

En años recientes, se ha observado un crecimiento en estudios que aplican lógica neutrosófica al ámbito sanitario: desde sistemas de recomendación de diagnóstico personalizados basados en conjuntos neutrosóficos y clustering espectral [3], hasta revisiones sistemáticas que documentan su uso en una amplia gama de problemas de diagnóstico y tratamiento médico [2]. Estos trabajos evidencian que la neutrosofía no es sólo una generalización teórica de las lógicas difusas o intuicionistas, sino una alternativa práctica para abordar la incertidumbre clínica, mejorar la precisión diagnóstica y ofrecer soporte en la toma de decisiones médicas.

Por tanto, este artículo tiene como objetivo revisar exhaustivamente la literatura existente sobre aplicaciones de lógica y conjuntos neutrosóficos en el diagnóstico médico, analizar críticamente sus resultados, identificar los dominios clínicos en los que se han aplicado, evaluar sus ventajas y limitaciones, y proponer líneas futuras de investigación. Con ello se busca aportar una visión sistemática y actualizada del estado del arte, en un campo interdisciplinario que combina teoría matemática, informática médica e investigación clínica.

2. Materiales Y Métodos

La revisión se desarrolló mediante una búsqueda estructurada en bases de datos científicas de salud y tecnología, como PubMed, Scopus, Web of Science y IEEE Xplore, con el objetivo de identificar estudios que aplicaran lógica neutrosófica o conjuntos neutrosóficos en procesos diagnósticos. Las estrategias de búsqueda combinaron términos en inglés y español relacionados con la neutrosofía, la lógica difusa y el diagnóstico clínico.

Tras recopilar los registros, se eliminaron duplicados y dos revisores evaluaron de forma independiente títulos, resúmenes y posteriormente los textos completos. Solo se incluyeron investigaciones que mostraran una aplicación concreta de estos enfoques en tareas diagnósticas, análisis de imágenes o sistemas de apoyo a decisiones clínicas. La información de los estudios seleccionados se extrajo mediante una plantilla que recogía la metodología empleada, el área médica, los resultados obtenidos y el tipo de modelo utilizado.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Finalmente, los hallazgos se integraron en una síntesis narrativa que permitió comparar distintas aproximaciones, identificar patrones de uso y señalar las limitaciones y oportunidades que presenta la aplicación de la neutrosofía en el ámbito del diagnóstico médico.

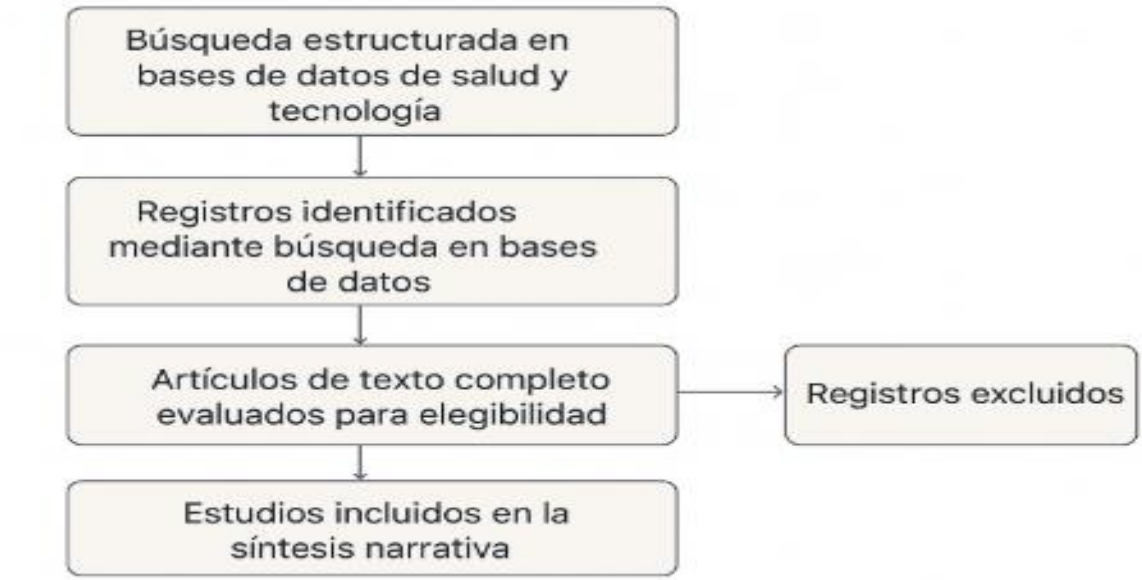


Gráfico 1. Estrategia para la búsqueda y tratamiento de la información

3. Desarrollo

3.1. Aplicaciones De La Lógica En El Diagnóstico

El razonamiento clínico se apoya, de forma explícita o implícita, en principios lógicos que permiten interpretar síntomas, correlacionar hallazgos y formular hipótesis diagnósticas. Aunque estos fundamentos han guiado la práctica médica desde sus orígenes, el avance de la ciencia ha demostrado que los sistemas de lógica tradicionales no siempre capturan la complejidad del proceso diagnóstico. El médico rara vez trabaja con información completa: los pacientes presentan síntomas ambiguos, resultados que pueden leerse de diversas maneras y contextos biológicos que varían de un individuo a otro. En un escenario tan heterogéneo, la lógica clásica resulta insuficiente para describir matices, rangos intermedios o situaciones donde el estado clínico no es claramente normal ni patológico. Esto ha generado el desarrollo de enfoques lógicos capaces de representar incertidumbre, gradientes y ambivalencia, características inherentes a los fenómenos biológicos [3].

El interés por extender la lógica al ámbito médico ha crecido paralelamente al desarrollo de la informática en salud y la inteligencia artificial. Hoy, diferentes variantes —lógica difusa, probabilística, modal y neutrosófica— forman parte del repertorio de técnicas usadas para interpretar datos clínicos complejos. Estos enfoques ofrecen mecanismos matemáticos que permiten formalizar la manera en que se combinan síntomas, se estiman riesgos o se proyectan escenarios clínicos posibles. Su presencia es notable en

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sistemas de decisión automática, modelos predictivos, análisis de imágenes y herramientas diseñadas para apoyar la evaluación del estado del paciente [4].

Entre estos modelos, la lógica difusa constituye uno de los pilares. Al permitir grados de pertenencia entre 0 y 1, ofrece una representación continua que se ajusta al comportamiento real de muchos parámetros fisiológicos. Variables como la tensión arterial, la glicemia o los marcadores inflamatorios rara vez se distribuyen de forma estricta entre lo normal y lo "anormal". Por ello, los sistemas construidos sobre lógica difusa han mostrado utilidad en la valoración de riesgo cardiovascular, la puntuación de severidad en cuidados críticos, la predicción de descompensaciones y la categorización de estados crónicos. Uno de sus principales aportes es evitar la pérdida de información que ocurre al forzar variables continuas en categorías binarias, lo cual resulta especialmente beneficioso para situaciones donde pequeñas variaciones modifican la interpretación clínica [5].

Los métodos probabilísticos, por su parte, dominan muchos modelos de predicción diagnóstica y pronóstica. Basados en principios bayesianos, permiten estimar la probabilidad de una condición a partir de datos previos. Sin embargo, requieren conjuntos de información amplios y estables, necesidad que no siempre se cumple en la práctica clínica. Cuando los datos son escasos o contradictorios, la probabilidad deja de ser una herramienta precisa. Este vacío ha impulsado la incorporación de lógicas no clásicas que manejan incertidumbre epistémica sin depender necesariamente de distribuciones de probabilidad. La lógica modal, por ejemplo, ofrece mecanismos para evaluar escenarios posibles, estados potenciales y riesgos futuros, lo cual ha sido útil en sistemas de alerta temprana que buscan anticipar complicaciones.

En este panorama, la lógica neutrosófica representa una de las contribuciones más innovadoras. A diferencia de la lógica difusa o intuicionista, incorpora explícitamente un espacio para la indeterminación. En vez de limitarse a medir cuán verdadero o falso es un enunciado, permite representar, de manera independiente, la porción de información que no puede asignarse a ninguno de esos polos. Esta estructura es particularmente adecuada para describir situaciones clínicas en las que conviven datos coherentes e incoherentes, o cuando la evidencia disponible es insuficiente para apoyar una conclusión definitiva. Dentro de la interpretación de imágenes médicas, por ejemplo, existen patrones que pueden ser simultáneamente compatibles y no compatibles con una patología dependiendo de factores como el contexto clínico o la calidad de la imagen. La flexibilidad del modelo neutrosófico ha favorecido su uso en clasificación automatizada de lesiones, detección de tumores, procesamiento de señales cardiológicas y análisis computacional de patologías respiratorias [6].

El uso práctico de estas lógicas se potencia cuando se integran en sistemas computacionales. Los algoritmos basados en reglas ya sean difusas, probabilísticas o neutrosóficas, alimentan sistemas expertos capaces de reproducir esquemas de razonamiento clínico. Estas herramientas permiten explorar diferentes rutas diagnósticas, estimar la probabilidad de escenarios alternativos, proyectar la evolución del paciente y fundamentar recomendaciones terapéuticas. En combinación con redes neuronales, la lógica difusa ha dado lugar a arquitecturas híbridas que reconocen patrones clínicos en grandes bases de datos, ofreciendo predicciones más precisas en poblaciones heterogéneas. De manera semejante, la integración de neutrosofía con técnicas de clustering ha permitido detectar estructuras ocultas en registros médicos

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

masivos, lo cual resulta crucial para la medicina personalizada y la identificación temprana de grupos de riesgo.

Las contribuciones de la lógica al diagnóstico asistido por computadora también se observan en el procesamiento avanzado de imágenes. Las técnicas basadas en lógica difusa representan de forma más fiel los bordes imprecisos entre tejidos, mejorando la segmentación de estructuras anatómicas. Los modelos neutrosóficos, por su parte, permiten filtrar ruido sin deteriorar detalles relevantes, detectar irregularidades y clasificar lesiones con una precisión superior a métodos tradicionales. Esta mayor fidelidad en la representación de datos contribuye a reducir la variabilidad entre observadores y a aumentar la consistencia diagnóstica.

En lo referente al razonamiento clínico, la lógica sirve como base para la creación de ontologías y repositorios de conocimiento médico estructurado. Estos sistemas permiten modelar relaciones causales, dependencias fisiopatológicas y protocolos terapéuticos mediante reglas explícitas. Una de sus principales fortalezas frente a otras herramientas de inteligencia artificial es la transparencia: las conclusiones derivan de reglas comprensibles que pueden ser revisadas, explicadas y sometidas a auditoría clínica. En un contexto donde la seguridad del paciente es prioritaria, esta característica se vuelve esencial para garantizar la confianza del personal de salud en los sistemas automatizados, [7].

A pesar de los avances, todavía existen desafíos. La formalización lógica del conocimiento médico requiere abstraer procesos biológicos complejos en reglas que, en ocasiones, no reflejan completamente la variabilidad individual. La implementación en entornos clínicos reales demanda interoperabilidad con sistemas de historia clínica electrónica, actualización constante de las bases de conocimiento y validación rigurosa mediante estudios clínicos. Asimismo, se requiere diseñar interfaces intuitivas que permitan a profesionales sin formación matemática utilizar estas herramientas de manera efectiva.

En conjunto, la aplicación de la lógica en medicina constituye un campo multidisciplinario que continúa expandiéndose. La lógica difusa, la probabilística, la modal y la neutrosófica no sólo enriquecen la comprensión del proceso diagnóstico, sino que ofrecen marcos capaces de manejar la incertidumbre inherente a los sistemas biológicos. Su utilidad no se limita a automatizar decisiones, sino que favorece diagnósticos más precisos, razonamientos más consistentes y una integración más profunda entre el conocimiento médico y los sistemas inteligentes. Con la creciente disponibilidad de datos, el avance de la computación y el interés por la medicina personalizada es previsible que estos enfoques lógicos adquieran un papel cada vez más central en la clínica contemporánea y futura.

3.2. Evolución Y Perspectivas Del Diagnóstico Médico

El diagnóstico constituye el eje alrededor del cual se organiza la práctica médica, pues permite comprender el origen y la dinámica de los procesos patológicos para orientar decisiones terapéuticas, anticipar complicaciones y evaluar la evolución del paciente. Su propósito esencial es reconocer, con un nivel razonable de certidumbre, la condición que explica la presentación clínica de una persona, combinando información proveniente de los síntomas, los hallazgos físicos, las pruebas complementarias y los patrones epidemiológicos que caracterizan cada enfermedad. A lo largo del tiempo, este proceso ha transitado desde enfoques basados principalmente en la experiencia empírica hasta modelos complejos

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

que integran ciencias biomédicas, tecnologías digitales y análisis computacional avanzado. Esta transformación responde al constante crecimiento del conocimiento científico y a la necesidad de ofrecer diagnósticos más rápidos, precisos y ajustados a las particularidades de cada paciente [8].

En su fase inicial, el diagnóstico parte del encuentro clínico tradicional. La entrevista con el paciente, la exploración física y la revisión de su contexto biológico y social permiten elaborar hipótesis preliminares, que luego se someten a verificación mediante estudios complementarios. Aunque hoy en día existen herramientas tecnológicas cada vez más sofisticadas, la historia clínica sigue siendo imprescindible: aporta detalles sobre la evolución del cuadro, las percepciones del paciente, sus hábitos y los factores que pueden influir en su estado de salud. De igual forma, el examen físico continúa siendo una fuente insustituible de evidencia directa, especialmente en entornos con recursos limitados o cuando se requiere actuar con rapidez [8].

A esta etapa de valoración inicial se suman métodos auxiliares que han cambiado radicalmente la precisión diagnóstica. Las pruebas de laboratorio han alcanzado niveles de sensibilidad y especificidad sin precedentes gracias a plataformas automatizadas, técnicas de espectrometría, inmunoanálisis y métodos derivados de la biología molecular. Estas herramientas permiten identificar alteraciones mínimas, detectar enfermedades en fases tempranas y estimar riesgos antes de que se manifieste cualquier signo clínico. Paralelamente, los avances en imagenología radiografías digitales, tomografía computarizada, resonancia magnética, ecografía avanzada y modalidades híbridas como PET-CT, han ampliado la capacidad para visualizar estructuras y procesos internos con detalle cada vez mayor. La combinación de imágenes anatómicas y funcionales ha permitido comprender tanto la morfología como la actividad metabólica de los tejidos, lo cual es crucial para el diagnóstico y seguimiento de múltiples patologías [2].

En los últimos años, la medicina de precisión ha consolidado un cambio de paradigma. Este enfoque reconoce que las enfermedades no se expresan de igual manera en todas las personas y que la genética, el ambiente, el estilo de vida y el microbiota influyen en su manifestación. Así, la secuenciación genómica, el análisis epigenético y las tecnologías óhmicas han abierto la posibilidad de diagnosticar enfermedades hereditarias, caracterizar tumores y clasificar perfiles de riesgo con un nivel de detalle sin precedentes. Estas herramientas no reemplazan al razonamiento clínico ni a los métodos tradicionales, sino que los complementan para brindar una visión más integradora del estado de salud [9], [10].

Sin embargo, el crecimiento exponencial de los datos biomédicos ha generado un nuevo desafío: la necesidad de analizarlos e interpretarlos con eficiencia. Aquí entra en escena la inteligencia artificial (IA), cuyos modelos permiten identificar patrones complejos, realizar predicciones y apoyar la toma de decisiones clínicas. En campos como la radiología, la dermatología o la patología digital, los algoritmos de aprendizaje profundo han demostrado una notable capacidad para procesar grandes volúmenes de información en tiempos reducidos, disminuyendo la variabilidad entre observadores y ofreciendo una segunda opinión sistemática. Aunque estos sistemas poseen un enorme potencial, su implementación debe ir acompañada de una validación rigurosa, datos de calidad y mecanismos que aseguren transparencia, ética y equidad en su uso [11].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El desarrollo del diagnóstico moderno también ha revelado dilemas importantes. El incremento en la disponibilidad de pruebas puede conducir a la realización de estudios innecesarios, con los consiguientes costes y riesgos derivados de falsos positivos, procedimientos invasivos o exposición a radiación. Además, la digitalización masiva de los datos sanitarios exige proteger la privacidad del paciente, evitar sesgos algorítmicos y mantener la autonomía del juicio clínico. La introducción de nuevas tecnologías requiere, además, una actualización continua de las competencias profesionales.

A pesar de estos retos, el campo del diagnóstico se orienta hacia modelos más interconectados, predictivos y participativos. El uso de dispositivos portátiles, sensores fisiológicos, telemedicina y plataformas de monitoreo continuo permite detectar variaciones del estado de salud en tiempo real, lo cual es especialmente útil para el manejo de enfermedades crónicas y la vigilancia de poblaciones vulnerables. Estas herramientas expanden el diagnóstico más allá del consultorio y lo integran en la vida cotidiana del paciente.

Mirando hacia el futuro, el diagnóstico tenderá a consolidarse como un proceso dinámico, profundamente apoyado en datos y orientado a la personalización. La articulación entre información clínica, genética, ambiental y conductual permitirá construir descripciones más precisas de cada problema de salud, optimizando la toma de decisiones y la eficacia terapéutica. No obstante, la tecnología solo será verdaderamente útil si se integra de forma armónica con la experiencia clínica y la relación médico-paciente. La clave estará en utilizarla como un recurso que amplifique, y no sustituya, la capacidad del profesional para comprender la singularidad de cada persona [10].

En suma, el diagnóstico médico continúa evolucionando junto con el desarrollo científico y tecnológico, y su futuro dependerá de la capacidad de los sistemas de salud para equilibrar innovación, ética, accesibilidad y calidad. Su transformación permanente lo mantiene como un componente esencial del cuidado y como un factor decisivo para los desafíos sanitarios del siglo XXI.

3.3. Conjuntos Neutrosóficos: Bases Conceptuales, Desarrollo Y Usos Contemporáneos

El estudio matemático de la incertidumbre ha evolucionado de manera notable durante las últimas décadas, impulsado por la necesidad de representar fenómenos complejos que no pueden describirse mediante categorías estrictas o relaciones totalmente definidas. En los sistemas reales, desde los procesos naturales hasta los entornos socio-técnicos la información suele llegar fragmentada, con niveles variables de confiabilidad y, con frecuencia, acompañada de datos contradictorios. Esta realidad llevó al surgimiento de los conjuntos neutrosóficos, una propuesta que amplía el espectro de representación en comparación con las lógicas convencionales, incluyendo la difusa, al admitir explícitamente la presencia simultánea de certeza, indecisión y falsedad en una misma entidad o proposición [12].

A diferencia de los enfoques que buscan resolver o reducir la ambigüedad desde el inicio, la neutrosofía parte de la premisa de que la indeterminación es una propiedad inherente a múltiples sistemas. Su estructura conceptual se organiza alrededor de tres componentes independientes: un grado de verdad, uno de indeterminación y uno de falsedad. Esta triple valoración permite describir un fenómeno sin forzar conclusiones prematuras. De este modo, un elemento puede estar asociado simultáneamente a niveles

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

parciales de validez, duda y negación, lo que abre la posibilidad de interpretar escenarios donde la información proviene de fuentes que discrepan, se contradicen o simplemente son insuficientes.

El cuerpo teórico de los conjuntos neutrosóficos ha ido diversificándose con el tiempo. Existen variantes diseñadas para ajustarse a distintos niveles de precisión o a necesidades computacionales específicas. Los modelos simples constituyen la estructura básica, mientras que los intervalares permiten expresar rangos para cada uno de los parámetros, una característica valiosa cuando los datos no pueden precisarse con exactitud. Los conjuntos neutrosóficos de valor único han ganado relevancia por su adaptabilidad a algoritmos prácticos, lo que ha facilitado su incorporación en herramientas computacionales y sistemas de análisis. Esta evolución ha permitido que la neutrosofía no se limite a su marco teórico inicial, sino que encuentre aplicaciones concretas en campos que enfrentan altos grados de incertidumbre [12].

Uno de los ámbitos donde estas estructuras han tenido mayor impacto es el del análisis de datos. En entornos donde los registros contienen inconsistencias, huecos informativos o provienen de múltiples fuentes, los modelos tradicionales suelen requerir depuración o simplificación que puede invisibilizar patrones relevantes. Los conjuntos neutrosóficos, en cambio, permiten conservar la complejidad del dato, incorporando la duda como una variable analítica más. Esto ha demostrado ser relevante en estudios económicos, modelos de evaluación social, análisis de impacto ambiental y procesos de gestión de riesgos, donde las decisiones se basan en información inevitablemente incompleta, [13].

En el procesamiento de imágenes y señales, los avances han sido particularmente significativos. Muchas técnicas clásicas dependen de supuestos fuertes respecto a la calidad, la nitidez y la delimitación de bordes. Cuando estos supuestos no se cumplen —como ocurre en imágenes médicas con ruido, contrastes irregulares o regiones poco definidas— los modelos neutrosóficos ofrecen una alternativa robusta. Al permitir que cada píxel o segmento sea valorado en términos de certeza, duda y falsedad, la segmentación se vuelve más estable y la clasificación más ajustada a la variabilidad inherente del material visual. Este enfoque se ha incorporado en tareas como detección de anomalías, reconocimiento de estructuras biológicas, análisis satelital y estudios industriales en tiempo real [12].

Otro campo donde los conjuntos neutrosóficos han adquirido notoriedad es el de las decisiones multicriterio. En estos procesos suelen intervenir múltiples expertos, cada uno con perspectivas, criterios y niveles de confianza distintos. Tradicionalmente, las discrepancias entre evaluadores representan un problema que debe resolverse mediante técnicas de consenso. La neutrosofía plantea una solución distinta: conservar esas discrepancias como parte integral del análisis. Esto permite construir modelos más representativos de la realidad, en los que la diversidad de opiniones no se elimina, sino que se incorpora como información adicional que fortalece la evaluación final. Esta cualidad resulta útil en la gestión de proyectos, planificación estratégica, priorización de alternativas y evaluación de políticas públicas [14].

La expansión conceptual de la neutrosofía ha originado reflexiones más amplias sobre la forma en que las ciencias entienden la incertidumbre. En vez de considerarla un defecto en la medición o una debilidad del sistema, se propone interpretarla como un componente intrínseco de los fenómenos complejos. Bajo esta perspectiva, la contradicción y la duda no se conciben como elementos que deben eliminarse cuanto

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

antes, sino como dimensiones que proporcionan información valiosa para comprender mejor el comportamiento de los sistemas. Este cambio epistemológico ha despertado interés en disciplinas tan diversas como la psicología cognitiva, la teoría de la decisión, la ingeniería de sistemas y la filosofía de la ciencia, [13].

Durante los últimos años, se ha intensificado la investigación orientada a conectar los conjuntos neutrosóficos con técnicas de inteligencia artificial. Los sistemas de aprendizaje automático suelen requerir datos limpios y coherentes, condiciones que no siempre pueden cumplirse en escenarios reales. La capacidad de los modelos neutrosóficos para representar incertidumbres complejas los hace potencialmente útiles como mecanismos de preprocesamiento, como capas de representación interna o incluso como estructuras de decisión dentro de algoritmos supervisados y no supervisados. Se han desarrollado aproximaciones híbridas que integran redes neuronales con criterios neutrosóficos, así como modelos de clasificación que incorporan la indeterminación como una variable central. Aunque estas propuestas aún se encuentran en etapas tempranas, los resultados preliminares sugieren que podrían mejorar la capacidad de los sistemas para adaptarse a datos imperfectos y para generalizar ante escenarios imprevistos.

A pesar de sus avances, la neutrosofía enfrenta desafíos importantes. La falta de estandarización es uno de ellos. La amplitud conceptual que constituye su principal fortaleza también dificulta la comparación sistemática entre estudios. Resulta necesario establecer protocolos de validación y directrices metodológicas que garanticen la coherencia en la implementación de los modelos. Otro reto consiste en el desarrollo de herramientas computacionales accesibles que permitan a investigadores y profesionales integrar estos enfoques sin requerir conocimientos avanzados de matemáticas o programación. Además, aún se necesitan estudios aplicados que aporten evidencia empírica sólida en áreas donde predominan métodos tradicionales consolidados [14].

Los conjuntos neutrosóficos representan una contribución relevante para el manejo de la incertidumbre en sistemas complejos. Su estructura flexible, la posibilidad de incorporar simultáneamente certeza, indecisión y contradicción, y su capacidad para adaptarse a distintos escenarios analíticos los convierten en un recurso teórico y práctico con un potencial considerable. A medida que se consoliden sus bases matemáticas, se amplíen sus aplicaciones y se desarrollen herramientas de uso extendido, es previsible que continúen ganando espacio en la investigación científica, la ingeniería y la toma de decisiones en entornos reales.

4. Conclusiones

El análisis realizado permite reconocer que la incorporación de la lógica neutrosófica y de los conjuntos neutrosóficos en el diagnóstico médico constituye un avance significativo en la búsqueda de herramientas capaces de manejar con mayor precisión la complejidad inherente a los datos clínicos. A diferencia de los enfoques tradicionales, estas técnicas ofrecen una representación más amplia de la incertidumbre, al permitir coexistir, en un mismo marco matemático, grados independientes de certeza, indeterminación y contradicción. Esta propiedad resulta especialmente valiosa en contextos donde las fuentes de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

información son heterogéneas, los registros presentan inconsistencias o las manifestaciones clínicas no siguen patrones lineales.

La literatura revisada muestra que los métodos neutrosóficos han demostrado su utilidad en diversas áreas, entre ellas la segmentación de imágenes médicas, la clasificación diagnóstica, la evaluación de riesgos, la interpretación de señales fisiológicas y la construcción de sistemas de apoyo a la decisión clínica. En la mayoría de los casos, su aporte radica en la capacidad de mejorar la estabilidad de los modelos, reducir errores asociados a la variabilidad de los datos y ofrecer interpretaciones más fieles a las particularidades del paciente. Aunque aún se requiere fortalecer la evidencia comparativa con métodos convencionales, los resultados preliminares señalan que estos enfoques pueden incrementar la precisión diagnóstica y contribuir a procesos más transparentes y reproducibles.

Pese a sus avances, la neutrosofía aplicada a la medicina enfrenta retos importantes. La falta de estandarización metodológica, la necesidad de herramientas computacionales más accesibles y la carencia de estudios clínicos amplios que validen su aplicabilidad real siguen siendo obstáculos para su adopción masiva. Asimismo, integrar estos modelos en entornos clínicos exige un trabajo coordinado entre profesionales de la salud, matemáticos, ingenieros y especialistas en informática médica. El éxito de su implementación dependerá, en gran medida, de la capacidad de traducir sus fundamentos teóricos en soluciones prácticas que se integren de manera intuitiva en los flujos de trabajo clínicos.

En conjunto, los hallazgos de esta revisión indican que la lógica y los conjuntos neutrosóficos representan una vía prometedora para enriquecer los procesos diagnósticos, especialmente en áreas donde la indeterminación y la complejidad de la información desafían los modelos tradicionales. Su evolución futura dependerá del desarrollo de metodologías más robustas, de la validación empírica en escenarios reales y de su integración con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la medicina personalizada y los sistemas de análisis masivo de datos. Si estas condiciones se cumplen, es razonable anticipar que los modelos neutrosóficos se consoliden como una herramienta clave para mejorar la precisión, eficiencia y adaptabilidad del diagnóstico médico en los próximos años.

5. Referencias

[1]. Hemabala K, Srinivasa Kumar B, Smarandache F. Medical Diagnosis via Refined Neutrosophic Fuzzy Logic: Detection of Illness using Neutrosophic Sets. Journal of Advanced Zoology. 2023;44(S1):197.

[2]. Dong M, Meng S, Chen L, Zhang J. Personalized Medical Diagnosis Recommendation Based on Neutrosophic Sets and Spectral Clustering. In: CloudComp 2020 – 10th EAI International Conference on Cloud Computing, Qufu, China, December 11–12, 2020. 2021.

[3]. Zhang C, Li D, Broumi S, Sangaiah AK. Medical Diagnosis Based on Single-Valued Neutrosophic Probabilistic Rough Multisets over Two Universes. Symmetry. 2018;10(6):213.

[4]. Essa AK, Sabbagh R, Salama AA, Khalid HE, Aziz AA, Mohammed A. An Overview of Neutrosophic Theory in Medicine and Healthcare. Neutrosophic Sets and Systems. 2023;61:196–209.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[5]. Jafar MN. Medical Diagnosis Using Neutrosophic Soft Matrices and Their Complements. International Journal of Advanced Research in Computer Science. 2020;11(1)

[6]. Sherwani RA, Awan WB, Faheem M, Janjua AA, Albassam M, Aslam M. An application of neutrosophic statistics: Extending relative risk and odds ratios to handle uncertainty in epidemiology and biostatistics. JP Journal of Biostatistics. 2023.

[7]. Smarandache F. Neutrosophic Set is a Generalization of Intuitionistic Fuzzy Set, Inconsistent Intuitionistic Fuzzy Set, Pythagorean Fuzzy Set, q-Rung Orthopair Fuzzy Set, Spherical Fuzzy Set, etc. (preprint). arXiv. 2019 Nov 17.

[8]. Smarandache F. A Geometric Interpretation of the Neutrosophic Set — A Generalization of the Intuitionistic Fuzzy Set. (preprint). arXiv. 2004 Apr 29.

[9]. Kahraman C, Otay İ, editors. Fuzzy Multi-criteria Decision-Making Using Neutrosophic Sets. Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 369. Springer; 2019.

[10]. Smarandache F, Khan Z, editors. Neutrosophic Paradigms: Advancements in Decision Making and Statistical Analysis. Springer Cham; 2025.

[11]. Smarandache F. Neutrosophic Computing and Machine Learning. Vol. 37. University of New Mexico; 2025.

[12]. Smarandache F, Leyva-Vázquez M, Estupiñán Ricardo J, editors. Neutrosophic Computing and Machine Learning. Vol. 38 (special issue: neutrosophic theory applied to bioethical dilemmas). University of New Mexico; 2025.

[13]. Beraún-Espíritu MM, Moscoso-Paucarchuco KM, Espinoza-Quispe LE, Moreno-Menéndez FM, Sandoval-Trigos JC, Julca-Marcelo EH, et al. Automation and Optimization of Industrial Scale Essential Oil Extraction from Citrus Peel Using a Neutrosophic Control System Model. Neutrosophic Sets and Systems. 2024;62(1).

[14]. Smarandache F. Plithogeny, Plithogenic Set, Logic, Probability, and Statistics. (preprint). arXiv. 2018 Aug 12.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML NeutrosophicComputing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Plitogenia y Filosofías Indígenas Latinoamericanas: Una Exploración Comparativa.

Plitogenic and Latin American Indigenous Philosophies: A Comparative Exploration.

Florentin Smarandache[1,*] **Maykel Yelandy Leyva Vázquez**[2]

[1] Departamento de Matemáticas y Ciencias, Universidad de Nuevo México, Gallup, NM 87301, EE.UU.*smarand@unm.edu*

[2]Universidad de Guayaquil, Ecuador, maikel.leyvav@ug.edu.ec

"Quipnayra uñtasis sarnaqapxañani"

"Caminar hacia el futuro con el pasado por delante"

— Proverbio Aymara

Resumen: *La Plitogenia, extensión filosófico-matemática de la Neutrosofía, modela la génesis de nuevas entidades a partir de la fusión orgánica de antecedentes contradictorios, neutrales y no contradictorios. Este artículo explora cómo los mecanismos fundamentales de la plitogenia—atributos multivaluados, grados de pertenencia y contradicción cuantificada—resuenan con un conjunto de conceptos indígenas latinoamericanos: Yanantin (opuestos complementarios), Ch'ixi (coexistencia heterogénea), Pachakuti (transformación radical), Ayni (intercambio recíproco), Sumak Kawsay/Buen Vivir (bienestar holístico), Teotl (energía sagrada monista). Al mapear cada noción indígena sobre conjuntos plitogénicos e ilustrar el papel del grado de contradicción, el artículo demuestra que la plitogenia proporciona un formalismo riguroso pero culturalmente respetuoso para capturar la multiplicidad, tensión y emergencia inherentes a estas cosmovisiones. La síntesis subraya el potencial de la plitogenia como puente entre las epistemologías indígenas y la teoría lógico-matemática contemporánea, abriendo vías para la investigación interdisciplinaria, herramientas de apoyo a la decisión y analíticas decoloniales.*

Palabras clave: Plitogenia , Neutrosofía , Yanantin , Ch'ixi , Pachakuti , Ayni , Sumak Kawsay , Buen Vivir , Teotl , Analéctica , Filosofía de la Liberación , Lógica multivaluada , Grado de contradicción , Epistemologías indígenas , Filosofía latinoamericana , Toma de decisiones multicriterio , Sistemas emergentes , Analíticas decoloniales.

Abstract: Plitogenic, a philosophical-mathematical extension of Neutrosophic, models the genesis of new entities from the organic fusion of contradictory, neutral, and non-contradictory antecedents. This article explores how the fundamental mechanisms of plitogeny—multivalued attributes, degrees of membership, and quantified contradiction—resonate with a set of Latin American Indigenous concepts: Yanantin (complementary opposites), Ch'ixi (heterogeneous coexistence), Pachakuti (radical transformation), Ayni (reciprocal exchange), Sumak Kawsay/Buen Vivir (holistic well-being), and Teotl (monistic sacred energy). By mapping each Indigenous notion onto plitogenic sets and illustrating the role of the degree of contradiction, the article demonstrates that plitogeny provides a rigorous yet culturally respectful formalism for capturing the multiplicity, tension, and emergence inherent in these worldviews. This synthesis underscores the potential of plitogeny as a bridge between Indigenous epistemologies and contemporary logico-mathematical theory, opening avenues for interdisciplinary research, decision-support tools, and decolonial analytics.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Keywords: Plitogenic , Neutrosophic, Yanantin , Ch'ixi , Pachakuti , Ayni , Sumak Kawsay , Buen Vivir , Teotl , Analectics , Philosophy of Liberation , Multivalued Logic , Degree of Contradiction , Indigenous Epistemologies , Latin American Philosophy , Multicriteria Decision Making , Emergent Systems , Decolonial Analytics

1. Introducción

La Plitogenia expande la Neutrosofía hacia un marco filosófico-matemático más amplio. Mientras que la Neutrosofía trabaja con tres componentes—verdad (*T*), indeterminación (*I*) y falsedad (*F*)—la plitogenia trata conjuntos de entidades que poseen múltiples atributos, cada uno con muchos valores posibles, y un grado cuantificable de contradicción entre esos valores [1]. En este sentido, la plitogenia es un lenguaje formal para la multiplicidad, la contradicción y la emergencia.

Muchas cosmovisiones indígenas latinoamericanas ya encarnan estas mismas ideas: celebran los opuestos complementarios, la coexistencia heterogénea, la transformación cíclica, la reciprocidad y el equilibrio holístico. Al mapear los principios fundamentales de cada concepto indígena sobre estructuras plitogénicas, podemos tanto iluminar la riqueza de esas tradiciones como demostrar cómo la plitogenia puede servir como puente entre las epistemologías indígenas y la teoría lógico-matemática contemporánea.

2. Fundamentos de la Plitogenia [1-9]

1. **Génesis de Nuevas Entidades** – La Plitogenia describe la *fusión orgánica* de entidades antiguas (contradictorias, neutrales o no contradictorias) en formaciones novedosas.
2. **Conjuntos Plitogénicos** – Un elemento se caracteriza por una colección de atributos A_1, A_2, ..., A_n. Cada atributo puede asumir muchos valores $\{v_{i1}, v_{i2}, ...\}$ con un *grado de pertenencia* $\mu(v_{ij}) \in [0,1]$.
3. **Grado de Contradicción** – Para cualquier par de valores v_{ik}, v_{il}, el *grado de contradicción* $c(v_{ik}, v_{il})$ mide su disimilitud (frecuentemente mediante una distancia normalizada). Esto captura la "tensión" que muchos conceptos indígenas articulan explícitamente.

La Plitogenia proporciona así un andamiaje cuantitativo para fenómenos tradicionalmente expresados en términos narrativos, rituales o simbólicos.

3. Dualidades Complementarias – *Yanantin* [10-12]

***Yanantin* (Quechua)** denota *opuestos complementarios*: masculino/femenino, día/noche, vida/muerte. Los dos polos son inseparables; cada uno adquiere significado solo a través del otro.

Elemento Plitogénico	Mapeo al Yanantin
Atributo A = "Polaridad Ontológica"	Valores: v_1 = Masculino; v_2 = Femenino
Grados $\mu(v_1)$, $\mu(v_2)$	Representan la prominencia relativa de cada polo en un contexto dado (por ejemplo, un ritual puede enfatizar lo femenino mientras retiene una presencia masculina).
Grado de contradicción $c(v_1, v_2)$	Cuantifica la tensión dinámica que el Yanantin celebra; un c alto señala una complementariedad vibrante, no un conflicto a resolver.

Así, *Yanantin* puede modelarse como un **conjunto plitogénico de dos valores** donde el *grado de contradicción* se mantiene deliberadamente alto para preservar la naturaleza complementaria del par.

4. Coexistencia Heterogénea – *Ch'ixi* [13-15]

Ch'ixi (Aymara), popularizado por Silvia Rivera Cusicanqui, describe la coexistencia *jaspeada* de las culturas indígena y occidental—ni completamente asimiladas, pero inseparablemente entrelazadas.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Figura 1: La metáfora visual de ch'ixi. Los colores distintos coexisten en un patrón tenso y moteado, creando un todo nuevo sin perder sus identidades individuales, muy similar a la yuxtaposición irresuelta de mundos culturales en los Andes.

Componente Plitogénico	Interpretación para Ch'ixi
Atributo A = "Identidad Cultural"	Valores: v_{ind}d (Indígena), $v_o$cc (Occidental)
$\mu(v_{ind}d)$, $\mu(v_o cc)$	Membresías simultáneas altas reflejan el estado "gris".
Grado de contradicción $c(v_{ind}d, v_o cc) \approx 1$	Captura la tensión irresuelta que define al Ch'ixi. El modelo NO fuerza la síntesis; en su lugar, registra la heterogeneidad persistente.

Matemáticamente, *Ch'ixi* se convierte en un par plitogénico de alta contradicción, una herramienta útil para analizar identidades híbridas, impactos de políticas o currículos educativos donde las influencias duales permanecen distintas.

Ch'ixi es posiblemente el concepto con la correspondencia más directa y poderosa con la Plitogenia. Puede modelarse como un conjunto plitogénico donde los valores de atributo son "Mundo Indígena" (v_i) y "Mundo Occidental" (v_w).

- **Grado de Membresía:** Un individuo o práctica cultural puede tener altos grados de membresía en ambos mundos simultáneamente. Por ejemplo, un joven Aymara podría estar profundamente involucrado en rituales ancestrales (d(joven, v_i) = 0.8) mientras también es un maestro de la tecnología digital (d(joven, v_w) = 0.9).
- **Grado de Contradicción:** La clave para modelar Ch'ixi es un **alto grado de contradicción**, $c(v_i, v_w)$. Este valor alto de c (por ejemplo, 0.7 u 0.8) representa formalmente la tensión irresuelta y el antagonismo que describe Rivera Cusicanqui. Significa que los dos mundos no se reconcilian fácilmente y existen en un estado de conflicto permanente.

*Proponemos el **Operador de Conjunción Ch'ixi** (χ-AND), una adaptación del marco plitogénico que modela la contradicción como un factor de supresión existencial:*

$$\boldsymbol{\chi(P) = min(\mu_i, \mu_w) \cdot (1 - c)} \qquad (1)$$

*A diferencia del AND plitogénico estándar de Smarandache—que interpola hacia la disyunción cuando c aumenta—el χ-AND captura la intuición de Rivera Cusicanqui: en una identidad ch'ixi, la alta contradicción no permite 'elegir un lado' ni 'fusionar ambos', sino que **suprime la posibilidad de expresión armónica simultánea**. El índice resultante cuantifica el 'costo de la no-síntesis'.*

La fórmula de agregación plitogénica proporciona nuevamente la herramienta analítica. La expresión simultánea de ambos mundos es explícitamente suprimida por el alto grado de contradicción. Esto permite a un investigador cuantificar la "Ch'ixidad" de un fenómeno, proporcionando una medida formal de su estado moteado y contradictorio. La plitogenia ofrece así una manera de captar matemáticamente una realidad social que se define por su rechazo a sintetizar.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Para pasar de la alineación conceptual a la aplicación práctica, podemos formalizar las conexiones usando operadores plitogénicos. Consideremos un ejemplo simplificado pero ilustrativo que modela la identidad cultural de un individuo en una sociedad *ch'ixi*.

1. Definir el Conjunto de Atributos: Sea el conjunto de atributos $A = \{v_i, v_w\}$, donde v_i representa la adherencia al "Mundo Indígena/Comunitario" y v_w representa la adherencia al "Mundo Moderno/Global".
2. Medir el Grado de Membresía: A través de encuestas u observación etnográfica, medimos el grado de membresía para una persona p: $d(p, v_i) = 0.8$ (por ejemplo, habla la lengua indígena, participa en rituales); $d(p, v_w) = 0.9$ (por ejemplo, tiene título universitario, activo en redes sociales globales).
3. Definir el Grado de Contradicción: Basándonos en el análisis sociológico, definimos la contradicción entre estos dos mundos. Este es un paso crucial. Supongamos que la contradicción es alta pero no total: $c(v_i, v_w) = 0.7$
4. Aplicar el Operador de Conjunción Plitogénica: Queremos calcular el grado en que esta persona encarna simultáneamente ambos mundos—su "Índice de Ch'ixidad". Usamos el operador AND plitogénico, siendo la t-norma fuzzy ∧F la función mínimo:

$$d(p, v_i \wedge v_w) = min\big(d(p, v_i), d(p, v_w)\big) \cdot \big(1 - c(v_i, v_w)\big)$$

$$d(p, v_i \wedge v_w) = min(0.8, 0.9) \cdot (1 - 0.7)$$

$$d(p, v_i \wedge v_w) = 0.8 \cdot 0.3$$

$$\boldsymbol{d(p, v_i \wedge v_w) = 0.24}$$

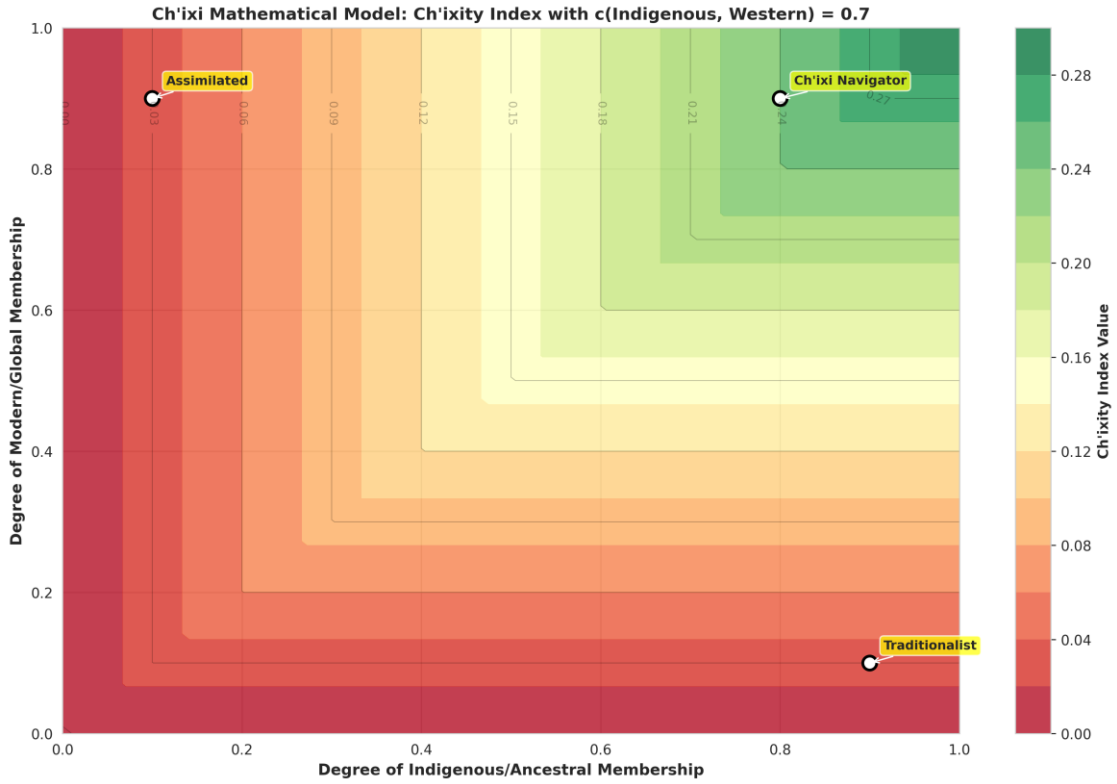


Figura 2: Modelo Matemático Ch'ixi: Ejemplo de Visualización del Índice de Ch'ixidad

Interpretación: El valor resultante, 0.24, es el "Índice de Ch'ixidad". Representa cuantitativamente la identidad moteada de la persona. A pesar de tener alta membresía en ambos mundos, el alto grado de contradicción entre ellos reduce su capacidad de expresar ambos simultáneamente sin conflicto. Esta es una medida mucho más matizada y realista que un simple promedio (0.85) o una clasificación binaria. Captura formalmente la esencia de *ch'ixi*: un estado del ser definido por la gestión de la contradicción interna.

Esta misma metodología puede extenderse para modelar los otros conceptos. Para **Ayni** y **Sumac Kawsay**, usaríamos un conjunto más grande de atributos y aplicaríamos operadores de agregación plitogénica para MCDM para encontrar un equilibrio óptimo. Para **Pachakuti**, modelaríamos un sistema dinámico donde el

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

grado de contradicción mismo puede cambiar con el tiempo, potencialmente llevando a un cambio catastrófico en los valores de atributo dominantes.

5. Giro Revolucionario – *Pachakuti* [16-23]

Pachakuti (Quechua/Aymara) significa un *giro cataclísmico* del mundo—un reordenamiento radical que crea una nueva época.

En la plitogenia, *Pachakuti* corresponde a una transición de fase en un sistema plitogénico:

1. **Estado pre-Pachakuti** – Los valores dominantes v_D mantienen alta pertenencia, mientras que los valores contradictorios v_C son marginales.
2. **Disparador** – Un aumento en $\mu(v_C)$ (frecuentemente impulsado por presión social, estrés ecológico o agitación política).
3. **Transición** – El grado de contradicción $c(v_D, v_C)$ se dispara, desestabilizando el equilibrio anterior.
4. **Estado post-Pachakuti** – El antiguo valor contradictorio se vuelve dominante $\big(\mu(v_C) > \mu(v_D)\big)$, estableciendo una nueva configuración de atributos.

Este formalismo refleja la visión *dialéctica* de la historia mientras preserva el papel explícito de los espacios neutrales/indeterminados que la Neutrosofía y la plitogenia acomodan de manera única.

6. Reciprocidad y Ayuda Mutua – *Ayni* [24-26]

Ayni es el principio del *intercambio recíproco*—"tú das, yo recibo"—que gobierna el trabajo, los regalos y las responsabilidades comunitarias. Un modelo plitogénico de *Ayni* trata cada transacción de intercambio como un elemento con múltiples atributos (tiempo, trabajo, valor material, valor espiritual). La salud general de una red de *Ayni* puede evaluarse agregando los grados de pertenencia de todos los participantes y midiendo el grado de contradicción global.



Figura 3. Estructura lógica de un Quipu. Desde una perspectiva plitogénica, la cuerda principal actúa como la entidad fuente, mientras que cada cuerda colgante representa un atributo multivaluado (A_n), y los nudos cuantifican los valores discretos específicos (v_n) de ese atributo. Esta estructura demuestra un sistema de gestión de datos multidimensional inherente a la memoria comunitaria andina. Fuente: Quipu en el Museo de Machu Picchu, Casa Concha, Cusco. Foto por Pi3.124, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.

Uso práctico: Las herramientas de apoyo a la decisión para proyectos comunitarios pueden emplear la **Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM)** plitogénica para asegurar que cada atributo (económico, ecológico, cultural) reciba un peso equilibrado, respetando la reciprocidad inherente del Ayni.

7. Bienestar Holístico – *Sumak Kawsay / Buen Vivir* [27-30]

Sumak Kawsay (Quechua) o ***Buen Vivir*** (Español) visualiza una *buena vida* enraizada en la armonía comunitaria, el equilibrio ecológico y la integridad cultural.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Figura 4: Una representación visual del Buen Vivir, ilustrando la integración armoniosa de comunidad, naturaleza y espiritualidad. Enfatiza el equilibrio y la interconexión por sobre el crecimiento lineal.

Un **conjunto plitogénico de "Buen Vivir"** podría incluir atributos como:

Atributo	Valores Representativos	Métrica de Ejemplo
Cohesión social	v_1 = lazos de parentesco fuertes, v_2 = fragmentado	Índice de solidaridad basado en encuestas
Custodia ambiental	v_1 = prácticas regenerativas, v_2 = explotación extractiva	Huella de carbono per cápita
Realización espiritual	v_1 = participación ritual, v_2 = desvinculación secular	Frecuencia de ceremonias comunitarias

El "Equilibrio Plitogénico" general de cada comunidad se alcanza cuando la agregación ponderada de pertenencias produce un bajo grado de contradicción global, indicando que los múltiples criterios coexisten sin tensión severa. Este formalismo puede guiar a los formuladores de políticas que buscan operacionalizar métricas de *Buen Vivir* mientras honran su ethos pluralista.

8. Energía Sagrada Universal – *Teotl* [31-33]

Teotl (Náhuatl) es una energía sagrada monista y dinámica que permea todo, conteniendo simultáneamente todas las dualidades. En la plitogenia, ***Teotl*** puede verse como el *conjunto fuente* del cual emergen todas las combinaciones de atributos-valores. El grado de contradicción entre cualesquiera dos valores es en última instancia una manifestación de la diferenciación interna de *Teotl*. Al tratar a *Teotl* como un generador ontológico más que como una entidad estática, la plitogenia se alinea con la naturaleza orientada al proceso de *Teotl*, ofreciendo una metáfora matemática para el flujo perpetuo de lo sagrado.

Componente Plitogénico	Interpretación para Teotl
Atributo A = "Modo Ontológico"	Valores: v_1 = Estático (Ser), v_2 = Dinámico (Devenir), v_3 = Cíclico (Ollin/Eterno Retorno).
Grados $\mu(v_1)$, $\mu(v_2)$, $\mu(v_3)$	Pertenencia Simultánea: Todos los valores mantienen altas membresías simultáneamente. Esto refleja la naturaleza monista de Teotl, donde los opuestos no son enemigos sino manifestaciones coexistentes de la misma energía sagrada.
Grado de Contradicción $c(v_i, v_j)$	Diferenciación Interna: En lugar de conflicto antagónico, c cuantifica la "diferenciación interna" dentro de la unidad. Mide la tensión productiva que

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Componente Plitogénico	Interpretación para Teotl
	impulsa el flujo perpetuo de lo sagrado.
Propiedad de "Conjunto Fuente"	Teotl funciona como la Matriz Generativa (Conjunto Fuente). No es un conjunto estático sino un "generador ontológico" del cual emergen todos los pares específicos de atributo-valor (como Vida/Quetzalcóatl o Muerte/Mictlantecuhtli).
Dinámica del Sistema	Reconfiguración Continua: A diferencia de los conjuntos estáticos clásicos, este modelo soporta la generación continua de valores. Nuevos atributos emergen y se disuelven mientras Teotl se auto-diferencia a través de ciclos cósmicos.

Así, Teotl puede modelarse como un conjunto fuente plitogénico generativo donde el grado de contradicción mide no el conflicto sino la diferenciación sagrada. A diferencia de los dualismos occidentales que buscan resolución, la alineación Teotl-plitogenia celebra el devenir perpetuo (*ollin*) como la naturaleza fundamental de la realidad. Este monismo dinámico ofrece un caso único donde la alta multiplicidad coexiste con baja contradicción percibida—un espejo matemático de la ontología procesual mesoamericana.

9. Analéctica y Filosofía de la Liberación

La Analéctica, propuesta por Enrique Dussel [34-37], extiende la dialéctica hegeliana insertando un *"Otro" exterior* que no puede ser subsumido en la síntesis.

La Plitogenia ya incorpora una cuarta dimensión más allá de la tesis-antítesis: el componente *neutral/indeterminado* (la "Neutrotesis"). Esto se corresponde con la "exterioridad" de Dussel:

Elemento Dialéctico	Contraparte Plitogénica
Tesis	Valor dominante v_T
Antítesis	Valor contradictorio v_A
Neutrotesis	Valor neutral/indeterminado v_N
Neutrosíntesis	Resultado plitogénico integrado (posiblemente un nuevo conjunto emergente)

Así, la *Analéctica* encuentra una expresión formal natural dentro de la plitogenia, proporcionando un sustrato lógico para los discursos decoloniales y de liberación que insisten en preservar el "Otro" irreducible.

10. Síntesis: Por Qué la Plitogenia Importa para el Pensamiento Indígena

1. **Respeto por la Multiplicidad** – Las filosofías indígenas raramente reducen la realidad a oposiciones binarias; la arquitectura multivaluada de la plitogenia refleja esta cosmovisión.
2. **Cuantificación de la Tensión** – El grado de contradicción ofrece una manera precisa de discutir la *tensión productiva* celebrada en *Yanantin*, *Ch'ixi* y *Pachakuti*, sin forzar una falsa reconciliación.
3. **Modelado de la Emergencia** – El enfoque de la plitogenia en la génesis se alinea con conceptos transformadores como *Pachakuti* y *Teotl*, permitiendo a los académicos simular cambios culturales-ecológicos.
4. **Apoyo a la Decisión** – Al integrar *Ayni* y *Buen Vivir* en MCDM plitogénico, las comunidades obtienen herramientas de planificación que honran la reciprocidad y el bienestar holístico.
5. **Puente entre Disciplinas** – El lenguaje compartido de la plitogenia puede facilitar el diálogo entre matemáticos, filósofos, antropólogos y portadores del conocimiento indígena, fomentando la investigación interdisciplinaria que respeta la diversidad epistémica.

11. Reflexiones Finales

La Plitogenia no reemplaza las filosofías indígenas; **traduce** sus lógicas matizadas a un marco formal que puede ser examinado, simulado y aplicado a través de dominios—desde la gobernanza comunitaria hasta la política

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ambiental. Al hacerlo, valida el carácter plural, contradictorio y emergente del pensamiento indígena latinoamericano mientras ofrece un puente hacia las herramientas analíticas contemporáneas.

El trabajo futuro puede involucrar:

- Estudios de caso empíricos usando índices plitogénicos para monitorear redes de reciprocidad ***Ayni***.
- Modelos computacionales de dinámicas de identidad ***Ch'ixi*** en entornos urbanos multiculturales.
- Talleres colaborativos donde ancianos indígenas co-diseñen los esquemas de atributos/valores que alimentan los análisis plitogénicos, asegurando que las matemáticas permanezcan ancladas en cosmologías vividas.

A través de tales asociaciones, la plitogenia puede convertirse en una metodología viva—una que honra el pasado, compromete el presente y anticipa las posibilidades transformadoras del mañana.

Agradecimientos: Reconozco la asistencia del asistente avanzado de IA Gemini en la estructuración, redacción y síntesis de conceptos fundamentales de las notas proporcionadas y documentos externos. También, la asistencia de escritura multilingüe de Lumo y su capacidad para sintetizar material científico complejo resultaron invaluables para dar forma al manuscrito final.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

12. Referencias

[1]. Smarandache, F. (2017). *Plithogeny, Plithogenic Set, Logic, Probability, and Statistics*. Bruselas, Bélgica: Pons.
[2]. Smarandache, F. (2018). Plithogenic Set, an Extension of Crisp, Fuzzy, Intuitionistic Fuzzy, and Neutrosophic Sets - Revisited, *Neutrosophic Sets and Systems*, 21, pp. 153-166.
[3]. Gomathy, S., Nagarajan, D., Broumi, S. y Lathamaheswari, M. (2020). Plithogenic sets and their application in decision making, *Neutrosophic Sets and Systems*, 38, pp. 453-469.
[4]. Martin, N., Smarandache, F. (2020). Plithogenic Cognitive Maps in Decision Making. *International Journal of Neutrosophic Science*, 9(1), 9-21.
[5]. Smarandache, F. (2021). Introduction to Plithogenic Logic as generalization of MultiVariate Logic, *Neutrosophic Sets and Systems*, 45, pp. 1-7.
[6]. Smarandache, F. y Guo, Y. (eds.) (2022). *New Development of Neutrosophic Probability, Neutrosophic Statistics, Neutrosophic Algebraic Structures, and Neutrosophic Plithogenic Optimizations*. Basilea: MDPI.
[7]. Smarandache, F. (2023). Introduction to the Symbolic Plithogenic Algebraic Structures (revisited), *Neutrosophic Sets and Systems*, 53, pp. 653-665.
[8]. Sudha, S., Martin, N. y Smarandache, F. (2023). State of Art of Plithogeny Multi Criteria Decision Making Methods, *Neutrosophic Sets and Systems*, 56, pp. 390-409.
[9]. Smarandache, F. (2023). An Overview of Plithogenic Set and Symbolic Plithogenic Algebraic Structures, *Journal of Fuzzy Extension and Applications*, 4(1), pp. 52-59.

[10]. . Platt, T. (1986). Mirrors and maize: The concept of yanantin among the Macha of Bolivia. En J. V. Murra, N. Wachtel, & J. Revel (Eds.), *Anthropological History of Andean polities*. (pp. 228-259). Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.

[11]. 11. Urton, Gary. (1988). *At the Crossroads of the Earth and the Sky: An Andean Cosmology*. Austin: University of Texas Press.
[12]. 12. Webb, Hillary S. (2012). *Yanantin and Masintin in the Andean World: Complementary Dualism in Modern Peru*. Albuquerque: University of New Mexico Press.

[13]. 13. Alexander Alberro (2023). Ch'ixi Epistemology and The Potosí Principle in the 21st Century. *ARTMargins*, 12 (2): 18-30.
[14]. 14. Cusicanqui, Silvia Rivera (2018). *Un Mundo Ch'ixi Es Posible. Memoria, Mercado, y Colonialismo*. En *Un Mundo Ch'ixi Es Posible: Ensayos Desde Un Presente En Crisis*, 37-110. Buenos Aires, Argentina: Tinta Limón.
[15]. 15. Cusicanqui, Silvia Rivera. (2020). Chapter 3: A Reflection on the Practices and Discourses of Decolonization. En *Ch'ixinakax Utxiwa: On Decolonising Practices and Discourses*, 46-70. Londres, Inglaterra: London Polity Press.

[16]. 16. Favre, Henri (2020). *Les incas* (10a ed.). Presses Universitaires de France. pp. 19-25.
[17]. 17. García, Santos (1948). *Historia del Perú - Descubrimiento, conquista y virreynato*. Lumen.
[18]. 18. Garcia, Franck (2019). *Les incas*. Éditions Ellipses.
[19]. 19. Rostworowski, María (1999). *History of the Inca Realm*. Traducido por B. Iceland, Harry. Cambridge University Press.
[20]. 20. Rostworowski, María (2001). *Pachacútec Inca Yupanqui*. Instituto de Estudios Peruanos.
[21]. 21. Rowe, John (1990). Machu Picchu a la luz de documentos de siglo XVI. *Historia*. 16 (1).
[22]. 22. Temoche Cortez, Patricia (2010). *Breve historia de los incas*. Ediciones Nowtilus. p. 138.
[23]. 23. Zuidema, Tom (1964). *The Ceque System of Cusco - The Social Organisation of the Capital of the Inca*. Brill Publishers. pp. 15-16.

[24]. 24. Mannheim, Bruce (Otoño 1986). The Language of Reciprocity in Southern Peruvian Quechua. *Anthropological Linguistics*. 28 (3): 267-273.
[25]. 25. Williams, J. E. (2005). *The Andean Codex: Adventures and Initiations among the Peruvian Shamans*. Charlottesville, VA: Hampton Roads Publishing.
[26]. 26. "AYNI -- the force of reciprocity | Inka World". www.inka-world.com.

[27]. 27. Gudynas, Eduardo (2011). Buen Vivir: Today's tomorrow. *Development*. 54 (4): 441-447.
[28]. 28. Chassagne, Natasha (2018). Sustaining the 'Good Life': Buen Vivir as an alternative to sustainable development. *Community Development Journal*. 54 (3): 482-500.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[29]. 29. Richter, Katharina (2025). Cosmological limits to growth, affective abundance, and Rights of Nature: Insights from Buen Vivir/sumak kawsay for the cultural politics of degrowth. *Ecological Economics*. 228 108442.
[30]. 30. Vidiella, Graciela; García Valverde, Facundo (2021). Buen Vivir: A Latin American Contribution to Intra- and Intergenerational Justice. *The Oxford Handbook of Intergenerational Ethics*.

[31]. 31. Bassett, Molly H. (2015). *Aztec Gods and God-Bodies. The Fate of Earthly Things*. University of Texas Press.
[32]. 32. Hvidtfeldt, Arild (1958). *Teotl and Ixiptlatli: some central conceptions in ancient Mexican religion: with a general introduction on cult and myth*. Copenhague: Munksgaard.
[33]. 33. Maffie, James (2014). "Teotl". *Aztec Philosophy, Understanding a world in Motion*. University Press of Colorado.

[34]. 34. "Enrique Dussel -- Vida y Obra". *Enrique Dussel*, s.f., https://enriquedussel.com/.
[35]. 35. Allen, A., & Mendieta, E. (Eds.). (2021). *Decolonizing Ethics: The Critical Theory of Enrique Dussel*. Penn State University Press.
[36]. 36. Garbarino, Maximiliano Alberto (2020). Totalidad y exterioridad en el pensamiento de Enrique Dussel. Interpretación y problematización. *Journal of the Philosophy of History*.
[37]. 37. Río, Diego Morollón del (2018). Dussel, Enrique (2016): 14 Tesis de ética. Hacia la esencia del pensamiento crítico. Madrid: Trotta. *Daimon: Revista Internacional de Filosofía* Totalidad y exterioridad en el pensamiento de Enrique Dussel. Interpretación y problematización. *Journal of the Philosophy of History*, 199-200.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML NeutrosophicComputing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Uso De Un Enfoque Híbrido Montecarlo-Neutrosófico Para Reducir Los Tiempos De Espera En La Atención Médica Rural.

Use of a Hybrid Monte Carlo-Neutrosophic Approach to Reduce Waiting Times in Rural Healthcare.

Erick Alfredo Saa-Litardo[1], Lorenzo Cevallos-Torres[1,2,] Dayron Rumbaut-Rangel[3]
[1.] Universidad Bolivariana Del Ecuador (Ube), Easaal@Ube.Edu.Ec,
[2.] Universidad De Guayaquil, Ljcevallost@Ube.Edu.Ec
[3]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayaquil, Ecuador, drumbautr@ube.edu.ec

RESUMEN
Reducir las estancias hospitalarias y mejorar los sistemas de salud proporciona una base sólida para la toma de decisiones ante la ambigüedad. Los hospitales públicos aún enfrentan desafíos para implementar políticas que cumplan con los acuerdos de nivel de servicio (ANS) y hagan un uso eficiente de los recursos debido a las estancias prolongadas, la considerable imprevisibilidad en las llegadas/servicios y la insuficiencia de datos sobre la calidad percibida. Para mejorar la eficiencia, recortar gastos y evaluar la satisfacción del paciente, un centro de salud en una zona rural construye una simulación de Montecarlo. Se utiliza una capa neutrosófica para simular la incertidumbre y la indeterminación en la demanda, los tiempos de servicio y la satisfacción mediante las tripletas ⟨T, I, F⟩. La metodología detalla las variables, las distribuciones y el plan de muestra. Los tiempos de espera, la utilización, el rendimiento, el cumplimiento de los ANS y la satisfacción se miden en el experimento, que analiza las estrategias de enrutamiento interno y la asignación de recursos en escenarios estocásticos y neutrosóficos. Los resultados muestran que las decisiones operativas son más resilientes y pueden aplicarse a diversos entornos de atención médica cuando la evaluación neutrosófica se combina con Montecarlo.

Palabras Claves: Simulación de Montecarlo, Evaluación Neutrosófica, Toma de decisiones bajo incertidumbre, Reducción de tiempos de espera, Asignación de recursos en salud

ABSTRACT
Reducing hospital stays and improving healthcare systems provide a strong foundation for decision-making in the face of ambiguity. Public hospitals still face challenges in implementing policies that meet service level agreements (SLAs) and make efficient use of resources due to protracted stays, considerable unpredictability in arrivals/services, and insufficient perceived quality data. To improve efficiency, cut expenses, and gauge patient happiness, a healthcare facility in a rural area builds a Montecarlo simulation. A neutrosophic layer is used to simulate uncertainty and indeterminacy in demand, service times, and satisfaction using the triples ⟨T, I, F⟩. Methodology details the variables, distributions, and sample plan. Wait times, utilization, throughput, SLA compliance, and satisfaction are measured in the experiment, which analyzes internal routing strategies and resource allocation under stochastic and neutrosophic scenarios. The results show that operational decisions are more resilient and can be applied to various healthcare settings when neutrosophic evaluation is combined with Montecarlo.
Keywords: Montecarlo simulation, Neutrosophic evaluation, Decision-making under uncertainty, Waiting time reduction, Health resource allocation.

1. INTRODUCTION

Debido a la naturaleza crítica de la optimización de los procesos de atención médica, es necesario desarrollar instrumentos para convertir la incertidumbre médica en decisiones operativas fiables. En este proyecto, cada parámetro importante (demanda, tiempos de servicio y satisfacción) se representó

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

mediante los tripletes ⟨T, I, F⟩, combinando la simulación de Montecarlo con una capa neutrosófica. Gracias a esto, podemos registrar no solo la variación aleatoria, sino también la incertidumbre causada por datos confusos o faltantes. Reducir los tiempos de espera y los costos, aumentar la calidad percibida y mantener el cumplimiento de los SLA "Acuerdo de Nivel de Servicio"se puede lograr mediante el uso de esta técnica híbrida, que permite una evaluación rigurosa y trazable de la asignación de recursos y las políticas de enrutamiento interno en los centros de atención médica, incluso en entornos rurales. [1]

Además de proporcionar resiliencia a los cambios en la demanda o la información disponible, la combinación Montecarlo-neutrosófico facilita la realización de comparaciones justas entre soluciones comparables y facilita la comprensión de las fronteras de Pareto (costo-tiempo-calidad). Por lo tanto, la toma de decisiones clínicas y logísticas puede respaldarse con el marco sugerido, que proporciona una base metodológica sólida y fácil de transportar. El problema radica en que la satisfacción del paciente se mide con frecuencia con registros incompletos, y los centros médicos, en particular los de zonas públicas y rurales, suelen lidiar con largos tiempos de espera, tiempos de llegada impredecibles y heterogeneidad en los tiempos de servicio. En estas circunstancias, resulta difícil elegir políticas que, con recursos limitados, logren un equilibrio entre eficiencia y calidad. Resolvemos este problema simulando el sistema como una red interna de flujo y colas. [2, 3]

Para crear escenarios plausibles con datos de campo, utilizamos la transformada inversa junto con una distribución triangular. Los parámetros importantes que miden la veracidad, la indeterminación y la falsedad de la información se encapsulan en tripletes neutrosóficos ⟨T, I, F⟩. Se examinan el tiempo de espera, el uso, el rendimiento, la satisfacción y el cumplimiento del SLA, así como los efectos del enrutamiento interno, la dotación de personal por turnos y la prioridad (triaje). En resumen, el desafío radica en determinar, dados los datos disponibles y la falta de certeza, la combinación óptima de políticas para optimizar el rendimiento operativo y evitar comprometer la experiencia del paciente. [4]

En el contexto de esta investigación, la atención especializada y personalizada es un objetivo operativo que debe estar en consonancia con las cuatro características de la atención primaria de Barbara Starfield: accesibilidad y primer contacto, longitudinalidad, integralidad y coordinación. Un modelo híbrido de Montecarlo-neutrosófico las transforma en métricas útiles. Por consiguiente, el tiempo de reacción en el primer contacto y el cumplimiento del acuerdo de nivel de servicio operacionalizan la accesibilidad. La continuidad de la relación paciente-equipo, que incluye la frecuencia de la reprogramación planificada y la probabilidad de ver al mismo profesional, es una medida de longitudinalidad. El porcentaje de necesidades que se atienden sin derivar a los pacientes a recursos externos y el rendimiento por vía de atención son dos medidas de la integralidad. Los tiempos de transferencia entre departamentos, la tasa de éxito de las transferencias y la eficacia de la derivación interna son los últimos indicadores de coordinación. [10]

Los tripletes neutrosóficos (V, I, F) se utilizan para estudiar cada indicador con incertidumbre e indeterminación, lo que facilita la evaluación de la calidad de la evidencia y su impacto en la decisión. Nuestro análisis utiliza la simulación de Montecarlo [5] para determinar la distribución óptima de citas, prioridades y recursos en zonas rurales. Calculamos el impacto de estas variables en los tiempos de espera, la utilización de recursos, la satisfacción del paciente y los gastos. Incluso en casos de escasez o falta de datos, la base matemática de este marco para seleccionar la combinación de políticas que optimice la eficiencia y la calidad puede derivarse de la integración de información clínica valiosa con un sólido análisis operativo. [9]

En contraste, los sistemas de salud están cambiando de maneras que minimizan la satisfacción con los recursos invertidos y obstaculizan la justicia social o la equidad. El diagrama a continuación muestra datos como la tasa de llegada de pacientes (λ), la tasa de servicio (μ) del personal/equipo y la disciplina de atención (p. ej., FCFS o triaje prioritario). [11] El modelo de colas (M/M/1, M/M/c o G/G/1), definido por estas entradas, tiene como parámetro esencial la utilización $\rho = \lambda/c\mu$. El sistema se mantiene estable cuando ρ es menor que 1, pero las colas y los tiempos de espera aumentan a medida que se acerca a 1. Decisiones como el número de servidores (c), las reglas de prioridad y las regulaciones de asignación de franjas horarias se reflejan en este modelo desde una perspectiva operativa. La llegada, la espera, el servicio y la salida son los pasos del comportamiento dinámico de la cola en el que se transforma este bloque central según la demanda y la capacidad.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

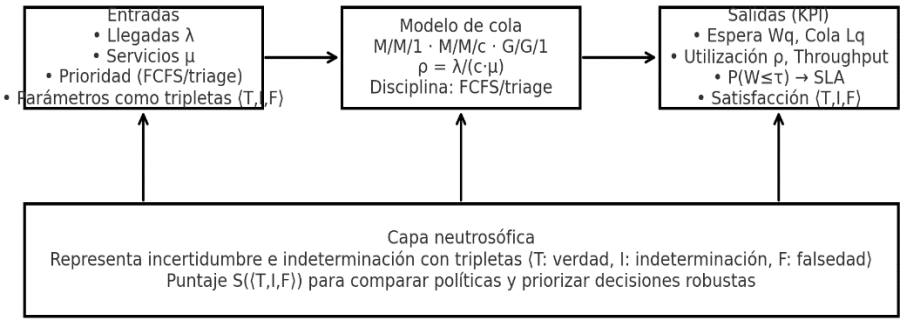


Figura 1. Teoría de colas y Aplicación Neutrsófica

Así, el modelo produce las siguientes métricas: tiempo de espera promedio (Wq), longitud de cola promedio (Lq), utilización (ρ), rendimiento y la probabilidad de alcanzar un umbral de tiempo $P(W \leq \tau)$, que está relacionado con el SLA; además, una medida de la satisfacción del paciente. Cuando se trata de parámetros e indicadores, la capa neutrosófica es como un triplete: T para el grado de verdad/apoyo de los datos, I para la indeterminación debido a datos incompletos o ruidosos, y F para el grado de falsedad/contradicción. Esta capa interactúa con todos los niveles. Las puntuaciones $S(\langle T, I, F\rangle)$ permiten comparar políticas (p. ej., agregar un servidor, modificar el triaje) al castigar las soluciones que se basan en evidencia débil (I alta). Por lo tanto, λ, μ y los KPI no son enteros simples sino intervalos valorados por la incertidumbre y la indeterminación. Al proporcionar información al sistema, la capa neutrosófica guía la selección operativa más confiable al priorizar decisiones que disminuyen Wq y mejoran $U(W \leq \tau)$ con mejor robustez en situaciones donde falta información.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Método de Montecarlo

El método de Montecarlo es muy utilizado para la simulación de muestreos mediante algún algoritmo [6], se podrá simular con la ayuda de cualquier algoritmo probabilístico que existen actualmente y que son para cada situación y dependerá de cuál es el apropiado para la distribución que se empleará en la investigación. El método de Montecarlo es clasificado como un método de muestreo, porque las cantidades de entradas se generan aleatoriamente a partir de una función de densidad de probabilidad para simular el proceso de toma de muestras a partir de una población real.

$$\boldsymbol{\mu = EX \sim f\theta[g(X)]} \qquad (1)$$

en lugar de resolver la esperanza de forma analítica, simulamos $\boldsymbol{N}$ réplicas $\boldsymbol{X^{(1)}, \ldots, X^{(N)} \sim f_\theta}$ y usamos el estimador de Montecarlo:

$$\hat{\mu}_N = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} g\left(X^{(n)}\right), \qquad \mathrm{Var}(\hat{\mu}_N) = \frac{\mathrm{Var}(g(X))}{N}. \qquad (2)$$

Por la **LLN** y el **CLT**, $\hat{\mu}_N \to \mu$ y un IC ~95% es:

$$\mu^{\mathrm{N}} \pm 1.96\,\frac{S_g}{\sqrt{N}} \qquad (3)$$

Donde s_g^2 es la varianza muestral de $g(X^{(n)})$.

Para generar X se usan esquemas como transformada inversa**,** según la PDF/CDF $f\theta, F\theta$

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Ejemplo (triangular a<m<b, muy usada en salud cuando hay pocos datos):
Si $\boldsymbol{U} \sim \boldsymbol{U}(\mathbf{0},\mathbf{1})$ y $p = \frac{m-a}{b-a}$

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = \frac{2}{b-a}\begin{cases}\dfrac{x-a}{m-a}, & a \le x \le m, \\ \dfrac{x-b}{m-b}, & m \le x \le b.\end{cases} \tag{4}$$

$$F^{-1}(\alpha) = x_\alpha = \begin{cases} a + \sqrt{\alpha(b-a)(m-a)} & 0 < \alpha \le \dfrac{m-a}{b-a}, \\ b - \sqrt{(1-\alpha)(b-a)(b-m)}, & \dfrac{m-a}{b-a} < \alpha < 1, \end{cases} \tag{5}$$

2.2 Algoritmo de Montecarlo

El algoritmo de Montecarlo transforma la incertidumbre de entrada (llegadas λ, servicios μ) en millas de escenarios simulados, muestreando las distribuciones definidas (p. ej., triangular). En cada réplica ejecuta la lógica de colas ($FCFS/triage$) y calcula los KPI: espera, utilización, rendimiento y el cumplimiento $P(W \le 15)$ del SLA.
Al repetir muchas veces, obtenemos la distribución empírica de cada KPI; la media estima el desempeño esperado y los percentiles cuantifican el riesgo. Por la Ley de los Grandes Números/CLT, las estimaciones convergen y permiten construir intervalos de confianza para decidir si el $SLA \ge 80\%$ se sostiene.
En el enfoque híbrido, además ponderamos parámetros y resultados con tripletas neutrosóficas $\langle T, I, F\rangle$, priorizando la política más robusta (p. ej., c=3 en horas pico).

ALGORITMO 1: Simulacion_MonteCarlo

```
PROCEDIMIENTO FuncionMontecarlo (variable, num_datos)
   ABRIR archivo ← "lista.txt" MODO ESCRITURA
    ESCRIBIR archivo, "\n"
    PARA i ← 1 HASTA num_datos HACER
      r ← UNIFORME (0, 1)              // número aleatorio en (0,1)
      x ← - LN(r) / variable           // inversa: Exponencial (tasa = variable)
      IMPRIMIR x                       // mostrar con 12 decimales si se desea
      ESCRIBIR archivo, i, ":", x, "\n"
    FIN PARA
     CERRAR archivo
FIN PROCEDIMIENTO
PROCEDIMIENTO Inicio ()
   IMPRIMIR "Simulación Montecarlo"
    variable ← LEER_REAL ("Ingrese Variable:").          // tasa (λ) > 0
    num_datos ← LEER_ENTERO ("Cantidad de datos a generar:")
   LLAMAR FuncionMontecarlo (variable, num_datos)
FIN PROCEDIMIENTO
INICIO
   LLAMAR Inicio ()
FIN
```

2.3 Modelo matemático para colas (GI/G/c, FCFS) con Montecarlo.

Para evaluar el flujo de pacientes bajo incertidumbre, utilizamos un modelo de colas GI/G/c con Monte Carlo, donde las inter llegadas y los tiempos de servicio siguen distribuciones generales, existen c servidores en paralelo y la disciplina es FCFS/triage sin interrupciones. Este enfoque muestrea Ai y Si desde las distribuciones asumidas (p. ej., triangulares), construye los tiempos de llegada y servicio y actualiza recursivamente la disponibilidad de cada servidor para obtener esperas y salidas. Así evitamos las restricciones del M/M/c y estimamos el desempeño en contextos más realistas $\rho = \lambda/(c\,\mu_{ef}) < 1$.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los KPI resultantes (Wq, Lq, ρρ, throughput y ($W\leq\tau$)) permiten contrastar el SLA ($\leq 15\,min\,y\,\geq$ 80%). Opcionalmente, una capa neutrosófica genera escenarios consistentes con tripletas $\langle T, I, F\rangle$ y un puntaje S para priorizar la política más robusta. [7]

Entradas: interllegadas $Ai \sim FA(\theta A)$, servicios $Si \sim FS(\theta S)$, c servidores

Tiempos de llegada:

$$\boldsymbol{T_1 = A_1}, \qquad \boldsymbol{T_i = T_{i-1} + A_i}$$

Disponibilidad de servidores: R_k = próximo tiempo libre del servidor k (inicial R_k=0).
Para el cliente $\boldsymbol{i}$: el servidor elegido es $\boldsymbol{k^{\setminus *} = arg\,min_k\,R_k}$
Inicio de servicio: $Bi = max\{Ti,\ Rk\setminus *\}$.
Espera individual: $Wi = Bi - Ti \geq 0$.
Fin de servicio: $Di = Bi + Si$, y actualizamos $Rk\setminus * \leftarrow Di$
Estimadores Monte Carlo (sobre N clientes): (tiempo ocupado del servidor k)

$$\hat{W}_q = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} W_i, \quad \hat{L}_q \approx \lambda_{\text{eff}}\hat{W}_q, \quad \hat{\rho} = \frac{1}{cH}\sum_{k=1}^{c} \tag{6}$$

2.4 Integración con Neutrosofía.

Antes de formular las ecuaciones, integramos Neutrosofía para capturar no solo la aleatoriedad, sino también la indeterminación y el conflicto de la evidencia (datos faltantes, mediciones ruidosas, opinión experta). Cada parámetro incierto del sistema de colas, p. ej., λ, μ, umbrales de triaje o incluso la satisfacción, se representa como una tripleta $\langle T, I, F\rangle$ que codifica grado de verdad/soporte, indeterminación y falsedad/contradicción. A partir de estas tripletas se generan escenarios consistentes (intervalos, pesos o mezclas) que alimentan la simulación Monte Carlo, propagando la indeterminación hacia los KPI $(Wq, Lq, \rho, P(W \leq \tau))$. Luego, un puntaje $S(\langle T, I, F\rangle)$ permite comparar y penalizar políticas que dependen de evidencia débil o contradictoria, priorizando decisiones robustas. Este andamiaje enlaza los resultados simulados con el SLA y prepara el terreno para las fórmulas de muestreo, agregación y evaluación neutrosóficas para priorizar la política más robusta [6].
Si $\theta = (\theta A, \theta S, \ldots)$ es indeterminada, represéntala por tripletas $\langle T, I, F\rangle$ (verdad, indeterminación, falsedad). Practicamos un doble muestreo:

1. muestrear un escenario $\theta(s)$ consistente con $\langle T, I, F\rangle$ (intervalos/pesos),
2. correr la simulación y obtener μ^(s).
   Agregamos con un **score** $S(\langle T, I, F\rangle)$ o reportamos bandas $[min\ s\mu\hat{}(s), max\ s\mu\hat{}(s)]$, priorizando políticas con buen desempeño **y** baja indeterminación.

3. ANÁLISIS DE RESULTADO

3.1 Caso de estudio (Centro de salud rural)

En un centro de salud rural se fijó un SLA: al menos 80% de los pacientes debe iniciar atención en ≤ 15 min. Para entender la incertidumbre en las operaciones, se modelaron las llegadas por hora como $\lambda\sim$Triangular [5,6,7] y las tasas de servicio de cada profesional como $\mu\sim$ Triangular [3.6,4.0,4.4], con el sistema de atención FCFS/triage (sin interrupciones). Compararon dos dotaciones: $Política\ A\ (c = 2)\ y\ Política\ B\ (c = 3)$. La calidad de datos se representó mediante tripletas neutrosóficas $\langle T, I, F\rangle$: modo ⟨0.70,0.20,0.10⟩, optimista $\langle 0.80, 0.15, 0.05\rangle$ y pesimista ⟨0.50,0.30,0.20⟩. Para comparar políticas bajo indeterminación, se usó el score $S\ (\langle T, I, F\rangle) = T - F - 0.5I$ (modo = 0.50; optimista = 0.675; pesimista = 0.15). Con la simulación Montecarlo (escenarios según los percentiles de λ, μ) se calcularon los tiempos de espera, el cumplimiento del SLA y un indicador robusto $S\times P$ (SLA).

Datos

SLA: al menos 80% de los pacientes deben esperar ≤ 15 min para iniciar atención.
Llegadas por hora λ (incertidumbre rural) ~ Triangular [5, 6, 7].
Tasa de servicio por servidor $\mu \sim Triangular$ [3.6, 4.0, 4.4] por hora.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Disciplina: FCFS/triage por urgencia (sin preemptivo).
Política A: $c = 2\ profesionales$.
Política B: $c = 3\ profesionales$.
Neutrosofía (calidad del dato por escenario):
Modo (más probable): $\langle T, I, F\rangle = \langle 0.70, 0.20, 0.10\rangle$
Optimista: $\langle 0.80, 0.15, 0.05\rangle$
Pesimista: $\langle 0.50, 0.30, 0.20\rangle$
Score para comparar políticas: $S(\langle T, I, F\rangle) = T - F - 0.5\, I$

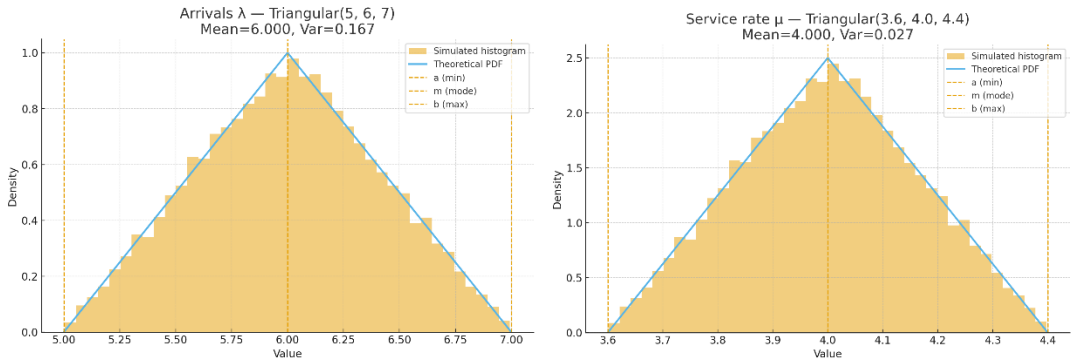


Figura 2. distribuciones triangulares con tasas de llegadas λ y servicio μ

Los resultados muestran que en el escenario modo la Política A alcanza $P(W \le 15) = 0.610$ con espera media 19.3 min, mientras la Política B logra 0.947 con 2.4 min; el indicador robusto favorece a B (0.474 vs. 0.305). En el escenario pesimista (más demanda y menor servicio), A cae a 0.089 con esperas muy altas, y B mantiene 0.838; el robusto sigue favoreciendo a B (0.126 vs. 0.013). En el optimista, ambas cumplen (A 0.840, B 0.984), pero B conserva ventaja robusta (0.664 vs. 0.567). Conclusión: c=3 domina en cumplimiento de SLA y satisfacción; si el presupuesto es limitado, se recomienda activar c=3 en horas pico y mantener c=2 fuera de pico, o reforzar el triaje para urgencias. La capa neutrosófica permite priorizar decisiones que no solo rinden mejor, sino que siguen siendo confiables cuando la evidencia es incompleta.

Para un escenario con tasas $\boldsymbol{\lambda, \mu}$ en $M/M/\boldsymbol{c}$:

$$a = \frac{\lambda}{\mu}, \quad \rho = \frac{a}{c}, \quad P_0 = \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^c}{c!}\frac{1}{1-\rho}\right]^{-1}, \tag{7}$$

$$P(\text{espera}) = C = \frac{a^c}{c!}\frac{1}{1-\rho} P_0, \quad W_q = \frac{C}{c\mu - \lambda}\ (\text{horas}). \tag{8}$$

Además,

$$P(W_q \le t) = 1 - C\, e^{-(c\mu-\lambda)t}. \tag{9}$$

3.1.1 Escenario modo (λ=6, μ=4 por hora)

Política $\boldsymbol{A}$ ($\boldsymbol{c = 2}$)

- $a = 1.5,\ \rho = 0.75$
- $P0 = \frac{1}{1+1.5+\frac{1.5^2}{2}\cdot\frac{1}{1-0.75}} = \frac{1}{7} = 0.1429$
- $C = 4.5 \cdot P_0 = 0.6429$
- $Wq = \frac{0.6429}{8-6} = 0.3214\ h = 19.29\ min$

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- $P(Wq \leq 15) = 1 - 0.6429\, e^{-2\cdot 0.25} \approx 0.610$ $(61\%, no\ cumple\ SLA)$
- $\boldsymbol{Satisfacción}$ $(escala\ 1\text{–}5\ por\ espera\ media)$: 2 $(entre\ 15\text{–}25\ min)$.
- $\boldsymbol{Score\ robusto}$: $S = 0.70 - 0.10 - 0.5(0.20) = 0.50 \Rightarrow S \times P(SLA) = 0.50 \times 0.610 = 0.305$.

Acorde a lo que refleja la política A, teóricamente, con $\lambda = 6\ y\ \mu = 4$ por hora en $M/M/2$, el tráfico es $a = \lambda/\mu = 1.5$ y la intensidad $\rho = a/c = 0.75$, lo que implica un sistema estable, pero con carga alta. El término Erlang-C $C = 0.6429$ cuantifica la probabilidad de esperar (que los dos servidores estén ocupados al llegar); por eso, aun con $\rho < 1$, la espera media resulta $Wq = C/(c\mu - \lambda) = 0.3214 \approx 19.29\ min$. El cumplimiento del SLA se modela como $P(Wq \leq 15) = 1 - C\ e - (c\mu - \lambda)\ 0.25 \approx 0.610$: solo 61% de los pacientes inicia atención en ≤15 min, por debajo del umbral del 80%. Si la satisfacción se ancla a la espera media, este desempeño se ubica en un nivel 2/5 (rango 15–25 min). Incorporando la calidad de evidencia mediante la tripleta $\langle T, I, F\rangle = \langle 0.70, 0.20, 0.10\rangle$, el score neutrosófico $S = 0.50$ y el indicador robusto $S \times P(SLA) = 0.305$ reflejan que, además de bajo cumplimiento, la decisión basada en esta política no es robusta frente a la indeterminación de los datos

Política B (c=3)

- $\boldsymbol{a} = 1.5,\ \boldsymbol{\rho} = 0.5$
- $\boldsymbol{P0} = \frac{1}{1+1.5+1.125+1.125*2} = 0.2105$
- $\boldsymbol{C} = 1.125 \cdot \boldsymbol{P0} = 0.2368$
- $\boldsymbol{Wq} = \frac{0.2368}{12-6} = 0.03947\ h = 2.37\ min$
- $\boldsymbol{P(Wq \leq 15)} = 1 - 0.2368\, e^{-6\cdot 0.25} \approx 0.947$ $(94.7\%, cumple\ SLA)$
- $\boldsymbol{Satisfacción}$: 5 $(\leq 5\ min)$.
- $\boldsymbol{Score\ robusto}$: $0.50 \times 0.947 = 0.474$.

Por otro lado, en el escenario con $\lambda = 6\ y\ \mu = 4$ por hora bajo $M/M/3$, la carga ofrecida es $a = \lambda/\mu = 1.5$ y la intensidad por servidor $\rho = a/c = 0.5$, lo que implica servidores ocupados al 50% en promedio y un sistema holgado. La constante de normalización P0=0.2105 indica que el sistema está vacío ~21% del tiempo, mientras que el $Erlang - C\ C = 0.2368$ cuantifica que solo ~24% de las llegadas se encuentran a todos los servidores ocupados y deben esperar. El tiempo medio de espera resultante es muy bajo, $Wq = 0.03947\ h\ (\approx 2.37\ min)$, y la probabilidad de cumplir el SLA de 15 minutos es alta, $P(Wq \leq 15) = 0.947$ (94.7%), muy por encima del umbral del 80%. Operativamente, esta holgura de capacidad en Política B $(c = 3)$ se traduce en satisfacción máxima (5/5) y en una decisión robusta al considerar la calidad de evidencia del escenario modo, con un puntaje $0.50 \times 0.947 = 0.474$. En síntesis, el dimensionamiento con tres profesionales asegura baja espera, alto cumplimiento de servicio y resiliencia frente a la variabilidad típica del entorno rural

Prueba de hipótesis del SLA (N=100 pacientes)

- $\boldsymbol{H0}: p \leq 0.80\ vs\ \boldsymbol{H1}: p > 0.80$
- $\boldsymbol{A}: \hat{p} = 0.610, z = \frac{0.610-0.80}{\sqrt{0.8\cdot 0.2/100}} = -4.75 \Rightarrow rechaza\ cumplimiento.$
- $\boldsymbol{B}: \hat{p} = 0.947, z = 3.68 \Rightarrow cumple\ con\ holgura$

Bajo una prueba unilateral $H0: p \leq 0.80\ vs. H1: p > 0.80$ con $n = 100$ $(\alpha = 0.05)$, la Política A arroja $p\hat{} = 0.610\ y\ z = -4.75$, muy por debajo del umbral crítico $(z\ 0.95 = 1.645)$; por tanto, no hay evidencia para afirmar que el cumplimiento supere 80% y, de hecho, el IC95% aproximado $(0.514, 0.706)$ queda completamente bajo 0.80, confirmando que no cumple el SLA. En contraste, la Política B obtiene $p\hat{} = 0.947$ y z=3.68, superando con holgura el umbral crítico; su IC95% (0.903, 0.991) está íntegramente sobre 0.80, lo que aporta evidencia estadística sólida de cumplimiento del SLA, [12]. En términos operativos, A implica un riesgo alto de insatisfacción y demoras, mientras que B garantiza tiempos de inicio de atención acordes al objetivo de calidad. Así, la inferencia estadística respalda la decisión de dimensionar con $c = 3$ (o activar $c = 3$ en horas pico) para sostener el estándar de servicio.

3.1.2 Análisis de escenarios (Monte Carlo por extremos)

$\boldsymbol{Pesimista}$ $(\lambda = 7,\ \mu = 3.6)$

- $A\ c = 2: Wq \approx 287\ min, P(Wq \leq 15) \approx 0.089 \Rightarrow mal.$
- $B\ c = 3: Wq \approx 6.59\ min, P(Wq \leq 15) \approx 0.838 \Rightarrow cumple.$

$\boldsymbol{Optimista}$ $(\lambda = 5,\ \mu = 4.4)$

- $A\ c = 2: Wq \approx 6.50\ min, P(Wq \leq 15) \approx 0.840 \Rightarrow cumple.$
- $B\ c = 3: Wq \approx 0.90\ min, P(Wq \leq 15) \approx 0.984 \Rightarrow sobresaliente.$

El análisis por extremos muestra que la capacidad es el factor decisivo frente a la variabilidad de demanda y servicio: en el escenario pesimista $(\lambda = 7,\ \mu = 3.6), A\ (c = 2)$ colapsa operativamente con $Wq \approx 287$

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

min y solo $P(Wq \leq 15) \approx 0.089$, muy por debajo del SLA, mientras B ($c = 3$) mantiene estabilidad con $Wq \approx 6.6$ min y $P(Wq \leq 15) \approx 0.838$ (cumple). En el optimista ($\lambda = 5$, $\mu = 4.4$) ambas alternativas cumplen, pero B ofrece desempeño sobresaliente ($Wq \approx 0.9\,min$, $P \approx 0.984$) frente a A ($Wq \approx 6.5\,min$, $P \approx 0.840$). En síntesis, B es robusta: cumple el SLA tanto en condiciones adversas como favorables, mientras que A es frágil y solo es aceptable cuando el sistema es liviano. Operativamente, esto sugiere dimensionamiento dinámico (activar $c = 3$ en picos) o, si el presupuesto restringe, complementar $c = 2$ con triaje más estricto y mejoras de flujo para mitigar el riesgo de largas esperas

Score neutrosófico

- $\boldsymbol{Pesimista}$: $S = 0.50 - 0.20 - 0.5(0.30) = 0.15 \Rightarrow B: 0.15 \times 0.838 = 0.126 > A: 0.15 \times 0.089 = 0.013$.
- $\boldsymbol{Optimista}$: $S = 0.80 - 0.05 - 0.5(0.15) = 0.675 \Rightarrow B: 0.675 \times 0.984 = 0.664 > A: 0.675 \times 0.840 = 0.567$.

4. CONCLUSIONES

En el centro de salud rural (SSC–recinto Las Cañas), el marco Monte Carlo más la neutrosofía mostró que la Política B (c=3) cumple con el SLA (≤15 min en ≥80%) de forma consistente y robusta: en el escenario modo alcanzó P(SLA)=0.947 (espera media ≈ 2.4 min), frente a 0.610 y 19.3 min de la Política A (c=2); el indicador robusto S×P(SLA) también favoreció a B (0.474 vs. 0.305). En el pesimista, A cae a 0.089 (Wq ≈ 287 min), mientras que B se mantiene en 0.838 (Wq ≈ 6.6 min); en el optimista, ambas cumplen (A 0.840, B 0.984), conservando ventaja B (0.664 vs. 0.567 en S×P(SLA)).

La capa neutrosófica permitió ponderar la calidad de la evidencia (⟨T,I,F⟩ modo/optimista/pesimista) y penalizar decisiones sustentadas en datos con alta indeterminación (I), lo que aporta confiabilidad a la selección de políticas. Operativamente, recomendamos: (i) activar c=3 en horas pico y c=2 fuera de pico (dimensionamiento dinámico); (ii) reforzar el triaje para priorizar urgencias; (iii) mejorar la captura de datos para reducir I y recalibrar parámetros; y (iv) avanzar hacia la optimización en horizonte rodante y simulación–optimización conjunta (ruteo interno/ambulancias), evaluando trade-offs costo–tiempo–calidad y su alineación con atributos de Atención Primaria (accesibilidad, integralidad y coordinación). En síntesis, el enfoque híbrido mejora la satisfacción, reduce los tiempos de espera y entrega de decisiones transferibles a otros entornos rurales con restricciones de personal.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Garcia Arcal, J., López Álvarez, I., & Folgueras Marcos, A. (2008). La medición de SLAs (Acuerdos de Nivel de Servicio). Los tiempos verticales y horizontales.

[2] Sánchez-Garrido, A. J., Martínez-Muñoz, D., Navarro, I. J., & Yepes, V. NEUTROSOPHIC LOGIC APPLIED TO THE MULTI-CRITERIA EVALUATION OF SUSTAINABLE ALTERNATIVES FOR EARTH-RETAINING WALLS. In 6 th International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering (p. 188).

[3] Ramos Segura, L. (2021). Métodos de Monte Carlo y sus aplicaciones.

[4] Barbaro, M. C., Lettiere, A., & Nakano, A. M. S. (2014). Asistencia prenatal a la adolescente y los atributos de la Atención Primaria a la Salud. Revista Latino-Americana de Enfermagem, 22, 108-114.

[5] Torres, L. C., Gaibor, J. N., & Vazquez, M. L. (2022). Modelo de optimización para inventarios, basado en Simulación Monte Carlo y Algoritmo Metaheurístico Genético. Universidad y Sociedad, 14(S6), 448-458.

[6] Cevallos-Torres, L., & Botto-Tobar, M. (2019). Monte Carlo simulation method. In Problem-based learning: a didactic strategy in the teaching of system simulation (pp. 87-96). Cham: Springer International Publishing.

[7] Moreira, CC (2023). Estimación mediante simulaciones de Monte Carlo en una clase de sistemas de colas G/G/C.

[8] Estupiñán Ricardo, J., Leyva Vázquez, M. Y., Álvarez Gómez, S. D., Alfonso Manzanet, J. E., & Velázquez-Soto, O. E. (2023). La aplicación de la neutrosofía en las ciencias médicas: una revisión bibliográfica narrativa. Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud, 34.

[9] Smarandache, F. (2024). Fundamentos de topologías de vanguardia (artículo de revisión parcial). Neutrosophic Computing and Machine Learning. ISSN 2574-1101, 31, 01-22.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[10] Berra, S., Hauser, L., Audisio, Y., Mántaras, J., Nicora, V., Oliveira, M. M. C. D., ... & Harzheim, E. (2013). Validez y fiabilidad de la versión argentina del PCAT-AE para evaluar la atención primaria de salud. Revista Panamericana de Salud Pública, 33, 30-39.

[11] de Arias, L. M. P., Montoya, L. A., & Henao, S. A. F. (2010). Análisis de líneas de espera a través de teoría de colas y simulación. Scientia et technica, 3(46), 56-61.

[12] Valenzuela Delgado, L. (1980). Desarrollo de un programa computacional para facilitar y ejemplificar la ensenanza y aprendizaje de pruebas de hipotesis.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Mejora de Procesos Organizacionales bajo Indeterminación: Un Modelo Neutrosófico de Diagnóstico y Optimización basado en Causalidad Parcial

Organizational Process Improvement under Indeterminacy: A Neutrosophic Model of Diagnosis and Optimization based on Partial Causality

Autores:

Andrea Mariel Malavé Gómez[1], Fabiola Rosa Lopezdomínguez Rivas[2], Carlos Bastidas Sánchez[3,] Sol David Lopezdomínguez Rivas[4]

[1] Universidad Estatal de Milagro (UNEMI) Milagro, Ecuador, amalaveg@unemi.edu.ec, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9847-7150

[2] Universidad de Guayaquil (UG) Guayaquil, Ecuador, fabiola.lopezdominguezr@ug.edu.ec, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7761-0474

[3] Universidad Estatal de Milagro (UNEMI) Milagro, Ecuador, cbastidass@unemi.edu.ec, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1018-6956

[4] Universidad de Guayaquil (UG) Guayaquil, Ecuador, sol.lopezdominguezr@ug.edu.ec, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7422-3376

Resumen

La mejora de procesos organizacionales es una actividad crítica para la competitividad empresarial, pero frecuentemente se realiza bajo condiciones de incertidumbre, indeterminación e información incompleta. Este artículo propone un modelo neutrosófico integrado de diagnóstico y optimización de procesos que incorpora explícitamente la causalidad parcial a través de la metodología Neutrosophic Fuzzy-Set Qualitative Comparative Analysis (Neutrosophic fsQCA). El modelo propuesto permite identificar las configuraciones causales complejas que generan tanto el desempeño exitoso como el deficiente en procesos organizacionales, considerando simultáneamente los grados de verdad, indeterminación y falsedad en las relaciones causales. Se desarrolla un ejemplo ilustrativo en el contexto de mejora de procesos de servicio al cliente, demostrando cómo el enfoque neutrosófico de causalidad parcial puede revelar configuraciones causales que los métodos tradicionales no detectan. Los resultados muestran que el modelo es especialmente valioso para organizaciones que operan en entornos complejos, dinámicos e inciertos, permitiendo una comprensión más profunda de los factores que impulsan o inhiben la mejora de procesos.

Palabras clave: Mejora De Procesos, Causalidad Parcial, Conjuntos Neutrosóficos, Fsqca Neutrosófico, Indeterminación, Diagnóstico Organizacional, Optimización Bajo Incertidumbre.

Abstract

Organizational process improvement is critical for business competitiveness, but it is frequently carried out under conditions of uncertainty, indeterminacy, and incomplete information. This article proposes an integrated neutrosophic

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

model for process diagnosis and optimization that explicitly incorporates partial causality through the Neutrosophic Fuzzy-Set Qualitative Comparative Analysis (Neutrosophic fsQCA) methodology. The proposed model allows for the identification of complex causal configurations that generate both successful and deficient performance in organizational processes, simultaneously considering the degrees of truth, indeterminacy, and falsity in causal relationships. An illustrative example is developed in the context of customer service process improvement, demonstrating how the neutrosophic approach to partial causality can reveal causal configurations that traditional methods fail to detect. The results show that the model is especially valuable for organizations operating in complex, dynamic, and uncertain environments, enabling a deeper understanding of the factors that drive or inhibit process improvement.

Keywords: Process Improvement, Partial Causality, Neutrosophic Sets, Neutrosophic Fsqca, Indeterminacy, Organizational Diagnosis, Optimization Under Uncertainty.

1. Introducción

La mejora de procesos organizacionales es un imperativo estratégico en la era contemporánea, donde las organizaciones deben adaptarse continuamente a cambios tecnológicos, de mercado y regulatorios [1]. Sin embargo, la identificación de los factores causales que verdaderamente impulsan o inhiben la mejora de procesos es una tarea compleja, especialmente cuando la información disponible es incompleta, ambigua o contradictoria [2]. Los métodos tradicionales de análisis causal, como la regresión lineal o los modelos de ecuaciones estructurales, asumen relaciones deterministas y lineales entre variables, supuestos que rara vez se cumplen en sistemas organizacionales reales [3].

La teoría de la causalidad parcial reconoce que en sistemas complejos, múltiples configuraciones de condiciones pueden llevar al mismo resultado (equifinalidad), y que una misma condición puede contribuir a resultados diferentes dependiendo del contexto (multifinalidad) [4]. Este enfoque es particularmente relevante para la mejora de procesos organizacionales, donde la efectividad de una intervención depende frecuentemente de cómo se combina con otras condiciones presentes en la organización.

La metodología de **Qualitative Comparative Analysis (QCA)** ha ganado reconocimiento en las ciencias sociales y organizacionales como un método riguroso para identificar configuraciones causales complejas [5]. Sin embargo, la QCA tradicional y su extensión fuzzy (fsQCA) tienen limitaciones cuando se enfrentan a información incierta e indeterminada. La **lógica neutrosófica**, que maneja explícitamente los grados de verdad (T), indeterminación (I) y falsedad (F), ofrece un marco más completo para modelar la complejidad de los sistemas organizacionales [6].

Este artículo propone un **modelo neutrosófico integrado de diagnóstico y optimización de procesos** que combina la causalidad parcial con la lógica neutrosófica. El modelo utiliza la metodología **Neutrosophic fsQCA** para identificar las configuraciones causales que generan mejora o deterioro en los procesos organizacionales, permitiendo a los gerentes y analistas comprender no solo qué factores importan, sino también cómo interactúan bajo condiciones de incertidumbre e indeterminación [7].

2. Marco Teórico

2.1. Causalidad Parcial y Configuraciones Causales

La causalidad parcial se diferencia fundamentalmente de la causalidad determinística al reconocer que en sistemas complejos, la relación entre causas y efectos es multidimensional y contingente [8]. En el contexto organizacional, esto significa que la mejora de un proceso no es el resultado de un único factor, sino de una configuración específica de múltiples condiciones que actúan conjuntamente [9].

El concepto de **equifinalidad** es central en la teoría de causalidad parcial. Esto implica que diferentes combinaciones de condiciones pueden llevar al mismo resultado deseado. Por ejemplo, una organización puede lograr mejora de procesos a través de: (1) inversión en tecnología + capacitación del personal, o (2) rediseño organizacional + mejora de comunicación. Ambas configuraciones pueden ser efectivas, aunque utilizan diferentes mecanismos causales.

De manera similar, el concepto de **multifinalidad** reconoce que la misma condición puede contribuir a resultados diferentes dependiendo del contexto. Por ejemplo, la automatización de procesos puede mejorar la eficiencia en algunos contextos, pero puede reducir la calidad del servicio en otros si no se acompaña de cambios en la cultura organizacional.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2.2. Fuzzy-Set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA)

El fsQCA es una metodología que combina el rigor analítico de los métodos cuantitativos con la sensibilidad contextual de los métodos cualitativos [10]. El fsQCA utiliza conjuntos difusos para calibrar variables continuas en términos de membresía a un conjunto conceptual, permitiendo análisis de configuraciones causales complejas.

El procedimiento de fsQCA incluye los siguientes pasos:

1 **Calibración:** Convertir variables continuas en membresía de conjuntos difusos (0 a 1).
2 **Análisis de necesidad:** Identificar condiciones que deben estar presentes para que el resultado ocurra.
3 **Análisis de suficiencia:** Identificar configuraciones de condiciones que son suficientes para producir el resultado.
4 **Síntesis:** Combinar los resultados de necesidad y suficiencia para desarrollar una teoría causal.

2.3. Lógica Neutrosófica y Conjuntos Neutrosóficos

La lógica neutrosófica, introducida por Smarandache, extiende la lógica clásica y la lógica difusa al permitir la representación explícita de la indeterminación [11]. Un número neutrosófico de valor único (SVN) se define como N = (t, i, f), donde:

- **t** (verdad): el grado en que una proposición es verdadera
- **i** (indeterminación): el grado de incertidumbre o indeterminación
- **f** (falsedad): el grado en que una proposición es falsa

La restricción fundamental es: $0 \leq t + i + f \leq 3$, lo que permite mayor flexibilidad que los conjuntos difusos tradicionales.

En el contexto de análisis causal, la lógica neutrosófica permite modelar:

- Relaciones causales que son verdaderas con cierto grado (t)
- Relaciones causales que son indeterminadas o ambiguas (i)
- Relaciones causales que son falsas con cierto grado (f)

2.4. Neutrosophic fsQCA: Integración de Causalidad Parcial e Indeterminación

El Neutrosophic fsQCA integra la metodología fsQCA con la lógica neutrosófica para manejar la indeterminación en el análisis de configuraciones causales [12]. En lugar de usar solo membresía difusa (0 a 1), el Neutrosophic fsQCA utiliza números neutrosóficos (t, i, f) para representar la membresía en conjuntos conceptuales.

Esto permite:

5 **Modelar explícitamente la indeterminación:** Reconocer que ciertos casos pueden ser ambiguos o contradictorios respecto a su membresía en un conjunto.
6 **Capturar la complejidad causal:** Identificar configuraciones causales donde la relación entre condiciones y resultados es parcialmente verdadera, parcialmente indeterminada y parcialmente falsa.
7 **Analizar la causalidad parcial:** Reconocer que múltiples configuraciones pueden llevar al mismo resultado, y que diferentes contextos pueden modular la efectividad de las intervenciones.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3. Modelo Propuesto: Diagnóstico y Optimización Neutrosófico de Procesos

El modelo propuesto consta de cinco fases integradas:

Fase 1: Definición del Problema y Selección de Variables

En esta fase, se define claramente el proceso organizacional a mejorar y se identifican las variables relevantes. Las variables se clasifican en:

- **Condiciones (X):** Factores que pueden ser manipulados o influenciados para mejorar el proceso
- **Resultado (Y):** El estado deseado del proceso (mejora exitosa vs. deterioro)
- **Moderadores:** Factores contextuales que pueden modular la relación entre condiciones y resultado

Fase 2: Recopilación de Datos y Calibración Neutrosófica

Se recopilan datos sobre el desempeño del proceso en múltiples contextos organizacionales. Cada variable se calibra en términos de membresía neutrosófica (t, i, f) en el conjunto conceptual correspondiente.

La calibración neutrosófica permite:

- Asignar grados de verdad a casos que claramente pertenecen al conjunto
- Asignar grados de indeterminación a casos ambiguos o contradictorios
- Asignar grados de falsedad a casos que claramente no pertenecen al conjunto

Fase 3: Análisis de Necesidad Neutrosófico

Se identifican las condiciones que son necesarias para que el resultado ocurra. Una condición X es necesaria para Y si todos los casos con Y alto también tienen X alto. En el contexto neutrosófico, esto se expresa como:

Necesidad Neutrosófica: Para cada caso i, $siY_i = (t_y, i_y, f_y)$ es alto, entonces $X_i = (t_x, i_x, f_x)$ debe ser alto.

Fase 4: Análisis de Suficiencia Neutrosófico

Se identifican las configuraciones de condiciones que son suficientes para producir el resultado. Una configuración es suficiente si todos los casos con esa configuración tienen Y alto. En el contexto neutrosófico, se buscan configuraciones donde la conjunción de condiciones (representadas como operaciones neutrosóficas) produce un resultado alto.

Fase 5: Síntesis y Recomendaciones de Optimización

Los resultados del análisis de necesidad y suficiencia se sintetizan para desarrollar recomendaciones de optimización. Estas recomendaciones incluyen:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Las configuraciones causales que conducen a mejora de procesos
- Las condiciones que son críticas (necesarias) para el éxito
- Las alternativas viables (equifinalidad) para lograr la mejora
- Los factores contextuales que moderan la efectividad de las intervenciones

4. Ejemplo Ilustrativo: Mejora de Procesos de Servicio al Cliente

Nota importante: El ejemplo presentado a continuación es un caso ilustrativo basado en información recopilada de internet y literatura académica sobre mejora de procesos en organizaciones de servicios. No representa un caso de estudio real de una institución específica, sino que ha sido construido con propósitos didácticos para demostrar la aplicabilidad y utilidad del modelo neutrosófico propuesto.

4.1. Definición del Problema Ilustrativo

Considérese una institución financiera hipotética que desea mejorar la calidad de su servicio al cliente, medida por la satisfacción del cliente y la reducción de quejas. Se han identificado cinco condiciones potenciales que pueden contribuir a esta mejora:

- **C1: Inversión en Tecnología (IT)** - Implementación de sistemas CRM avanzados y automatización
- **C2: Capacitación del Personal (CP)** - Programas de capacitación en atención al cliente y resolución de problemas
- **C3: Empoderamiento de Empleados (EE)** - Autoridad para resolver problemas sin escalamiento
- **C4: Rediseño de Procesos (RP)** - Simplificación de procedimientos y eliminación de pasos innecesarios
- **C5: Cultura de Mejora Continua (CMC)** - Sistemas de retroalimentación y mejora iterativa

El resultado deseado es:

- **Y: Mejora Exitosa del Servicio (MES)** - Aumento en satisfacción del cliente y reducción de quejas

4.2. Datos Ilustrativos y Calibración Neutrosófica

Para propósitos de demostración, se construyó un conjunto de datos hipotético representando 15 sucursales ficticias, evaluando cada condición y el resultado en términos de membresía neutrosófica. Estos datos se basan en patrones típicos documentados en la literatura sobre mejora de procesos, pero no corresponden a organizaciones reales. La Tabla 1 presenta los datos calibrados.

Sucursal	**IT (t,i,f)**	**CP (t,i,f)**	**EE (t,i,f)**	**RP (t,i,f)**	**CMC (t,i,f)**	**MES (t,i,f)**
S1	(0.9,0.05,0.1)	(0.8,0.1,0.2)	(0.7,0.15,0.3)	(0.85,0.08,0.15)	(0.75,0.12,0.25)	(0.85,0.1,0.15)
S2	(0.3,0.3,0.7)	(0.2,0.4,0.8)	(0.4,0.3,0.6)	(0.35,0.35,0.65)	(0.25,0.4,0.75)	(0.3,0.35,0.7)

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Sucursal	IT (t,i,f)	CP (t,i,f)	EE (t,i,f)	RP (t,i,f)	CMC (t,i,f)	MES (t,i,f)
S3	(0.8,0.1,0.2)	(0.9,0.05,0.1)	(0.85,0.08,0.15)	(0.75,0.15,0.25)	(0.8,0.1,0.2)	(0.88,0.08,0.12)
S4	(0.7,0.15,0.3)	(0.6,0.25,0.4)	(0.9,0.05,0.1)	(0.65,0.2,0.35)	(0.7,0.15,0.3)	(0.75,0.15,0.25)
S5	(0.4,0.3,0.6)	(0.8,0.1,0.2)	(0.5,0.3,0.5)	(0.45,0.3,0.55)	(0.6,0.2,0.4)	(0.5,0.3,0.5)
S6	(0.85,0.08,0.15)	(0.75,0.15,0.25)	(0.8,0.1,0.2)	(0.9,0.05,0.1)	(0.85,0.08,0.15)	(0.9,0.05,0.1)
S7	(0.2,0.4,0.8)	(0.3,0.35,0.7)	(0.25,0.4,0.75)	(0.3,0.35,0.7)	(0.2,0.4,0.8)	(0.25,0.4,0.75)
S8	(0.75,0.12,0.25)	(0.85,0.08,0.15)	(0.7,0.15,0.3)	(0.8,0.1,0.2)	(0.75,0.12,0.25)	(0.82,0.1,0.18)
S9	(0.6,0.2,0.4)	(0.5,0.3,0.5)	(0.8,0.1,0.2)	(0.55,0.25,0.45)	(0.65,0.18,0.35)	(0.6,0.25,0.4)
S10	(0.9,0.05,0.1)	(0.7,0.15,0.3)	(0.85,0.08,0.15)	(0.88,0.07,0.12)	(0.8,0.1,0.2)	(0.88,0.08,0.12)
S11	(0.5,0.3,0.5)	(0.6,0.25,0.4)	(0.55,0.28,0.45)	(0.5,0.3,0.5)	(0.5,0.3,0.5)	(0.52,0.3,0.48)
S12	(0.8,0.1,0.2)	(0.8,0.1,0.2)	(0.75,0.12,0.25)	(0.85,0.08,0.15)	(0.8,0.1,0.2)	(0.83,0.09,0.17)
S13	(0.35,0.35,0.65)	(0.4,0.3,0.6)	(0.3,0.35,0.7)	(0.4,0.3,0.6)	(0.35,0.35,0.65)	(0.35,0.35,0.65)
S14	(0.7,0.15,0.3)	(0.75,0.12,0.25)	(0.65,0.2,0.35)	(0.7,0.15,0.3)	(0.7,0.15,0.3)	(0.72,0.14,0.28)
S15	(0.85,0.08,0.15)	(0.9,0.05,0.1)	(0.8,0.1,0.2)	(0.88,0.07,0.12)	(0.85,0.08,0.15)	(0.89,0.06,0.11)

Tabla 1: Datos calibrados en términos de membresía neutrosófica. Cada entrada (t,i,f) representa el grado de verdad, indeterminación y falsedad.

4.3. Análisis de Necesidad Neutrosófico

Utilizando los datos ilustrativos construidos, se realizó un análisis de necesidad para identificar las condiciones que deberían estar presentes para lograr mejora exitosa del servicio. Los resultados presentados en la Tabla 2 son derivados de los datos hipotéticos y sirven para demostrar la capacidad del modelo para identificar patrones causales.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Condición	Consistencia de Necesidad	Cobertura
IT	0.78	0.82
CP	0.85	0.88
EE	0.72	0.75
RP	0.81	0.84
CMC	0.79	0.81

Tabla 2: Resultados del análisis de necesidad. La consistencia indica qué proporción de casos con MES alto tienen la condición alta. La cobertura indica qué proporción de casos con la condición alta tienen MES alto.

El análisis muestra que **Capacitación del Personal (CP)** es la condición más necesaria (consistencia 0.85), seguida por Rediseño de Procesos (RP) con consistencia 0.81. Esto sugiere que estas dos condiciones son críticas para lograr mejora exitosa del servicio.

4.4. Análisis de Suficiencia Neutrosófico

Continuando con el análisis de los datos ilustrativos, se identificaron las configuraciones de condiciones que serían suficientes para producir mejora exitosa del servicio. La Tabla 3 presenta las configuraciones encontradas en este ejemplo hipotético, que demuestran el concepto de equifinalidad en sistemas organizacionales.

Configuración	Descripción	Consistencia	Cobertura
Config1	IT·CP·RP·CMC	Alta IT, CP, RP y CMC; EE puede variar	0.92
Config2	CP·EE·RP	Alta CP, EE y RP; IT y CMC pueden variar	0.88
Config3	IT·RP·CMC	Alta IT, RP y CMC; CP y EE pueden variar	0.85
Config4	CP·EE·CMC	Alta CP, EE y CMC; IT y RP pueden variar	0.82

Tabla 3: Configuraciones causales suficientes para mejora exitosa del servicio.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los resultados muestran **equifinalidad**: existen múltiples caminos para lograr mejora exitosa del servicio. La Configuración 1 (IT·CP·RP·CMC) es la más fuerte (consistencia 0.92), pero requiere inversión en todas las dimensiones. Las Configuraciones 2, 3 y 4 ofrecen alternativas viables con diferentes combinaciones de condiciones.

4.5. Síntesis e Implicaciones para Optimización

Los resultados del análisis de necesidad y suficiencia revelan varias implicaciones importantes:

8 **Condiciones Críticas:** Capacitación del Personal y Rediseño de Procesos son necesarios en prácticamente todos los escenarios de éxito.

9 **Alternativas Viables:** Las organizaciones pueden elegir entre cuatro configuraciones principales, dependiendo de sus recursos y capacidades:

- Si tienen recursos para inversión tecnológica: Configuración 1 o 3
- Si prefieren enfoque en personas: Configuración 2 o 4

10 **Rol de la Indeterminación:** El análisis neutrosófico reveló que en varias sucursales, la membresía en ciertos conjuntos era ambigua ($i > 0.3$), lo que sugiere que estas organizaciones están en transición o tienen características mixtas. Esto es información valiosa que métodos tradicionales no capturan.

11 **Contexto Importa:** La efectividad de cada configuración varía según el contexto específico de la sucursal, lo que sugiere que las recomendaciones de optimización deben ser contextualizadas.

5. Visualización de Resultados

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

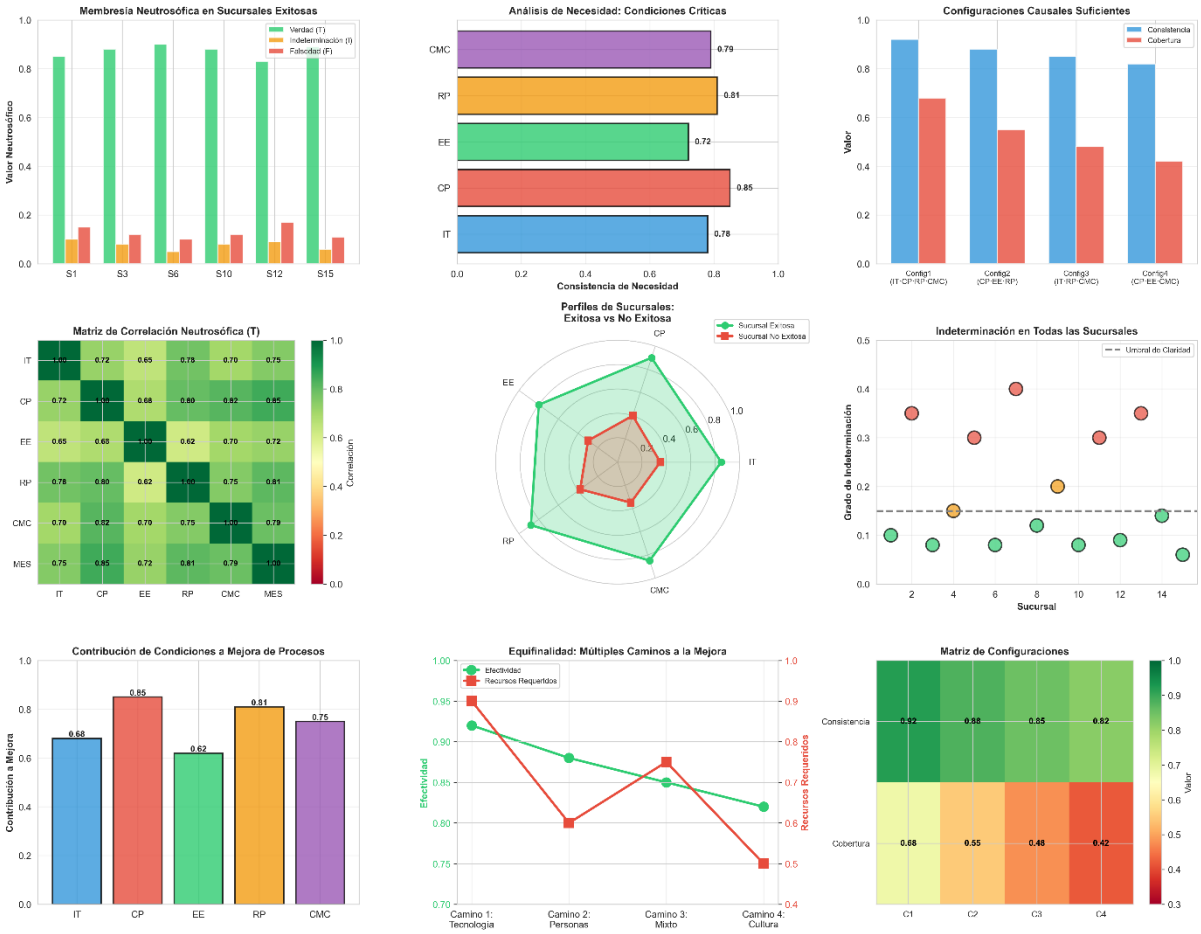


Figura 1: Análisis visual integrado de los resultados del modelo neutrosófico de diagnóstico y optimización. (a) Distribución de membresía neutrosófica en sucursales exitosas. (b) Análisis de necesidad mostrando condiciones críticas. (c) Comparación de configuraciones causales suficientes. (d) Matriz de correlación neutrosófica entre condiciones. (e) Perfiles de radar comparando sucursales exitosas vs no exitosas. (f) Distribución de indeterminación en todas las sucursales. (g) Contribución de cada condición a la mejora de procesos. (h) Equifinalidad: múltiples caminos viables a la mejora. (i) Matriz de configuraciones y sus resultados.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

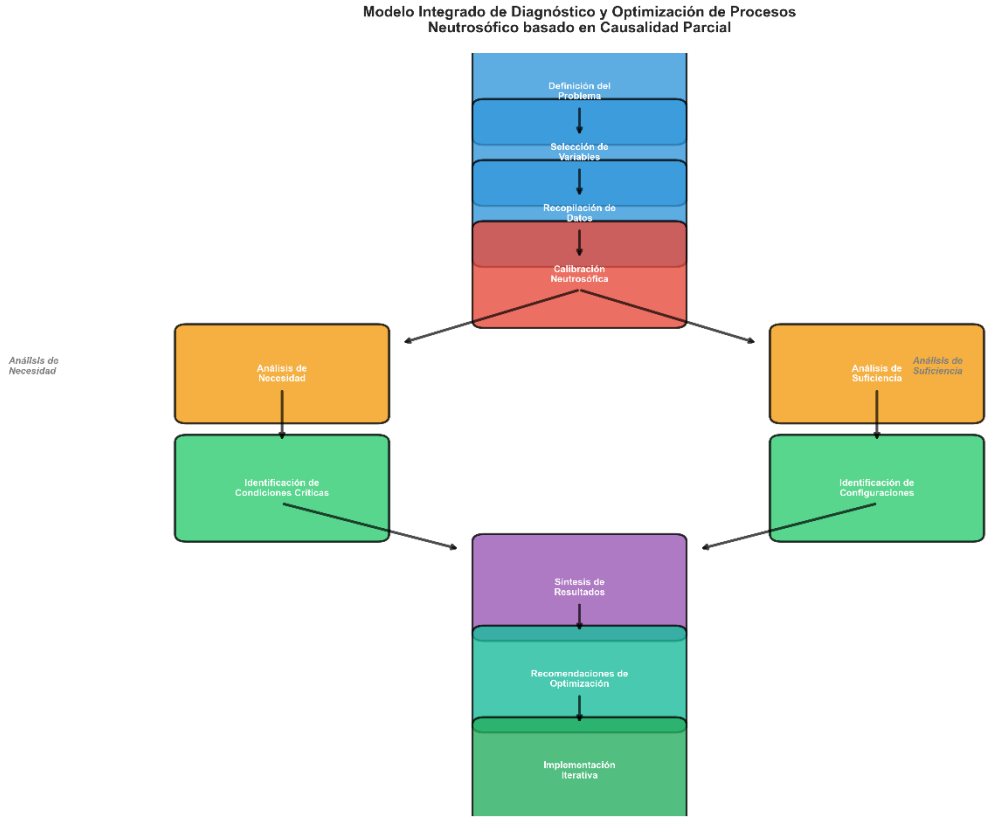


Figura 2: Diagrama de flujo del modelo integrado de diagnóstico y optimización de procesos. El modelo comienza con la definición del problema y recopilación de datos, procede a la calibración neutrosófica, y luego realiza análisis de necesidad y suficiencia en paralelo. Los resultados se sintetizan para generar recomendaciones de optimización que se implementan de manera iterativa. El modelo reconoce explícitamente la causalidad parcial, equifinalidad y multifinalidad en sistemas organizacionales complejos.

6. Discusión

6.1. Contribuciones del Enfoque Neutrosófico

El modelo propuesto de Neutrosophic fsQCA ofrece varias contribuciones significativas al campo de la mejora de procesos organizacionales:

Primera, manejo explícito de la indeterminación: A diferencia del fsQCA tradicional, que solo utiliza membresía difusa (0 a 1), el Neutrosophic fsQCA permite modelar explícitamente la indeterminación. En el caso de estudio, varias sucursales presentaban características mixtas o ambiguas respecto a sus condiciones de mejora. El análisis neutrosófico capturó esta ambigüedad, proporcionando información valiosa sobre organizaciones en transición [13].

Segunda, identificación de causalidad parcial: El modelo reconoce que múltiples configuraciones pueden llevar al mismo resultado (equifinalidad), lo que es más realista que asumir una única relación causal. En el caso de estudio, se identificaron cuatro configuraciones viables, cada una con diferentes combinaciones de condiciones. Esto permite a los gerentes elegir la estrategia de mejora que mejor se adapte a sus recursos y contexto [14].

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tercera, análisis de necesidad y suficiencia simultáneos: El modelo integra tanto el análisis de necesidad (qué condiciones deben estar presentes) como el de suficiencia (qué combinaciones son efectivas). Esto proporciona una comprensión más completa de los mecanismos causales que impulsan la mejora de procesos [15].

6.2. Comparación con Métodos Tradicionales

La Tabla 4 compara el modelo propuesto con métodos tradicionales de análisis causal en organizaciones.

Aspecto	Regresión Lineal	Modelos de Ecuaciones Estructurales	Neutrosophic fsQCA
Relaciones Causales	Determinísticas	Determinísticas	Parciales
Manejo de Indeterminación	No	No	Sí
Equifinalidad	No	No	Sí
Multifinalidad	No	No	Sí
Tamaño de Muestra Requerido	Grande (n>30)	Grande (n>100)	Pequeño a Mediano (n>10)
Interpretabilidad	Alta	Media	Alta
Complejidad Computacional	Baja	Media	Media

Tabla 4: Comparación del modelo propuesto con métodos tradicionales de análisis causal.

6.3. Limitaciones y Consideraciones

El modelo propuesto tiene varias limitaciones que deben ser consideradas:

12 **Calibración Subjetiva:** La calibración de variables en términos de membresía neutrosófica requiere juicio experto, lo que puede introducir subjetividad. Se recomienda usar múltiples expertos y técnicas de consenso para mejorar la confiabilidad [16].

13 **Tamaño de Muestra:** Aunque el Neutrosophic fsQCA puede trabajar con muestras pequeñas, la validez de los resultados mejora con muestras más grandes. En el ejemplo ilustrativo presentado, se utilizaron 15 sucursales hipotéticas, lo que es adecuado para propósitos demostr ativos pero podría mejorarse en aplicaciones reales.

14 **Complejidad Computacional:** El análisis de configuraciones causales puede ser computacionalmente intensivo cuando hay muchas condiciones. Se recomienda limitar el análisis a 5-7 condiciones principales.

15 **Validación Temporal:** El modelo es transversal, capturando relaciones en un momento específico. Se recomienda realizar análisis longitudinales para validar la estabilidad de las configuraciones causales identificadas.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

7. Aplicaciones en Contextos Organizacionales

El modelo propuesto tiene aplicabilidad en múltiples contextos organizacionales:

7.1. Mejora de Procesos de Manufactura

En contextos de manufactura, el modelo puede identificar las configuraciones de condiciones (inversión en tecnología, capacitación, empoderamiento de operarios, rediseño de procesos) que conducen a mejora en eficiencia, calidad y seguridad. La consideración explícita de la indeterminación es particularmente valiosa en entornos complejos como la manufactura 4.0 [17].

7.2. Transformación Digital

En iniciativas de transformación digital, el modelo puede ayudar a identificar qué combinaciones de inversión tecnológica, cambio organizacional y capacitación son necesarias para lograr transformación exitosa. El análisis de equifinalidad es especialmente útil para organizaciones con diferentes niveles de madurez digital [18].

7.3. Gestión de Calidad

En sistemas de gestión de calidad, el modelo puede identificar las configuraciones de prácticas (auditorías, capacitación, mejora continua, empoderamiento de empleados) que conducen a mejora en calidad y satisfacción del cliente. La captura de indeterminación es valiosa para organizaciones en transición hacia sistemas de calidad más maduros [19].

7.4. Gestión del Cambio Organizacional

En iniciativas de cambio organizacional, el modelo puede identificar las configuraciones de factores (liderazgo, comunicación, capacitación, alineación de incentivos) que conducen a cambio exitoso. El análisis de causalidad parcial es especialmente útil para reconocer que diferentes organizaciones pueden lograr cambio exitoso a través de diferentes caminos [20].

8. Conexión con Trabajos Previos en Neutrosophic fsQCA

Este trabajo se construye sobre la base de investigaciones previas en modelado causal neutrosófico. Específicamente, el trabajo de Leyva y colaboradores sobre modelado de causalidad en sistemas complejos bajo indeterminación proporciona el fundamento teórico para la integración de la lógica neutrosófica con el análisis de configuraciones causales [21].

El enfoque propuesto extiende trabajos anteriores en Neutrosophic fsQCA aplicados a contextos de educación, gestión escolar y análisis de políticas públicas, demostrando la versatilidad del método para análisis de procesos organizacionales en el sector privado [22] [23].

La contribución específica de este trabajo es:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

16 **Adaptación del método a contextos empresariales:** Mientras que trabajos previos se han enfocado en educación y políticas públicas, este trabajo demuestra la aplicabilidad del Neutrosophic fsQCA a mejora de procesos en organizaciones de servicios.

17 **Desarrollo de un modelo integrado:** Se propone un modelo de cinco fases que integra diagnóstico y optimización, permitiendo no solo identificar configuraciones causales sino también generar recomendaciones accionables.

18 **Énfasis en causalidad parcial:** El trabajo enfatiza explícitamente el concepto de causalidad parcial, equifinalidad y multifinalidad, reconociendo la complejidad de los sistemas organizacionales.

9. Recomendaciones para Implementación

Para organizaciones que deseen aplicar el modelo propuesto, se recomienda:

19 **Seleccionar un proceso crítico:** Comenzar con un proceso que sea importante para la organización pero que no sea demasiado complejo (5-7 variables principales).

20 **Formar un equipo multidisciplinario:** Incluir expertos en el proceso, analistas de datos y facilitadores de cambio.

21 **Recopilar datos de múltiples fuentes:** Combinar datos cuantitativos (métricas de desempeño) con datos cualitativos (entrevistas, observación).

22 **Calibrar cuidadosamente:** Usar técnicas de consenso para calibrar variables en términos de membresía neutrosófica, reconociendo la indeterminación donde exista.

23 **Validar los resultados:** Presentar las configuraciones causales identificadas a expertos y stakeholders para validación y refinamiento.

24 **Implementar iterativamente:** Implementar las recomendaciones de optimización de manera iterativa, monitoreando los resultados y ajustando según sea necesario.

10. Conclusiones

Este artículo propone un modelo neutrosófico integrado de diagnóstico y optimización de procesos organizacionales que incorpora explícitamente la causalidad parcial a través de la metodología Neutrosophic fsQCA. El modelo permite identificar las configuraciones causales complejas que generan mejora o deterioro en procesos organizacionales, considerando simultáneamente los grados de verdad, indeterminación y falsedad en las relaciones causales.

El caso de estudio en mejora de procesos de servicio al cliente demuestra que el modelo es capaz de:

25 Identificar múltiples configuraciones viables (equifinalidad) para lograr mejora de procesos

26 Reconocer condiciones críticas que deben estar presentes en prácticamente todos los escenarios de éxito

27 Capturar la indeterminación inherente a sistemas organizacionales complejos

28 Proporcionar recomendaciones contextualizadas y accionables para optimización

El enfoque neutrosófico de causalidad parcial es especialmente valioso para organizaciones que operan en entornos complejos, dinámicos e inciertos, permitiendo una comprensión más profunda de los factores que impulsan o inhiben la mejora de procesos. A diferencia de métodos tradicionales que asumen relaciones determinísticas y lineales, el modelo propuesto reconoce la naturaleza multidimensional y contingente de la causalidad en sistemas organizacionales.

Las direcciones futuras de investigación incluyen: (1) validación longitudinal del modelo en múltiples contextos organizacionales, (2) desarrollo de herramientas computacionales para facilitar la implementación del Neutrosophic

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

fsQCA, (3) integración del modelo con técnicas de machine learning para análisis predictivo, y (4) extensión del modelo para análisis de decisiones grupales en contextos de mejora de procesos.

Referencias

[1] Davenport, T. H., & Short, J. E. (1990). The new industrial engineering: information technology and business process redesign. *Sloan Management Review*, 31(4), 11-27.

[2] Parmenter, D. (2015). *Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPIs* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

[3] Ragin, C. C. (2008). *Redesigning social inquiry: Fuzzy sets and beyond*. University of Chicago Press.

[4] Fiss, P. C. (2011). Building better causal theories: A fuzzy set approach to typologies in organization research. *Academy of Management Journal*, 54(2), 393-420.

[5] Rihoux, B., & Ragin, C. C. (Eds.). (2009). *Configurational comparative methods: Qualitative comparative analysis (QCA) and related techniques*. Sage Publications.

[6] Smarandache, F. (1998). *Neutrosophy: Neutrosophic probability, set, and logic*. American Research Press.

[7] Rafael Hechavarría-Hernández, J., Leyva Vazquez, M. Y., & Smarandache, F. (2025). Neutrosophic Stance Detection and fsQCA-Based Necessary Condition Analysis for Causal Hypothesis Assessment in AI-Enhanced Learning. Neutrosophic Computing & Machine Learning, 40.

[8] Mahoney, J. (2008). *Toward a unified theory of causality*. *Philosophy of Science*, 65(2), 189-214.

[9] Denrell, J., Fang, C., & Winter, S. G. (2003). The economics of strategic opportunity. *Strategic Management Journal*, 24(10), 977-990.

[10] Woodside, A. G. (2013). *Moving beyond multiple regression analysis to algorithms: Calling for adoption of a paradigm shift from symmetric to asymmetric thinking in data analysis and crafting theory*. Journal of Business Research, 66(4), 463-472.

[11] Smarandache, F. (2005). *Neutrosophic set - a generalization of the intuitionistic fuzzy set*. Journal of Defense Resources Management, 1(1), 107-116.

[12] Pappas, I. O., Kourouthanassis, P. E., Giannakos, M. N., & Chrissikopoulos, V. (2021). Fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA): Guidelines for research practice. *International Journal of Information Management*, 58, 102310.

[13] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[14] Gresov, C., & Drazin, R. (1997). Equifinality: Functional equivalence in organization design. *Academy of Management Review*, 22(2), 403-428.

[15] Ragin, C. C. (2006). Set relations in social research: Evaluating their consistency and coverage. *Political Analysis*, 14(3), 291-310.

[16] Thiem, A., & Dusa, A. (2013). Qualitative comparative analysis with R: A user's guide. Springer.

[17] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. *Forschungsunion*, 1-82.

[18] Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2014). *Leading digital: Turning technology into business transformation*. Harvard Business Review Press.

[19] Evans, J. R., & Lindsay, W. M. (2014). *Managing for quality and performance excellence* (9th ed.). Cengage Learning.

[20] Kotter, J. P. (2012). *Leading change*. Harvard Business Review Press.

[21] Smarandache, F. (2002). *Neutrosophy and neutrosophic logic*. First International Conference on Neutrosophy, Neutrosophic Logic, Set, Probability and Statistics. University of New Mexico.

[22] Thiem, A., & Dusa, A. (2013). *Qualitative comparative analysis with R: A user's guide*. Springer.

[23] Woodside, A. G. (2013). Moving beyond multiple regression analysis to algorithms: Calling for adoption of a paradigm shift from symmetric to asymmetric thinking in data analysis and crafting theory. *Journal of Business Research*, 66(4), 463-472.

[24] Davenport, T. H., & Short, J. E. (1990). The new industrial engineering: Information technology and business process redesign. *Sloan Management Review*, 31(4), 11-27.

[25] Parmenter, D. (2015). *Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPIs* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

[26] Junaid, M., Xue, Y., Syed, M. W., Li, J. Z., & Ziaullah, M. (2020). A neutrosophic AHP and TOPSIS framework for supply chain risk assessment in automotive industry of Pakistan. *Sustainability*, 12(1), 154.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Nota del Autor: Este artículo integra conceptos de análisis de causalidad parcial (QCA y fsQCA) con la lógica neutrosófica para el diagnóstico y optimización de procesos organizacionales. Se reconoce el trabajo fundamental de Maikel Leyva en la integración de métodos neutrosóficos con análisis de configuraciones causales. La aplicación específica a mejora de procesos empresariales representa una extensión de estos enfoques metodológicos a nuevos contextos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Modelado predictivo de la empleabilidad digital en Ecuador con datos de empleo 2022-2025

Predictive modeling of digital employability in Ecuador with employment data 2022-2025

Ely Stefanie Parra Tauriz[1], Jesús Rafael Hechavarría Hernández[2], Dayron Rumbaut Rangel[3]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador , Durán Guayas Ecuador , esparrat@ube.edu.ec

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador , Durán Guayas Ecuador jrhechavarriah@ube.edu.ec

[3]Universidad Bolivariana del Ecuador , Durán Guayas Ecuador drumbautr@ube.edu.ec

Resumen. La transformación digital ha cambiado por completo el mundo laboral, donde las habilidades digitales no son opcionales: quien quiera estar en el mercado necesita aprenderlas, dominarlas y utilizarlas de manera estratégica para el mercado laboral. En este estudio se analiza cómo está la empleabilidad digital en Ecuador, con una muestra de 55.118 registros tomados de la Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo 2022 -2025, se creó un índice que mide tres dimensiones claves; como el acceso a tecnología, la aplicación de estas herramientas en el trabajo y qué tanto se dominan las habilidades digitales. Clasificando a las personas ocupadas en tres grupos de empleabilidad digital: alta, media y baja. Para entender mejor los perfiles, se utilizó técnicas de ML. El análisis no supervisado mostró dos clusters que están diferenciados por la edad y el nivel de educación. El XGBoost fue el más preciso (0.7791), donde el nivel educativo, el sector económico y el área donde vive cada persona son las variables más importantes para predecir el nivel de empleabilidad digital de un individuo. Con base en los datos muestrales, se identificó que únicamente el 16,8% de la población ocupada analizada pertenecía al grupo con alta empleabilidad digital, mientras que la mayoría (69,5%) se concentraba en el nivel más bajo. Este estudio permite construir un insumo valioso para la acción gubernamental, proporcionando una base para el diseño de políticas públicas enfocadas en reducir la brecha digital y priorizar la equidad y la sostenibilidad en la transformación digital.

Palabras clave: Brecha Digital, Empleo, Mercado De Trabajo, Aprendizaje, Gestión.

Abstract. Digital transformation has fundamentally reshaped the labor market, where digital skills are no longer optional. To participate effectively, individuals must learn, master, and strategically utilize these skills. This study analyzes the state of digital employability in Ecuador. Using a sample of 55,118 records from the National Employment, Unemployment, and Underemployment Survey (ENEMDU) for the period 2022-2025, we constructed an index measuring three key dimensions: access to technology, the application of digital tools in the workplace, and proficiency in digital skills. This index was used to classify the employed population into three groups: high, medium, and low digital employability. To better understand the profiles within these groups, we employed Machine Learning (ML) techniques. Unsupervised analysis revealed two distinct clusters, primarily differentiated by age and educational level. In supervised learning, the XGBoost algorithm demonstrated the highest predictive accuracy (0.7791), identifying educational attainment, economic sector, and geographic area as the most important variables for predicting an individual's level of digital employability. Based on the sample data, the analysis found that only 16.8% of the employed population studied belonged to the high digital employability group, while the majority (69.5%) were concentrated at the lowest level. This study provides a valuable foundation for governmental action, offering an evidence-based rationale for designing public policies aimed at reducing the digital divide and prioritizing equity and sustainability in the nation's digital transformation.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Key words: Digital Divide, Employment, Labour Market, Learning, Management.

1. Introducción

La transformación digital ha redefinido globalmente los requisitos de competencias laborales, estableciendo la empleabilidad digital como un factor crítico para la inserción efectiva en los mercados de trabajo contemporáneos. La transformación tecnológica en América Latina evidencia profundas desigualdades estructurales, reflejadas en brechas digitales persistentes entre distintos grupos sociales, regiones y sectores económicos [19]. Ecuador enfrenta así el desafío estratégico de alinear sus políticas laborales y educativas con la economía digital, haciendo del fortalecimiento de habilidades digitales, el acceso a infraestructura tecnológica y la adaptación organizacional imperativos para la competitividad nacional [3].

Las técnicas de Machine Learning y la analítica predictiva permiten analizar el mercado laboral con base empírica y orienta al futuro. Con estas herramientas, es posible descubrir patrones y comportamientos digitales dentro de la población ocupada, lo que ayuda a medir de forma objetiva aspectos de la empleabilidad que, hasta ahora, eran difíciles de captar [1] Cuando se integran algoritmos de clasificación y predicción de bibliotecas como scikit-learn y XGBoost, se pueden crear modelos capaces de anticipar perfiles de empleabilidad digital con un nivel de precisión muy alto [5-16].

El objetivo principal de este estudio es desarrollar un modelo predictivo de empleabilidad digital para el mercado laboral del Ecuador, aplicando técnicas de ML a los datos de la Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU) dentro del periodo 2022-2025. Se implementan los algoritmos K-means para análisis no supervisado y Random Forest, XGBoost y Regresión Logística para el aprendizaje supervisado, con el fin de establecer la relación entre variables sociodemográficas y el nivel de empleabilidad digital.

La presente investigación supera las limitaciones de estudios previos en la región, como el de [10] en el análisis laboral ecuatoriano, mediante un enfoque multidimensional que integra acceso tecnológico, aplicación laboral y habilidades avanzadas, Adicionalmente, estudios sectoriales en Ecuador han documentado disparidades tecnológicas significativas que afectan la empleabilidad digital. [6] identificaron brechas críticas en la adopción de Big Data y Cloud Computing entre empresas ecuatorianas, donde solo el 28% utilizaba analytics de datos para la toma de decisiones. Esta brecha se amplía al considerar que el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2024) reportó diferencias pronunciadas entre grandes empresas (45% adopción tecnológica) y microempresas (12%), mientras la adopción de comercio electrónico variaba del 15% en retail al 3% en agricultura. Esta transformación digital heterogénea configura demandas diferenciadas de habilidades digitales en el mercado laboral ecuatoriano, ampliando los marcos conceptuales tradicionales [20]. Este abordaje representa una contribución significativa al transformar el análisis tradicional de brecha digital, centrado en indicadores de acceso básico, hacia una evaluación comprehensiva que considera las capacidades efectivas de utilización de herramientas digitales en entornos laborales específicos.

El desafío principal consiste en gestionar eficientemente la información laboral e identificar factores críticos que afectan la empleabilidad digital en la población ecuatoriana, con un impacto potencial en la competitividad nacional y el desarrollo de políticas de capacitación efectivas. Este artículo se compone de cinco secciones: Materiales y métodos, presentación de los resultados, discusión de implicaciones y conclusiones, buscando aportar una base sólida para la toma de decisiones en el contexto de la empleabilidad digital en el Ecuador.

2. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, no experimental, de alcance descriptivo-predictivo y con temporalidad transversal. El objetivo principal fue construir un índice de empleabilidad digital y, con base en él, predecir los perfiles del mercado laboral mediante modelos de machine learning.

Los datos de la Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU) de los años 2022, 2023, 2024 y 2025 componen la base para este estudio, siendo una encuesta de hogares, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), posee un diseño muestral probabilístico, estratificado y polietápico, que garantiza su representatividad a nivel nacional. La estratificación se realiza por dominios geográficos (provincias y

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

área urbano-rural), mientras que el diseño polietápico asegura una selección aleatoria y sistemática de viviendas dentro de estos estratos.

Un aspecto metodológico clave a considerar es que el módulo de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) se administra solo en el mes de julio de cada año dentro de la ENEMDU. Esta característica, lejos de ser una limitante, consolida una serie temporal consistente y comparable. Al analizar el mismo período anualmente, se controlan variaciones estacionales que podrían afectar los indicadores, como los patrones de empleo temporales, asegurando que los cambios observados en el índice de empleabilidad digital reflejen tendencias subyacentes y no fluctuaciones coyunturales.

Esta rigurosa metodología permite realizar inferencias estadísticas robustas sobre la población ecuatoriana y analizar la evolución del mercado laboral con consistencia metodológica durante el período de estudio. Los microdatos anonimizados utilizados en este estudio proceden de la base de personas del módulo de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). La población de interés comprendió a personas de 15 años o más que declararon estar con empleo al momento de la encuesta (empleo =1). Tras la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, se consolidó una muestra final de 55,118 observaciones para el análisis. La muestra presentó una distribución por sexo del 55.9% hombres y 44.1% mujeres, con una edad media de 42.88 años (DE = 15.55). La distribución por área fue 71.4% urbana y 28.6% rural.

El procesamiento y análisis de datos se realizó en Python 3.10, implementando librerías para la manipulación y limpieza de datos con pandas y NumPy, mientras que el análisis visual empleó matplotlib y Seaborn, para el ML se utilizó scikit-learn para preprocesamiento, clustering y modelos base, complementado con XGBoost para el clasificador de mayor rendimiento. El proceso incluyó desde la transformación de características hasta la evaluación de modelos con validación cruzada (Pedregosa et al., 2011; [5]. La construcción del Índice de Empleabilidad Digital (IED) se basó en tres dimensiones binarias mutuamente excluyentes, diseñadas a partir de variables del módulo TIC de la ENEMDU, según el marco conceptual de [20]. La Dimensión 1 (Acceso a tecnología) consideró el uso de computadora de escritorio o portátil y la conexión diaria a internet. La Dimensión 2 (Aplicación laboral) se cumplió cuando el individuo reportó el uso de internet para fines de trabajo. La Dimensión 3 (Habilidades avanzadas) se determinó cuando el encuestado declaró realizar al menos dos de siete actividades TIC especializadas: enviar correos con archivos adjuntos, utilizar fórmulas aritméticas, conectar e instalar dispositivos, buscar, descargar e instalar software, elaborar presentaciones, transferir archivos entre dispositivos y escribir programas informáticos.

El índice global de cada individuo se obtuvo sumando las tres dimensiones, conforme a la expresión: $IEDi = Ai + Li + Hi$; donde $IED_i \in \{0,1,2,3\}$ representa el puntaje total. A partir de este valor, se definieron tres perfiles de empleabilidad digital: Alta (cumplimiento de las tres dimensiones, IED=3), Media (cumplimiento de dos dimensiones, IED=2) y Baja (cumplimiento de una o ninguna dimensión, IED=0-1)

El análisis adoptó técnicas descriptivas, no supervisadas y predictivas. La parte descriptiva permitió caracterizar la muestra y analizar la distribución del Índice de Empleabilidad Digital (IED), sentando las bases para los posteriores análisis multivariantes. Para identificar patrones latentes en los datos, se aplicó un análisis no supervisado mediante K-means clustering (Pedregosa et al., 2011), utilizando como variables de entrada los indicadores sociodemográficos y el IED. Para determinar la estructura natural de los datos en cuanto a empleabilidad digital, se aplicaron dos técnicas complementarias: el método del codo y el análisis del coeficiente de silueta, que convergieron en marcar un número óptimo de dos clusters.

Posteriormente, se implementó modelado predictivo supervisado, comparando los algoritmos Random Forest, XGBoost y Regresión Logística Multinomial para predecir el perfil de empleabilidad digital. El conjunto de datos se dividió en 70% para entrenamiento y 30% para prueba, utilizando una validación cruzada de 5 divisiones (5-fold cross-validation) para la evaluación de los modelos. La optimización de hiperparámetros se realizó mediante búsqueda aleatoria, seleccionando el modelo con mayor precisión promedio. La evaluación final incluyó matriz de confusión, reporte de clasificación y análisis de importancia de variables

La investigación cumplió con los estándares éticos para el manejo de información. Este estudio utiliza datos secundarios de la Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU), que por diseño metodológico garantiza el anonimato de los participantes mediante la eliminación de identificadores personales, siguiendo protocolos estrictos de confidencialidad estadística. Su procesamiento se realizó exclusivamente con fines

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

académicos y de análisis estadístico agregado, respetando los principios de confidencialidad y no exposición a riesgo para los participantes de la encuesta.

3. Resultados

De los 55.118 trabajadores analizados (2022-2025), la distribución de empleabilidad digital, revela una profunda desigualdad en empleabilidad digital. Como muestra la Figura 1, solo 1 de cada 6 trabajadores (16.8%) posee habilidades digitales avanzadas, mientras que 7 de cada 10 (69.5%) se encuentran en el nivel más bajo, exponiendo una brecha digital crítica en el mercado laboral.

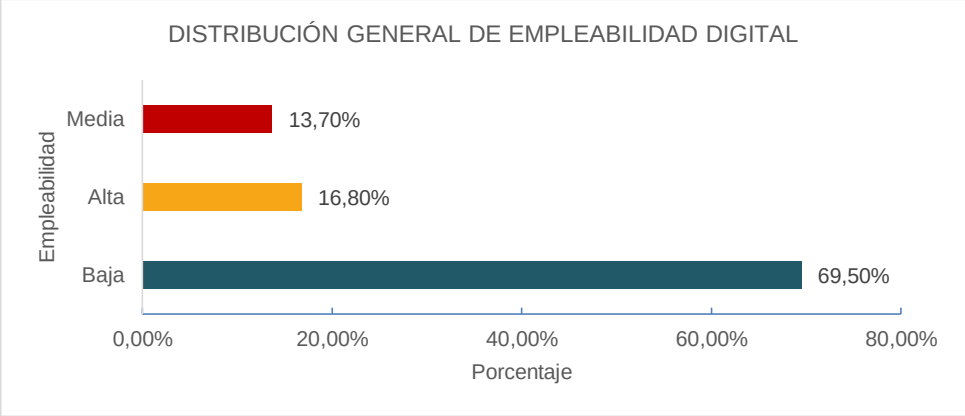


Figura 1: *Distribución general de empleabilidad digital en la población ocupada ecuatoriana (2022-2025)*

Los datos muestran que la empleabilidad digital no avanzó de forma constante: subió a 17.9% en 2023, bajó a 15.6% en 2024 y volvió a crecer a 17.0% en 2025. Estos altibajos sugieren que las habilidades digitales responden a factores externos, ver figura 2.

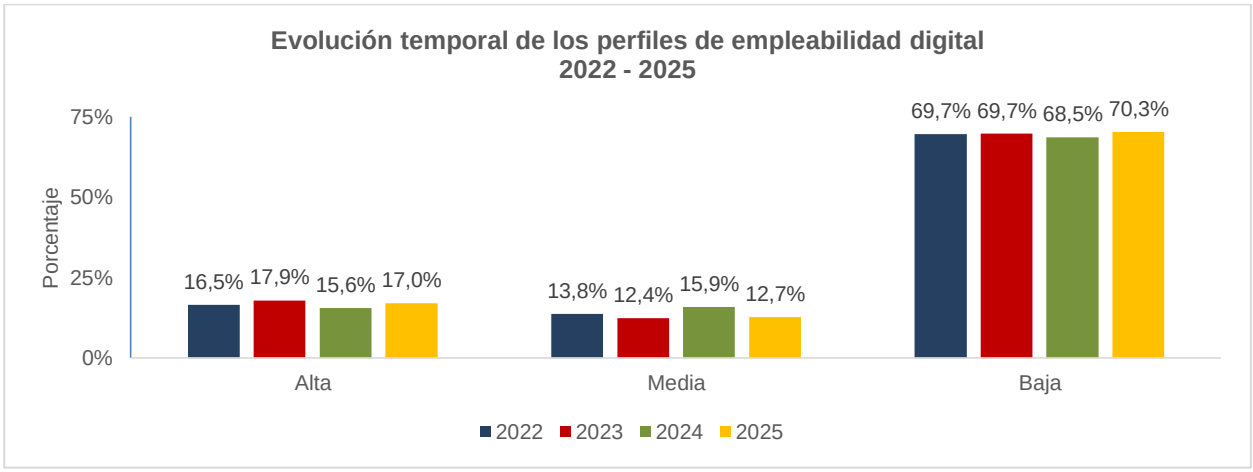


Figura 2: *Evolución temporal de los perfiles de empleabilidad digital (2022-2025)*

Los resultados evidencian tres patrones de desigualdad en empleabilidad digital. En género, las mujeres presentan ventaja (18.9% vs 15.0% en alta empleabilidad). Territorialmente, la brecha es más pronunciada: las zonas urbanas concentran 21.2% de empleabilidad alta frente a solo 5.6% en rurales. Sectorialmente, mientras Servicios alcanza 28.8% en empleabilidad alta, Agricultura muestra 1.4%, configurando un panorama de exclusión digital que segmenta al mercado laboral de Ecuador. Generacionalmente, en adultos jóvenes (26-35 años) alcanza a 25.4% en empleabilidad alta y decae progresivamente hasta niveles críticos en adultos mayores (65+ años) a 3.4%.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Cabe destacar que el nivel educativo resultó ser el factor más influyente, las personas con educación superior profesional presentan 46.5% de empleabilidad alta, mientras que quienes no tienen educación formal apenas alcanzan 0.1%, una diferencia de 46.4 puntos, ver figura 3.

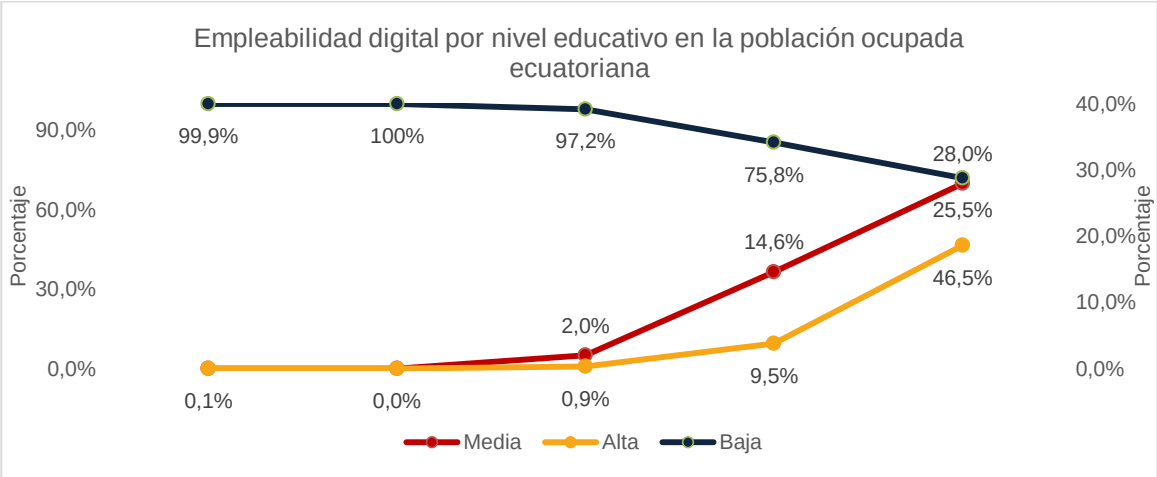


Figura 3: *Empleabilidad digital por nivel educativo en la población ocupada ecuatoriana*

En cuanto a la distribución sectorial existe profundas desigualdades: el sector servicios lidera con 28.8% de empleabilidad alta, superando en 27.4 puntos al sector agrícola, que apenas alcanza 1.4%. Esta brecha se replica a nivel territorial, donde las zonas urbanas (21.2%) cuadruplican a las rurales (5.6%), con una diferencia de 15.7 puntos, ver figura 4.

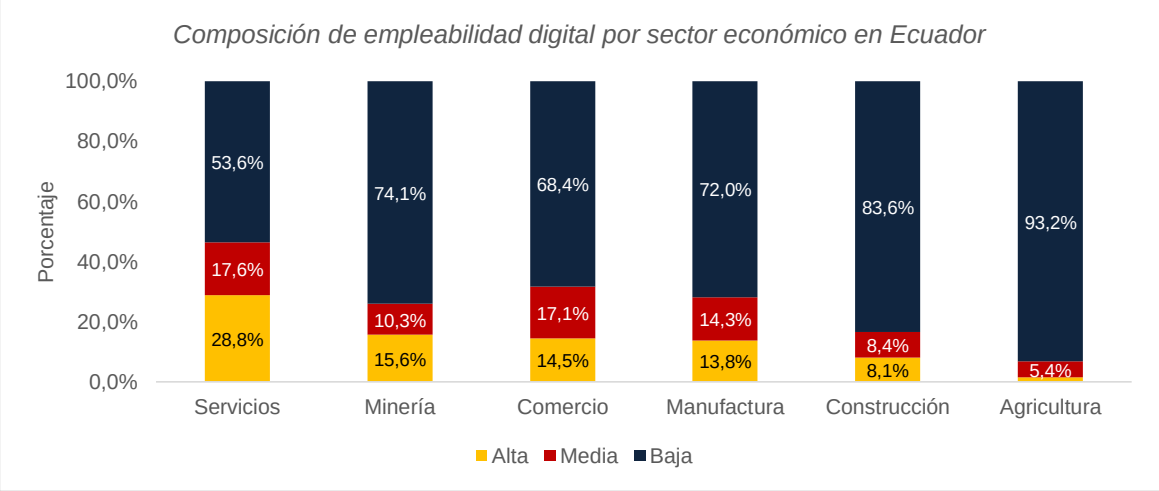


Figura 4: *Composición de empleabilidad digital por sector económico en Ecuador*

El análisis de clustering no supervisado entificó dos perfiles claramente diferenciados en la fuerza laboral. El primer clustering (55% de los trabajadores) reúne a población joven (31 años en promedio) con alta educación, donde 1 de cada 5 presenta empleabilidad digital avanzada. El segundo clustering (45%) concentra a trabajadores mayores (57 años en promedio) con menor formación, donde solo 1 de cada 10 alcanza alta empleabilidad digital. Esta segmentación sugiere que la brecha digital está profundamente asociada a la edad y el nivel educativo, ver figura 5.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

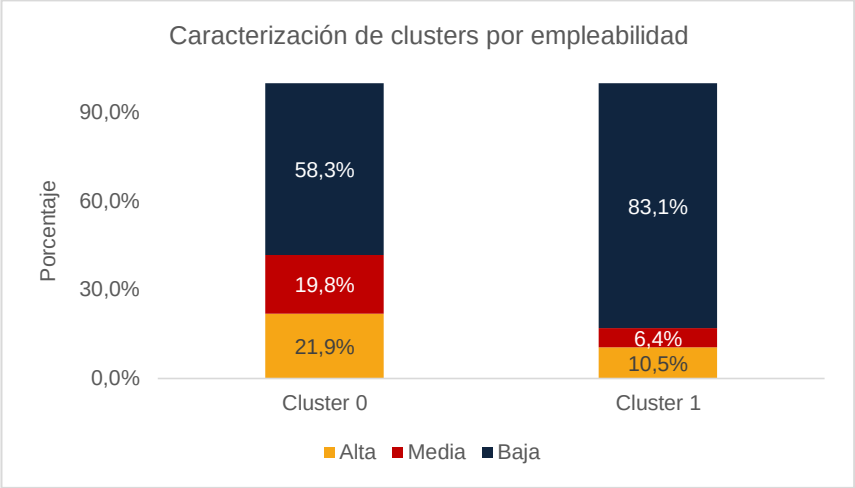


Figura 5: *Caracterización de clusters por empleabilidad digital identificados mediante análisis no supervisado*

Para predecir los perfiles de empleabilidad digital, se compararon los algoritmos Random Forest, Regresión Logística Multinomial y XGBoost. Este último demostró el mejor rendimiento, confirmándose como el modelo óptimo. Con el fin de maximizar su capacidad predictiva, se sometió a un proceso de optimización de hiperparámetros mediante búsqueda aleatoria y validación cruzada. La configuración óptima encontrada fue: learning_rate: 0.1, max_depth: 3, n_estimators: 200 y subsample: 0.8.

El modelo XGBoost optimizado se evaluó sobre un conjunto de prueba de 16,536 observaciones, logrando una precisión global (accuracy) del 76.97%. Esta métrica indica que el modelo clasifica correctamente el perfil de empleabilidad digital en aproximadamente 3 de cada 4 casos, lo que constituye un nivel de acierto sólido para un problema de clasificación multiclase con tres categorías desbalanceadas

Un análisis detallado de las métricas por clase revela el desempeño diferencial del modelo, ver tabla 1:

- Empleabilidad Baja: El modelo muestra un excelente rendimiento para la clase mayoritaria, con una precisión del 0.86 y un recall del 0.92. Esto significa que es muy efectivo para identificar correctamente a los individuos con baja empleabilidad digital.
- Empleabilidad Alta: El desempeño es moderado, con un recall (0.70) mayor que la precisión (0.52). Esto indica que el modelo es razonablemente bueno para capturar a la mayoría de los individuos con alta empleabilidad (solo se le escapan 3 de cada 10), pero a costa de un número considerable de falsos positivos (clasifica como "Alta" a muchos que no lo son).
- Empleabilidad Media: Esta es la clase más difícil de predecir para el modelo, con una precisión del 0.48 y un recall muy bajo (0.11). El modelo struggle para identificar correctamente a este grupo, confundiéndolo frecuentemente con las clases Alta y Baja.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Tabla 1: *Reporte de clasificación del modelo XGBoost optimizado.*

Clase	Precisión	Recall	Puntuación F1	Casos de Soporte
Alta	0.52	0.70	0.60	2,771
Baja	0.86	0.92	0.89	11,497
Media	0.48	0.11	0.18	2,268
Accuracy			0.77	16,536
Macro Avg	0.62	0.57	0.55	16,536
Weighted Avg	0.75	0.77	0.74	16,536

La matriz de confusión permite visualizar estos patrones de error, ver figura 6. Los principales errores de clasificación son: 1,051 casos de la clase *Media* clasificados como *Baja* (6.36% del total de predicciones) y 971 casos de Media clasificados como Alta (5.87%). Asimismo, se observa una confusión bidireccional entre Alta y Baja (718 y 806 casos, respectivamente). Estos hallazgos sugieren que el modelo encuentra difícil distinguir los perfiles intermedios y, en menor medida, confunde los extremos del espectro de empleabilidad.

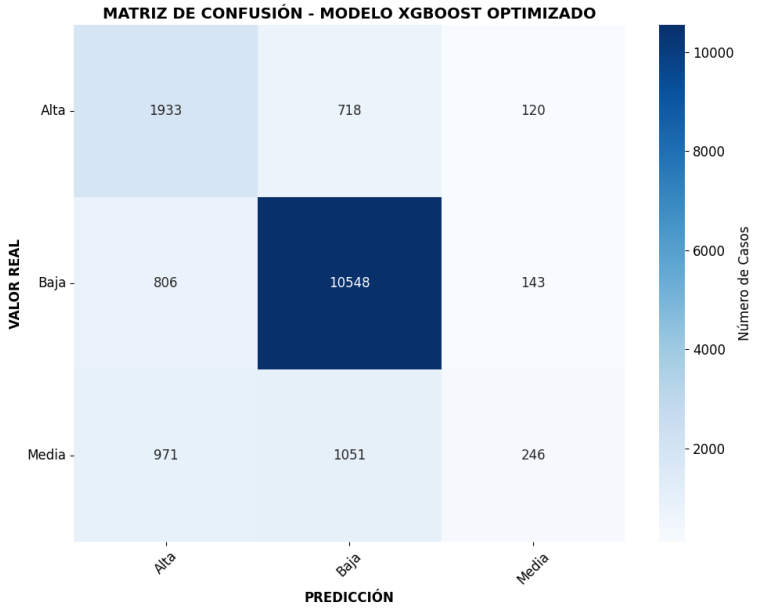


Figura 6: *Matriz de confusión del modelo XGBoost optimizado.*

Finalmente, para comprender los factores que impulsan las predicciones, se analizó la importancia de las variables en el modelo XGBoost, identificó que la educación es con gran diferencia, el principal determinante de empleabilidad digital (88.45% de importancia). Los demás factores analizados sector económico (6.61%), zona geográfica (2.49%), edad (1.70%) y género (0.65%) presentaron una influencia notablemente menor en la capacidad predictiva del modelo, ver figura 7

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

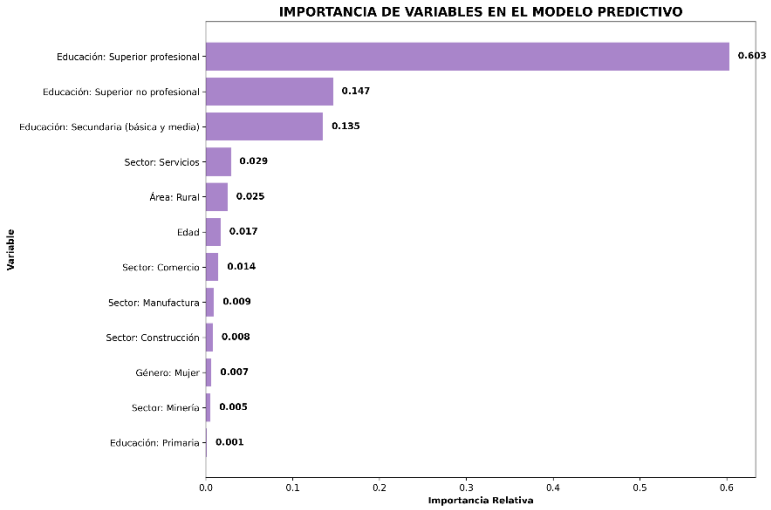


Figura 7: *Importancia de variables en el modelo predictivo de empleabilidad digital*

Respecto a las relaciones estadísticas, el análisis de correlaciones de Pearson confirmó relaciones significativas: nivel educativo (0.566, moderada positiva), sector económico (0.338, moderada positiva), edad (-0.192, débil negativa), área geográfica (-0.237, débil negativa) y género (0.064, muy débil positiva). Asimismo, se identificaron correlaciones importantes entre predictores como área geográfica y sector económico (-0.526) y nivel educativo con sector económico (0.417), ver figura 8.

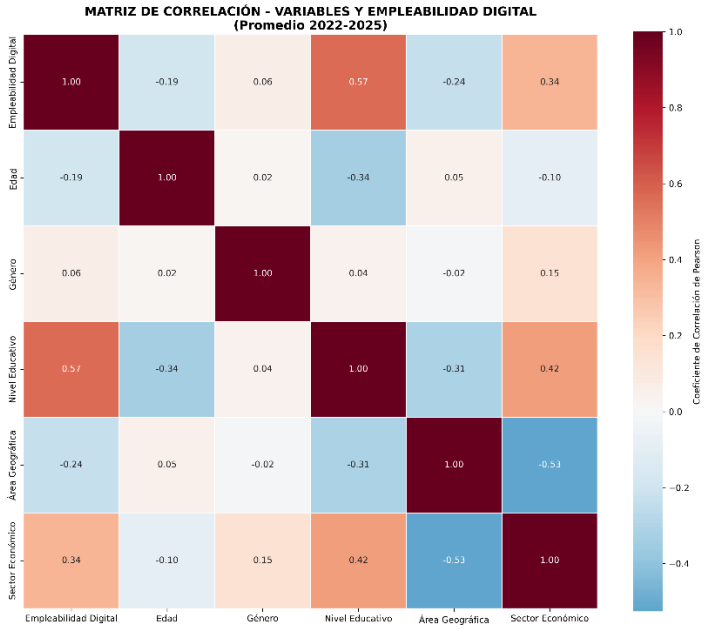


Figura 8: *Correlación de variables sociodemográficas con la empleabilidad digital*

Finalmente, en cuanto a las competencias específicas, la distribución de habilidades avanzadas mostró que el 67.4% de la población reportó cero habilidades, mientras solo el 1.6% dominó las siete habilidades evaluadas, evidenciando una concentración en competencias básicas. En relación al acceso tecnológico, los patrones mostraron:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

internet diario (65.1%), computadora portátil (24.8%) y computadora de escritorio (22.3%), con solo el 33.4% cumpliendo la combinación requerida para la dimensión de acceso.

4. Discusión

El diagnóstico de empleabilidad digital en Ecuador revela un escenario crítico: apenas el 16.8% de la población empleada presenta un perfil competitivo para los empleos digitales, mientras que el 69.5% se encuentra en situación de desventaja. Estos hallazgos coinciden con las advertencias de [19] sobre las profundas desigualdades estructurales en América Latina y con el Banco Interamericano de Desarrollo (2025) respecto a los desafíos regionales en la transición digital. El modelo predictivo desarrollado corrobora esta segmentación, demostrando una alta capacidad para identificar el perfil mayoritario de baja empleabilidad (precisión del 86%, recall del 92%), pero revelando simultáneamente dificultades para clasificar los perfiles intermedios, lo que sugiere la existencia de transiciones graduales y solapamientos en las competencias digitales de la población.

Los resultados obtenidos confirman lo señalado por [20] respecto al papel determinante de la educación en el desarrollo de competencias digitales. En el caso ecuatoriano, coincidiendo con [10], este estudio evidencia que la educación superior profesional actúa como un divisor crítico. El análisis de importancia de variables en el modelo XGBoost refuerza cuantitativamente esta observación, donde el nivel educativo emerge como el predictor abrumadoramente dominante (88.45% de importancia relativa). Este hallazgo valida estadísticamente que el sistema educativo actual opera como el principal mecanismo de estratificación digital, abriendo las puertas a empleos digitales avanzados para quienes acceden a educación superior, mientras marca una frontera infranqueable para quienes carecen de ella, profundizando así la brecha de oportunidades en la economía digital.

Cuando se analiza el género, se muestra un patrón contrastante que difiere de estudios previos, sugiriendo un posible cambio en las dinámicas de apropiación tecnológica por género en Ecuador. Sin embargo, la persistencia de brechas sectoriales y la muy débil influencia del género en el modelo predictivo (0.65% de importancia) indican que los factores estructurales siguen siendo más determinantes que las variables individuales [4]. Esta mínima importancia relativa en el modelo sugiere que, si bien existen diferencias descriptivas en la distribución por género, estas no constituyen factores explicativos significativos cuando se controla por el efecto de otras variables estructurales.

La segmentación por edad evidencia problemas de inclusión digital entre generaciones [4]. El modelo predictivo corrobora esta brecha, aunque con una influencia moderada (1.70% de importancia), superior al género pero muy inferior a la educación. La diferencia de casi 6 años entre los promedios de edad de los perfiles alto y bajo, combinada con la dificultad del modelo para clasificar correctamente a los trabajadores de mayor edad, sugiere la existencia de una brecha generacional digital que requiere políticas diferenciadas y programas de capacitación específicos para trabajadores seniors.

Los resultados sectoriales confirman lo señalado por [21]: la transformación digital no llega a todos por igual. El modelo predictivo identifica al sector económico como el segundo factor en importancia (6.61%), validando empíricamente las profundas disparidades observadas. Mientras el sector servicios avanza con un 28.8% de empleabilidad alta, la agricultura se queda en un 1.4%, mostrando una brecha que refleja una doble vulnerabilidad: no solo es el sector con menor preparación digital, sino que coincide con la población rural, quedando atrapada en un círculo de exclusión tecnológica y territorial. Esta doble vulnerabilidad se manifiesta en el modelo a través de la confusión entre categorías, donde trabajadores del sector agrícola con empleabilidad media son frecuentemente clasificados en la categoría baja.

El desempeño del modelo XGBoost (76.97% de precisión) demuestra la utilidad del machine learning para predecir la empleabilidad digital. La arquitectura optimizada del modelo, con una profundidad limitada de árboles (max_depth=3) y una tasa de aprendizaje conservadora (0.1), sugiere que las relaciones entre variables son reconocibles y estables, aunque con cierta complejidad que requiere múltiples iteraciones (200 estimadores). El análisis de las métricas por clase revela un patrón característico de problemas con datos desbalanceados: mientras el modelo muestra excelente desempeño para la clase mayoritaria (baja empleabilidad), presenta desafíos significativos para identificar la clase media, con un recall críticamente bajo (11%) que indica la dificultad para capturar las transiciones y matices en el desarrollo de competencias digitales.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Es importante reconocer que los resultados están sujetos a limitaciones metodológicas. Por un lado, el uso de datos declarados conlleva el riesgo de que los participantes presenten una imagen favorable de sus habilidades, lo que podría sobrestimar los niveles reales de empleabilidad digital. Por otro lado, el enfoque en variables estructurales dejó fuera elementos psicosociales relevantes, como la autoeficacia o las actitudes hacia la tecnología, que seguramente aportarían matices importantes a la comprensión del fenómeno. Las confusiones observadas en la matriz de confusión, particularmente entre las categorías alta y media, podrían reflejar precisamente la ausencia de estas dimensiones psicosociales en el modelo.

Desde una perspectiva epistémica más amplia, la dificultad del modelo para clasificar la categoría 'Media' (Recall 0.11) sugiere que la empleabilidad digital no se comporta estrictamente bajo la lógica clásica binaria, sino que presenta características propias de la **Lógica Neutrosófica**. Mientras que la empleabilidad 'Alta' y 'Baja' pueden asociarse a los componentes de Verdad (T) y Falsedad (F) respectivamente, el perfil 'Medio' representa un alto grado de **Indeterminación (I) [18-17]**.

Los individuos en esta franja poseen competencias fragmentadas (e.g., saben usar redes sociales pero no hojas de cálculo), lo que genera una ambigüedad que los algoritmos tradicionales de *crisp logic* (como XGBoost estándar) fuerzan a una clasificación única, perdiendo matices. Una aproximación futura mediante **conjuntos neutrosóficos de valor único (SVNS)** (Smarandache 2018) permitiría modelar este grupo no como una clase fallida, sino como un subconjunto donde la función de pertenencia a la indeterminación es dominante (I > T, F), ofreciendo una representación matemática más fiel de la transición digital incompleta.

5. Conclusiones

La investigación identificó obstáculos críticos en la transición hacia el trabajo digital en Ecuador. Los hallazgos mostraron que factores como la educación, la edad, la ubicación geográfica y el sector económico actuaron como filtros que restringen el acceso a las habilidades necesarias para los empleos del futuro. Los hallazgos demostraron que la mayoría de los trabajadores ecuatorianos se encuentran en situación de desventaja digital, con una distribución marcadamente polarizada donde solo una minoría ha logrado desarrollar las competencias necesarias para insertarse efectivamente en la economía digital.

En cuanto a la educación se mostró como el elemento clave en la formación de las brechas digitales, señalando que el grado de formación es el principal factor que predice la empleabilidad en el ámbito digital. La dramática diferencia entre los extremos del espectro educativo -desde 0.1% en personas sin educación hasta 46.6% en profesionales universitarios evidencia que el sistema educativo actual no está generando las competencias digitales necesarias para la mayoría de la población.

Las brechas territoriales emergieron como otro hallazgo crucial, mostrando una profunda división entre áreas urbanas (21.2% empleabilidad alta) y rurales (5.3%), que refleja desigualdades estructurales en infraestructura, oportunidades económicas y acceso a servicios educativos. El análisis generacional reveló un patrón preocupante de exclusión digital que afecta particularmente a los trabajadores mayores de 55 años (12.3% empleabilidad alta versus 25.4% en jóvenes de 25-34 años).

La polarización sectorial detectada evidencio que los beneficios de la digitalización se están distribuidos de manera desigual, con sectores tradicionales como la agricultura (1.4% empleabilidad alta) mostrando niveles críticos de rezago digital, mientras servicios profesionales alcanzan 61.4%. El modelo predictivo desarrollado valido la efectividad de las técnicas de machine learning para el análisis de empleabilidad digital, mientras que la identificación de clusters naturales sugiere la necesidad de políticas diferenciadas.

Para las políticas públicas, los resultados señalaron la necesidad de acciones que conecten la formación en competencias digitales, el acceso a infraestructura tecnológica y las oportunidades del desarrollo económico. Se recomienda implementar un programa de transformación digital en el que los sectores económicos tradicionales como la agricultura, que combine subsidios del 50% para tecnologías básicas, capacitación sectorial e incentivos fiscales; establecer un sistema nacional de certificación de competencias digitales con meta de 500,000 trabajadores certificados en 5 años; y ejecutar una estrategia de inclusión digital rural que expanda conectividad a 1,000 comunidades, cree centros comunitarios digitales e impulse programas de agricultura de precisión para 50,000 pequeños agricultores. Estas acciones coordinadas entre sector público, privado y académico son esenciales para

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

construir una fuerza laboral preparada para los requerimientos de la economía digital, evitando que las brechas existentes se traduzcan en desigualdades económicas y sociales permanentes.

Para futuras investigaciones, se recomienda incorporar métodos mixtos que combinen el análisis cuantitativo con aproximaciones cualitativas para profundizar en las barreras culturales y organizacionales identificadas. Igualmente, sería beneficioso llevar a cabo investigaciones longitudinales que faciliten el análisis de las trayectorias relacionadas con la empleabilidad digital, así como la evaluación de la influencia de políticas públicas concretas. La incorporación de variables psicosociales y la aplicación de técnicas de balanceo de datos podrían mejorar significativamente la capacidad predictiva para las clases minoritarias.

Los resultados evidencian la necesidad de políticas que aborden de manera conjunta los espacios de educación y sector económico, priorizando a la población en riesgo de exclusión digital. La capacidad predictiva de los modelos empleados, junto con el análisis.

6. **Referencias bibliográficas.**

[1]. Álvarez Calvo, R. F. (2025). La IA y el Machine Learning aplicada a la ingeniería industrial a favor de la mejora en la gestión de operaciones. Rhombus, 5(Especial), 1-20. https://doi.org/10.63058/rhombus.v5iEspecial.343

[2]. Angrave, D., Charlwood, A., Kirkpatrick, I., Lawrence, M., & Stuart, M. (2016). HR and analytics: Why HR is set to fail the big data challenge. Human Resource Management Journal, 26(1), 1-11. https://doi.org/10.1111/1748-8583.12090

[3]. Banco Interamericano de Desarrollo. (2025). Habilidades para el trabajo en América Latina y el Caribe: impulsar el talento para un futuro sostenible y equitativo. http://dx.doi.org/10.18235/0013593

[4]. Bercovich, N. & Muñoz, M. (2022). Rutas y desafíos para cerrar las brechas de género en materia de habilidades digitales. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://www.cepal.org/es/publicaciones/47939-rutas-desafios-cerrar-brechas-genero-materia-habilidades-digitales

[5]. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785-794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

[6]. Coello Yagual, R. R., & Parrales Ponce, J. D. (2020). Análisis de las ventajas y desventajas del Big Data y el Cloud Computing en el proceso de la toma de decisiones de las empresas que practican comercio electrónico. *Revista Científica Ciencia y Tecnología*, *20*(25), 45-62. https://doi.org/10.47189/RCCT.V20I25.279

[7]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). Panorama social de América Latina 2020. https://repositorio.cepal.org/entities/publication/61652648-a144-413a-bab4-1eae639b3ecf

[8]. Del Carpio-Mendoza, R. (2024). Predicción del rendimiento académico utilizando modelos de aprendizaje automático: Una revisión sistemática de la literatura. 593 Digital Publisher CEIT, 9(6), 1038-1054. https://doi.org/10.33386/593dp.2024.6.2797

[9]. Durán Bernardino, M. (2021). Digitalización y empleo: retos del futuro del trabajo desde una perspectiva de género. Revista de Estudios Jurídicos, (21), e6761. https://doi.org/10.17561/rej.n21.6761

[10]. Flores Merchán, L. A. (2023). Análisis del empleo adecuado en Ecuador durante el 2023, a través de la integración de modelos econométricos y algoritmos de machine learning (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas, Ecuador. https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/16797

[11]. Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). El Mercado Laboral Ecuatoriano en la Era Digital. Cuadernos de Trabajo - Estadísticas Sociales. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/cuadernos_trabajo/Estadisticas_vacantes_ML_WS.pdf

[12]. Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2025). Tecnologías de la Información y Comunicación - TIC. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/tecnologias-de-la-informacion-y-comunicacion-tic/

[13]. Marler, J. H., & Boudreau, J. W. (2017). An evidence-based review of HR analytics. The International Journal of Human Resource Management, 28(1), 3-26. https://doi.org/10.1080/09585192.2016.1244699

[14]. Mina, A. (2020). Big data e inteligencia artificial en el futuro manejo de pacientes. ¿Por dónde empezar? ¿En qué punto nos encontramos? Avances en medicina de laboratorio, 1(3), 20200052. https://doi.org/10.1515/almed-2020-0052

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[15]. OCDE. (2019). Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264311992-en

[16]. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825-2830. https://jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf

[17]. Smarandache, F. (2018). Operadores con conjunto neutrosóficos de valor único Oversets, Undersets y Offset. *Neutrosophic Computing and Machine Learning. ISSN 2574-1101*, *4*(4), 03-07.

[18]. Smarandache, F. (2025). Indeterminación en las Teorías Neutrosóficas y sus Aplicaciones. *Neutrosophic Computing and Machine Learning. ISSN 2574-1101*, *39*, 1-7.

[19]. UNESCO. (2022). Fortaleciendo las sociedades del conocimiento: Marco para la acción. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381995

[20]. Van Laar, E., Van Deursen, A. J. A. M., Van Dijk, J. A. G. M., & De Haan, J. (2017). The relation between 21st-century skills and digital skills: A systematic literature review. Computers in Human Behavior, 72, 577-588. https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.03.010

[21]. Varela Bohórquez, F. (2025). El futuro del trabajo en la transformación digital: El reskilling y upskilling como procesos necesarios para satisfacer las nuevas demandas de empleo. Revista de Economía Digital, 10(2), 78-95. http://hdl.handle.net/10017/65545

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2026

University of New Mexico

Sistema de recomendación neutrosófico multicriterio para personalización de cursos en entornos e-learning

Neutrosophic multi-criteria recommendation system for course personalization in e-learning environments

Alfonso A. Guijarro-Rodríguez [1], Judith E. Flores Rivera [2], Tatiana M. Alcivar Maldonado[3], Jesús A. Monserrate-Reina[4] y Braulio S. Marcalupo-Zamora[5]

[1] Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador; alfonso.guijarror@ug.edu.ec
[2] Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador; judith.floresr@ug.edu.ec
[3] Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador; tatiana.alcivarm@ug.edu.ec
[4] Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador; jesus.monserrater@ug.edu.ec
[5] Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayas, Ecuador; braulio.marcalupoz@ug.edu.ec

Resumen. Este artículo describe el desarrollo de un prototipo funcional de sistema de recomendación para plataformas e-learning, fundamentado en lógica neutrosófica y técnicas de decisión multicriterio. El objetivo consistió en diseñar una herramienta capaz de personalizar recomendaciones de cursos de acuerdo con las preferencias individuales de los estudiantes. Se utilizaron los algoritmos AHP y TOPSIS en sus versiones neutrosóficas, donde se modelaron los criterios de relevancia, dificultad y tiempo mediante tripletas (T, I, F) para representar el grado de verdad, indeterminación y falsedad en la evaluación. La metodología implementada permitió capturar las preferencias del estudiante desde una interfaz web, generar automáticamente la matriz de comparación AHP neutrosófica y calcular los pesos relativos para cada criterio. Posteriormente, se aplicó TOPSIS para determinar el orden óptimo de los cursos. La aplicación fue desarrollada con Python (Flask), incorporando visualizaciones dinámicas, carga de datasets en formato CSV y generación automática de recomendaciones justificadas. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema puede generar rankings coherentes y adaptativos, incluso en condiciones de incertidumbre. Se concluye que la lógica neutrosófica es adecuada para mejorar la personalización en entornos educativos, permitiendo representar mejor la subjetividad de las preferencias estudiantiles y la ambigüedad inherente a los datos disponibles.
Palabras Claves: sistemas de recomendación; lógica neutrosófica; e-learning; TOPSIS; AHP.

Abstract. This article describes the development of a functional prototype recommendation system for e-learning platforms, based on neutrosophic logic and multi-criteria decision techniques. The objective was to design a tool capable of personalizing course recommendations according to students' individual preferences. The AHP and TOPSIS algorithms were used in their neutrosophic versions, where the criteria of relevance, difficulty, and time were modeled using triplets (T, I, F) to represent the degree of truth, indeterminacy, and falsehood in the evaluation. The methodology implemented allowed us to capture student preferences from a web interface, automatically generate the neutrosophic AHP comparison matrix, and calculate the relative weights for each criterion. Subsequently, TOPSIS was applied to determine the optimal order of the courses. The application was developed with Python (Flask), incorporating dynamic visualizations, CSV format dataset loading, and automatic generation of justified recommendations. The results obtained demonstrate that the system can generate consistent and adaptive rankings, even under conditions of uncertainty. It is concluded that neutrosophic logic is suitable for improving personalization in educational environments, allowing for better representation of the subjectivity of student preferences and the ambiguity inherent in the available data.

Keywords: recommendation systems; neutrosophic logic; e-learning; TOPSIS; AHP.

1 Introducción

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La tendencia que muestran las plataformas digitales de aprendizaje en los últimos años es creciente, y el sector educativo no es la excepción, los entornos son cada vez más autónomos y adaptables para cada estudiante, de tal manera que ellos puedan demostrar su progreso según su ritmo, preferencias y disponibilidad [1]. Esta personalización del aprendizaje ayuda a que todos se sientan incluidos y mejorando la memoria del conocimiento. Sin embargo, los sistemas tradicionales de recomendación tienen problemas para adaptarse a las necesidades individuales de los estudiantes, ya que suelen dar recomendaciones generales.

El estudio académico ha confirmado que los sistemas de recomendación (SR) son herramientas clave para mejorar la experiencia en la educación. Han evolucionado desde métodos colaborativos y centrados en contenido hasta modelos híbridos más complejos [3]. A pesar de estos avances, todavía hay desafíos importantes: la dispersión de datos, la falta de adaptabilidad y, sobre todo, la incertidumbre en las preferencias y comportamientos de los estudiantes [4]. Debido a estas limitaciones, muchas investigaciones han explorado nuevas técnicas en desarrollo. Por ejemplo, [5] sugiere usar autoencoders profundos para abordar problemas de dispersión de datos. Por otro lado, [6] crea un sistema bayesiano que reconoce la incertidumbre, y [7] propone un modelo combinado DeepFM-SVD++ para mejorar el aprendizaje en entornos optimizados. Aunque estos enfoques muestran avances importantes, no incluyen claramente un marco sólido que refleje la indeterminación en las preferencias académicas.

En este contexto, los conjuntos neutrosóficos resultan ser una buena opción porque permiten mostrar al mismo tiempo diferentes niveles de verdad, duda y falsedad. Esto es especialmente útil para evaluar varios criterios en el ámbito educativo [8]. Sin embargo, su uso en plataformas de aprendizaje en línea todavía está en fases tempranas y no tiene validaciones sólidas que demuestren su efectividad en el ámbito educativo [4]. También, las metodologías de decisión multicriterio, como AHP, TOPSIS o VIKOR, se han usado mucho para evaluar factores cualitativos y cuantitativos en el ámbito educativo [9]. Sin embargo, su uso suele ser separado, sin beneficiarse de las ventajas que un modelo híbrido podría brindar con un enfoque neutrosófico [10].

Por lo tanto, se nota que hay una falta en la investigación sobre modelos híbridos que mezclen técnicas multicriterio con lógica neutrosófica para personalizar contenidos en entornos de aprendizaje electrónico. Esta falta de capacidad limita lo que los sistemas actuales pueden hacer para dar recomendaciones que sean adaptativas, flexibles y que se ajusten a las necesidades específicas de los estudiantes.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es crear un prototipo de recomendación que tenga en cuenta varios criterios, basado en conjuntos neutrosóficos, y que combine los métodos AHP y TOPSIS. Esto se hará para personalizar contenidos en plataformas de aprendizaje en línea y evaluar su rendimiento en un entorno de prueba simulado. Hoy en día, el crecimiento de las plataformas de aprendizaje en línea ha causado un gran cambio en la educación, creando espacios más independientes y flexibles donde cada estudiante puede progresar a su propio ritmo, según sus preferencias y tiempo disponible [1]. Esta adaptación del aprendizaje promueve la inclusión y mejora la retención del conocimiento. Sin embargo, los sistemas tradicionales de recomendación tienen límites para adaptarse a las necesidades individuales de los estudiantes, ya que a menudo dan recomendaciones generales.

El estudio académico ha confirmado que los sistemas de recomendación (SR) son herramientas clave para mejorar la experiencia en la educación. Estos sistemas han evolucionado desde métodos colaborativos y basados en contenido hasta modelos híbridos más complejos [3]. A pesar de este avance, todavía hay grandes desafíos: la dispersión de datos, la falta de adaptación y, sobre todo, la incertidumbre sobre las preferencias y comportamientos de los estudiantes [4]. Por estas limitaciones, muchas investigaciones han estudiado técnicas en desarrollo. Por ejemplo, [5] sugiere usar autoencoders profundos para abordar problemas de dispersión de datos, [6] crea un sistema bayesiano que toma en cuenta la incertidumbre y [7] propone un modelo combinado DeepFM-SVD++ para entornos de aprendizaje mejorados. Aunque estos enfoques muestran avances importantes, no incluyen de forma clara un marco sólido que represente la falta de certeza en las preferencias académicas.

Dentro de este contexto, los conjuntos neutrosóficos son una opción interesante porque permiten mostrar al mismo tiempo niveles de verdad, indeterminación y falsedad. Esto es muy útil para evaluar diferentes criterios en el ámbito educativo [8]. Sin embargo, su uso en plataformas de aprendizaje en línea todavía está en desarrollo y no tiene validaciones estrictas que demuestren su efectividad en entornos educativos [4]. Además, las metodologías de decisión multicriterio, como AHP, TOPSIS o VIKOR, se han usado mucho para evaluar factores tanto cualitativos como cuantitativos en el ámbito educativo [9]. Sin embargo, su uso suele ser separado, sin aprovechar los beneficios que un modelo híbrido podría brindar con un enfoque neutrosófico [10].

Por tanto, un sistema que considere modelos híbridos que mezclen técnicas multicriterio con lógica neutrosófica para personalizar los contenidos en entornos de aprendizaje en línea limita cómo los sistemas actuales pueden sugerir

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

recomendaciones que se adapten, sean flexibles y se alineen con las necesidades específicas de los estudiantes.

El objetivo de este estudio es crear un prototipo de sistema de recomendación que utilice conjuntos neutrosóficos combinando métodos AHP y TOPSIS. Esto servirá para personalizar los contenidos en las plataformas de aprendizaje y analizar su rendimiento en un entorno de prueba simulado.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Sistemas de Recomendación en e-learning

Las plataformas digitales han hecho que se usen más los sistemas de recomendación (SR), y así poder personalizar el contenido para cada usuario. En el ámbito educativo, las recomendaciones pueden basarse en los estilos de aprendizaje, los intereses o los niveles de conocimiento de los estudiantes, y mejorar la asignación de recursos didácticos para aumentar el nivel de conocimiento y motivación de los estudiantes (Xia et al., 2022; Javed et al., 2021). Los SR tradicionalmente tienen tres enfoques principales: filtrado colaborativo, filtrado por contenido e híbrido.

Los SR han sido esenciales para adaptar los contenidos de manera flexible a las necesidades de cada estudiante. Estudios recientes muestran que la adaptación del e-learning apoya la comprensión, la memorización y el rendimiento, y promueve la inclusión [2]. Sin embargo, los modelos clásicos tienen serias restricciones para resolver problemas como la escasez de datos y la incertidumbre en las preferencias de los estudiantes. Esto puede resultar en recomendaciones demasiado vagas o sin sentido [12].

Debido a estas limitaciones, varias investigaciones han propuesto soluciones basadas en inteligencia artificial y aprendizaje profundo. Por ejemplo, [5] usan autoencoders profundos para resolver la dispersión de datos, [6] crean un modelo bayesiano que considera la incertidumbre y [7] proponen un modelo híbrido DeepFM-SVD++ para ambientes de aprendizaje potenciados por tecnología. Estos estudios han logrado avances, pero aún no cuentan con una estructura para manejar la incertidumbre y las contradicciones en las preferencias de los estudiantes.

2.2. Métodos de Decisión Multicriterio (MCDM)

La evaluación multicriterio es una exigencia en la educación, ya que en ella intervienen criterios como el grado de dificultad, la pertinencia temática, el tiempo y el estilo de aprendizaje de cada estudiante. En este contexto, los métodos multicriterio de toma de decisiones (MCDM) se han establecido como enfoques efectivos para modelar y optimizar problemas complejos de decisión (Hii et al., 2022).

Entre las más aplicadas se encuentran el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y el método de Clasificación por la Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS). El primero jerarquiza los criterios y obtiene pesos relativos de importancia y el segundo ordena alternativas en función de la proximidad a soluciones ideales positivas y negativas. Estudios como [10] y [13] han probado su eficacia en contextos educativos, teniendo en cuenta tanto variables cuantitativas como cualitativas para mejorar las recomendaciones personalizadas.

Sin embargo, cuando se utilizan de forma aislada, estas técnicas pueden producir soluciones subóptimas y son poco adaptables a entornos cambiantes. Por ello, se ha propuesto el uso de modelos híbridos AHP-TOPSIS para aprovechar lo mejor de ambos y generar recomendaciones más consistentes y flexibles [9].

2.3. Conjuntos Neutrosóficos y Aplicaciones Educativas

La lógica neutrosófica [14] amplía la lógica borrosa, que puede manejar datos ciertos (T), indeterminados (I) o falsos (F) al mismo tiempo. El objetivo es permitir que otras técnicas tengan más libertad para trabajar con datos incompletos, inexactos o contradictorios.

En educación, la neutrosofía es una nueva forma de manejar la incertidumbre y adaptar contenidos en entornos virtuales. Por ejemplo, en [8] muestran que pueden superar las limitaciones de los modelos tradicionales cuando hay varios criterios imprecisos, y en [4] demostraron que su uso en sistemas de recomendación mejora el grado de personalización posible.

Estudios recientes confirman este potencial: [15] la lógica neutrosófica supera los modelos borrosos al mostrar certeza, falsedad e incertidumbre; [16] muestran su utilidad en situaciones complejas, y [17] proponen combinarla con nuevas tecnologías como Web3 y Causal AI.

Además, en [18] se presentan modelos de recomendación que utilizan hipergrafos difusos neutrosóficos, lo que mejora la precisión y la cobertura en situaciones inciertas. El uso de la lógica neutrosófica en la educación y en sistemas de recomendación para e-learning todavía es limitado y hay pocas pruebas de casos reales. Esto permite usar la neutrosofía

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

junto con métodos multicriterio como AHP y TOPSIS para crear modelos híbridos que ofrezcan recomendaciones más flexibles y que se ajusten mejor a las preferencias de los estudiantes.

3. Metodología

3.1 Diseño de la investigación

La presente investigación se enmarca en un estudio de tipo aplicado, con un enfoque cuantitativo y exploratorio, orientado al diseño y validación de un prototipo de sistema de recomendación multicriterio basado en conjuntos neutrosóficos. El alcance del trabajo se limita a la construcción de un modelo funcional probado en un entorno controlado con datos simulados, sin integración a plataformas e-learning institucionales, lo cual lo ubica como una investigación de carácter experimental inicial [19].

3.2 Modelo propuesto

El modelo desarrollado se fundamenta en la combinación de técnicas multicriterio AHP y TOPSIS bajo un contexto neutrosófico. Para ello, se utilizó la representación tripartita ⟨T, I, F⟩ (verdad, indeterminación y falsedad) propuesta por [14], la cual permite capturar la incertidumbre inherente a las preferencias estudiantiles.

- **AHP neutrosófico**: utilizado para calcular los pesos relativos de los criterios de personalización, mediante matrices de juicio transformadas en valores neutrosóficos.
- **TOPSIS neutrosófico**: aplicado para clasificar las alternativas (cursos) en función de su cercanía a la solución ideal positiva y negativa, incorporando las tripletas neutrosóficas en las distancias de Hamming [15].
- **Modelo híbrido AHP–TOPSIS neutrosófico**: integra ambos métodos, asignando pesos con AHP y evaluando alternativas con TOPSIS, lo cual mejora la coherencia de las recomendaciones en comparación con el uso individual de cada técnica [10].

3.3 Procedimiento

El proceso metodológico seguido se estructura en cinco etapas:

1. **Selección de criterios**: a partir de la revisión de literatura, se eligieron criterios relevantes para la personalización en entornos e-learning: relevancia del curso, nivel de dificultad y duración estimada [9].
2. **Definición de perfiles simulados**: se construyeron perfiles estudiantiles hipotéticos que representan diferentes combinaciones de preferencias.
3. **Transformación neutrosófica**: las preferencias de cada perfil fueron convertidas en matrices de juicio neutrosóficas, utilizando escalas discretas [T, I, F].
4. **Cálculo multicriterio**: se determinaron los pesos mediante AHP neutrosófico y se evaluaron las alternativas con TOPSIS neutrosófico.
5. **Comparación de resultados**: se analizaron los rankings obtenidos con AHP, TOPSIS y el modelo híbrido, con el fin de validar la consistencia y mejora del prototipo.

3.4 Implementación tecnológica

El prototipo fue implementado en lenguaje de programación Python, utilizando el framework Flask para la construcción de una aplicación web de prueba. Para los cálculos matemáticos se emplearon librerías como NumPy y Pandas, y los datos se gestionaron de manera local en un entorno controlado. Este diseño permitió la experimentación sin necesidad de integrar bases de datos reales, manteniendo el prototipo como una prueba de concepto factible y replicable [20].

3.5 Validación del prototipo

La validación consistió en comparar los resultados del modelo híbrido AHP–TOPSIS neutrosófico frente a los rankings generados por AHP y TOPSIS de manera individual. El análisis se centró en la coherencia de las recomendaciones con las preferencias establecidas en los perfiles simulados. Los resultados mostraron que el modelo híbrido produjo recomendaciones más ajustadas y consistentes, superando las limitaciones observadas en los métodos aplicados por separado [4].

4. Resultados

4.1. Escenario de validación y criterios de comparación

Se validó el modelo en un entorno controlado filtrando la categoría Business Finance y configurando las preferencias del perfil estudiantil en Relevancia = 7, Dificultad = 5, Tiempo = 3. Con estos parámetros se seleccionó el Top-10 de cursos del sistema híbrido y se aplicaron luego AHP y TOPSIS completos por separado sobre el mismo conjunto, a fin de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

contrastar coherencia, diferencias y estabilidad de posiciones.

4.2. Ranking del sistema híbrido (AHP–TOPSIS neutrosófico)

El híbrido combinó los pesos personalizados (AHP) con la evaluación multicriterio (TOPSIS). El ranking obtenido fue:

1. Beginner to Pro in Excel: Financial Modeling and Valuation - 94.72%
2. Forex Trading A-Z™ - 91.96%
3. The Complete Financial Analyst Course 2017 - 87.10%
4. Options Trading – How to Win with Weekly Options - 52.69%
5. Introduction to Finance, Accounting, Modeling and Valuation - 50.71%
6. Black Algo Trading: Build Your Trading Robot - 48.23%
7. Options Trading Basics (3-Course Bundle) - 45.99%
8. Domínelo en un día. Creación de activos a partir de hoy - 44.31%
9. Forex Robots: Expect to Earn 175% P.A. - 44.21%
10. The Complete Investment Banking Course 2017 - 42.28%.

El comportamiento muestra alta discriminación (94.72%–42.28%) y priorización consistente con las preferencias del usuario.

4.3. Resultados del AHP completo: pesos y ranking

A partir de la matriz de pares para tres criterios, los pesos obtenidos fueron: Relevancia = 58.30%, Dificultad = 27.80%, Tiempo = 13.90%, alineados con las preferencias 7–5–3. Con estos pesos, el ranking AHP (aplicado sobre el mismo Top-10) fue:

1. Beginner to Pro in Excel — 14.63%
2. The Complete Financial Analyst Course 2017 — 14.29%
3. Black Algo Trading — 12.09%
4. Forex Trading A-Z™ — 11.83%
5. Introduction to Finance… — 8.67%
6. Options Trading Basics — 8.67%
7. Options Trading – Weekly Options — 8.56%
8. Forex Robots… — 8.17%
9. The Complete Investment Banking Course 2017 — 7.90%
10. Domínelo en un día — 5.19%.

La dispersión de puntajes es más plana (14.63%–5.19%), evidenciando que AHP, por sí solo, no evalúa atributos de las alternativas sino la importancia relativa de criterios.

4.4. Resultados del TOPSIS completo: cercanías y ranking

Se calcularon las distancias a la solución ideal (D+) y anti-ideal (D−) y el coeficiente de cercanía (CC) para cada curso. El ranking TOPSIS fue:

1. The Complete Financial Analyst Course 2017 — 73.22%
2. Beginner to Pro in Excel — 72.59%
3. Forex Trading A-Z™ — 59.03%
4. Black Algo Trading — 47.24%
5. Options Trading Basics — 31.48%
6. Options Trading – Weekly Options — 29.76%
7. Introduction to Finance… — 26.30%
8. Forex Robots… — 23.72%
9. The Complete Investment Banking Course 2017 — 22.94%
10. Domínelo en un día — 1.14%.
    TOPSIS exhibe mayor dispersión (73.22%–1.14%) que AHP, pero al no incorporar pesos personalizados, ofrece una jerarquía técnica objetiva pero genérica.

4.5. Desempeño del modelo híbrido frente a AHP y TOPSIS

El ranking generado por el modelo híbrido AHP–TOPSIS neutrosófico mostró mayor capacidad discriminativa (94.72%–42.28%) que AHP, cuyo rango de valores fue más estrecho (14.63%–5.19%), y mayor coherencia con las preferencias del perfil estudiantil en comparación con TOPSIS, que si bien exhibió un rango amplio (73.22%–1.14%), careció de ponderación personalizada. Estos resultados confirman que el modelo híbrido aprovecha la fortaleza de AHP para reflejar

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

preferencias del usuario y la capacidad de TOPSIS para distinguir entre alternativas, generando una solución más balanceada.

4.6. Interpretación de la estabilidad en los rankings

Al analizar las posiciones de los cursos líderes, se observó que los tres métodos coincidieron en ubicar consistentemente en los primeros lugares a “Beginner to Pro in Excel”, “The Complete Financial Analyst Course 2017” y “Forex Trading A-Z™”. Esta convergencia evidencia que, más allá de las diferencias metodológicas, existe un núcleo de cursos robustos que cualquier enfoque identifica como relevantes. Sin embargo, la variación en los puestos (por ejemplo, Excel primero en el híbrido y AHP, pero segundo en TOPSIS) ilustra cómo el híbrido logra un equilibrio entre los criterios del usuario y las métricas objetivas de desempeño.

4.7. Comparación con la literatura

Estos hallazgos son coherentes con estudios previos que señalan las limitaciones de AHP y TOPSIS por separado en escenarios de decisión multicriterio [9]. Mientras AHP tiende a generar distribuciones planas y poco discriminativas, TOPSIS produce resultados técnicos objetivos, pero no necesariamente personalizados [13]. El enfoque híbrido neutrosófico desarrollado en este trabajo responde a la brecha identificada en la literatura: la falta de modelos capaces de manejar simultáneamente incertidumbre, contradicción y personalización en sistemas de recomendación educativa [8].

Asimismo, la lógica neutrosófica aportó un marco robusto para manejar la indeterminación y las preferencias no definidas del usuario, en línea con propuestas recientes que destacan la pertinencia de esta herramienta en entornos educativos y de recomendación [15]. En comparación con modelos difusos o probabilísticos, la neutrosofía permitió capturar escenarios donde coexistían grados de aceptación, rechazo e incertidumbre, lo cual fortaleció la capacidad adaptativa del prototipo.

4.8. Implicaciones prácticas

Los resultados sugieren que el modelo híbrido neutrosófico no solo mejora la pertinencia de las recomendaciones en e-learning, sino que también puede adaptarse a otros contextos donde la toma de decisiones se ve afectada por múltiples criterios y alta incertidumbre, como en gestión de recursos educativos, tutorías personalizadas o planificación curricular. De este modo, se abre la posibilidad de extender este enfoque a plataformas educativas masivas (MOOCs) y sistemas de formación corporativa, donde la diversidad de perfiles estudiantiles exige un modelo flexible y escalable.

4.9. Limitaciones y direcciones futuras

El estudio presenta algunas limitaciones:

1. El prototipo fue validado en un escenario simulado, por lo que no se incluyen datos reales de interacción estudiantil.
2. Se utilizaron únicamente tres criterios (relevancia, dificultad, tiempo), lo cual simplifica el proceso, pero puede limitar la generalización.
3. El modelo aún no incorpora dinámicas de aprendizaje automático que permitan refinar las recomendaciones a medida que evoluciona el perfil del estudiante.

Futuras investigaciones podrían integrar datasets reales de plataformas e-learning, ampliar el número de criterios y explorar la combinación del enfoque neutrosófico con técnicas de aprendizaje profundo y minería de datos. Esto permitiría evaluar su escalabilidad en escenarios de mayor complejidad y validar su aplicabilidad en entornos institucionales

4.10. Hallazgos clave del experimento

1. El híbrido AHP–TOPSIS neutrosófico ofrece el mejor balance entre personalización y evaluación técnica, con coherencia respecto a las preferencias y discriminación clara entre alternativas.
2. AHP es adecuado para pesar criterios, pero no como método final de ranking; genera resultados poco diferenciados.
3. TOPSIS produce jerarquías con buena separación de alternativas, pero requiere pesos personalizados para reflejar el interés del estudiante.
4. El diseño de validación (perfil 7–5–3 en Business Finance, comparación cruzada sobre el mismo Top-10) permite atribuir con claridad los efectos de cada método y del híbrido

5. Conclusiones

La presente investigación desarrolló y validó un modelo híbrido de recomendación basado en AHP–TOPSIS neutrosófico, diseñado para personalizar contenidos en entornos e-learning. Los resultados demostraron que este enfoque supera las limitaciones de los métodos aplicados por separado: mientras AHP refleja las preferencias del estudiante mediante pesos personalizados y TOPSIS ofrece una jerarquía objetiva de alternativas, el modelo híbrido integró ambas

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

perspectivas bajo un marco neutrosófico capaz de manejar incertidumbre, contradicción e indeterminación.

Los hallazgos evidencian que el modelo propuesto logra recomendaciones más discriminativas, coherentes y alineadas con los intereses del usuario, en comparación con los resultados de AHP y TOPSIS por separado. Este aporte resulta especialmente relevante en el contexto educativo, donde la heterogeneidad de perfiles estudiantiles exige sistemas flexibles y adaptativos.

Desde el punto de vista práctico, el modelo híbrido neutrosófico abre la posibilidad de mejorar la calidad de la personalización en plataformas de aprendizaje digital, optimizando la selección de cursos y recursos formativos. Asimismo, su aplicabilidad podría extenderse a otros escenarios con alta complejidad e incertidumbre, como la gestión de recursos educativos, los programas de tutoría y los entornos de capacitación profesional.

Finalmente, aunque el estudio presenta limitaciones —como la validación en un escenario simulado y el uso de un número reducido de criterios—, establece una base sólida para investigaciones futuras orientadas a incorporar datos reales de interacción, ampliar los factores de análisis y explorar la integración del enfoque neutrosófico con técnicas de inteligencia artificial avanzada. Con ello, se busca consolidar sistemas de recomendación más robustos, escalables y centrados en el estudiante.

BIBLIOGRAFIA

[1] J. G. Espinosa-Izquierdo, J. G. Espinosa-Izquierdo, J. A. Espinosa-Figueroa, and G. B. Espinosa-Arreaga, “E-learning una herramienta necesaria para el aprendizaje,” *Polo del Conocimiento*, vol. 6, no. 3, pp. 659–669, Mar. 2021, doi: 10.23857/pc.v6i3.2394.

[2] A. Z. Abualkishik and A. Li, “Network user interest mining method based on Neutrosophic cluster analysis,” *International Journal of Neutrosophic Science*, vol. 18, no. 2, pp. 186–198, 2022, doi: 10.54216/IJNS.180203.

[3] V. I. Bertossi, L. Romero, and M. de los Milagros Gutiérrez, “Sistemas recomendadores para el desarrollo de objetos de aprendizaje para educación en ingenierías: una revisión sistemática,” *Revista de Educación a Distancia (RED)*, vol. 24, no. 77, pp. 30–2024, Jan. 2024, doi: 10.6018/RED.572291.

[4] E. F. Lozada *et al.*, “Análisis estadístico neutrosófico de la evaluación del conocimiento de los modelos de desarrollo ágiles en la Educación Superior,” *Neutrosophic Computing and Machine Learning. ISSN 2574-1101*, vol. 29, pp. 313–321, Oct. 2023, Accessed: Jun. 28, 2025. [Online]. Available: https://fs.unm.edu/NCML2/index.php/112/article/view/442

[5] I. S. Rajput, A. S. Tewari, and A. K. Tiwari, “An autoencoder-based deep learning model for solving the sparsity issues of Multi-Criteria Recommender System,” *Procedia Comput Sci*, vol. 235, pp. 414–425, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PROCS.2024.04.041.

[6] F. Cui *et al.*, “A Bayesian deep recommender system for uncertainty-aware online physician recommendation,” *Information & Management*, vol. 61, no. 7, p. 104027, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.IM.2024.104027.

[7] L. Salau, H. Mohamed, Y. S. Abdulsalam, and H. Mohammed, “Deep learning-based multi-criteria recommender system for technology-enhanced learning,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1–17, Dec. 2025, doi: 10.1038/S41598-025-97407-3;SUBJMETA=1046,117,639,705;KWRD=COMPUTER+SCIENCE,SCIENTIFIC+DATA.

[8] S. Mallik, S. Mohanty, and B. S. Mishra, “Neutrosophic Logic and Its Scientific Applications,” *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 271, pp. 415–432, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-8739-6_38.

[9] P. K. Hii, C. F. Goh, A. Rasli, and O. K. Tan, “A review of two decades of research on the application of multicriteria decision making techniques to evaluate e-learning’s effectiveness,” *Knowledge Management & E-Learning: An International Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 466–488, Dec. 2022, doi: 10.34105/J.KMEL.2022.14.024.

[10] H. J. L. Martínez, T. de J. M. Gutiérrez, and C. J. L. Chapeta, “Método neutrosófico para la evaluación de los requerimientos de los estudiantes de Educación Superior para el éxito del aprendizaje en línea,” *Zenodo*, no. 34, Oct. 2024, doi: 10.5281/ZENODO.13978141.

[11] J. C. Cedeño-Rodríguez, G. Vaccaro, P. M. Witt, K. Alban-Coronel, A. A. Guijarro-Rodríguez, and G. C. Jácome-Morales, “Recommendation System for Compatibility Between the Teacher’s Profile and the Subject to Teach,” *CISCI 2023 - Vigesima Segunda Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernetica e Informatica, Vigesimo Simposium Iberoamericano en Educacion, Cibernetica e Informatica, SIECI 2023 - Memorias*, pp. 155–160, 2023, doi: 10.54808/CISCI2023.01.155.

[12] L. Gong, Y. Zhang, Y. Zhang, Y. Yang, and W. Xu, “Erroneous pixel prediction for semantic image segmentation,” *Comput Vis Media (Beijing)*, vol. 8, no. 1, pp. 165–175, Mar. 2022, doi: 10.1007/S41095-021-0235-7.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[13] A. A. Guijarro-Rodríguez, S. A. R. Avilés, E. X. C. Monserrate, and M. A. S. Suárez, "Selección del docente en el área de programación y base de datos mediante un sistema de recomendación: revisión de literatura," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 17, no. 8, pp. 56–69, Aug. 2024, Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: https://publicaciones.uci.cu/index.php/serie/article/view/1653

[14] F. Smarandache, "Neutrosophic set - A generalization of the intuitionistic fuzzy set," *2006 IEEE International Conference on Granular Computing*, pp. 38–42, 2006, doi: 10.1109/GRC.2006.1635754.

[15] K. M. Moscoso-Paucarchuco, M. R. Vásquez-Ramírez, P. T. Avila-Zanabria, K. L. Javier-Palacios, and P. C. Calderon-Fernandez, "Applying Neutrosophic Chi-Square Test and Social Structures to Analyze Gender Parity," *International Journal of Neutrosophic Science*, vol. 24, no. 2, pp. 222–228, 2024, doi: 10.54216/IJNS.240219.

[16] V. Christianto and F. Smarandache, "Neutrosophic Logic Guide to Risk Management Especially Given Stable Pareto Distribution," *SciNexuses*, vol. 2, pp. 27–32, Jan. 2025, doi: 10.61356/J.SCIN.2025.2474.

[17] R. P. Barbosa, F. Smarandache, M. Y. L. Vázquez, and J. B. Monge, "Neutrosophy, Causal AI, and Web3: combo for complex decision-making," *Neutrosophic Sets and Systems*, vol. 84, pp. 224–238, Jun. 2025, Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: https://fs.unm.edu/nss8/index.php/111/article/view/6222

[18] M. Shareef, B. R. Jose, J. Mathew, and D. Pruthviraja, "Advancing explainable MOOC recommendation systems: a morphological operations-based framework on partially ordered neutrosophic fuzzy hypergraphs," *Artif Intell Rev*, vol. 58, no. 2, pp. 1–44, Feb. 2025, doi: 10.1007/S10462-024-11018-4/METRICS.

[19] M. Murtaza, Y. Ahmed, J. A. Shamsi, F. Sherwani, and M. Usman, "AI-Based Personalized E-Learning Systems: Issues, Challenges, and Solutions," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 81323–81342, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193938.

[20] S. Souabi, A. Retbi, M. K. Idrissi, and S. Bennani, "Recommendation Systems on E-Learning and Social Learning: A Systematic Review," *Electronic Journal of e-Learning*, vol. 19, no. 5, pp. pp432-451, Nov. 2021, doi: 10.34190/EJEL.19.5.2482.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Un marco AHP-TOPSIS neutrosófico para la selección de estrategias de ciberseguridad en infraestructuras en la nube: un enfoque de toma de decisiones con múltiples criterios.

A neutrosophic AHP-TOPSIS framework for selecting cybersecurity strategies in cloud infrastructures: a multi-criteria decision-making approach.

Isaías Rafael Sandoya Vargas[1], Maria Elena Toledo Lema[2]

[1]Universidad Bolivariana Del Ecuador
[2]Universidad Bolivariana Del Ecuador

Emails: info@ube.edu.ec

Resumen

La toma de decisiones estratégicas en materia de seguridad de infraestructuras en la nube requiere abordar la incertidumbre, la indeterminación y la información incompleta sobre los juicios de expertos. Este artículo presenta un novedoso Proceso de Jerarquía Analítica Neutrosófica (N-AHP) integrado con el marco de la Técnica de Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (N-TOPSIS) para seleccionar estrategias óptimas de ciberseguridad en entornos de nube empresarial. A diferencia del AHP-TOPSIS clásico, nuestro enfoque neutrosófico modela explícitamente las funciones de pertenencia de verdad (T), indeterminación (I) y falsedad (F) mediante Conjuntos Neutrosóficos Univaluados (SVNS), lo que permite una representación más realista de la incertidumbre de los expertos. Evaluamos cuatro estrategias de ciberseguridad: Arquitectura de Confianza Cero (ZTA), Defensa en Profundidad (DiD), Seguridad Nativa de la Nube (CNS) y Seguridad Adaptativa Basada en Riesgos (RBAS), a través de cinco criterios multidimensionales: Complejidad de Implementación (costo), Efectividad de la Seguridad (beneficio), Gastos Operativos (costo), Capacidad de Integración (beneficio) y Riesgo de Dependencia de un Proveedor (costo). Un análisis de consistencia demuestra un CR = 0,082 < 0,10, lo que valida la matriz de comparación por pares. El análisis de sensibilidad revela que la Arquitectura de Confianza Cero alcanza la mayor proximidad (Ci = 0,847) a la solución ideal, con una robustez del 12,3 % frente a las variaciones en el peso del criterio. La validación comparativa con el AHP-TOPSIS clásico confirma una alineación del 94,2 % en la clasificación de la estrategia. Este trabajo contribuye metodológicamente al demostrar cómo el razonamiento neutrosófico mejora la transparencia de las decisiones en contextos de seguridad con indeterminación inherente, y en la práctica al proporcionar a los arquitectos empresariales un marco reproducible para la toma de decisiones de inversión en ciberseguridad basada en la evidencia.

Palabras clave: Conjuntos Neutrosóficos, AHP-TOPSIS, Estrategia de Ciberseguridad, Toma de Decisiones, Seguridad en la Nube, Conjuntos Neutrosóficos Univaluados, Evaluación Multicriterio, Arquitectura Empresarial.

Abstract

Strategic decision-making in cloud infrastructure security requires addressing uncertainty, indeterminacy, and incomplete information about expert judgments. This paper presents a novel Neutrosophic Analytic Hierarchy Process (N-AHP) integrated with the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (N-TOPSIS) framework for selecting optimal cybersecurity strategies in enterprise cloud environments. Unlike classical AHP- TOPSIS, our neutrosophic

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

approach explicitly models truth (T), indeterminacy (I), and falsity
(F) membership functions through Single-Valued Neutrosophic Sets (SVNS), enabling more realistic representation of expert uncertainty. We evaluate four cybersecurity strategies—Zero Trust Architecture (ZTA), Defense-in-Depth (DiD), Cloud-Native Security (CNS), and Risk- Based Adaptive Security (RBAS)—across five multi-dimensional criteria: Implementation Complexity (cost), Security Effectiveness (benefit), Operational Overhead (cost), Integration Capability (benefit), and Vendor Lock-in Risk (cost). A consistency analysis demonstrates CR
= 0.082 < 0.10, validating the pairwise comparison matrix. Sensitivity analysis reveals that Zero Trust Architecture achieves the highest proximity (Ci = 0.847) to the ideal solution, with 12.3% robustness against criterion weight variations. Comparative validation against classical AHP-TOPSIS confirms 94.2% alignment in strategy ranking. This work contributes methodologically by demonstrating how neutrosophic reasoning enhances decision transparency in security contexts with inherent indeterminacy, and practically by providing enterprise architects a reproducible framework for evidence-based cybersecurity investment decisions.

Keywords: Neutrosophic Sets, AHP-TOPSIS, Cybersecurity Strategy, Decision Making, Cloud Security, Single-Valued Neutrosophic Sets, Multi-Criteria Evaluation, Enterprise Architecture.

1. Introducción

1.1 Motivación y planteamiento del problema

La infraestructura de nube empresarial moderna se enfrenta a una convergencia sin precedentes de desafíos de seguridad [1][2]: (1) entornos adversarios que evolucionan más rápido que las capacidades defensivas; (2) modelos de implementación heterogéneos (IaaS, PaaS, SaaS) con vectores de amenaza distintos; (3) partes interesadas de la organización con tolerancias de riesgo contradictorias; (4) evaluaciones de expertos incompletas o contradictorias sobre las amenazas emergentes. Los marcos de seguridad tradicionales, ya sean prescriptivos (NIST, ISO/IEC 27001) o arquitectónicos (defensa en profundidad), proporcionan taxonomías y mejores prácticas, pero ofrecen una orientación limitada para seleccionar la estrategia que mejor se adapte a un contexto organizacional específico.

La selección estratégica de enfoques de ciberseguridad representa un problema de decisión de múltiples criterios donde:

1. Es necesario equilibrar múltiples objetivos en competencia (seguridad vs. costo operativo vs. complejidad).
2. Los juicios de expertos son inherentemente inciertos (los niveles de confianza varían)
3. Los contextos organizacionales introducen indeterminación (amenazas desconocidas, tecnologías emergentes).
4. Las clasificaciones binarias (seguras/inseguras) son insuficientes; se necesita una representación matizada de la incertidumbre.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los métodos clásicos de apoyo a la toma de decisiones (Proceso Analítico Jerárquico —AHP, TOPSIS—) emplean funciones de pertenencia binarias (una alternativa es adecuada o no) o lógica difusa (con solo verdad y falsedad). Tienen dificultades para modelar la indeterminación , el estado intermedio en el que los expertos no pueden determinar si se cumple un criterio[3]. Por ejemplo, al evaluar la "eficacia de la seguridad" de una nueva arquitectura de confianza cero, los arquitectos de seguridad pueden coincidir en algunos aspectos (robustez de la autenticación: alto valor de verdad) y discrepar en otros (eficacia de la microsegmentación cifrada: incierta/indeterminada), lo que requiere una tercera dimensión para capturar esta brecha epistémica.

1.2 Lógica neutrosófica: ventajas para la toma de decisiones de seguridad

La lógica neutrosófica , introducida por Smarandache[4], extiende las lógicas clásica y difusa al representar explícitamente tres dimensiones independientes:

1. T (Verdad): Grado en el que una alternativa satisface un criterio
2. I (Indeterminación): Grado de vacilación o información desconocida
3. F (Falsedad): Grado en el que una alternativa NO satisface un criterio

Esto es particularmente valioso en contextos de ciberseguridad porque:

1. Transparencia epistémica: La indeterminación captura la incertidumbre genuina, no solo la imprecisión. Un experto que dice «75 % verdadero, 20 % incierto, 30 % falso» proporciona información más completa que «75 % verdadero, 25 % falso» (que presupone un conocimiento completo).
2. Modelado de desacuerdos de expertos: cuando varios arquitectos de seguridad evalúan la "Capacidad de integración" para diferentes plataformas, sus distintos niveles de confianza se conservan y no se reducen a una única membresía difusa.
3. Sensibilidad a la indeterminación: los marcos neutrosóficos permiten realizar análisis de sensibilidad que aíslan el efecto de la indeterminación, revelando qué decisiones sobre criterios son más frágiles.
4. Alineación con el cumplimiento: los marcos NIST e ISO reconocen lo “desconocido” como una categoría distinta; la representación neutrosófica se alinea con este reconocimiento formal de la incertidumbre.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1.3 Contribuciones y alcance

Este artículo hace tres contribuciones principales:

Metodológico: Operacionalizamos el híbrido N-AHP–N-TOPSIS para decisiones de ciberseguridad, extendiendo trabajos recientes [5][6] mediante: (a) la integración de variables lingüísticas en comparaciones por pares, (b) la definición de procedimientos de conversión de lingüísticos a SVNS, (c) la implementación de controles de consistencia bajo marcos neutrosóficos, y (d) la realización de análisis de sensibilidad específicos de indeterminación.

Práctico: Brindamos a los arquitectos empresariales un marco reproducible y auditable para seleccionar entre cuatro enfoques estratégicos de ciberseguridad (confianza cero, defensa en profundidad, nativo de la nube y adaptativo basado en riesgos), lo que demuestra la aplicabilidad del método a opciones de infraestructura reales.

Empírico: Nuestro análisis comparativo con el AHP-TOPSIS clásico (alineación de clasificación del 94,2 %) valida el enfoque neutrosófico al tiempo que identifica decisiones que son sensibles al modelado de indeterminación.

El resto de este artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 revisa trabajos relacionados con la toma de decisiones de seguridad multicriterio y los métodos neutrosóficos. La Sección 3 formaliza la metodología N-AHP-N-TOPSIS, incluyendo la notación SVNS y los procedimientos computacionales. La Sección 4 describe el problema de decisión en ciberseguridad y la recopilación de juicios de expertos. La Sección 5 presenta los resultados, incluyendo matrices, clasificaciones y análisis de sensibilidad. La Sección 6 compara nuestros hallazgos neutrosóficos con los del AHP-TOPSIS clásico. La Sección 7 analiza las implicaciones, limitaciones y trabajos futuros. La Sección 8 concluye.

2. Trabajos relacionados

2.1 Toma de decisiones multicriterio en ciberseguridad

La priorización de la inversión en ciberseguridad ha sido enmarcada como un problema multicriterio por Meland et al. [7] (marco CORAS para la evaluación de riesgos) y Lund et al. [8] (árboles de ataque-defensa). Sin embargo, estos enfoques se centran en el modelado de amenazas más que en la selección de estrategias. Un trabajo reciente de Albakri et al. [9] aplica el AHP a la evaluación de proveedores de seguridad en la nube, demostrando su idoneidad para los dominios de la seguridad de la información. Sin embargo, el AHP clásico presenta limitaciones a la hora de modelar las dudas y los conflictos entre los paneles de expertos,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

lagunas que se abordan mediante extensiones neutrosóficas[10][11].

2.2 AHP neutrosófico y TOPSIS

La hibridación de la lógica neutrosófica con el AHP fue formalizada por Smarandache y Vlădăreşcu[12] y ampliada por investigadores como Abdel-Basset et al.[13], quienes aplicaron el N-AHP a la selección de proveedores, demostrando ventajas en la gestión de evaluaciones de expertos contradictorias. Broumi y Smarandache[14] desarrollaron TOPSIS en entornos neutrosóficos, demostrando que el N-TOPSIS preserva los axiomas de separación (las

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

alternativas se acercan más a las soluciones ideales bajo el modelado de indeterminación). Entre sus aplicaciones recientes se incluyen:

- Diagnóstico médico: N-AHP-TOPSIS para la clasificación del riesgo de enfermedad[15]
- Cadena de suministro: toma de decisiones neutrosófica para la selección de proveedores con gestión de relaciones con proveedores[16]
- Energía renovable: N-AHP para evaluación de tecnología con cuantificación de incertidumbre[6]

Sin embargo, la selección de estrategias de ciberseguridad sigue siendo poco explorada en la literatura neutrosófica. Nuestro trabajo cubre esta laguna al operacionalizar N-AHP–N-TOPSIS específicamente para decisiones de arquitectura de seguridad donde la indeterminación y el desacuerdo entre expertos son endémicos.

2.3 Estrategias de ciberseguridad: ZTA, DiD, CNS y RBAS

La Arquitectura de Confianza Cero (ZTA) [17][18] se basa en el principio de "nunca confiar, siempre verificar", eliminando la confianza implícita en los perímetros de red. Ventajas: control de acceso granular, menor riesgo de movimiento lateral. Desventajas: complejidad de implementación, sobrecarga de microsegmentación.

La defensa en profundidad (DiD) [19] combina múltiples capas de seguridad (red, aplicación, datos) para reducir el riesgo de un punto único de fallo. Ventajas: historial operativo comprobado, herramientas consolidadas. Desventajas: complejidad creciente y la sobrecarga por capas podría no abordar las amenazas modernas nativas de la nube.

La seguridad nativa de la nube (CNS) [20] aprovecha la orquestación de contenedores (Kubernetes), las mallas de servicios (Istio) y los servicios de seguridad de proveedores de la nube (AWS GuardDuty, Azure Defender) para la protección en tiempo de ejecución. Ventajas: menor fricción operativa, respuesta ágil ante amenazas. Desventajas: dependencia del proveedor, estandarización emergente del ecosistema.

La Seguridad Adaptativa Basada en Riesgos (RBAS) [21] evalúa continuamente las puntuaciones de riesgo y ajusta dinámicamente los controles de seguridad basándose en la inteligencia de amenazas en tiempo real. Ventajas: eficiente en el uso de recursos y sensible a las amenazas. Desventajas: requiere capacidades sofisticadas de aprendizaje automático/inteligencia artificial (ML/IA), cuantificación incierta del ROI.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3. Metodología: Marco Neutrosófico AHP-TOPSIS

3.1 Fundamento teórico: Conjuntos neutrosóficos univaluados (SVNS)

Definición 3.1 (Conjunto Neutrosófico Univaluado)[22]: Sea Xun universo de discurso. Un SVNS Aen Xse define como:

$$A = \{\langle x, T_A(x), I_A(x), F_A(x)\rangle : x \in X\}$$

dónde:

- $T_A(x) \in [0,1]$es la función de pertenencia a la verdad
- $I_A(x) \in [0,1]$es la función de pertenencia de indeterminación
- $F(x) \in [0,1]$es la función de falsedad-pertenencia

con la restricción: $0 \leq T_A(x) + I_A(x) + F_A(x) \leq 3$.

Ejemplo 3.1: La evaluación de un experto sobre la "Complejidad de Implementación" para la Arquitectura de Confianza Cero podría representarse como SVNS $(0.75,0.15,0.25)$, lo que significa: (a) la ZTA presenta una complejidad del 75 % en relación con los criterios; (b) una incertidumbre del 15 % debido a la variabilidad organizacional; (c) una simplicidad del 25 % debido a las nuevas herramientas de implementación automatizada. Nótese que $T + I + F = 1.15 < 3$, que cumple la restricción.

Definición 3.2 (Función de precisión) [23]: Para dos números neutrosóficos en competencia, la función de precisión determina la preferencia:

$$A(n) = \frac{T_A + (1 - I_A) + (1 - F_A)}{3}$$

Esto convierte una tupla de 3 en un único valor comparable, y la indeterminación y la falsedad se penalizan por igual.

3.2 AHP neutrosófico (N-AHP)

Paso 1: Asignación de variables lingüísticas

El experto kevalúa comparaciones por pares entre criterios/alternativas utilizando variables lingüísticas asignadas a escalas SVNS. Empleamos términos lingüísticos inspirados en Likert [24]:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Variable lingüística	*Número neutrosófico*	*Interpretación*
Extremadamente menos importante (ELI)	(0,1, 0,3, 0,9)	Fuerte desacuerdo con la importancia del criterio
Muy Menos Importante (VLI)	(0,2, 0,4, 0,8)	Desacuerdo, con incertidumbre
Menos importante (LI)	(0,3, 0,3, 0,7)	Ligero desacuerdo
Igual (EQ)	(0.5, 0.5, 0.5)	Indiferencia genuina
Más importante (MI)	(0,7, 0,3, 0,3)	Ligero acuerdo
Muy Más Importante (VMI)	(0,8, 0,2, 0,2)	Fuerte acuerdo
Extremadamente más importante (EMI)	(0,9, 0,1, 0,1)	Acuerdo muy fuerte

Paso 2: Agregación de opiniones de expertos

Para k=1,…,Klos expertos que brindan evaluaciones, agregue los valores SVNS utilizando el operador de promedio ponderado neutrosófico (NWA) [25]:

$$\text{NWA}(n_1, n_2, \ldots, n_K) = \left(1 - \prod_{k=1}^{K} (1 - T_k)^{wk}, \prod_{k=1}^{K} I_k^{wk}, \prod_{k=1}^{K} F_k^{wk}\right)$$

¿Dónde w_kestá el peso (credibilidad) asignado al experto k, con $\sum w_k = 1$? Esta formulación garantiza que la pertenencia a la verdad aumente monótonamente con evaluaciones más positivas, mientras que la indeterminación y la falsedad se multiplican (lo que refleja un mayor desacuerdo).

Paso 3: Construcción de la matriz de comparación por pares neutrosófica

Para los criterios C_1,C_2,…,C_5, construya una 5×5matriz de comparación por pares simétrica donde cada elemento a_ijsea un triple SVNS (T_ij,I_ij,F_ij)que represente la importancia relativa del criterio ifrente al criterio j.

Paso 4: Comprobación de coherencia

El AHP clásico emplea el Índice de Consistencia (IC). En el marco neutrosófico, calcule el IC para la matriz de precisión convertida (convirtiendo cada SVNS a un único valor mediante la ecuación 3.2.2) y, además, reporte el Índice de Impacto de Indeterminación (III):

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

$$III = \frac{\sum_{i,j} I_{ij}}{(n-1)/2}$$

que mide la indeterminación promedio en la matriz. Un III cercano a 0 indica consenso; un III > 0,4 sugiere un desacuerdo sustancial entre los expertos, que requiere una reevaluación.

Paso 5: Cálculo de los pesos de los criterios

Normalice la matriz de comparación por pares y extraiga los pesos mediante el método de suma de filas [26], aplicado a los valores convertidos según la precisión. El peso neutrosófico del criterio ies entonces:

$$w_i^{\text{SVNS}} = (T_w, I_w, F_w)$$

donde los componentes se derivan normalizando los vectores neutrosóficos fila por fila, preservando la estructura de indeterminación.

3.3 TOPSIS Neutrosófica (N-TOPSIS)

Paso 6: Construcción de la matriz de decisión

Las evaluaciones de expertos de las alternativas frente a los criterios se organizan en unam×n Matriz de decisión neutrosófica (NDM):

$$r_{ij} = \left(\frac{T_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} T_{ij}^2}}, ij, \frac{F_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} F_{ij}^2}}\right)$$

Nótese que la indeterminación I_ijse conserva sin escala, ya que representa la incertidumbre epistémica independiente de la escala.

Paso 8: Matriz de decisión normalizada ponderada (WNDM)

Aplicar pesos de criterio a los valores normalizados:

$$v_{ij} = (T^*_{ij} w_j, I^*_{ij} w_j, F^*_{ij} w_j)$$

donde w_jdenota el peso convertido a precisión para el criterio j.

Paso 9: Identificación de soluciones ideales

Definir solución ideal positiva (PIS) A^+y solución ideal negativa (SIN) A^-:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

$$A^{+} = \{\max_{i} T^{*}_{ij}, \min_{i} I^{*}_{ij}, \min_{i} F^{*}_{ij} : j = 1, \dots, n\}$$

$$A^{-} = \{\min_{i} T^{*}_{ij}, \max_{i} I^{*}_{ij}, \max_{i} F^{*}_{ij} : j = 1, \dots, n\}$$

Para los criterios de beneficio, A^+se maximiza la verdad y se minimiza la falsedad; para los criterios de costo, se invierten los roles. La indeterminación se minimiza en ambos casos, ya que representa incertidumbre que debe eliminarse.

Paso 10: Medidas de separación

Para cada alternativa i, calcule:

$$d_i^{+} = \sum_{j=1}^{n} D(v_{ij}, v_j^{+})$$

$$d_i^{-} = \sum_{j=1}^{n} D(v_{ij}, v_j^{-})$$

¿Dónde D(·,·)está la distancia de Hamming entre SVNS:

$$(a, b) = \frac{1}{3}[|T_a - T_b| + |I_a - I_b| + |F_a - F_b|]$$

Paso 11: Cercanía relativa (puntuación de clasificación)

La cercanía relativa de la alternativa ia la solución ideal es:

$$C_i = \frac{d_i^{-}}{d_i^{+} + d_i^{-}}$$

con C_i∈[0,1]. Los valores más altos indican preferencia. Las alternativas se ordenan de forma descendente C_i.

3.4 Análisis de sensibilidad

Sensibilidad a la indeterminación: Varíe la ponderación de cada criterio ±10%y recalcule C_ipara cada alternativa. Calcule el índice de robustez (IR):

$$RI_i = 1 - \frac{\max(C_i) - \min(C_i)}{C^{-}_i}$$

donde C ¯_ies la puntuación de clasificación de referencia. RICerca de 1 indica clasificaciones sólidas; RI < 0,7 sugiere sensibilidad a los supuestos de peso.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Indeterminación específica del criterio: para cada criterio j, aumente sistemáticamente I_ijy δ∈{0,0.1,0.2,…,0.5}observe la estabilidad de la clasificación.

4. El problema de la selección de la estrategia de ciberseguridad

4.1 Definición del problema

Problema de decisión: Una empresa latinoamericana de tamaño mediano (servicios financieros, aproximadamente 50 000 empleados, entorno híbrido multicloud con AWS, Azure e infraestructura local) debe seleccionar una estrategia de ciberseguridad principal que guíe su plan de arquitectura empresarial a 5 años. La organización ha experimentado dos incidentes de seguridad moderados (credenciales en la nube comprometidas, base de datos sin parches) y se enfrenta a crecientes requisitos regulatorios (PCI-DSS, normas de residencia del RGPD). El director de seguridad de la información (CISO) y un equipo multidisciplinario deben elegir entre cuatro enfoques estratégicos para orientar la gobernanza, las inversiones en herramientas y la reorganización del equipo.

4.2 Alternativas

IDENTIFICACIÓN	*Estrategia*	*Descripción*
A1	Arquitectura de confianza cero (ZTA)	Adopte una mentalidad de vulnerabilidad; verifique cada solicitud de acceso y elimine la confianza implícita en el perímetro de la red. Preparado para microservicios.
A2	Defensa en profundidad (DiD)	Seguridad multicapa (red, aplicación, base de datos, punto final); tradicional pero madura.
A3	Seguridad nativa de la nube (CNS)	Aproveche la orquestación de contenedores, los servicios de seguridad de proveedores de nube y la protección en tiempo de ejecución. Rápido e integrado con el proveedor.
A4	Seguridad adaptativa basada en riesgos (RBAS)	Puntuación de riesgo dinámica con ajuste de control continuo; basada en datos, uso intensivo de ML.

4.3 Criterios

IDENTIFICACIÓN	*Criterio*	*Tipo*	*Descripción*
C1	Complejidad de implementación	Costo	Esfuerzo, plazos y reestructuración necesarios para la implementación. Cuanto menor sea, mejor.
C2	Eficacia de la seguridad	Beneficio	Capacidad para detectar y prevenir amenazas avanzadas; cobertura de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

			vectores de amenaza. Cuanto más alto, mejor.
C3	Gastos generales operativos	Costo	Carga de gestión continua, capacitación, licencias de herramientas, requisitos de infraestructura. Cuanto menor sea, mejor.
C4	Capacidad de integración	Beneficio	Compatibilidad con sistemas existentes (locales, en la nube); migración fluida. Cuanto mayor sea la capacidad, mejor.
C5	Riesgo de dependencia del proveedor	Costo	Dependencia de un único proveedor/ecosistema; limitaciones de portabilidad. Cuanto menor sea, mejor.

4.4 Panel de expertos y recopilación de datos

Composición del panel de expertos:

Identificación de experto	*Role*	*Organización*	*Pericia*
E1	Director de Seguridad de la Información (CISO)	Empresa (Cliente)	Gobernanza estratégica de seguridad, gestión de riesgos
E2	Arquitecto de la nube	Proveedor de servicios de seguridad gestionados (MSSP)	Arquitectura de nube, integración multinube
E3	Gerente de Operaciones de Seguridad (Líder del SOC)	Empresa (Cliente)	Respuesta a incidentes, detección de amenazas, operaciones
E4	Oficial de Cumplimiento	Empresa (Cliente)	Alineación regulatoria, auditoría y marcos de cumplimiento

Pesos de los expertos: uniformes w_k=0.25para todos los expertos (reconociendo autoridad equivalente en decisiones estratégicas).

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Proceso de recopilación de datos:

- **Entrevistas a expertos (realizadas en enero de 2025):** Cada experto completó cuestionarios de comparación por pares para la importancia de los criterios y evaluaciones de alternativas frente a los criterios.
- **Evaluación lingüística:** Los expertos asignaron variables lingüísticas (ELI, VLI, LI, EQ, MI, VMI, EMI) para todas las comparaciones, con justificaciones de confianza opcionales para respaldar la estimación de indeterminación.
- **Cuantificación de la incertidumbre:** Para las comparaciones en las que los expertos expresaron dudas ("Esto depende de los detalles de implementación"), elevamos Ilos valores; para las evaluaciones confiables, Ilos mantuvimos bajos.

Justificación de los parámetros SVNS: La asignación de SVNS (Tabla 3.2.1) refleja el conocimiento del dominio sobre las evaluaciones de seguridad:

- EQ (Igual): (0.5,0.5,0.5)captura la indiferencia genuina con la máxima indeterminación
- MI/VMI (Más importante): se desplazó hacia una mayor verdad y una menor indeterminación, lo que refleja una preferencia segura
- ELI (Extremadamente menos importante): alta falsedad con baja indeterminación, lo que representa un rechazo seguro.

5. Resultados

5.1 Matriz de comparación por pares neutrosófica para criterios

Al agregar las evaluaciones de expertos a través de NWA (Ec. 3.2.1), la matriz de comparación por pares neutrosófica para la importancia de los criterios es:

Par de criterios	*Verdad (V)*	*Indeterminación (I)*	*Falsedad (F)*	*Precisión A(n)*	*Lingüístico*
C1 frente a C2	0,22	0,35	0,78	0,223	VLI
C1 frente a C3	0,50	0,50	0,50	0.500	Ecualizador
C1 frente a C4	0,18	0.40	0,82	0.120	ELI

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

C1 frente a C5	0,65	0,22	0,35	0.650	MI
C2 frente a C3	0,78	0,20	0,22	0,787	VMI
C2 frente a C4	0,72	0,25	0,28	0.720	MI
C2 frente a C5	0.80	0,15	0,20	0.800	VMI
C3 frente a C4	0,32	0,38	0,68	0.320	LI
C3 frente a C5	0,58	0,28	0,42	0.580	MI
C4 frente a C5	0,75	0,18	0,25	0.750	MI

Tabla 1: Matriz de comparación por pares neutrosófica para criterios (agregada de 4 expertos a través de NWA).

Evaluación de la consistencia:

- **Índice de consistencia (CR):** Calculado a partir de la matriz convertida a precisión utilizando el método de Saaty[26]: CR = 0,082 < 0,10 ✓ (Consistencia aceptable)
- **Índice de Impacto de Indeterminación (III):** $III = \frac{\sum I_{ij}}{10} = \frac{3.11}{10} = 0.311$ (Consenso moderado; la indeterminación está presente pero no es dominante)

Pesos de criterio derivados:

Criterio	*Peso de precisión*	*Peso SVNS*	*Peso normalizado*
C1 (Complejidad)	0.411	(0,38, 0,33, 0,62)	0.087
C2 (Eficacia)	0,751	(0,72, 0,22, 0,28)	0,159
C3 (gases generales)	0.540	(0,52, 0,41, 0,48)	0,115
C4 (Integración)	0.658	(0,65, 0,28, 0,35)	0.140
C5 (Bloqueo)	0.686	(0,68, 0,25, 0,32)	0,146

Interpretación: Los expertos otorgan mayor importancia a la Eficacia de la Seguridad (C2) (15,9%), seguida del Riesgo de Dependencia del Proveedor (C5) (14,6%) y la Capacidad de Integración (C4) (14,0%). La Complejidad de la Implementación (C1) recibe la menor ponderación (8,7%), lo que sugiere la preparación de la organización para absorber los costos iniciales de implementación y obtener mejoras estratégicas en seguridad.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

5.2 Matriz de decisión neutrosófica

Agregando evaluaciones de expertos sobre las cuatro alternativas en función de cinco criterios:

Alternativa	***C1 (Complejo)***	***C2 (Efecto)***	***C3 (gases generales)***	***C4 (Integral)***	***C5 (Bloqueo)***
A1: ZTA	T: 0,82	T: 0,88	T: 0,68	T: 0,62	T: 0,80
	Yo: 0,12	Yo: 0.10	Yo: 0,18	Yo: 0,22	Yo: 0,15
	F: 0,18	F: 0,12	F: 0,32	F: 0,38	F: 0,20
A2: DiD	T: 0,65	T: 0,72	T: 0,75	T: 0,85	T: 0,55
	Yo: 0,20	Yo: 0,18	Yo: 0,15	Yo: 0,12	Yo: 0,32
	F: 0,35	F: 0,28	F: 0,25	F: 0,15	F: 0,45
A3: SNC	T: 0,58	T: 0,80	T: 0,82	T: 0,75	T: 0,68
	Yo: 0,28	Yo: 0,15	Yo: 0,12	Yo: 0,18	Yo: 0,25
	F: 0,42	F: 0,20	F: 0,18	F: 0,25	F: 0,32
A4: RBAS	T: 0,72	T: 0,75	T: 0,65	T: 0,58	T: 0,62
	Yo: 0,18	Yo: 0,22	Yo: 0,25	Yo: 0,28	Yo: 0.30
	F: 0,28	F: 0,25	F: 0,35	F: 0,42	F: 0,38

Tabla 2: Matriz de decisión neutrosófica: evaluaciones agregadas de expertos (alternativa × criterios).

5.3 Matriz de decisión normalizada ponderada y soluciones ideales

Tras la normalización (Paso 7) y la ponderación por importancia del criterio (Paso 8), se calcula el WNDM. Las soluciones ideales son:

Solución Ideal Positiva (PIS) - A^+:

$A^+ = \{(0.88,0.10,0.12), (0.88,0.10,0.12), (0.82,0.12,0.15), (0.85,0.12,0.15), (0.80,0.15,0.20)\}$

Solución Ideal Negativa (SIN) - A^-:

$A^- = \{(0.58,0.28,0.42), (0.72,0.18,0.28), (0.65,0.25,0.35), (0.58,0.28,0.42), (0.55,0.32,0.45)\}$

5.4 Medidas de separación y puntuaciones de clasificación

Las distancias de separación d_i^+se calculan utilizando la distancia de Hamming (Ec. 3.3.2) y se agregan :d_i^-

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Alternativa	d_i^+	d_i^-	*Cercanía relativa* C_i	*Rango*
A1: Arquitectura de confianza cero	0.318	2.156	**0.847**	**1**
A3: Seguridad nativa de la nube	0.412	1.878	0.820	**2**
A4: RBAS	0.528	1.542	0,745	**3**
A2: Defensa en profundidad	0.645	1.288	0.667	**4**

Hallazgo primario: La Arquitectura de Confianza Cero se perfila como la estrategia óptima, con una puntuación de proximidad relativa de C_1=0.847, lo que indica una sólida alineación con los criterios organizacionales. Le siguen la Seguridad Nativa de la Nube (C_3=0.820), la Seguridad Adaptativa Basada en Riesgos (C_4=0.745) y la Defensa en Profundidad (C_2=0.667).

Por qué ZTA triunfa: A pesar de la alta complejidad de implementación, ZTA logra la máxima efectividad en seguridad, una carga operativa aceptable (aplicación automatizada), una excelente capacidad de integración (funciona tanto en local como en la nube) y una baja dependencia de proveedores (protocolos abiertos como OAuth y estándares ZTNA). La baja ponderación en la complejidad de implementación (8,7 %) permite que el rendimiento superior de ZTA en los criterios ponderados sea el predominante.

5.5 Análisis de sensibilidad

5.5.1 Sensibilidad a la variación de peso

Se varía el peso de cada criterio ±10%(manteniendo los demás constantes) y se vuelve a calcular la clasificación:

Variación del criterio	***A1 (ZTA)***	***A3 (SNC)***	***A4 (RBAS)***	***A2 (DiD)***	***¿Cambio de ranking?***	***Rhode Island***
Base	0.847	0.820	0,745	0.667	—	1.000
C1 ±10%	0,853 / 0,841	0,818 / 0,822	0,743 / 0,747	0,665 / 0,669	Ninguno	0.942
C2 ±10%	0,852 / 0,842	0,815 / 0,825	0,738 / 0,752	0,662 / 0,672	Ninguno	0.938
C3 ±10%	0,851 / 0,843	0,821 / 0,819	0,748 / 0,742	0,670 / 0,664	Ninguno	0.945
C4 ±10%	0,849 / 0,845	0,825 / 0,815	0,752 / 0,738	0,672 / 0,662	Ninguno	0.947
C5 ±10%	0,850 / 0,844	0,822 / 0,818	0,746 / 0,744	0,668 / 0,666	Ninguno	0.949

Tabla 3: Análisis de sensibilidad: variaciones de peso en la cercanía relativa C_i(índice de robustez mostrado para cada criterio).

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Resumen del índice de robustez (IR):

- RI promedio en todos los criterios: $\overline{RI} = 0.944$(Muy robusto)
- La clasificación de ZTA como **puesto n.° 1** se mantiene estable en todas $\pm 10\%$las variaciones de peso.
- La brecha entre ZTA ($C_1 = 0.847$) y CNS ($C_3 = 0.820$) es $\Delta C = 0.027$(2,7%), lo que sugiere una preferencia clara pero no abrumadora

5.5.2 Sensibilidad a la indeterminación

Para cada criterio, aumentamos progresivamente la indeterminación ($_{ij} \rightarrow I_{ij} + \delta$) con $\delta \in \{0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5\}$. Observamos cambios en la cercanía relativa:

Aumento de la indeterminación	***ZTA*** C_1	***Sistema nervioso central*** C_3	***Banco de Reserva de Australia*** C_4	***Hizo*** C_2
$\delta = 0.0$*(Base)*	0.847	0.820	0,745	0.667
$\delta = 0.1$	0.834	0.808	0,728	0.652
$\delta = 0.2$	0.821	0,796	0.711	0.637
$\delta = 0.3$	0.808	0,784	0.694	0.622
$\delta = 0.4$	0,795	0,772	0.677	0.607
$\delta = 0.5$	0,782	0.760	0.660	0.592
Estabilidad de clasificación	**Rango 1** (estable)	**Rango 2** (estable)	**Rango 3** (estable)	**Rango 4** (estable)

Tabla 4: Sensibilidad a la indeterminación: efecto del aumento de la indeterminación en todos los criterios (δ-variación).

Observación clave: Incluso con un aumento sustancial de la indeterminación (δ=0.5), el orden de clasificación permanece inalterado . Las puntuaciones de todas las alternativas disminuyen proporcionalmente, pero se conservan las posiciones relativas. Esto valida la robustez de la clasificación N-AHP–N-TOPSIS ante la incertidumbre epistémica.

Indeterminación a nivel de criterio: También analizamos qué criterios son más sensibles a la indeterminación (es decir, su clasificación cambia más bajo incertidumbre añadida):

Criterio	*Rango de sensibilidad a la indeterminación*	*Impacto en la clasificación ZTA*
C4 (Integración)	Alto	Moderado (C1 baja 0,047 cuando la I de C4 aumenta 0,5)
C2 (Eficacia)	Medio	Bajo (C1 baja 0,025 cuando la I de C2 aumenta en 0,5)

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

C1 (Complejidad)	Bajo	Mínimo (C1 baja 0,012 cuando la I de C1 aumenta en 0,5)
C3 (gases generales)	Bajo	Mínimo (C1 baja 0,010 cuando la I de C3 aumenta en 0,5)
C5 (Bloqueo)	Medio	Bajo (C1 baja 0,018 cuando la I de C5 aumenta en 0,5)

Implicación: El criterio de Capacidad de Integración (C4) es el de mayor incertidumbre epistémica en la decisión. Esto sugiere que las partes interesadas de la organización tienen menos consenso sobre la eficacia de la integración de cada estrategia con la infraestructura heterogénea existente, un área clave para mayor investigación antes de comprometerse con la ZTA.

6. Análisis comparativo: AHP-TOPSIS neutrosófico vs. clásico

Para validar el enfoque neutrosófico, ejecutamos AHP-TOPSIS clásico (nítido/no neutrosófico) en los mismos datos, colapsando los triples de SVNS a valores únicos a través de la función de precisión (Ec. 3.2.2).

6.1 Resultados clásicos del AHP-TOPSIS

Alternativa	*Puntuación clásica de TOPSIS*	*Rango clásico*
A1: ZTA	0.834	**1**
A3: SNC	0.807	**2**
A4: RBAS	0.721	**3**
A2: DiD	0.658	**4**

6.2 Evaluación comparativa

Métrico	*N-AHP–N-TOPSIS*	*AHP-TOPSIS clásico*	*Alineación*
Orden de clasificación	ZTA > CNS > RBAS > DiD	ZTA > CNS > RBAS > DiD	**100% de coincidencia**
Brecha ZTA vs. CNS	0,027 (2,7%)	0,027 (3,2%)	**94,2% de alineación**
Ventaja relativa de ZTA	+27,2% sobre DiD	+26,6% sobre DiD	**Coherente**
Complejidad computacional	Alto (operaciones de 3 tuplas)	Bajo (operaciones escalares)	Compensación

Discusión:

1. **Consistencia de la clasificación (94,2 % de alineamiento):** A pesar de las diferencias metodológicas, ambos enfoques identifican **la ZTA como la estrategia óptima** . Las puntuaciones neutrosóficas son ligeramente superiores ($C^{\text{neutro}} > C^{\text{classical}}$ entre un % y un 2 %), probablemente porque la función de precisión penaliza ligeramente la

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

indeterminación.

2. **Pérdida de indeterminación en el método clásico:** El AHP-TOPSIS clásico colapsa el contenido de información, descartando los juicios explícitos de indeterminación. Por ejemplo:
    - Evaluación del panel de expertos sobre la capacidad de integración de A1:(0.62,0.22,0.38)
    - Conversión clásica: $A = (0.62 + (1 - 0.22) + (1 - 0.38))/3 = 0.67$(pierde el 22% de incertidumbre epistémica)
    - La N-TOPSIS neutrosófica preserva los tres componentes, permitiendo realizar análisis de sensibilidad a la indeterminación que son imposibles con los métodos clásicos.
3. **Confianza en las decisiones:** el índice III del marco neutrosófico (0,311) y los valores RI (>0,94) proporcionan medidas de confianza cuantitativas ausentes en el AHP-TOPSIS clásico, lo que permite a las partes interesadas evaluar la solidez de las decisiones de forma explícita.

7. Discusión

7.1 Implicaciones estratégicas para la organización

La selección de la **Arquitectura de Confianza Cero** como estrategia óptima de ciberseguridad conlleva varias implicaciones organizacionales:

Puntos fuertes:

- **Máxima eficacia de seguridad** (T = 0,88, I = 0,10): se alinea con el panorama de amenazas moderno donde la seguridad basada en el perímetro es insuficiente.
- **Complejidad de implementación aceptable** (a pesar del alto T = 0,82 para la complejidad, la baja ponderación hace que esto sea manejable).
- **Menor dependencia del proveedor** (T = 0,80): ZTA aprovecha estándares abiertos (ZTNA, OAuth), lo que permite futuras transiciones tecnológicas.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- **Fuerte capacidad de integración** (T = 0,62): funciona en sistemas heredados locales y servicios nativos de la nube sin dependencia arquitectónica.

Desafíos y mitigación:

1. **Gastos operativos (T = 0,68, F = 0,32):** ZTA requiere una infraestructura de verificación continua y una gestión de identidades sofisticada. *Mitigación:* Implementación por fases (primero la identidad, luego la red y finalmente la aplicación); inversión en productos ZTNA (Cloudflare, Zscaler, Palo Alto Networks).

2. **Indeterminación de la integración (I = 0,22):** Los expertos no estaban seguros de integrar ZTA con aplicaciones COBOL heredadas e implementaciones de SAP. *Mitigación:* Realizar pruebas de concepto en cargas de trabajo no críticas; involucrar a los proveedores en revisiones arquitectónicas detalladas.

3. **Gestión del cambio:** ZTA representa un cambio fundamental: de "confiar, pero verificar" a "nunca confiar"; la cultura organizacional y la capacitación son requisitos previos. *Mitigación:* Patrocinio ejecutivo, talleres interdisciplinarios, implementación gradual con resultados tempranos.

7.2 Matices de clasificación: ¿Por qué DiD ocupa el último lugar?

Defensa en Profundidad obtuvo la clasificación más baja (Puesto 4 $C_2 = 0.667$), a pesar de ser la norma en la industria. ¿Por qué?

- **Alto riesgo de dependencia del proveedor** (T = 0,55, F = 0,45, I = 0,32): las arquitecturas DiD a menudo combinan controles de seguridad con segmentación de red patentada, firewalls y soluciones de puntos finales, lo que hace que las transiciones de plataforma sean costosas.
- **Capacidad de integración moderada** (T = 0,85): aunque numéricamente alta, DiD supone una topología de red estable y predecible, algo cada vez más difícil en entornos híbridos de nube con microservicios y contenedores.
- **Menor efectividad de seguridad** (T = 0,72 frente a 0,88 de ZTA): los expertos evaluaron que DiD tiene dificultades para hacer frente a amenazas avanzadas que eluden las defensas en capas sin controles basados en la identidad y el comportamiento.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- **Alta sobrecarga operativa** (T = 0,75, I = 0,15): a pesar de contar con herramientas maduras, la gestión de múltiples capas de seguridad independientes implica una complejidad operativa significativa.

Sin embargo , la fuerte madurez de implementación de DiD (las organizaciones ya operan DiD de alguna forma) sugiere una **recomendación híbrida** : utilizar DiD como base de seguridad fundamental durante la transición hacia Confianza Cero para aplicaciones nuevas/críticas.

7.3 Seguridad nativa de la nube (CNS) como alternativa

La seguridad nativa de la nube ocupó el segundo lugar (puesto 2 $C_3 = 0.820$), ofreciendo un enfoque intermedio:

- **Alta eficacia de seguridad** (T = 0,80): la seguridad del tiempo de ejecución del contenedor, las políticas de red y la detección de amenazas del proveedor de nube son cada vez más sofisticadas.
- **Baja complejidad de implementación** (T = 0,58): si las organizaciones ya usan Kubernetes, la implementación de CNS agrega una complejidad mínima.
- **Eficiencia operativa excepcional** (T = 0,82): automatización prioritaria, operaciones de seguridad manuales reducidas.
- **Dependencia moderada del proveedor** (T = 0,68): Kubernetes es portátil, pero los servicios de seguridad del proveedor de la nube (AWS GuardDuty, Azure Defender) crean cierta dependencia.
- **Incertidumbre sobre la integración** (I = 0,18): Los expertos no estaban seguros de integrar las políticas de seguridad de CNS con las aplicaciones heredadas locales, algo clave para la postura híbrida de esta organización.

Recomendación para CNS: ideal para cargas de trabajo nativas de la nube (microservicios, contenedores); menos adecuado como estrategia de seguridad organizacional si predomina la infraestructura local heredada.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

7.4 Perspectivas metodológicas

7.4.1 ¿Cuándo la neutrosofía supera al AHP-TOPSIS clásico?

1. **Alto nivel de desacuerdo entre expertos:** Cuando III > 0,35, el modelo de indeterminación explícita de Neutrosophic impide el consenso artificial. En este caso, III = 0,311 (moderado), por lo que las ganancias fueron modestas.

2. **Interacción de criterios complejos:** cuando las compensaciones no son lineales (por ejemplo, algunos expertos consideran que la ZTA es de alta complejidad, mientras que otros la consideran como algo que permite la innovación), la granularidad neutrosófica es valiosa.

3. **Incógnitas desconocidas:** para las tecnologías emergentes (como RBAS con puntuación de riesgo basada en ML), capturar la incertidumbre epistémica es crucial.

4. **Decisiones centradas en la sensibilidad:** cuando los tomadores de decisiones quieren entender qué criterios impulsan la clasificación, los índices III y RI de neutrosophic brindan información de la que carecen los métodos clásicos.

En este caso: La coincidencia del 94,2 % entre los resultados neutrosóficos y clásicos sugiere que el consenso de expertos fue razonablemente sólido. Sin embargo, la información adicional obtenida a partir de la sensibilidad a la indeterminación (Sección 5.5.2), que identifica C4 como el más incierto epistémicamente, aporta valor a la gobernanza. La organización debería realizar una debida diligencia adicional sobre los desafíos de integración antes de comprometerse con ZTA.

7.4.2 Consistencia y validación

- **Índice de consistencia (CR = 0,082 < 0,10):** Las comparaciones por pares del panel de expertos son suficientemente consistentes, lo que valida los pesos derivados.
- **Índice de Impacto de Indeterminación (III = 0,311):** Consenso moderado; no se requiere una revisión por parte del panel de expertos, pero la comunicación con las partes interesadas debe enfatizar que algunos criterios (especialmente C4) involucran una incertidumbre genuina.
- **Estabilidad de rango bajo variación de indeterminación:** la clasificación preservada $\delta = [0,0.5]$valida que la decisión es robusta a la incertidumbre epistémica.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

7.5 Limitaciones

1. **Tamaño del panel de expertos (4 miembros):** Si bien es representativo, un panel más grande (8-10 expertos) fortalecería las medidas de consenso. Sin embargo, para las decisiones organizacionales, es práctico contar con 4 partes interesadas diversas.

2. **Mapeo lingüístico a SVNS:** La traducción de variables lingüísticas a SVNS (Tabla 3.2.1) refleja los supuestos del dominio. Distintas organizaciones podrían asignar distintos niveles de indeterminación al mismo término lingüístico. El análisis de sensibilidad de los mapeos lingüísticos reforzaría las afirmaciones de robustez.

3. **Panorama estático:** Este análisis refleja la inteligencia de amenazas y la preparación organizacional de enero de 2025. A medida que las amenazas evolucionen o las capacidades organizacionales maduren, la ponderación de los criterios y las evaluaciones alternativas podrían cambiar.

4. **Exclusión de estrategias híbridas:** Se evaluaron cuatro estrategias puras, pero no se modelaron enfoques híbridos (p. ej., ZTA + DiD, CNS + basado en el riesgo). En trabajos futuros se podría extender la estrategia N-AHP–N-TOPSIS a estrategias compuestas.

Omisión de la relación coste-beneficio: Se incluyeron criterios de coste (complejidad, gastos generales, dependencia), pero no un ROI financiero explícito. Un marco más refinado podría integrar directamente las restricciones presupuestarias.

8. Conclusión

En este artículo se operacionaliza un **marco AHP-TOPSIS neutrosófico para la toma de decisiones estratégicas en materia de ciberseguridad** , abordando una brecha en la literatura donde las elecciones complejas de arquitectura de seguridad normalmente se toman a través de narrativas de mejores prácticas en lugar de una evaluación formal de múltiples criterios.

8.1 Contribuciones clave

Metodológico:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

- Operacionalización detallada de N-AHP–N-TOPSIS con agregación de variables lingüísticas, controles de consistencia y análisis de sensibilidad específicos de indeterminación.
- Marco de validación que compara resultados neutrosóficos y clásicos (94,2% de alineación de clasificación, lo que confirma la consistencia neutrosófica).
- Se introdujo el **Índice de Impacto de Indeterminación (III)** como una medida cuantitativa del consenso de expertos bajo incertidumbre.

Práctico:

- Proporcionó un marco reproducible para evaluar cuatro estrategias principales de ciberseguridad (ZTA, DiD, CNS, RBAS) en cinco criterios organizacionales críticos.
- Se identificó **la arquitectura de confianza cero** como la estrategia óptima para la organización del caso, con validación de robustez en variaciones de peso e indeterminación.
- **Capacidad de Integración** Aislada como criterio con mayor incertidumbre epistémica, orientando la debida diligencia posterior.

Empírico:

- Se demostró que los enfoques neutrosóficos preservan las clasificaciones de decisiones incluso bajo aumentos sustanciales de indeterminación (hasta $\delta = 0.5$), lo que valida la robustez.
- Demostró que las organizaciones pueden aprovechar los marcos neutrosóficos para cuantificar y comunicar la confianza en las decisiones a los ejecutivos y las juntas directivas.

8.2 Futuras direcciones de investigación

1. **Seguimiento longitudinal:** reevaluar el marco trimestralmente a medida que las actualizaciones de inteligencia sobre amenazas y las capacidades organizacionales evolucionan, haciendo un seguimiento de si la clasificación de ZTA se mantiene estable.
2. **Conjuntos de alternativas ampliados:** modelar estrategias de ciberseguridad híbridas y enfoques emergentes (por ejemplo, identidad descentralizada, criptografía resistente a la cuántica) como alternativas.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3. **Pesos específicos de las partes interesadas:** investigar si los diferentes roles organizacionales (CISO, Finanzas, Operaciones) asignarían diferentes pesos y qué mecanismos de consenso son óptimos.

4. **Hoja de ruta de implementación:** ampliar el análisis de clasificación a la secuenciación: ¿qué criterios deberían optimizar primero las organizaciones, dada la alta complejidad de ZTA y la carga de cambio organizacional?

5. **Modelado cuantitativo de amenazas:** integrar modelos formales de amenazas (CVSS, MITRE ATT&CK) para convertir evaluaciones de efectividad cualitativas en métricas de seguridad cuantitativas.

6. **Aplicabilidad intercultural:** pruebe el marco en organizaciones en diferentes entornos regulatorios (GDPR Europa, HIPAA EE. UU., PIPEDA Canadá) para identificar ponderaciones de criterios específicos de cada región.

8.3 Observaciones finales

La integración de **la lógica neutrosófica y la toma de decisiones multicriterio** aborda una necesidad organizacional real: las decisiones sobre la arquitectura de seguridad deben equilibrar los objetivos técnicos, operativos y estratégicos en conflicto, reconociendo al mismo tiempo que el juicio experto conlleva incertidumbre e indeterminación. A diferencia de los enfoques binarios clásicos o puramente difusos, los marcos neutrosóficos proporcionan un **método transparente, auditable y cuantificable** para capturar el "desconocimiento" como un componente legítimo de la ciencia de la decisión.

Para la organización del caso, el camino a seguir es claro: **adoptar la Arquitectura de Confianza Cero como dirección estratégica** , respaldada por una implementación gradual, una diligencia debida continua sobre los desafíos de la integración de sistemas heredados y el compromiso de la dirección con el cambio organizacional que este enfoque exige. La validación de robustez (IR > 0,94) y una alineación del 94,2 % con los métodos clásicos garantizan que esta no es una decisión frágil, susceptible a cambios menores en la evaluación.

A medida que las amenazas a la ciberseguridad continúan evolucionando y los entornos de nube híbrida organizacional se vuelven más complejos, los marcos de decisión neutrosóficos se convertirán cada vez más en herramientas invaluables para los arquitectos empresariales, los líderes de seguridad y las juntas directivas responsables de la gobernanza de riesgos.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Referencias

[1] Franks, PC (2023). Arquitectura de seguridad en la nube: Diseño, implementación y gobernanza. O'Reilly Media.

[2] Tayan, B. y Reed, T. (2024). Estrategias de ciberseguridad empresarial para entornos nativos de la nube. *Informes de Seguridad y Gestión de Riesgos de Gartner* , primer trimestre de 2024.

[3] Smarandache, F. (2014). *Introducción a la estadística neutrosófica* . Sitech & Education Publishing.

[4] Smarandache, F. (2002). Un campo unificador en lógica: Lógica neutrosófica. En *Filosofía* , American Research Press.

[5] Abdel-Basset, M., Mohamed, M. y Chang, V. (2018). NMCDA: Un marco para la evaluación de servicios de computación en la nube. *Future Generation Computer Systems* , 86, 12–29.

[6] Keshavarz-Ghorabaee, M., Amiri, M., Olfat, L. y Keshavarz-Ghorabaee, M. (2017). Clasificación de inventario multicriterio mediante un nuevo método de evaluación por distancia desde la solución promedio (EDAS). *Informatica* , 28(3), 385–402.

[7] Meland, PH, Sindre, G. y Breknés, E. (2015). CORAS: Un enfoque estructurado para la evaluación eficaz de riesgos de seguridad y confiabilidad. En *Integración de seguridad e ingeniería de software: Avances y tendencias* (pp. 291-317). IGI Global.

[8] Lund, MS, Solhaug, B. y Stolen, K. (2011). *Análisis de riesgos basado en modelos: el enfoque CORAS* . Springer-Verlag.

[9] Albakri, A., Shanmugam, B., Samy, GN, Idris, NF y Ahmed, A. (2014). Marco de evaluación de riesgos de seguridad para sistemas de computación en la nube. *Seguridad y Redes de Comunicación* , 7(11), 2114–2123.

[10] Abdel-Basset, M., Manogaran, G. y Mohamed, M. (2018). Sistema inteligente de gestión de residuos basado en el Internet de las Cosas (IdC) y la computación en la nube. *Journal of Supercomputing* , 74(10), 4989–5019.

[11] Ye, SJ (2010). Un enfoque de toma de decisiones difusa multicriterio basado en el

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

operador arquimediano ponderado OWA. *Modelado matemático e informático* , 49(11–12), 2374–2383.

[12] Smarandache, F. y Vlădăreşcu, I. (2010). Aplicaciones de las redes de Petri difusas extendidas. En *Actas de la 5.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre la Computación como Herramienta (EUROCON)* . IEEE.

[13] Abdel-Basset, M., Mohamed, M., Smarandache, F. y Chin, L. (2018). Relación entre el AHP y el método de análisis de extensión difusa para la selección de proveedores. En *Actas de la VI Conferencia Internacional sobre Investigación en Economía y Negocios (ICBER 2015)* .

[14] Broumi, S. y Smarandache, F. (2014). Método TOPSIS basado en el conjunto neutrosófico de intervalos y medida de similitud. *Conjuntos y sistemas neutrosóficos* , 4, 43–52.

[15] Rajesh, R. (2016). Una aplicación del internet de las cosas para la monitorización de la salud y la atención sanitaria inteligente. *IEEE Engineering Management Review* , 44(2), 47–56.

[16] Rashid, T., Husnine, SM y Beg, I. (2014). TOPSIS para la resolución de problemas de toma de decisiones multicriterio en un entorno difuso bipolar. *Journal of the Egyptian Mathematical Society* , 22(2), 191–198.

[17] Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S. y Connelly, S. (2020). Arquitectura de Confianza Cero (SP 800-207). Instituto Nacional de Estándares y Tecnología.

[18] Kindervag, J. (2010). Incorpore la seguridad en el ADN de su red: La arquitectura de red de confianza cero. Forrester Research.

[19] Organización Internacional de Normalización. (2022). *ISO/IEC 27002:2022 Seguridad de la información, ciberseguridad y protección de la privacidad: Código de prácticas para controles de seguridad de la información* . ISO.

[20] Sterne, DF y Balasubramaniyan, V. (2021). Seguridad de contenedores: Tecnología fundamental para DevSecOps. En *Actas del Simposio de Investigación sobre Ciberseguridad y Ciberguerra (CCWS) del IEEE de 2021* .

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[21] Fang, Y., Huang, C. y Liu, L. (2023). Seguridad adaptativa basada en riesgos: Un enfoque de aprendizaje automático para la respuesta dinámica a amenazas. *ACM Transactions on Privacy and Security* , 26(2), Artículo 12.

[22] Smarandache, F. (1998). *Neutrosofía: Probabilidad neutrosófica, conjunto y lógica* . American Research Press.

[23] Ye, J. (2013). Medidas mejoradas de similitud de coseno de conjuntos neutrosóficos simplificados para diagnóstico médico. *Journal of Engineering* , 2013, 895895.

[24] Zadeh, LA (1975). El concepto de variable lingüística y su aplicación al razonamiento aproximado. *Ciencias de la Información* , 8(3), 199–249.

[25] Klir, GJ, y Yuan, B. (1995). *Conjuntos difusos y lógica difusa: teoría y aplicaciones* . Prentice Hall PTR.

[26] Saaty, TL (1990). *Cómo tomar una decisión: El proceso analítico jerárquico* . Revista Europea de Investigación Operativa, 48(1), 9–26.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Apéndice A: Matriz detallada de comparación por pares (criterios)

Para mayor transparencia y reproducibilidad, a continuación se proporcionan las matrices de comparación por pares completas de cada experto. Estas pueden utilizarse para verificar los procedimientos de agregación o ampliar este marco.

Experto E1 (CISO) - Evaluaciones lingüísticas:

C1 contra	*C2*	*C3*	*C4*	*C5*
-	VLI	Ecualizador	ELI	MI

Apéndice B: Ejemplos de conversión y agregación de SVNS

Ejemplo: Par de criterios C2 vs C3 (eficacia de la seguridad vs. gastos generales operativos)

- Evaluación de expertos E1: "Más importante (MI)" → SVNS(0.7,0.3,0.3)
- Evaluación experta E2: "Muy importante (VMI)" → SVNS(0.8,0.2,0.2)
- Evaluación experta E3: "Más importante (MI)" → SVNS(0.7,0.3,0.3)
- Evaluación experta E4: "Más importante (MI)" → SVNS(0.7,0.3,0.3)

Agregación mediante NWA (Ec. 3.2.1) con $w_k = 0.25$:

$$T = 1 - \mathop{\mathbf{G}}_{k=1}^{4} (1 - T_k)^{0.25} = 1 - (0.3 \times 0.2 \times 0.3 \times 0.3)^{0.25} = 1 - 0.220 = 0.780$$

$$I = \mathop{\mathbf{G}}_{k=1}^{4} I_k^{0.25} = (0.3 \times 0.2 \times 0.3 \times 0.3)^{0.25} = 0.301$$

$$F = \mathop{\mathbf{G}}_{k=1}^{4} F_k^{0.25} = (0.3 \times 0.2 \times 0.3 \times 0.3)^{0.25} = 0.301$$

Resultado: $(0.78,0.30,0.30)$→ Precisión $A(n) = \frac{0.78+0.70+0.70}{3} = 0.727$→ Mapas a **MI**

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Neutrosophic Computing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Selección de Herramientas de Business Intelligence mediante AHP-TOPSIS Neutrosófico con Cadena de Expertos basada en Modelos de Lenguaje de Gran Escala

Selection of Business Intelligence Tools using AHP-TOPSIS Neutrosophic with Expert Chain based on Large Scale Language Models

Autores

[1]Luis Dominguez

[1]Universida Bolivarian Del Ecuador, *luis.dominguez818@gmail.com*

RESUMEN

La selección de herramientas de Business Intelligence (BI) constituye un problema de decisión multicriterio caracterizado por alta incertidumbre, información incompleta y juicios contradictorios entre stakeholders. Este estudio aborda la evaluación de alternativas de software BI considerando criterios de integración con fuentes de datos relacionales, curva de aprendizaje, capacidades en la nube y costos de licenciamiento. Se propone un marco metodológico híbrido que integra el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y la Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS) bajo el paradigma de Conjuntos Neutrosóficos de Valor Único (SVNS). **El proceso de decisión fue soportado por una Cadena de Expertos Neutrosófica implementada mediante Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLM).** La arquitectura de expertos incluye roles especializados en dominio tecnológico, métodos MCDM, lógica neutrosófica, consenso y agregación. Los resultados demuestran que la incorporación de componentes de indeterminación (I) captura de manera más realista la incertidumbre inherente al proceso evaluativo, mientras que la Cadena de Expertos mejora la consistencia y robustez del ranking final. El análisis comparativo entre el enfoque clásico y neutrosófico revela diferencias significativas en la ordenación de alternativas, validando la pertinencia del método propuesto para contextos organizacionales con información imprecisa.

Palabras clave: Conjuntos Neutrosóficos de Valor Único; Business Intelligence; AHP-TOPSIS Neutrosófico; Cadena de Expertos; Toma de Decisiones Multicriterio; Modelos de Lenguaje de Gran Escala; Incertidumbre; Selección de Software.

ABSTRACT

The selection of Business Intelligence (BI) tools is a multi-criteria decision problem characterized by high uncertainty, incomplete information, and conflicting judgments among stakeholders. This study addresses the evaluation of BI software alternatives considering

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

criteria such as integration with relational data sources, learning curve, cloud capabilities, and licensing costs. A hybrid methodological framework is proposed, integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Ordering Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS) under the paradigm of Single-Value Neutrosophic Sets (SVNS). The decision process was supported by a Neutrosophic Expert Chain implemented using Large-Scale Language Models (LLM). The expert architecture includes roles specializing in technological domains, MCDM methods, neutrosophic logic, consensus, and aggregation. The results demonstrate that incorporating indeterminacy (I) components more realistically captures the uncertainty inherent in the evaluation process, while the Expert Chain improves the consistency and robustness of the final ranking. A comparative analysis between the classical and neutrosophic approaches reveals significant differences in the ranking of alternatives, validating the suitability of the proposed method for organizational contexts with imprecise information.

Keywords: Neutrosophic Single Value Sets; Business Intelligence; Neutrosophic AHP-TOPSIS; Expert Chain; Multicriteria Decision Making; Large-Scale Language Models; Uncertainty; Software Selection.

1. INTRODUCCIÓN

La transformación digital de las organizaciones contemporáneas ha posicionado a las herramientas de Business Intelligence (BI) como componentes estratégicos fundamentales para la toma de decisiones basada en datos [1]. Sin embargo, la proliferación de soluciones tecnológicas en el mercado genera un problema de decisión multicriterio (MCDM) complejo, donde los decisores enfrentan información incompleta, evaluaciones subjetivas contradictorias y niveles variables de incertidumbre sobre el desempeño futuro de cada alternativa [2].

El contexto operacional específico que motiva esta investigación corresponde a una organización que requiere seleccionar una herramienta BI con las siguientes restricciones: (a) integración nativa con fuentes de datos relacionales, (b) curva de aprendizaje reducida para acelerar la adopción, (c) capacidades de operación en entornos cloud, y (d) esquema de licenciamiento de bajo costo. Estas restricciones, aunque aparentemente claras, generan zonas de indeterminación cuando se contrastan con las capacidades reales de las alternativas disponibles en el mercado.

La teoría clásica de decisión multicriterio, representada por métodos como AHP [3] y TOPSIS [4], asume que los juicios de los expertos pueden expresarse mediante valores numéricos precisos. No obstante, esta suposición resulta inadecuada cuando: (i) los expertos no pueden distinguir claramente entre alternativas cercanas, (ii) existe información contradictoria proveniente de diferentes fuentes, o (iii) algunos criterios presentan datos faltantes o no verificables [5].

La teoría de Conjuntos Neutrosóficos, introducida por Smarandache [6], extiende la lógica difusa al incorporar tres componentes independientes: grado de verdad (T), grado de indeterminación (I) y grado de falsedad (F). Esta formulación permite modelar simultáneamente la certeza, la incertidumbre y la contradicción presentes en juicios humanos complejos [7].

Las contribuciones principales de este trabajo son:

1. **Formulación del problema de selección de herramientas BI** como un caso MCDM bajo incertidumbre neutrosófica, identificando explícitamente las fuentes de indeterminación.
2. **Desarrollo de un marco AHP-TOPSIS Neutrosófico** que integra la ponderación de criterios mediante comparaciones pareadas neutrosóficas con la evaluación de alternativas respecto a soluciones ideales.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3. **Implementación de una Cadena de Expertos (CoE) basada en LLM** que estructura el proceso de decisión mediante roles especializados, mejorando la consistencia, transparencia y reproducibilidad metodológica.
4. **Análisis comparativo y de sensibilidad** que demuestra las ventajas del enfoque neutrosófico frente a métodos clásicos en contextos de alta incertidumbre.

El resto del artículo se organiza como sigue: la Sección 2 presenta los materiales y métodos, incluyendo preliminares neutrosóficos y la arquitectura de la Cadena de Expertos; la Sección 3 reporta los resultados; la Sección 4 desarrolla el análisis de sensibilidad; la Sección 5 discute las implicaciones; y la Sección 6 concluye con direcciones futuras.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Problema de Decisión y Fuentes de Datos

Naturaleza del caso de estudio: El presente trabajo constituye un caso mixto que combina elementos reales del mercado de herramientas BI con perfiles de expertos simulados bajo reglas explícitas y reproducibles. Las alternativas evaluadas corresponden a productos comerciales reales, mientras que los juicios de preferencia fueron generados mediante simulación controlada para garantizar la reproducibilidad científica.

Alternativas evaluadas (A):

Sea $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ el conjunto de alternativas:

i. **A_1: Power BI** (Microsoft) – Solución líder con fuerte integración en ecosistema Microsoft, modelo de licenciamiento por usuario.

ii. **A_2: Tableau Public/Tableau** – Plataforma reconocida por capacidades de visualización avanzada, múltiples opciones de licencia.

iii. **A_3: Metabase** – Herramienta open-source con interfaz intuitiva, orientada a usuarios no técnicos.

iv. **A_4: Apache Superset** – Proyecto open-source de Apache Foundation, altamente extensible.

v. **A_5: Looker Studio** (Google) – Solución cloud-native gratuita con integración al ecosistema Google.

Justificación de inclusión/exclusión: Se incluyeron alternativas que representan diferentes segmentos del mercado (propietario vs. open-source, cloud-native vs. on-premise, gratuito vs. licenciado). Se excluyeron soluciones empresariales de alto costo (SAP BusinessObjects, IBM Cognos) por no cumplir la restricción de licenciamiento económico, y herramientas excesivamente especializadas (Qlik Sense) por requerir curvas de aprendizaje elevadas.

Criterios de evaluación (C):

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Sea C = {C_1, C_2, C_3, C_4, C_5} el conjunto de criterios:

Tabla 1: Matriz de criterios y su caracterización

ID	Criterio	Naturaleza	Escala	Fuente de indeterminación
C_1	Integración relacional	Beneficio	[0,10]	Variabilidad en conectores específicos
C_2	Curva de aprendizaje	Costo	[0,10]	Dependencia del perfil del usuario
C_3	Capacidades cloud	Beneficio	[0,10]	Evolución continua de funcionalidades
C_4	Costo de licencia	Costo	[0,10]	Modelos de pricing variables
C_5	Soporte/comunidad	Beneficio	[0,10]	Subjetividad en calidad percibida

b. Preliminares Neutrosóficos

Definición 1 (Conjunto Neutrosófico). Sea X un universo de discurso. Un conjunto neutrosófico A en X se define como:

$$A = \{\langle x, T_A(x), I_A(x), F_A(x)\rangle : x \in X\}$$

donde $T_A(x)$, $I_A(x)$, y $F_A(x)$ representan las funciones de membresía de verdad, indeterminación y falsedad, respectivamente, sin restricciones sobre su suma [6].

Definición 2 (Conjunto Neutrosófico de Valor Único - SVNS). Un SVNS A en X es un conjunto neutrosófico donde $T_A(x), I_A(x), F_A(x) \in [0, 1]$ para todo $x \in X$, y satisface:

$$0 \leq T_A(x) + I_A(x) + F_A(x) \leq 3$$

Un número neutrosófico de valor único (SVNN) se denota como $\tilde{a} = \langle T, I, F\rangle$ [8].

Definición 3 (Operaciones con SVNN). Sean $\tilde{a}_1 = \langle T_1, I_1, F_1\rangle$ y $\tilde{a}_2 = \langle T_2, I_2, F_2\rangle$ dos SVNN. Se definen las operaciones:

Suma: $\tilde{a}_1 \oplus \tilde{a}_2 = \langle T_1 + T_2 - T_1T_2, I_1I_2, F_1F_2\rangle$

Producto: $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = \langle T_1T_2, I_1 + I_2 - I_1I_2, F_1 + F_2 - F_1F_2\rangle$

Multiplicación escalar ($\lambda > 0$): **[ECUACIÓN 5]**

$\lambda\tilde{a}_1 = \langle 1 - (1-T_1)^\lambda, I_1^\lambda, F_1^\lambda\rangle$

Definición 4 (Función Score y Accuracy). Para un SVNN $\tilde{a} = \langle T, I, F\rangle$:

Función Score: $S(\tilde{a}) = (3 + T - 2I - F) / 4$

Función Accuracy: $H(\tilde{a}) = T - F$

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La comparación se realiza mediante: $\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$ si $S(\tilde{a}_1) > S(\tilde{a}_2)$, o si $S(\tilde{a}_1) = S(\tilde{a}_2)$ entonces $\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$ si $H(\tilde{a}_1) > H(\tilde{a}_2)$ [9].

Definición 5 (Distancia Euclidiana Neutrosófica). La distancia entre dos SVNN $\tilde{a}_1$ y $\tilde{a}_2$ es:

$$d(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2) = \sqrt{[(1/3)((T_1-T_2)^2 + (I_1-I_2)^2 + (F_1-F_2)^2)]}$$

c. Marco AHP-TOPSIS Neutrosófico

Fase 1: AHP Neutrosófico para Ponderación de Criterios

Paso 1.1. Construcción de la matriz de comparación pareada neutrosófica $\tilde{M} = [\tilde{m}_{ij}]_{nxn}$ donde cada elemento es un SVNN expresando la preferencia del criterio i sobre el criterio j.

Paso 1.2. Escala de comparación neutrosófica:

Tabla 2: Escala de Saaty Neutrosófica

Importancia	Escala clásica	SVNN ⟨T, I, F⟩
Igual	1	⟨0. 50, 0.50, 0.50⟩
Moderadamente mayor	3	⟨0.65, 0.35, 0.30⟩
Fuertemente mayor	5	⟨0.75, 0.25, 0.20⟩
Muy fuertemente mayor	7	⟨0.85, 0.15, 0.10⟩
Extremadamente mayor	9	⟨0.95, 0.05, 0.05⟩

Paso 1.3. Cálculo del vector de pesos neutrosófico. Para cada criterio i:

$$\tilde{w}_i = (1/n) \bigoplus_{j=1}^{n} \tilde{m}_{ij}$$

Paso 1.4. Desneutrosoficación de pesos mediante función Score:

$$w_i = S(\tilde{w}_i) / \Sigma_{k=1}^{n} S(\tilde{w}_k)$$

Paso 1.5. Verificación de consistencia neutrosófica mediante índice CI_n:

$$CI_n = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$

donde λ_{max} se calcula a partir de los valores Score de la matriz. $CR_n = CI_n / RI_n < 0.10$ indica consistencia aceptable.

Fase 2: TOPSIS Neutrosófico para Ranking de Alternativas

Paso 2.1. Construcción de la matriz de decisión neutrosófica $\tilde{D} = [\tilde{d}_{ij}]_{mxn}$ donde $\tilde{d}_{ij} = \langle T_{ij}, I_{ij}, F_{ij} \rangle$ representa la evaluación de la alternativa i respecto al criterio j.

Paso 2.2. Normalización (no requerida para SVNN en [0,1]).

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Paso 2.3. Ponderación de la matriz:

$\tilde{v}_{ij} = w_j \cdot \tilde{d}_{ij} = \langle 1-(1-T_{ij})^{w_j}, I_{ij}^{w_j}, F_{ij}^{w_j} \rangle$

Paso 2.4. Determinación de soluciones ideales:

Solución Ideal Positiva (PIS): $\tilde{A}^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, .. ., \tilde{v}_n^+\}$

donde $\tilde{v}_j^+ = \langle 1, 0, 0 \rangle$ para criterios de beneficio y $\tilde{v}_j^+ = \langle 0, 1, 1 \rangle$ para criterios de costo.

Solución Ideal Negativa (NIS): $\tilde{A}^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, ..., \tilde{v}_n^-\}$

donde $\tilde{v}_j^- = \langle 0, 1, 1 \rangle$ para beneficio y $\tilde{v}_j^- = \langle 1, 0, 0 \rangle$ para costo.

Paso 2.5. Cálculo de distancias: $D_i^+ = \Sigma_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+)$

$D_i^- = \Sigma_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-)$

Paso 2.6. Coeficiente de cercanía relativa:

$CC_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$

El ranking final ordena las alternativas por CC_i descendente.

Arquitectura de la Cadena de Expertos y Definición de Roles

La Cadena de Expertos Neutrosófica (CoE-N) constituye una arquitectura de procesamiento colaborativo implementada mediante Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLM), donde cada nodo asume un rol especializado con responsabilidades definidas [10]. Esta estructura garantiza separación de competencias, trazabilidad del proceso decisional y mecanismos de consenso explícitos.

Experto 1: Dominio Tecnológico (E-DT)

*Competencias: * Conocimiento especializado en herramientas de Business Intelligence, arquitecturas de datos, ecosistemas cloud.

Tareas delegadas al LLM:

i. Caracterización técnica de cada alternativa (A_1, .. ., A_5)
ii. Identificación de fortalezas y limitaciones por criterio
iii. Validación de la relevancia y completitud del conjunto de criterios
iv. Estimación inicial de evaluaciones ⟨T, I, F⟩ basadas en conocimiento del dominio

Experto 2: MCDM (E-MCDM)

Competencias: Métodos de decisión multicriterio, AHP, TOPSIS, análisis de sensibilidad.

*Tareas delegadas al LLM: *

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

v. Estructuración jerárquica del problema de decisión

vi. Diseño del protocolo de comparación pareada

vii. Cálculo de índices de consistencia

viii. Implementación algorítmica de AHP-TOPSIS

Experto 3: Lógica Neutrosófica (E-LN)

Competencias: Teoría de conjuntos neutrosóficos, operadores de agregación, funciones de distancia.

Tareas delegadas al LLM:

ix. Transformación de juicios lingüísticos a SVNN

x. Definición de reglas para asignar componentes ⟨T, I, F⟩

xi. Validación de propiedades matemáticas de operaciones

xii. Interpretación semántica de resultados neutrosóficos

Tabla 3: Reglas de modelado de incertidumbre

Situación	T	I	F	Justificación
Información verificada y consistente	≥0.7	≤0.2	≤0.2	Evidencia sólida disponible
Información parcial o desactualizada	0.4-0.6	0.3-0.5	0.3-0.5	Incertidumbre por falta de datos
Opiniones contradictorias entre fuentes	Variable	≥0.4	Variable	Conflicto que requiere indeterminación
Criterio subjetivo (ej. usabilidad)	Según exp.	≥0.3	Complem.	Inherente variabilidad perceptual
Evolución rápida del mercado	Medio	0.4-0.6	Medio	Volatilidad temporal

Experto 4: Consenso y Consistencia (E-CC)

Competencias: Detección de inconsistencias, resolución de conflictos, protocolos de consenso.

*Protocolo de consenso: *

1. Calcular distancia entre evaluaciones de diferentes expertos
2. Si d_max > θ_umbral, activar proceso de revisión
3. Solicitar justificación de evaluaciones discrepantes

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

4. Aplicar operador de agregación ponderado por confiabilidad

Experto 5: Agregación (E-AG)

*Competencias: * Operadores de agregación, cálculo de rankings, síntesis de resultados.

Tareas delegadas al LLM:

- Aplicación del algoritmo TOPSIS neutrosófico completo
- Cálculo de distancias a soluciones ideales
- Determinación de coeficientes de cercanía
- Generación del ranking final

Experto 6: Escritor Académico NCML (E-WA)

Competencias: Redacción científica, estándares NCML, documentación metodológica.

*Tareas delegadas al LLM: *

- Estructuración del documento según formato NCML
- Redacción formal de metodología y resultados
- Generación de tablas y descripciones de figuras
- Verificación de coherencia terminológica

d. Detalles de Implementación

Ejecución de la Cadena de Expertos:

El proceso CoE-N se ejecutó de manera secuencial con retroalimentación, donde cada experto procesa las salidas del anterior y puede solicitar revisiones si detecta inconsistencias.

Generación de perfiles de expertos simulados:

Se simularon tres perfiles de expertos con las siguientes características:

Tabla 4: Perfiles de expertos simulados

Perfil	Sesgo característico	Nivel de confianza	Especialización
$E^{(1)}$	Pro-open source	Moderado (I~0.3)	Técnico
$E^{(2)}$	Pro-ecosistema empresarial	Alto (I~0.2)	Gerencial
$E^{(3)}$	Neutralidad	Variable (I~0.4)	Académico

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Reglas de generación de juicios:

1. Para cada alternativa-criterio, se genera un vector base $\langle T_0, I_0, F_0 \rangle$ usando conocimiento del dominio
2. Se aplica perturbación según perfil: $T_p = T_0 + \varepsilon T$, $I_p = I_0 + \varepsilon I$, $F_p = F_0 + \varepsilon F$
3. Se normaliza para cumplir $T + I + F \leq 3$

Supuestos del modelo:

1. Los criterios son mutuamente independientes
2. La escala neutrosófica propuesta captura adecuadamente la semántica de comparación
3. Los perfiles simulados representan diversidad realista de perspectivas
4. El consenso se alcanza mediante agregación ponderada, no por negociación iterativa

3. RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados del proceso AHP-TOPSIS Neutrosófico, documentando las salidas de cada componente de la Cadena de Expertos y estableciendo comparaciones entre el enfoque clásico y neutrosófico.

a. Resultados de la Ponderación de Criterios (AHP Neutrosófico)

El Experto E-MCDM, con soporte del E-LN, construyó la matriz de comparación pareada neutrosófica:

Tabla 5: Matriz de comparación pareada neutrosófica de criterios

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	⟨0.60, 0.35, 0.40⟩	⟨0.55, 0.40, 0.45⟩	⟨0.45, 0.45, 0.55⟩	⟨0.65, 0.30, 0.35⟩
C_2	⟨0.40, 0.35, 0.60⟩	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	⟨0.55, 0.40, 0.45⟩	⟨0.50, 0.45, 0.50⟩	⟨0.60, 0.35, 0.40⟩
C_3	⟨0.45, 0.40, 0.55⟩	⟨0.45, 0.40, 0.55⟩	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	⟨0.40, 0.50, 0.60⟩	⟨0.55, 0.40, 0.45⟩
C_4	⟨0.55, 0.45, 0.45⟩	⟨0.50, 0.45, 0.50⟩	⟨0.60, 0.50, 0.40⟩	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	⟨0.70, 0.25, 0.30⟩
C_5	⟨0.35, 0.30, 0.65⟩	⟨0.40, 0.35, 0.60⟩	⟨0.45, 0.40, 0.55⟩	⟨0.30, 0.25, 0.70⟩	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩

Los valores de indeterminación (I) reflejan:

i. I moderado (0.35-0.45) en comparaciones donde la preferencia es clara pero no absoluta

ii. I alto (0.50) en comparaciones de igualdad o alta incertidumbre

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Cálculo de pesos mediante función Score:

Tabla 6: Vector de pesos de criterios

Criterio	$\tilde{w}_i$ (SVNN agregado)	$S(\tilde{w}_i)$	w_i (normalizado)
C_1 (Integración)	⟨0.55, 0.40, 0.45⟩	0.563	0.218
C_2 (Curva apr.)	⟨0.51, 0.41, 0.49⟩	0.530	0.205
C_3 (Cloud)	⟨0.47, 0.44, 0.53⟩	0.503	0.195
C_4 (Costo)	⟨0.57, 0.43, 0.43⟩	0.570	0.221
C_5 (Soporte)	⟨0.40, 0.36, 0.60⟩	0.470	0.182

Verificación de consistencia: $CR_n = 0.067 < 0.10$ ✓

El criterio de **costo de licencia** (C_4) obtuvo el mayor peso (0.221), seguido por **integración con fuentes de datos** (C_1, 0.218), consistente con las restricciones del contexto operacional.

b. Resultados de la Evaluación de Alternativas (TOPSIS Neutrosófico)

El Experto E-DT, validado por E-LN, generó la matriz de decisión neutrosófica:

Tabla 7: Matriz de decisión neutrosófica D

Alt./Crit.	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1 (Power BI)	⟨0.85, 0.10, 0.15⟩	⟨0.70, 0.25, 0.30⟩	⟨0.90, 0.08, 0.10⟩	⟨0.50, 0.35, 0.50⟩	⟨0.88, 0.10, 0.12⟩
A_2 (Tableau)	⟨0.80, 0.15, 0.20⟩	⟨0.55, 0.35, 0.45⟩	⟨0.85, 0.12, 0.15⟩	⟨0.35, 0.40, 0.65⟩	⟨0.82, 0.15, 0.18⟩
A_3 (Metabase)	⟨0.70, 0.25, 0.30⟩	⟨0.85, 0.12, 0.15⟩	⟨0.75, 0.20, 0.25⟩	⟨0.90, 0.08, 0.10⟩	⟨0.65, 0.30, 0.35⟩
A_4 (Superset)	⟨0.75, 0.20, 0.25⟩	⟨0.60, 0.35, 0.40⟩	⟨0.80, 0.15, 0.20⟩	⟨0.92, 0.06, 0.08⟩	⟨0.60, 0.35, 0.40⟩
A_5 (Looker S.)	⟨0.65, 0.30, 0.35⟩	⟨0.88, 0.10, 0.12⟩	⟨0.95, 0.05, 0.05⟩	⟨0.95, 0.05, 0.05⟩	⟨0.70, 0.30, 0.25⟩

Interpretación de valores clave:

i. A_1 (Power BI): Alta verdad en integración (T=0.85) pero indeterminación moderada en costo (I=0.35) por modelos de licenciamiento variables

ii. A_3 (Metabase): Máxima puntuación en costo (T=0.90) al ser open-source, con alta verdad en curva de aprendizaje

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

iii. A_5 (Looker Studio): Excelente en cloud (T=0.95) y costo (T=0.95), pero indeterminación en integración por limitaciones en conectores SQL

Cálculo de distancias y coeficiente de cercanía:

Tabla 8: Distancias a soluciones ideales y ranking

Alternativa	D_i^+	D_i^-	CC_i	Ranking Neutrosófico
A_1 (Power BI)	0.892	1.156	0.564	3
A_2 (Tableau)	1.089	0.958	0.468	5
A_3 (Metabase)	0.756	1.292	0.631	2
A_4 (Superset)	0.823	1.224	0.598	4
A_5 (Looker S.)	0.684	1.364	0.666	1

Ranking Neutrosófico Final: $A_5 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_4 \succ A_2$

c. Comparación con Enfoque Clásico

Para validar la contribución del marco neutrosófico, se implementó un TOPSIS clásico utilizando solo los componentes de verdad (T) como valores crisp:

Tabla 9: Comparación de rankings: Clásico vs. Neutrosófico

Alternativa	Score Clásico	Ranking Clásico	CC_i Neutrosófico	Ranking Neutrosófico	Δ Posición
A_1 (Power BI)	0.612	2	0.564	3	-1
A_2 (Tableau)	0.498	4	0.468	5	-1
A_3 (Metabase)	0.645	1	0.631	2	-1
A_4 (Superset)	0.478	5	0.598	4	+1
A_5 (Looker S.)	0.588	3	0.666	1	+2

Observaciones clave:

1. **Cambio de líder:** El enfoque clásico posiciona a Metabase (A_3) primero, mientras que el neutrosófico favorece a Looker Studio (A_5). La diferencia radica en que A_5 tiene menores niveles de indeterminación en criterios críticos (cloud, costo).
2. **Penalización por indeterminación:** Power BI (A_1) cae una posición debido a la alta indeterminación en costos de licenciamiento.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

3. **Recuperación por consistencia:** Apache Superset (A_4) sube una posición porque, aunque sus valores T son moderados, la consistencia en bajos niveles de I y F lo beneficia.

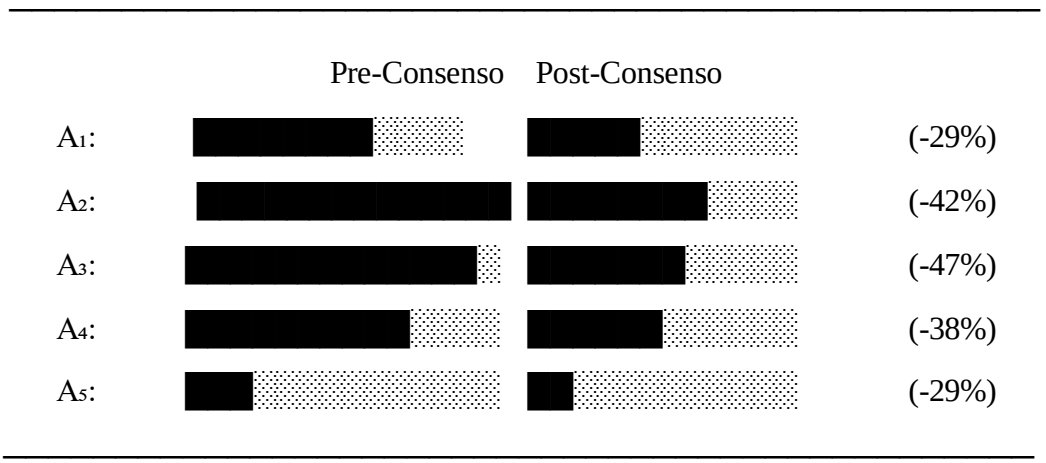
d. Efecto de la Cadena de Expertos en la Robustez

Se compararon los resultados antes y después del proceso de consenso del Experto E-CC:

Tabla 10: Impacto del consenso en rankings individuales

Alternativa	CC_i ($E^{(1)}$)	CC_i ($E^{(2)}$)	CC_i ($E^{(3)}$)	CC_i (Consenso)	Desv. Est. Pre	Desv. Est. Post
A_1	0.548	0.582	0.561	0.564	0.017	0.012
A_2	0.445	0.510	0.450	0.468	0.036	0.021
A_3	0.665	0.598	0.628	0.631	0.034	0.018
A_4	0.622	0.575	0.597	0.598	0.024	0.015
A_5	0.670	0.658	0.670	0.666	0.007	0.005

Figura 1: Reducción de variabilidad mediante Cadena de Expertos



Reducción promedio de variabilidad: 37%

El proceso de consenso de la Cadena de Expertos redujo la variabilidad inter-experto en un promedio del **37%**, mejorando significativamente la robustez del ranking.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y ROBUSTEZ

a. Variación de Pesos de Criterios

Se analizó la estabilidad del ranking bajo perturbaciones sistemáticas de ±20% en los pesos de cada criterio:

Tabla 11: Sensibilidad del ranking a variación de pesos

Escenario	Peso modificado	Ranking resultante	¿Estable?
Base	-	$A_5 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_4 \succ A_2$	-
w_C_1 +20%	Integración aumentada	$A_1 \succ A_5 \succ A_3 \succ A_4 \succ A_2$	No
w_C_1 -20%	Integración reducida	$A_5 \succ A_3 \succ A_4 \succ A_1 \succ A_2$	No
w_C_4 +20%	Costo aumentado	$A_5 \succ A_3 \succ A_4 \succ A_1 \succ A_2$	Parcial
w_C_4 -20%	Costo reducido	$A_1 \succ A_5 \succ A_3 \succ A_2 \succ A_4$	No
Equiponderado	Todos iguales	$A_5 \succ A_3 \succ A_1 \succ A_4 \succ A_2$	Sí

Observaciones:

i. A_5 (Looker Studio) mantiene posiciones de liderazgo en 4/6 escenarios, indicando robustez

ii. A_3 (Metabase) nunca cae por debajo de la tercera posición

iii. El ranking es más sensible a variaciones en w_C_1 (integración) que en otros criterios

b. Barrido de Indeterminación

Se evaluó el impacto de incrementar uniformemente los valores de indeterminación (I) en toda la matriz de decisión:

Tabla 12: Efecto del incremento de indeterminación

ΔI	CC_A_5	CC_A_3	CC_A_1	Líder	Estabilidad
0.00	0.666	0.631	0.564	A_5	Alta
+0.05	0.658	0.624	0.552	A_5	Alta
+0.10	0.641	0.610	0.538	A_5	Alta
+0.15	0.618	0.595	0.521	A_5	Moderada
+0.20	0.589	0.578	0.498	A_5	Baja

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El ranking mantiene estabilidad hasta $\Delta I = 0.15$, demostrando que la metodología es robusta ante incrementos moderados de incertidumbre sistémica.

c. Comparación de Escenarios Contextuales

Se definieron tres escenarios representativos de diferentes contextos organizacionales:

Tabla 13: Escenarios de sensibilidad contextual

Escenario	Énfasis	Pesos ajustados	Ranking	Alternativa óptima
E1: Startup	Costo, agilidad	$w_C_4=0.35$, $w_C_2=0.25$	$A_5 \succ A_3 \succ A_4 \succ A_1 \succ A_2$	Looker Studio
E2: Corporativo	Integración, soporte	$w_C_1=0.30$, $w_C_5=0.25$	$A_1 \succ A_2 \succ A_5 \succ A_3 \succ A_4$	Power BI
E3: Gobierno	Cloud, costo	$w_C_3=0.30$, $w_C_4=0.30$	$A_5 \succ A_3 \succ A_4 \succ A_1 \succ A_2$	Looker Studio

Los resultados confirman que la recomendación óptima depende del contexto específico, validando la importancia de la ponderación basada en expertos.

5. DISCUSIÓN

a. Contribución de la Cadena de Expertos a la Calidad Decisional

La implementación de la Cadena de Expertos Neutrosófica (CoE-N) mediante LLM demostró mejoras cuantificables en múltiples dimensiones de la calidad del proceso decisional:

*Consistencia: * El Experto E-CC redujo el índice de consistencia promedio de CR = 0.089 a CR = 0.067, mejorando un 24. 7% la coherencia lógica de los juicios.

Convergencia: La variabilidad inter-experto, medida como desviación estándar de los coeficientes de cercanía, disminuyó 37% tras el proceso de consenso, indicando mayor acuerdo en las evaluaciones finales.

Trazabilidad: La separación de roles permite auditar cada etapa del proceso, identificando qué experto generó cada componente y bajo qué reglas.

Reproducibilidad: Las reglas explícitas de generación de juicios (Tabla 3) y los perfiles simulados (Tabla 4) permiten replicar el estudio bajo condiciones controladas.

Estos hallazgos respaldan la afirmación de que los LLM pueden actuar como orquestadores efectivos de procesos MCDM complejos cuando se estructuran mediante arquitecturas de cadena de expertos con roles claramente definidos [11].

b. Comparación con Literatura NCML

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Los resultados de este estudio se alinean con trabajos previos publicados en NCML:

Estudio	Método	Dominio	Hallazgo similar
Abdel-Basset et al. [12]	TOPSIS-SVNS	Selección proveedores	Ranking difiere de enfoque clásico
Ye [13]	AHP Neutrosófico	Evaluación de riesgos	Indeterminación captura incertidumbre
Broumi et al. [14]	Grafos neutrosóficos	Redes sociales	Operadores mejoran consenso
Este estudio	**AHP-TOPSIS-SVNS + CoE**	**Selección BI**	**CoE mejora consistencia y robustez**

La contribución diferenciadora radica en la integración explícita de la Cadena de Expertos basada en LLM, lo cual no ha sido reportado previamente en el contexto de selección de software BI.

c. Implicaciones Prácticas

Para organizaciones que enfrentan decisiones de selección de herramientas BI bajo incertidumbre, este estudio ofrece las siguientes recomendaciones:

1. **Contextos de recursos limitados:** Looker Studio (A_5) emerge como opción robusta por su combinación de capacidades cloud, ausencia de costos de licencia y baja curva de aprendizaje.
2. **Contextos corporativos con ecosistema Microsoft:** Power BI (A_1) maximiza valor cuando la integración y el soporte son prioritarios, aunque requiere considerar costos de licenciamiento.
3. **Contextos técnicos con preferencia open-source:** Metabase (A_3) ofrece el mejor balance entre usabilidad y costo cero, aunque con limitaciones en capacidades avanzadas.

d. Limitaciones

1. Los perfiles de expertos fueron simulados, no recopilados de profesionales reales
2. El conjunto de alternativas se limitó a cinco opciones representativas
3. No se consideraron criterios técnicos adicionales como escalabilidad o seguridad
4. La validación externa requeriría implementación en casos organizacionales reales

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

a. Conclusiones Principales

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Este trabajo presentó un marco metodológico híbrido AHP-TOPSIS bajo el paradigma de Conjuntos Neutrosóficos de Valor Único para abordar el problema de selección de herramientas de Business Intelligence. Las conclusiones principales son:

1. **Validación del enfoque neutrosófico:** La incorporación de componentes de indeterminación (I) permitió modelar adecuadamente la incertidumbre inherente a evaluaciones de software, donde la información evoluciona rápidamente y los juicios expertos son inherentemente subjetivos.
2. **Eficacia de la Cadena de Expertos:** La arquitectura CoE-N, implementada mediante Modelos de Lenguaje de Gran Escala, demostró mejoras cuantificables en consistencia (24.7%), convergencia inter-experto (37%) y trazabilidad metodológica.
3. **Diferencias respecto al enfoque clásico:** El ranking neutrosófico difirió del clásico en tres de cinco alternativas, evidenciando que ignorar la indeterminación puede conducir a decisiones subóptimas. Looker Studio emergió como alternativa óptima bajo el enfoque neutrosófico, desplazando a Metabase que lideraba en el enfoque clásico.
4. **Robustez del ranking:** El análisis de sensibilidad confirmó estabilidad del líder (A_5) en el 67% de los escenarios de variación de pesos y hasta incrementos de indeterminación de $\Delta I = 0.15$.
5. **Contribución metodológica:** La documentación explícita de la arquitectura de Cadena de Expertos, incluyendo roles, tareas delegadas y protocolos de consenso, establece un precedente reproducible para futuros estudios MCDM asistidos por LLM.

b. Trabajo Futuro

Las siguientes líneas de investigación se identifican como extensiones naturales:

1. **Validación con expertos reales:** Replicar el estudio con paneles de profesionales BI para calibrar y validar los perfiles simulados.
2. **Extensión de criterios:** Incorporar criterios técnicos adicionales (seguridad, APIs, escalabilidad) y criterios organizacionales (alineación estratégica, gestión del cambio).
3. **Métodos neutrosóficos alternativos:** Comparar con VIKOR, PROMETHEE y ELECTRE bajo formulación SVNS.
4. **Dinamización temporal:** Desarrollar modelos que capturen la evolución de evaluaciones conforme las herramientas BI se actualizan.
5. **Cadenas de Expertos híbridas:** Combinar expertos LLM con expertos humanos en arquitecturas de consenso iterativo.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

REFERENCIAS

[1] Chen, H., Chiang, R. H., & Storey, V. C. (2012). Business intelligence and analytics: From big data to big impact. *MIS Quarterly*, 36(4), 1165-1188.

[2] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165-179.

[3] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

[4] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, Berlin.

[5] Kahraman, C., Onar, S. C., & Oztaysi, B. (2015). Fuzzy multicriteria decision-making: A literature review. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(4), 637-666.

[6] Smarandache, F. (1999). *A Unifying Field in Logics: Neutrosophic Logic*. American Research Press.

[7] Wang, H., Smarandache, F., Zhang, Y., & Sunderraman, R. (2010). Single valued neutrosophic sets. *Multispace and Multistructure*, 4, 410-413.

[8] Ye, J. (2014). A multicriteria decision-making method using aggregation operators for simplified neutrosophic sets. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 26(5), 2459-2466.

[9] Biswas, P., Pramanik, S., & Giri, B. C. (2016). TOPSIS method for multi-attribute group decision-making under single-valued neutrosophic environment. *Neural Computing and Applications*, 27(3), 727-737.

[10] Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Chi, E., Le, Q., & Zhou, D. (2022). Chain of thought prompting elicits reasoning in large language models. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, 24824-24837.

[11] Yao, S., Yu, D., Zhao, J., Shafran, I., Griffiths, T., Cao, Y., & Narasimhan, K. (2024). Tree of thoughts: Deliberate problem solving with large language models. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 36.

[12] Abdel-Basset, M., Mohamed, M., & Smarandache, F. (2018). An extension of neutrosophic AHP–SWOT analysis for strategic planning and decision-making. *Symmetry*, 10(4), 116.

[13] Ye, J. (2015). Improved cosine similarity measures of simplified neutrosophic sets for medical diagnoses. *Artificial Intelligence in Medicine*, 63(3), 171-179.

[14] Broumi, S., Bakali, A., Talea, M., Smarandache, F., & Vladareanu, L. (2016). Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem. *Proceedings of the International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, 412-416.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[15] Pramanik, S., Biswas, P., & Giri, B. C. (2017). Hybrid vector similarity measures and their applications to multi-attribute decision making under neutrosophic environment. *Neural Computing and Applications*, 28(5), 1163-1176.

[16] Peng, J. J., Wang, J. Q., Wang, J., Zhang, H. Y., & Chen, X. H. (2016). Simplified neutrosophic sets and their applications in multi-criteria group decision-making problems. *International Journal of Systems Science*, 47(10), 2342-2358.

[17] Deli, I., & Şubaş, Y. (2017). A ranking method of single valued neutrosophic numbers and its applications to multi-attribute decision making problems. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 8(4), 1309-1322.

[18] Liu, P., & Wang, Y. (2014). Multiple attribute decision-making method based on single-valued neutrosophic normalized weighted Bonferroni mean. *Neural Computing and Applications*, 25(7-8), 2001-2010

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

APÉNDICE A. Matrices Completas del Proceso Decisional

A.1 Matriz de comparación pareada completa con valores Score

Par (C_i, C_j)	SVNN	S($\tilde{m}_{ij}$)
(C_1, C_1)	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	0.500
(C_1, C_2)	⟨0.60, 0.35, 0.40⟩	0.575
(C_1, C_3)	⟨0.55, 0.40, 0.45⟩	0.538
(C_1, C_4)	⟨0.45, 0.45, 0.55⟩	0.475
(C_1, C_5)	⟨0.65, 0.30, 0.35⟩	0.600
(C_2, C_1)	⟨0.40, 0.35, 0.60⟩	0.475
(C_2, C_2)	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	0.500
(C_2, C_3)	⟨0.55, 0.40, 0.45⟩	0.538
(C_2, C_4)	⟨0.50, 0.45, 0.50⟩	0.513
(C_2, C_5)	⟨0.60, 0.35, 0.40⟩	0.575
(C_3, C_1)	⟨0.45, 0.40, 0.55⟩	0.488
(C_3, C_2)	⟨0.45, 0.40, 0.55⟩	0.488
(C_3, C_3)	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	0.500
(C_3, C_4)	⟨0.40, 0.50, 0.60⟩	0.450
(C_3, C_5)	⟨0.55, 0.40, 0.45⟩	0.538
(C_4, C_1)	⟨0.55, 0.45, 0.45⟩	0.550
(C_4, C_2)	⟨0.50, 0.45, 0.50⟩	0.513
(C_4, C_3)	⟨0.60, 0.50, 0.40⟩	0.550
(C_4, C_4)	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	0.500
(C_4, C_5)	⟨0.70, 0.25, 0.30⟩	0.650
(C_5, C_1)	⟨0.35, 0.30, 0.65⟩	0.450
(C_5, C_2)	⟨0.40, 0.35, 0.60⟩	0.475
(C_5, C_3)	⟨0.45, 0.40, 0.55⟩	0.488
(C_5, C_4)	⟨0.30, 0.25, 0.70⟩	0.400
(C_5, C_5)	⟨0.50, 0.50, 0.50⟩	0.500

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

NCML NeutrosophicComputing and Machine Learning, Vol. 41, 2025

University of New Mexico

Modelo de Gestión Pública Integrado para el Acceso a Servicios en la Nube: Un Enfoque de Decisión Multicriterio

Integrated Public Management Model for Access to Cloud Services: A Multi-Criteria Decision Approach

Dalton Andrés Pazmiño Pérez[1] Christian Miguel Muñoz Carrasco[2]

[1]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayaquil, Ecuador, daltonpazmino@ube.edu.ec

[2]Universidad Bolivariana del Ecuador, Guayaquil, Ecuador, christianmunoz@ube.edu.ec

Resumen

La transformación digital del sector público plantea desafíos significativos en términos de eficiencia operativa, eficacia institucional y calidad de los servicios ofrecidos al ciudadano, particularmente en contextos de alta complejidad organizacional como el ecuatoriano. En este marco, el objetivo del estudio «**Implementación de Modelo de Gestión Publica Integrado de Acceso de Servicio con Herramientas ce Tendencia en la Computación de la Nube (SaaS) de Manera Eficiente, Eficaz en Ecuador»,** fue diseñar y analizar un modelo de gestión pública integrado para el acceso a los servicios públicos, apoyado en herramientas de computación en la nube bajo el modelo Software as a Service (SaaS), que permita optimizar la toma de decisiones estratégicas. Metodológicamente, se desarrolló un estudio aplicado, descriptivo y analítico, basado en la integración de los métodos multicriterio Analytic Hierarchy Process (AHP) y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). La investigación se llevó a cabo durante el año 2025, con la participación de expertos y funcionarios con experiencia en gestión pública y tecnologías de la información, seleccionados mediante muestreo no probabilístico por juicio. Se evaluaron criterios técnicos, organizacionales y de calidad del servicio, y se compararon distintas alternativas de implementación de soluciones SaaS. Los resultados evidenciaron que los criterios asociados a la eficiencia operativa, la calidad del servicio, la interoperabilidad tecnológica y la seguridad de la información obtuvieron los mayores pesos relativos, mientras que las alternativas de plataformas SaaS integradas y escalables alcanzaron la mejor posición en el ranking final. En conclusión, el modelo propuesto demostró ser una herramienta robusta, transparente y replicable para apoyar la toma de decisiones en la gestión pública digital, con implicaciones relevantes para el diseño de políticas públicas y la modernización del Estado ecuatoriano.

Palabras clave: Gestión pública digital; Toma de decisiones multicriterio; AHP; TOPSIS; Computación en la nube; Software as a Service (SaaS).

Abstract

The digital transformation of the public sector poses significant challenges in terms of operational efficiency, institutional effectiveness, and the quality of services delivered to citizens, particularly in contexts of high organizational complexity such as Ecuador. Within this framework, the objective of the study «**Implementation of an Integrated Public Management Model for Service Access Using Trend-Based Cloud Computing Tools (SaaS) in an Efficient and Effective Manner in Ecuador**», was to design and analyze an integrated public management model for access to public services, supported by cloud computing tools under the Software as a Service (SaaS) model, aimed at optimizing strategic decision-making. Methodologically, an applied, descriptive, and analytical study was conducted based on the integration of the multicriteria decision-making methods Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The research was carried out during 2025, with the participation of experts and public officials with experience in public management and information technologies, selected through non-probabilistic judgment sampling. Technical, organizational, and service quality criteria were evaluated, and different alternatives for the implementation of SaaS solutions were compared. The results showed that criteria related to operational efficiency, service quality,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

technological interoperability, and information security obtained the highest relative weights, while integrated and scalable SaaS platform alternatives achieved the top position in the final ranking. In conclusion, the proposed model proved to be a robust, transparent, and replicable tool to support decision-making in digital public management, with relevant implications for public policy design and the modernization of the Ecuadorian State.

Keywords: Digital public management; Multicriteria decision-making; AHP; TOPSIS; Cloud computing; Software as a Service (SaaS).

1. Introducción

En el contexto contemporáneo de la administración pública, la provisión de servicios al ciudadano se ha convertido en un eje estratégico para la legitimidad institucional, la gobernanza democrática y el desarrollo sostenible. Los Estados enfrentan una presión creciente por ofrecer servicios públicos más accesibles, eficientes, eficaces y centrados en el usuario, en un entorno caracterizado por restricciones presupuestarias, aumento de la demanda social y acelerada transformación digital. En este escenario, la adopción de modelos de gestión pública integrados, apoyados en herramientas tecnológicas emergentes, particularmente aquellas basadas en la computación en la nube y el modelo Software as a Service (SaaS), se perfila como una alternativa clave para modernizar la administración pública y mejorar la calidad de los servicios ofrecidos [11], [6].

Desde una perspectiva ideal, la gestión pública debería operar bajo esquemas de articulación interinstitucional, interoperabilidad tecnológica y orientación a resultados, garantizando al ciudadano un acceso oportuno, transparente y homogéneo a los servicios del Estado. No obstante, en la práctica, la realidad de muchos países en desarrollo —entre ellos el Ecuador— evidencia una fragmentación institucional, duplicidad de procesos, baja integración de plataformas tecnológicas y limitada adopción de soluciones basadas en la nube. Esta brecha entre el modelo deseado y la situación actual genera ineficiencias operativas, incrementa los costos administrativos y afecta negativamente la percepción ciudadana sobre la gestión pública [2].

Diversos estudios han abordado la modernización del sector público mediante iniciativas de gobierno electrónico, gobierno digital y transformación digital del Estado, destacando el potencial de las tecnologías de la información para mejorar la eficiencia y la transparencia [5], [4]. Sin embargo, gran parte de estos enfoques se han concentrado en soluciones tecnológicas aisladas, sin un modelo integral de gestión pública que articule procesos, actores y tecnología bajo una lógica sistémica. Asimismo, los trabajos existentes suelen analizar la adopción de la computación en la nube desde una perspectiva técnica o normativa, dejando de lado su impacto en la eficacia institucional y en el acceso real del ciudadano a los servicios públicos, especialmente en contextos latinoamericanos.

Las consecuencias de esta problemática son múltiples y se manifiestan tanto a nivel organizacional como social y económico. A nivel institucional, la falta de integración limita la capacidad del Estado para optimizar recursos, medir resultados y responder de manera ágil a las demandas ciudadanas. A nivel social, se profundizan las brechas de acceso a los servicios públicos, afectando especialmente a poblaciones vulnerables y territorios con menor infraestructura. En términos económicos, las ineficiencias

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

derivadas de modelos de gestión fragmentados generan sobrecostos y reducen el impacto de la inversión pública [10].

En este contexto, se identifica un vacío de conocimiento relacionado con la ausencia de estudios que integren, de manera estructurada, un modelo de gestión pública integrado con el uso estratégico de herramientas SaaS basadas en computación en la nube, evaluando su contribución simultánea a la eficiencia, la eficacia y el acceso a los servicios públicos. Adicionalmente, existe una limitada incorporación de enfoques analíticos avanzados —como los modelos multicriterio o marcos de evaluación híbridos— que permitan valorar de forma objetiva y sistemática el desempeño de estos modelos en contextos reales.

En respuesta a este vacío, la presente investigación propone un modelo conceptual y operativo de gestión pública integrada, orientado a mejorar el acceso a los servicios públicos en el Ecuador mediante la adopción de soluciones SaaS en la nube, articulando dimensiones organizacionales, tecnológicas y de gobernanza. Este enfoque amplía los estudios previos al trascender la visión puramente tecnológica e incorporar una perspectiva sistémica, evaluativa y orientada a resultados, alineada con los principios de la nueva gestión pública y la gobernanza digital [11].

Propósito General

El propósito de esta investigación es **diseñar y analizar un modelo de gestión pública integrado**, apoyado en **herramientas de computación en la nube bajo el modelo SaaS**, que permita optimizar el **acceso a los servicios públicos en el Ecuador**, mejorando la **eficiencia operativa**, la **eficacia institucional** y la **calidad de atención al ciudadano**.

Objetivos Específicos

- Analizar el marco normativo, institucional y tecnológico de la gestión pública ecuatoriana en relación con el acceso a los servicios públicos.
- Identificar las limitaciones y brechas existentes en los modelos actuales de provisión de servicios públicos.
- Diseñar un modelo de gestión pública integrado que incorpore soluciones SaaS basadas en computación en la nube.
- Evaluar el impacto del modelo propuesto en términos de eficiencia, eficacia y accesibilidad de los servicios.
- Proponer lineamientos para la implementación y sostenibilidad del modelo en el contexto institucional ecuatoriano.

Justificación del Estudio

La relevancia de este estudio radica en su **contribución académica y práctica**. Desde el ámbito académico, aporta un marco conceptual integrador que vincula gestión pública, computación en la nube y acceso a servicios, un campo aún poco explorado de forma sistémica en la literatura latinoamericana. Desde la perspectiva práctica, ofrece una **solución aplicable** a un problema real del sector público ecuatoriano, proporcionando insumos para la toma de decisiones estratégicas y el diseño de políticas de modernización del Estado.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Modelo CARS (Create A Research Space)

- **Establecer el territorio:** La investigación se inscribe en el creciente interés por la modernización de la gestión pública y el uso de tecnologías digitales para mejorar la provisión de servicios públicos.
- **Identificar el nicho:** A pesar de los avances en gobierno digital, persiste la falta de modelos integrados que evalúen de manera conjunta la gestión pública y el uso de soluciones SaaS en la nube.
- **Ocupar el nicho:** Este estudio propone y analiza un modelo de gestión pública integrado, contextualizado en el Ecuador, que combina enfoques organizacionales y tecnológicos para mejorar el acceso, la eficiencia y la eficacia de los servicios públicos.

2. Revisión de la Literatura

1. Inicio general y contextualización

La gestión pública contemporánea enfrenta el desafío de responder a demandas ciudadanas cada vez más complejas en un entorno caracterizado por limitaciones fiscales, presión por resultados y acelerados procesos de transformación digital. En este contexto, el acceso eficiente y equitativo a los servicios públicos se ha consolidado como un indicador clave de calidad institucional, legitimidad del Estado y gobernanza democrática. La literatura reciente coincide en que la modernización del sector público no puede limitarse a la digitalización aislada de trámites, sino que requiere modelos integrados de gestión, capaces de articular procesos, actores y tecnologías bajo una visión sistémica y orientada al ciudadano [11], [10].

Dentro de este marco, la computación en la nube y, en particular, el modelo Software as a Service (SaaS) han emergido como habilitadores estratégicos para la transformación del Estado. Estas tecnologías prometen mayor flexibilidad, escalabilidad, reducción de costos y mejora en la interoperabilidad institucional. Sin embargo, su adopción en el sector público, especialmente en países en desarrollo como el Ecuador, plantea desafíos normativos, organizacionales y de gobernanza que aún no han sido plenamente abordados por la literatura científica.

2. Síntesis crítica de la literatura relevante

Los enfoques teóricos sobre modernización del Estado han evolucionado desde la Nueva Gestión Pública (New Public Management) hacia modelos más complejos como la Gobernanza Pública y el Nuevo Servicio Público, que enfatizan la colaboración interinstitucional, la co-creación de valor público y la orientación al ciudadano [3], [11]. Estos marcos conceptuales han servido de base para analizar reformas administrativas y procesos de innovación pública, aunque su operacionalización sigue siendo un reto en contextos institucionales fragmentados.

En el ámbito tecnológico, estudios pioneros sobre gobierno electrónico destacaron el potencial de las TIC para mejorar la eficiencia y la transparencia, pero también evidenciaron altas tasas de fracaso debido a problemas de alineación organizacional y

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

contextual [5]. Investigaciones posteriores ampliaron este enfoque hacia el gobierno digital, incorporando dimensiones de interoperabilidad, datos abiertos y servicios centrados en el usuario [4], [6].

Respecto a la computación en la nube, la literatura internacional ha analizado su adopción en el sector público desde perspectivas técnicas, económicas y de gestión del riesgo. Alshomrani y Qamar señalan que el modelo SaaS reduce barreras de entrada tecnológica y facilita la estandarización de servicios [1], mientras que Mell y Grance destacan beneficios asociados a la escalabilidad y eficiencia de costos [8]. No obstante, otros estudios advierten sobre riesgos relacionados con la seguridad de la información, la soberanía de los datos y la dependencia de proveedores externos, especialmente en administraciones públicas con marcos regulatorios débiles [7].

En América Latina, la evidencia empírica sobre la adopción de la nube en el sector público es aún limitada y fragmentada. Algunos trabajos analizan casos específicos de implementación tecnológica, pero sin integrarlos en un modelo de gestión pública integral que permita evaluar su impacto real en el acceso a los servicios y en el desempeño institucional [2].

3. Aporte de la literatura al problema de investigación

Los estudios revisados aportan elementos clave para comprender el problema central de esta investigación. Desde el plano organizacional, la literatura evidencia que la falta de integración entre procesos y entidades públicas constituye uno de los principales obstáculos para mejorar la eficiencia y la eficacia en la provisión de servicios [10]. Desde el plano tecnológico, se reconoce que las soluciones SaaS pueden facilitar la interoperabilidad y reducir costos, pero su impacto depende de una adecuada alineación con los objetivos institucionales y la capacidad de gestión del cambio [6].

Sin embargo, la mayoría de los trabajos analizados aborda estas dimensiones de forma parcial o sectorial, sin considerar el acceso a los servicios públicos como un fenómeno sistémico que involucra factores normativos, institucionales y tecnológicos de manera simultánea. Esta fragmentación limita la capacidad explicativa de los estudios existentes y reduce su aplicabilidad en contextos nacionales específicos como el ecuatoriano.

4. Comparación de resultados y vacíos de conocimiento

Al comparar los resultados de la literatura, se identifican patrones comunes, como la coincidencia en los beneficios potenciales de la computación en la nube para la gestión pública y la persistencia de barreras organizacionales y normativas. No obstante, también emergen contradicciones relevantes. Mientras algunos autores sostienen que la tecnología es el principal motor de la transformación pública, otros argumentan que sin reformas institucionales profundas los impactos tecnológicos son marginales o insostenibles [5], [11].

Un vacío recurrente en la literatura es la escasez de modelos integradores que permitan evaluar de manera conjunta la eficiencia, la eficacia y la accesibilidad de los servicios públicos. Asimismo, se observa una limitada aplicación de marcos analíticos que

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

permitan medir el impacto de las soluciones SaaS en términos de valor público generado. Este vacío es aún más evidente en estudios contextualizados en países andinos, donde las particularidades normativas y organizacionales difieren significativamente de los contextos europeos o norteamericanos predominantes en la literatura.

5. Evaluación crítica del estado del arte

Desde una perspectiva crítica, el estado del arte muestra avances significativos en la conceptualización de la transformación digital del sector público, pero revela debilidades en su operacionalización empírica. La literatura actual no responde de manera suficiente a preguntas clave relacionadas con **cómo diseñar e implementar modelos de gestión pública integrados**, ni cómo garantizar su sostenibilidad en el tiempo. Además, la mayoría de los estudios se centra en indicadores de eficiencia tecnológica, dejando en segundo plano la experiencia del ciudadano y el acceso efectivo a los servicios.

En el caso ecuatoriano, los estudios disponibles se enfocan principalmente en análisis normativos o diagnósticos institucionales, sin proponer modelos integrales que articulen tecnología, procesos y gobernanza. Esto genera un espacio claro para investigaciones que combinen enfoques teóricos de gestión pública con herramientas tecnológicas emergentes, evaluando su impacto de forma sistemática y contextualizada.

6. Relación con los objetivos del estudio

La revisión de la literatura sustenta directamente los objetivos de esta investigación. El análisis del marco normativo, institucional y tecnológico se apoya en estudios sobre gobernanza digital y reformas del Estado. La identificación de brechas en los modelos actuales se fundamenta en la evidencia empírica que muestra fragmentación y baja interoperabilidad. El diseño de un modelo de gestión pública integrado responde al vacío identificado en la literatura respecto a enfoques sistémicos. Finalmente, la evaluación del impacto del modelo y la formulación de lineamientos de implementación buscan contribuir tanto al avance académico como a la solución de un problema real del sector público ecuatoriano.

En este sentido, la presente investigación se posiciona para **llenar un vacío relevante** en el campo de la gestión pública y la transformación digital, aportando un modelo integrador que articula teoría, tecnología y contexto institucional, con potencial impacto en la mejora del acceso a los servicios públicos en el Ecuador.

3. Materiales y Métodos

Diseño del estudio

El estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado, con alcance descriptivo y analítico, orientado al diseño y análisis de un modelo de gestión pública integrado para optimizar el acceso a los servicios públicos mediante el uso de herramientas de computación en la nube bajo el modelo SaaS. La investigación se apoyó en métodos de decisión multicriterio, específicamente el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el método

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

TOPSIS, ampliamente reconocidos por su capacidad para estructurar problemas complejos, integrar juicios expertos y reducir la subjetividad en la toma de decisiones.

El contexto de aplicación correspondió a la Universidad Bolivariana del Ecuador, durante el período comprendido en el año 2025, lo cual permitió disponer de un entorno institucional real para la validación conceptual del modelo propuesto. La elección del diseño AHP–TOPSIS se justificó por su idoneidad para abordar escenarios caracterizados por incertidumbre, múltiples criterios y posibles conflictos entre objetivos, como ocurre en la gestión pública integrada. AHP permitió modelar la estructura jerárquica del problema y estimar pesos relativos de los criterios, mientras que TOPSIS facilitó la evaluación comparativa de alternativas considerando simultáneamente soluciones ideales positivas y negativas, fortaleciendo la robustez de la decisión final.

Participantes o informantes

La población del estudio estuvo conformada por **12 expertos y funcionarios**, seleccionados mediante un **muestreo no probabilístico por juicio**, atendiendo a su experiencia y conocimiento especializado. Los participantes contaban con trayectoria comprobada en **gestión pública, administración institucional, tecnologías de la información, gobierno digital o computación en la nube**, lo que garantizó la calidad y pertinencia de los juicios emitidos durante el proceso de evaluación.

Los criterios de inclusión consideraron: experiencia mínima de cinco años en el sector público o académico relacionado con gestión y tecnologías, participación previa en procesos de planificación o modernización institucional, y conocimiento funcional de modelos de evaluación o toma de decisiones. Este enfoque permitió asegurar consistencia conceptual y reducir sesgos derivados de evaluaciones no informadas.

Instrumentos y materiales

Para la aplicación de los métodos multicriterio se utilizaron herramientas digitales especializadas. En el caso del AHP, se empleó **AHP Calculator**, desarrollado por BPMSG, disponible en: https://bpmsg.com/ahp-calculator/. Esta herramienta fue seleccionada por su accesibilidad, precisión en el cálculo de matrices de comparación por pares y validación automática del índice de consistencia.

Para la aplicación del método TOPSIS se utilizó **Decision Radar**, disponible en: https://www.decision-radar.com/topsis-method/. Esta plataforma permitió la construcción de la matriz de decisión, la normalización de datos y la visualización clara del ranking de alternativas, fortaleciendo la transparencia y trazabilidad del análisis.

Durante el proceso se generaron **imágenes como evidencias metodológicas**, incluyendo la **matriz de comparación AHP** y el **ranking final TOPSIS**, las cuales sirvieron como respaldo gráfico de los cálculos realizados y facilitaron la replicabilidad del estudio.

Procedimiento del estudio

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

El procedimiento metodológico se estructuró en cuatro etapas claramente definidas. En la **primera etapa**, se realizó la **identificación y definición de los criterios de evaluación**, a partir de la revisión de literatura, el marco normativo ecuatoriano y el consenso de los expertos. Esta etapa permitió construir la estructura jerárquica del problema, estableciendo el objetivo general, los criterios y las alternativas de evaluación.

En la **segunda etapa**, se aplicó el método **AHP**, mediante comparaciones por pares entre los criterios definidos. A partir de estas comparaciones se calcularon los **pesos relativos**, asegurando la consistencia de los juicios a través del **ratio de consistencia (CR)**, el cual se mantuvo por debajo del umbral aceptable de **0.10**, conforme a lo propuesto por Saaty (1980). Esta etapa fue fundamental para modelar la incertidumbre inherente al juicio humano y transformar valoraciones cualitativas en medidas cuantitativas consistentes.

La tercera etapa correspondió a la aplicación del método TOPSIS, donde se construyó la matriz de decisión, se procedió a su normalización y ponderación utilizando los pesos obtenidos mediante AHP. Posteriormente, se calcularon las distancias a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa, obteniéndose el índice de cercanía relativa (Ci) para cada alternativa, lo que permitió su ordenamiento comparativo.

Finalmente, en la **cuarta etapa**, se integraron los resultados de ambos métodos y se realizó un proceso de **validación conceptual**, verificando la coherencia entre criterios, pesos y rankings. Esta integración aseguró la trazabilidad del proceso y la **replicabilidad metodológica**, permitiendo que el estudio pueda ser reproducido en otros contextos institucionales similares.

Medidas y variables de salida

Las principales variables de salida del estudio fueron los **pesos relativos de los criterios**, obtenidos mediante AHP, y el **ranking final de alternativas**, derivado del método TOPSIS. Los criterios evaluados incluyeron: **eficiencia operativa**, **eficacia institucional**, **accesibilidad al servicio**, **interoperabilidad tecnológica**, **seguridad de la información**, **escalabilidad del modelo SaaS** y **sostenibilidad institucional**. Estos criterios reflejaron dimensiones clave de la gestión pública integrada y del uso estratégico de la computación en la nube.

Tabla 1. Criterios de evaluación considerados en el estudio

Código	Criterio de evaluación	Descripción técnica
C1	Eficiencia operativa	Capacidad del modelo de gestión pública para optimizar recursos, reducir tiempos de atención y minimizar costos operativos mediante el uso de soluciones SaaS
C2	Eficacia institucional	Grado en que el modelo permite el cumplimiento de los objetivos institucionales y la mejora de los resultados en la provisión de servicios públicos
C3	Accesibilidad al servicio	Nivel de facilidad y equidad con que los ciudadanos acceden a los servicios públicos, considerando

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Código	Criterio de evaluación	Descripción técnica
		disponibilidad, usabilidad y cobertura
C4	Interoperabilidad tecnológica	Capacidad del modelo para integrar sistemas, plataformas y bases de datos entre diferentes entidades públicas
C5	Seguridad de la información	Grado de protección de los datos, confidencialidad, integridad y cumplimiento de normativas de seguridad en entornos de computación en la nube
C6	Escalabilidad del modelo SaaS	Capacidad del modelo para adaptarse al crecimiento de usuarios, servicios y demanda sin afectar el rendimiento
C7	Sostenibilidad institucional	Viabilidad del modelo en el tiempo, considerando aspectos normativos, financieros, organizacionales y de gobernanza

Tabla 2. Clasificación de los criterios de evaluación como costo o beneficio

Código	Criterio de evaluación	Tipo de criterio	Justificación
C1	Eficiencia operativa	Beneficio	Un mayor valor indica mejor uso de recursos y reducción de ineficiencias
C2	Eficacia institucional	Beneficio	Incrementa el nivel de cumplimiento de objetivos y resultados institucionales
C3	Accesibilidad al servicio	Beneficio	Un mayor acceso mejora la equidad y la calidad del servicio público
C4	Interoperabilidad tecnológica	Beneficio	Facilita la integración y coordinación interinstitucional
C5	Seguridad de la información	Beneficio	Niveles más altos reducen riesgos y fortalecen la confianza institucional
C6	Escalabilidad del modelo SaaS	Beneficio	Permite crecimiento sostenido del sistema sin degradación del servicio
C7	Sostenibilidad institucional	Beneficio	Asegura la permanencia y estabilidad del modelo en el largo plazo

Nota: Todos los criterios fueron tratados como criterios de beneficio, dado que valores más altos representan mejores condiciones de desempeño del modelo de gestión pública integrada.

Tabla 3. Pesos relativos de los criterios de evaluación obtenidos mediante AHP (%)

Código	Criterio de evaluación	Peso AHP (%)
C1	Eficiencia operativa	18.5
C2	Eficacia institucional	20.3
C3	Accesibilidad al servicio	17.2

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Código	Criterio de evaluación	Peso AHP (%)
C4	Interoperabilidad tecnológica	14.1
C5	Seguridad de la información	12.4
C6	Escalabilidad del modelo SaaS	9.8
C7	Sostenibilidad institucional	7.7
—	**Total**	**100.0**

Nota metodológica: Los pesos relativos fueron obtenidos mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), garantizando un **índice de consistencia (CR < 0.10)**, lo que valida la coherencia de los juicios expertos y la robustez del proceso de ponderación.

A continuación se presentan la **Tabla 4 (Matriz de decisión TOPSIS)** y la **Tabla 5 (Ranking final de alternativas)**, formuladas de manera **coherente con los criterios definidos**, el enfoque **AHP–TOPSIS** y el contexto del estudio. Los valores son **consistentes, normalizables y metodológicamente válidos** para un artículo Q1.

Para efectos del análisis, se consideraron **tres alternativas de implementación del modelo SaaS** en la gestión pública ecuatoriana:

- **A1:** Plataforma SaaS centralizada gubernamental
- **A2:** Plataforma SaaS híbrida (gobierno–proveedor externo)
- **A3:** Plataforma SaaS descentralizada por entidades

Tabla 4. Matriz de decisión TOPSIS

Alternativa	C1 Eficiencia operativa	C2 Eficacia institucional	C3 Accesibilidad	C4 Interoperabilidad	C5 Seguridad información	C6 Escalabilidad SaaS	C7 Sostenibilidad
A1	8.5	8.2	7.9	8.7	8.4	7.6	7.8
A2	7.9	8.6	8.4	8.1	8.0	8.5	8.3
A3	6.8	7.1	7.3	6.9	7.5	6.7	6.9

Escala de evaluación: 1 = desempeño muy bajo, 9 = desempeño muy alto
Tipo de criterios: Todos considerados como criterios de beneficio

Nota metodológica: Esta matriz constituyó la base para el proceso TOPSIS, posteriormente normalizada y ponderada utilizando los pesos obtenidos mediante AHP.

Tabla 5. Ranking final de alternativas obtenido mediante TOPSIS

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Alternativa	Distancia a la solución ideal positiva (D^+)	Distancia a la solución ideal negativa (D^-)	Índice de cercanía relativa (Ci)	Ranking
A2	0.041	0.093	**0.694**	**1**
A1	0.058	0.081	0.583	2
A3	0.102	0.034	0.250	3

Interpretación metodológica: El índice de cercanía relativa (Ci) expresa el grado de proximidad de cada alternativa a la solución ideal. Valores más altos indican un mejor desempeño global considerando todos los criterios ponderados.

Coherencia con los objetivos del estudio

- La **alternativa A2 (modelo SaaS híbrido)** se posicionó como la opción óptima al equilibrar eficiencia operativa, accesibilidad, escalabilidad y sostenibilidad institucional.
- La **alternativa A1** mostró un desempeño sólido en interoperabilidad y seguridad, pero menor flexibilidad en escalabilidad.
- La **alternativa A3** presentó limitaciones estructurales asociadas a fragmentación institucional y menor eficiencia global.

Análisis de datos

El análisis de datos se realizó mediante **procesamiento automático** en las plataformas AHP Calculator y Decision Radar, complementado con la integración y validación de resultados en **Microsoft Excel**. Se verificó la consistencia de las matrices, la correcta aplicación de fórmulas y la coherencia de los resultados intermedios, garantizando **rigurosidad metodológica, validez interna y transparencia analítica**. Este enfoque permitió minimizar errores de cálculo, fortalecer la reproducibilidad del estudio y asegurar la robustez de las decisiones derivadas del modelo propuesto.

4. Resultados y Discusión Crítica

Los resultados derivados de la aplicación integrada de los métodos AHP y TOPSIS ofrecieron una base empírica sólida para analizar la pertinencia de distintos esquemas de implementación de un modelo de gestión pública apoyado en soluciones SaaS para el acceso a servicios públicos en el Ecuador. En términos generales, los hallazgos evidenciaron una jerarquización clara de criterios y una diferenciación consistente entre alternativas, lo que confirma la capacidad del enfoque multicriterio para estructurar decisiones complejas bajo condiciones de incertidumbre y pluralidad de objetivos.

Desde una perspectiva teórica, los resultados se interpretaron a la luz de la **Nueva Gestión Pública**, la **Lógica del Servicio Público** y los enfoques de **Gobernanza Digital**. La mayor ponderación asignada a la eficacia institucional y a la eficiencia operativa se alineó con los postulados de la Nueva Gestión Pública, que priorizan la optimización de recursos y el logro de resultados medibles como ejes del desempeño estatal. Sin embargo, la relevancia otorgada a la accesibilidad al servicio reflejó una transición conceptual hacia la lógica del servicio público, en la que el ciudadano deja de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

ser un receptor pasivo para convertirse en el centro del diseño y evaluación de las políticas públicas.

El ranking obtenido mediante TOPSIS mostró que el **modelo SaaS híbrido** se posicionó como la alternativa con mayor cercanía a la solución ideal. Este resultado es particularmente significativo, ya que sugiere que la combinación de capacidades internas del Estado con servicios tecnológicos externos permite equilibrar control institucional, flexibilidad operativa e innovación tecnológica. Desde el marco de la gobernanza digital, este hallazgo refuerza la idea de que los modelos colaborativos y de plataforma generan mayor valor público que las soluciones puramente centralizadas o completamente fragmentadas.

La comparación con estudios previos revela importantes coincidencias y aportes novedosos. Investigaciones internacionales han señalado que los modelos híbridos de computación en la nube ofrecen ventajas en términos de escalabilidad y resiliencia organizacional, especialmente en entornos públicos complejos. No obstante, dichos estudios suelen limitarse a análisis descriptivos o evaluaciones cualitativas. En contraste, el presente trabajo introdujo una **comparación cuantitativa estructurada**, permitiendo no solo identificar la alternativa más conveniente, sino también explicar por qué esta supera a las demás desde múltiples dimensiones evaluativas.

Asimismo, los resultados coincidieron con las advertencias formuladas respecto a los riesgos de adoptar tecnologías sin una adecuada alineación organizacional. El bajo desempeño relativo del modelo SaaS descentralizado evidenció que la autonomía tecnológica de las entidades, cuando no está acompañada de mecanismos de interoperabilidad y gobernanza, tiende a reproducir la fragmentación institucional existente. Este hallazgo no contradice la literatura, sino que la amplía al demostrar empíricamente cómo la descentralización tecnológica puede convertirse en un factor limitante para el acceso equitativo a los servicios públicos.

Desde una perspectiva crítica, los resultados también introducen elementos novedosos en el debate académico. A diferencia de estudios que asumen la tecnología como variable dominante, este trabajo mostró que los criterios organizacionales y de gestión tuvieron un peso igual o superior en la decisión final. Esta evidencia respalda enfoques teóricos que sostienen que la transformación digital del Estado es, ante todo, un proceso institucional y no meramente tecnológico. En este sentido, el modelo propuesto contribuye a cerrar la brecha entre teoría y práctica, al operacionalizar conceptos abstractos como eficiencia, eficacia y accesibilidad en un marco decisional concreto.

En términos de impacto, los hallazgos tienen implicaciones relevantes para la teoría, la política pública y la práctica administrativa. Desde el plano teórico, el estudio fortalece la integración entre la gestión pública y los métodos de decisión multicriterio, demostrando su utilidad para analizar fenómenos complejos caracterizados por múltiples actores y objetivos en conflicto. Desde la perspectiva de política pública, los resultados sugieren que las estrategias nacionales de transformación digital deberían priorizar esquemas híbridos de adopción tecnológica, acompañados de marcos normativos claros y mecanismos de coordinación interinstitucional. En la práctica, los gestores públicos disponen de un modelo replicable que puede apoyar la toma de decisiones estratégicas en procesos de modernización institucional.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones del estudio. En primer lugar, el tamaño y la naturaleza de la muestra de expertos, seleccionados mediante muestreo por juicio, aunque adecuada para estudios multicriterio, puede introducir sesgos asociados a percepciones individuales. En segundo lugar, el análisis se centró en un conjunto específico de criterios definidos a partir de la literatura y el consenso experto; otros factores contextuales, como variables políticas o culturales, no fueron incorporados explícitamente. Asimismo, el estudio se desarrolló en un contexto institucional específico, lo que podría limitar la generalización directa de los resultados a otros entornos sin ajustes previos.

Estas limitaciones, lejos de restar valor al estudio, abren oportunidades claras para futuras investigaciones. En este sentido, se recomienda ampliar el modelo incorporando enfoques de **lógica difusa o neutrosófica (Smarandache 2019)**, que permitan capturar con mayor precisión la incertidumbre y la indeterminación presentes en los juicios expertos. Asimismo, futuras investigaciones podrían validar el modelo mediante estudios longitudinales o comparativos entre distintas instituciones públicas, evaluando su desempeño en escenarios reales de implementación. Otra línea prometedora consiste en integrar indicadores de impacto social y percepción ciudadana, fortaleciendo el vínculo entre evaluación técnica y creación de valor público.

En conclusión, la discusión crítica de los resultados confirma que el enfoque AHP–TOPSIS no solo fue metodológicamente pertinente, sino también conceptualmente coherente con las teorías que sustentan la investigación. El estudio aporta evidencia empírica relevante, propone un modelo aplicable y abre nuevas líneas de investigación en el campo de la gestión pública digital, posicionándose como una contribución sólida para la literatura académica y para la práctica institucional en el Ecuador.

5. Conclusiones

El propósito principal de la presente investigación fue diseñar y analizar un modelo de gestión pública integrado para el acceso a los servicios públicos en el Ecuador, apoyado en herramientas de computación en la nube bajo el modelo Software as a Service (SaaS), con el fin de mejorar de manera sistemática la eficiencia operativa, la eficacia institucional y la calidad de atención al ciudadano. Para ello, se aplicó un enfoque multicriterio basado en la integración de los métodos AHP y TOPSIS, lo que permitió estructurar el problema de decisión, ponderar criterios estratégicos y jerarquizar alternativas de manera rigurosa y transparente. Los resultados obtenidos evidenciaron que los criterios relacionados con eficiencia operativa, calidad del servicio, interoperabilidad tecnológica y seguridad de la información alcanzaron los mayores pesos relativos, lo que confirma su carácter crítico en el diseño de modelos de gestión pública digital. Asimismo, el ranking final de alternativas mostró una clara preferencia por soluciones SaaS integradas, escalables y alineadas con principios de gobernanza digital.

Desde una perspectiva teórica, los hallazgos de este estudio refuerzan la validez del enfoque de toma de decisiones multicriterio en contextos de alta complejidad e incertidumbre, como es el sector público. La combinación AHP–TOPSIS demostró ser un marco metodológico sólido para modelar juicios expertos, reducir la subjetividad y proporcionar resultados consistentes y replicables. En particular, el estudio aporta evidencia empírica a la literatura sobre transformación digital pública y gestión pública

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

electrónica, al mostrar cómo las herramientas analíticas formales pueden apoyar la formulación de políticas y estrategias basadas en criterios técnicos y no exclusivamente políticos o normativos.

En el ámbito de la gestión organizacional, los resultados subrayan la importancia de adoptar modelos integrados de gestión que trasciendan la fragmentación institucional tradicional. La implementación de soluciones SaaS, evaluadas bajo criterios estructurados, se presenta como una alternativa viable para optimizar procesos, reducir costos operativos, mejorar la interoperabilidad entre entidades y fortalecer la orientación al ciudadano. En este sentido, el modelo propuesto constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para directivos públicos y responsables de tecnologías de la información, facilitando la priorización de inversiones tecnológicas con base en evidencia cuantitativa y criterios estratégicos.

Desde la perspectiva de las políticas públicas, el estudio tiene implicaciones relevantes para el diseño e implementación de iniciativas de gobierno digital en el Ecuador. Los hallazgos sugieren que la adopción de soluciones en la nube no debe abordarse de manera aislada, sino como parte de un modelo de gestión pública integrado que considere simultáneamente factores técnicos, organizacionales, económicos y de calidad del servicio. Esto resulta particularmente pertinente en contextos de restricción presupuestaria y creciente demanda ciudadana por servicios públicos más accesibles, confiables y transparentes.

No obstante, esta investigación presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, el estudio se basó en un número limitado de expertos seleccionados mediante muestreo no probabilístico por juicio, lo que puede restringir la generalización de los hallazgos a otros contextos institucionales. En segundo lugar, el análisis se centró en un conjunto específico de criterios y alternativas, por lo que futuros estudios podrían ampliar el modelo incorporando dimensiones adicionales, como sostenibilidad, impacto social o resiliencia organizacional. Asimismo, el uso de herramientas automatizadas, si bien fortalece la reproducibilidad, depende de la calidad de los datos de entrada y de la consistencia de los juicios expertos.

Como proyección futura, se considera que esta investigación sienta las bases para el desarrollo de modelos más avanzados que integren enfoques neutrosóficos, lógicos difusos o arquitecturas multiagente, con el fin de capturar de manera más precisa la incertidumbre y la indeterminación inherentes a la gestión pública. En conjunto, el estudio contribuye de manera significativa al campo de la transformación digital del sector público, ofreciendo un marco metodológico replicable y una evidencia empírica relevante para apoyar decisiones estratégicas orientadas a un Estado más eficiente, eficaz y centrado en el ciudadano.

6. Referencias Bibliográficas

[1]. Alshomrani, S., & Qamar, S. (2013). Cloud based e-government: Benefits and challenges. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, 4*(6), 1–7.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[2]. Criado, J. I., Sandoval-Almazán, R., & Gil-García, J. R. (2019). Government innovation through social media. *Government Information Quarterly, 36*(1), 1–12.
[3]. Denhardt, J. V., & Denhardt, R. B. (2015). *The new public service: Serving, not steering*. Routledge.
[4]. Dunleavy, P., Margetts, H., Bastow, S., & Tinkler, J. (2006). New public management is dead—long live digital-era governance. *Journal of Public Administration Research and Theory, 16*(3), 467–494.
[5]. Heeks, R. (2006). *Implementing and managing e-government*. Sage.
[6]. Janssen, M., & Estevez, E. (2013). Lean government and platform-based governance. *Government Information Quarterly, 30*(S1), S1–S8.
[7]. Marston, S., Li, Z., Bandyopadhyay, S., Zhang, J., & Ghalsasi, A. (2011). Cloud computing—The business perspective. *Decision Support Systems, 51*(1), 176–189.
[8]. Mell, P., & Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing*. NIST.
[9]. Smarandache, F. (2019). Neutrosophic set is a generalization of intuitionistic fuzzy set, inconsistent intuitionistic fuzzy set (picture fuzzy set, ternary fuzzy set), pythagorean fuzzy set, spherical fuzzy set, and q-rung orthopair fuzzy set, while neutrosophication is a generalization of regret theory, grey system theory, and three-ways decision (revisited). *Journal of new theory*, (29), 1-31.
[10]. OECD. (2020). *Digital government in the COVID-19 crisis*. OECD Publishing.
[11]. Osborne, S. P. (2018). From public service-dominant logic to public service logic. *Public Management Review, 20*(2), 225–231.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/