

CULCYT

CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 23 | NÚMERO 1

ENERO - ABRIL 2026

Dr. Daniel Constandse Cortez
RECTOR

Dr. Salvador David Nava Martínez
SECRETARIO GENERAL

Mtra. Guadalupe Gaytán Aguirre
SECRETARIA ACADÉMICA

Dr. Erwin Adán Martínez Gómez
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Mtra. Mayola Renova
COORDINADORA GENERAL EDITORIAL Y DE PUBLICACIONES

Dr. Manuel Antonio Ramos Murillo
EDITOR EN JEFE DE CULCYT

Comité Editorial

Dr. Manuel Antonio Ramos Murillo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Editor en Jefe

Mtro. Raúl Alfredo Meza González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Coordinador Editorial

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Abdiel Ramírez Reyes
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dra. Santos Adriana Martel Estrada
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Cortés Sáenz
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Ortega Gaucin
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza.

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Volumen 23, número 1, enero-abril 2026, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Editor responsable: Dr. Manuel Antonio Ramos Murillo

Reserva de derechos al uso exclusivo núm. 04-2022-101711332100-102.

ISSN (electrónico): 2007-0411.

Sitio OJS: erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt. Correo electrónico: culcyt@uacj.mx. Teléfono +52 (656) 6884848.

DOI: [10.20983/culcyt.2026.1](https://doi.org/10.20983/culcyt.2026.1)

Modalidad de publicación continua. Tan pronto como un artículo ha sido preparado, se publica en línea.

Los trabajos a publicar en CULCYT deben ser originales e inéditos. En este momento, la revista no tiene costos de publicación para los autores.

El acceso a la revista es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



UACJ |  Repositorio Institucional

Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE CIUDAD JUÁREZ

latindex

Dialnet

Artículos de investigación
Research articles

Identificación paramétrica para un amortiguador regenerativo electromecánico	5
Parametric identification for an electromechanical regenerative shock absorber Josmar Emmanuel Martínez Pérez, Miguel Alberto Domínguez Gurriá, José Gabriel Mendoza Larios, Eduardo Barredo Hernández	

Optimización de la calidad y productividad en la manufactura de pastas mediante DMAIC y herramientas Lean-Six Sigma	18
Optimization of Quality and Productivity in Pasta Manufacturing using DMAIC and Lean-Six Sigma Tools Gissel Guadalupe Morales Medina, Erick Uriel Morales Cruz, Jair Jared Pérez Ambrosio	

Edición Especial “Estrategia de Gestión para la Transición hacia una Economía Circular”
Special Edition “Management Strategy for the Transition to a Circular Economy”

Presentación	E1
Foreword Dra. Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy	

Modelo para la creación de una <i>spin-off</i> en Ciudad Juárez: consideraciones y prácticas	E2
Model for Creating a Spin-off in Ciudad Juárez: Considerations and Practices Tomás Francisco Limones Meraz, Roberto Romero López, Mario Macario Ruiz Grijalva	

Control ecoeficiente para equipos de prueba eléctrica en la industria electrónica	E21
Eco-efficient control for electrical testing equipment in the electronics industry Geu M. Puentes-Conde, Ernesto Sifuentes de la Hoya, Javier Molina Salazar, Francisco Javier Enríquez-Aguilera, Guadalupe Navarro Enriquez	

Sustentabilidad y seguridad en el transporte de mercancías en Ciudad Juárez: un análisis multicriterio con el método TOPSIS	E31
Sustainable and Security Freight Transportation in Juarez City: A Multicriteria Analysis Using TOPSIS Method M.I.A. Johana Medina Zárate, Dr. Iván Juan Carlos Pérez Olguín, Dra. Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy, Dra. Consuelo Catalina Fernández Gaxiola	

Diseño sostenible de perfiles de elevador: mejorando la eficiencia aerodinámica en aeronaves experimentales	E40
Sustainable elevator profile design: improving aerodynamic efficiency in experimental aircraft Jeannette Abril Nevárez Sánchez, Arturo Paz Pérez	

Red neuronal para la detección inteligente de residuos orgánicos: hacia una solución ambiental sostenible	E58
Neuronal Network for Intelligent Detection of Organic Waste: Towards a Sustainable Environmental Solution Guadalupe Navarro Enríquez, Trinidad Reyes Portillo, Dionisio Navarrete Baloës, Irving Bruno López Santos, Quetzal Elohim Bastarrachea Almodóvar, Geu M. Puentes-Conde	

Solar Panel Stand Alone Microgrid Allocation System	E66
Sistema de asignación de microrred para paneles solares José Trinidad Reyes Portillo, Guadalupe Navarro Enríquez, Adrián Francisco Loera Castro	

Modelación de red hidráulica de alcantarillado sanitario. Caso de estudio en Mexicali, Baja California, México	E74
Hydraulic modeling of a sanitary sewer network. Case study in Mexicali, Baja California, Mexico Irma Lorena Villagrana García, Marco Antonio Montoya Alcaraz, Carlos Salazar-Briones, José Ruiz-Gibert	

Selección de proveedores verdes en la cadena de suministro: aplicación del **E84**
método MEREC en la industria maquiladora

Green Supplier Selection in Supply Chains: Application of the MEREC Method in the Maquiladora Industry

Alejandra Holguín Avila, Luis Asunción Pérez Domínguez, Roberto Romero Lopez, David Luviano Cruz, Erwin Adán Martínez Gómez

Residuos voluminosos en Latinoamérica: caso de estudio para los **E93**
colchones en desuso

Bulky waste in Latin America: A case study for unused mattresses

Ing. Ana María Jiménez Leal, Dr. Rodrigo Barraza Alonso, Dr. Leonardo Rodríguez-Cordova

Función socioambiental de las empresas turísticas: enfoques locales **E101**
para desafíos globales

Socioenvironmental function of tourism enterprises: local approaches to global challenges

María José Rueda, Salomé Raquel Vega, María Agustina Bres, Luz María Kasperski

Factores críticos de desempeño y seguridad en SI mediante TOPSIS: **E119**
determinantes para la sustentabilidad empresarial

Critical Performance and Security Factors in SI using TOPSIS: Determinants of Business Sustainability

Montserrat Reséndiz Leos, Patricia Parroquin-Amaya, Iván Juan Carlos Pérez-Olguín, Karla Miroslava Olmos-Sánchez

Identificación paramétrica para un amortiguador regenerativo electromecánico

Parametric identification for an electromechanical regenerative shock absorber

Josmar Emmanuel Martínez Pérez^{1a} ✉, Miguel Alberto Domínguez Gurría^{1b} , José Gabriel Mendoza Larios^{1a} ,
Eduardo Barredo Hernández² 

¹ ^a{Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz}, ^b{División de Estudios de Posgrado}, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México

² Departamento de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Universidad Politécnica de Tapachula, Tapachula - Puerto de San Benito, Chiapas, México

RESUMEN

Este estudio presenta el desarrollo de identificadores paramétricos basados en un enfoque algebraico, aplicados a una suspensión pasiva moderna con un amortiguador regenerativo electromecánico. Mediante un modelo generalizado del vehículo, se abordan los efectos de las vibraciones mecánicas, cuyo control es esencial para evitar fallos estructurales y mejorar el desempeño del sistema. La correcta estimación y sintonización de parámetros permite no solo una mitigación eficiente de las vibraciones, sino también optimizar la generación de energía eléctrica en sistemas regenerativos. Se validan los identificadores propuestos mediante pruebas de robustez y análisis de sensibilidad, demostrando su eficacia y confiabilidad en condiciones operativas variables.

PALABRAS CLAVE: amortiguador regenerativo; identificación algebraica; suspensión automotriz regenerativa; parámetros físicos.

ABSTRACT

This study presents the development of parametric identifiers based on an algebraic approach, applied to a modern passive suspension system with an electromechanical regenerative shock absorber. Using a generalized vehicle model, the study addresses the effects of mechanical vibrations, whose control is essential to prevent structural failures and enhance system performance. Accurate parameter estimation and tuning enable not only efficient vibration mitigation but also the optimization of electrical energy generation in regenerative systems. The proposed identifiers are validated through robustness tests and sensitivity analysis, demonstrating their effectiveness and reliability under varying operating conditions.

KEYWORDS: regenerative shock absorber; algebraic identification; automotive regenerative suspension; physical parameters.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Josmar Emmanuel Martínez Pérez
INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica de la Mixteca
DIRECCIÓN: Av. Dr. Modesto Seara Vázquez núm. 1, Acatlima
Huajuapán, C. P. 69004, Oaxaca, México
CORREO ELECTRÓNICO: mapj000119@gs.utm.mx

Fecha de recepción: 15 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 9 de enero de 2026. **Fecha de publicación:** 6 de marzo de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

La actual crisis climática, impulsada por el uso de combustibles fósiles y las emisiones de CO_2 , ha llevado a las industrias del sector privado y/o público a buscar soluciones más sostenibles en el sector transporte, como los vehículos híbridos y eléctricos. Aunque estas tecnologías reducen las emisiones, enfrentan desafíos relacionados con la autonomía, el costo y la eficiencia de las baterías. Para mejorar indirectamente su rendimiento, se han desarrollado estrategias de gestión energética y tecnologías de recuperación, como sistemas de freno regenerativo (KERs) [1], aprovechamiento del calor del motor mediante el uso de los Generadores Termoeléctricos (TEMs) [2] y los amortiguadores regenerativos (RSAs) [3]. Estos últimos, estudiados desde los años 80, representan mayor densidad de regeneración de energía que los KERs, produciendo hasta 2.5 veces mayor energía eléctrica que su contraparte [4].

Los amortiguadores regenerativos electromecánicos (RSAs), tanto convencionales como híbridos, no solo permiten recuperar la energía vibratoria del sistema de suspensión, sino que también contribuyen al mejoramiento del confort y la seguridad en la conducción del vehículo [5]. Estos dispositivos de tecnología renovable logran un equilibrio adecuado entre distintos requerimientos dinámicos del vehículo, equilibrio que depende principalmente de la capacidad disipativa del sistema de amortiguación híbrido [6]. En general, el comportamiento de amortiguamiento de los RSAs híbridos se modela teóricamente como la superposición de las componentes de amortiguamiento generadas por cada unidad de conversión de energía, las cuales están altamente influenciadas por las no-linealidades del sistema [7]. Por ello, el mecanismo de disipación de energía en los RSAs resulta complejo de evaluar y caracterizar con precisión.

Recientemente, Zhang *et al.* determinaron empíricamente, mediante un proceso de prueba y error, el coeficiente de amortiguamiento mecánico de un RSA lineal con accionamiento indirecto, utilizando perfiles armónicos como fuente de excitación [8]. Posteriormente, los mismos autores consideraron la contribución del amortiguamiento eléctrico al amortiguamiento total en un RSA rotatorio, calculando teóricamente el amortiguamiento global del dispositivo a partir de las ecuaciones de balance de energía [9]. Asimismo, Salman *et al.* emplearon un enfoque similar para analizar cómo varía el amortiguamiento en función de la resistencia eléctrica

de carga en el circuito de recolección de energía [10]. Sin embargo, en la mayoría de los distintos tipos de RSAs, el amortiguamiento aún no ha sido identificado mediante técnicas robustas y alternativas de identificación.

La correcta identificación del amortiguamiento en los amortiguadores regenerativos inteligentes (RSAs) es fundamental para asegurar el desempeño óptimo del sistema de suspensión. Esto permite maximizar la capacidad de recuperación de energía sin comprometer no solo la efectividad de mitigación de vibraciones, sino también la seguridad estructural de los elementos mecánicos móviles y fijos del sistema [11].

Actualmente, una técnica innovadora, conocida como *identificación algebraica*, se presenta como una herramienta eficiente para estimar parámetros físicos a partir del modelo matemático del sistema. Esta metodología es aplicable tanto en el dominio temporal como en el frecuencial, siendo adecuada para sistemas lineales y no lineales [12], [13]. Entre sus principales ventajas destacan su independencia de las condiciones iniciales y su alta robustez frente a perturbaciones [14]. La técnica ha sido aplicada con éxito en la identificación de parámetros como el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez en sistemas de suspensión pasivos y semiactivos [15]. Adicionalmente, algunas comparaciones entre la técnica de identificación algebraica y los métodos clásicos de identificación, así como sus ventajas y desventajas, se pueden encontrar en [16].

Por lo tanto, este trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar identificadores algebraicos para un RSA electromecánico, cuyo modelo dinámico ha sido previamente reportado en la literatura. Con el fin de evaluar la robustez de los identificadores frente a incertidumbres paramétricas, se emplea un modelo generalizado del vehículo que incorpora tanto la dinámica del RSA como las perturbaciones estocásticas inducidas por las irregularidades del camino.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló siguiendo de manera sistemática las distintas etapas de la metodología, las cuales se describen a continuación:

- A. Revisión del estado del arte sobre técnicas de identificación paramétrica en sistemas dinámicos.

- B. Derivación de las ecuaciones de movimiento del sistema de suspensión regenerativo.
- C. Desarrollo de los identificadores utilizando la metodología de identificación algebraica en el dominio frecuencial, considerando la presencia de excitaciones aleatorias.
- D. Simulación numérica de los identificadores algebraicos en Matlab/Simulink.
- E. Análisis y discusión de los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones.

A. MODELADO MATEMÁTICO

La [Figura 1](#) muestra el RSA electromecánico de accionamiento indirecto desarrollado por Zhang *et al.* [9], acoplado al modelo de un cuarto de vehículo sometido a vibraciones aleatorias. Adicionalmente, se presenta el circuito de recolección de energía, el cual representa el proceso mediante el cual el RSA convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

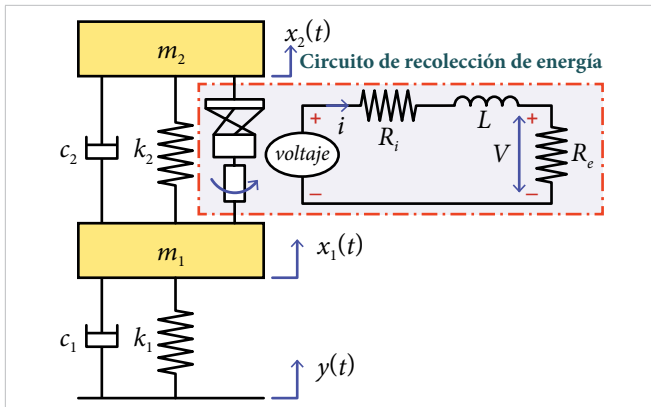


Figura 1. Modelo generalizado del vehículo basado en el RSA electromecánico con circuito de recolección de energía [17].

En la [Figura 1](#), la masa m_1 representa la masa no suspendida, que incluye el neumático, el disco de freno y el mecanismo de sujeción del sistema de suspensión, mientras que la masa m_2 corresponde a la masa suspendida, es decir, la masa del chasis del vehículo. Los coeficientes de amortiguamiento y rigidez (c_1 , k_1) y (c_2 , k_2) representan las propiedades dinámicas del neumático y del sistema de suspensión, respectivamente. En el circuito de recuperación de energía se detallan los componentes eléctricos del RSA: la resistencia interna R_i y la inductancia L del cable de la bobina, así como la resistencia de carga

R_e . Para derivar el modelo matemático del sistema, se emplea la formulación lagrangiana para el dominio mecánico y la Ley de Kirchhoff para el dominio eléctrico, dado que el sistema involucra la interacción entre dos dominios físicos acoplados. Como resultado, se obtienen las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento de la suspensión regenerativa.

$$m_2 \ddot{x}_2(t) + b(\ddot{x}_2(t) - \ddot{x}_1(t)) + k_2(x_2(t) - x_1(t)) + (c_2 + c_L)(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) - \frac{Bl}{R_e} \left(\frac{\kappa r_g}{r} \right) V(t) = 0 \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{x}_1(t) - b(\ddot{x}_2(t) - \ddot{x}_1(t)) - k_2(x_2(t) - x_1(t)) - (c_2 + c_L)(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) + k_1(x_1(t) - y(t)) + c_1(\dot{x}_1(t) - \dot{y}_1(t)) + \frac{Bl}{R_e} \left(\frac{\kappa r_g}{r} \right) V(t) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{L}{R_e} \dot{V}(t) + \frac{(R_i + R_e)}{R_e} V(t) - \frac{k_e \kappa}{r} (\dot{x}_s(t) - \dot{x}_u(t)) = 0 \quad (3)$$

donde b , c_L , r y κ representan, respectivamente, la inercia, el coeficiente de amortiguamiento mecánico, el radio equivalente y la relación de transmisión del transductor de movimiento del RSA. Por otro lado, Bl , k_e y r_g corresponden al coeficiente de acoplamiento electromecánico, a la constante del generador y al radio del eje del mismo, respectivamente. Cabe destacar que en la ecuación (3), $V(t)$ representa el voltaje inducido en la bobina. Además, en la ecuación (2), la fuerza de excitación que actúa sobre el sistema de suspensión se origina principalmente por la deformación del neumático, la cual puede expresarse como $F_0 = k_1 y(t)$, asumiendo que el coeficiente de amortiguamiento del neumático es pequeño y puede despreciarse, es decir, $c_1 \approx 0$.

En la siguiente sección se desarrolla la formulación de los identificadores algebraicos destinados a la determinación de los parámetros físicos del sistema, con especial énfasis en el coeficiente de amortiguamiento global. Dichos estimadores se diseñan considerando diferentes tipos de perfiles artificiales de carretera.

B. DESARROLLO Y FORMULACIÓN DE LOS IDENTIFICADORES

La implementación de la técnica de identificación algebraica parte del modelo matemático del sistema dinámico. A partir de dicho modelo, se procede al desarrollo de los estimadores algebraicos correspondientes para los parámetros físicos de interés. Dado que esta metodología permite su implementación tanto en el do-

minio temporal como en el frecuencial, y considerando que el sistema bajo estudio presenta un comportamiento lineal, se optó por formular los identificadores en el dominio de la frecuencia, utilizando el formalismo del cálculo operacional.

Desarrollo de los identificadores asociados a los parámetros físicos m_1 , b , k_1 y k_2

En una primera etapa, se procedió a estimar los parámetros correspondientes a la masa y rigidez del neumático m_1 y k_1 , el coeficiente de rigidez k_2 y la inercia b del amortiguador electromecánico. Para ello, se tomó como punto de partida la ecuación (2), utilizando como fuente de excitación la fuerza desarrollada por la deformación del neumático F_0 , debido al perfil irregular de la carretera al cual se somete el sistema de suspensión. A partir del despeje de F_0 , se obtuvo la siguiente ecuación diferencial:

$$m_1\ddot{x}_1(t) - b(\ddot{x}_2(t) - \ddot{x}_1(t)) + k_1x_1(t) - k_2(x_2(t) - x_1(t)) = F_0 \quad (4)$$

Posteriormente, al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación (4), esta se representa ahora en el dominio frecuencial:

$$m_1\{s^2X_1(s) - sX_1(0) - \dot{x}_1(0)\} - b\{s^2(X_2(s) - X_1(s)) - s(x_2(0) - x_1(0)) - (\dot{x}_2(0) - \dot{x}_1(0))\} + k_1X_1(s) - k_2\{(X_2(s) - X_1(s))\} = F_0(s) \quad (5)$$

A continuación, al derivar la ecuación dos veces respecto a la variable compleja s , se eliminan las condiciones iniciales y se obtiene la ecuación resultante:

$$m_1\left\{2X_1(s) + 4s\frac{dX_1(s)}{ds} + s^2\frac{d^2X_1(s)}{ds^2}\right\} - b\left\{2(X_2(s) - X_1(s)) + 4s\frac{d(X_2(s) - X_1(s))}{ds} + s^2\frac{d^2(X_2(s) - X_1(s))}{ds^2}\right\} + k_1\left\{\frac{d^2X_1(s)}{ds^2}\right\} - k_2\left\{\frac{d^2(X_2(s) - X_1(s))}{ds^2}\right\} = \frac{d^2F_0(s)}{ds^2} \quad (6)$$

Enseguida, al multiplicar ambos lados de la ecuación por s^{-2} , se genera una expresión que, al llevarla al dominio del tiempo, resulta libre de derivadas:

$$m_1\left\{2s^{-2}X_1(s) + 4s^{-1}\frac{dX_1(s)}{ds} + \frac{d^2X_1(s)}{ds^2}\right\} - b\left\{2s^{-2}(X_2(s) - X_1(s)) + 4s^{-1}\frac{d(X_2(s) - X_1(s))}{ds} + \frac{d^2(X_2(s) - X_1(s))}{ds^2}\right\} + k_1\left\{s^{-2}\frac{d^2X_1(s)}{ds^2}\right\} - k_2\left\{s^{-2}\frac{d^2(X_2(s) - X_1(s))}{ds^2}\right\} = s^{-2}\frac{d^2F_0(s)}{ds^2} \quad (7)$$

Dado que la ecuación (7) se encuentra representada en el dominio frecuencial, es necesario convertirla al dominio del tiempo y para ello se aplicaron las transformadas inversas correspondientes a la derivada y al cociente, obteniéndose así la siguiente ecuación:

$$m_1\left\{2\int^{(2)}x_1(t) - 4\int tx_1(t) + t^2x_1(t)\right\} - b\left\{2\int^{(2)}(x_2(t) - x_1(t)) - 4\int t(x_2(t) - x_1(t)) + t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} + k_1\left\{\int^{(2)}t^2x_1(t)\right\} - k_2\left\{\int^{(2)}t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} = \int^{(2)}t^2F_0(t) \quad (8)$$

Dado que los parámetros a identificar corresponden a m_1 , b , k_1 y k_2 , y solo se dispone de una ecuación, es preciso obtener tres ecuaciones adicionales que permitan conformar un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas. Para lograr esto, la ecuación (8) se integra de manera iterativa, obteniéndose así las ecuaciones necesarias:

$$m_1\left\{2\int^{(3)}x_1(t) - 4\int^{(2)}tx_1(t) + \int t^2x_1(t)\right\} - b\left\{2\int^{(3)}(x_2(t) - x_1(t)) - 4\int^{(2)}t(x_2(t) - x_1(t)) + \int t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} + k_1\left\{\int^{(3)}t^2x_1(t)\right\} - k_2\left\{\int^{(3)}t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} = \int^{(3)}t^2F_0(t) \quad (9)$$

$$m_1\left\{2\int^{(4)}x_1(t) - 4\int^{(3)}tx_1(t) + \int^{(2)}t^2x_1(t)\right\} - b\left\{2\int^{(4)}(x_2(t) - x_1(t)) - 4\int^{(3)}t(x_2(t) - x_1(t)) + \int^{(2)}t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} + k_1\left\{\int^{(4)}t^2x_1(t)\right\} - k_2\left\{\int^{(4)}t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} = \int^{(4)}t^2F_0(t) \quad (10)$$

$$m_1\left\{2\int^{(5)}x_1(t) - 4\int^{(4)}tx_1(t) + \int^{(3)}t^2x_1(t)\right\} - b\left\{2\int^{(5)}(x_2(t) - x_1(t)) - 4\int^{(4)}t(x_2(t) - x_1(t)) + \int^{(3)}t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} + k_1\left\{\int^{(5)}t^2x_1(t)\right\} - k_2\left\{\int^{(5)}t^2(x_2(t) - x_1(t))\right\} = \int^{(5)}t^2F_0(t) \quad (11)$$

Una vez determinadas las ecuaciones (8), (9), (10) y (11), se obtuvo un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, a partir del cual se definió el conjunto de ecuaciones simultáneas de la siguiente forma:

$$P(t)\Theta = Q(t) \quad (12)$$

donde, $\Theta = \{m_1, b, k_1, k_2\}^T$ representa el vector de parámetros a identificar, mientras que $P(t)$ y $Q(t)$ son matrices de dimensiones 4×4 y 4×1 , respectivamente, definidas por,

$$P(t) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & a_{13}(t) & a_{14}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & a_{23}(t) & a_{24}(t) \\ a_{31}(t) & a_{32}(t) & a_{33}(t) & a_{34}(t) \\ a_{41}(t) & a_{42}(t) & a_{43}(t) & a_{44}(t) \end{pmatrix}, Q(t) = \begin{pmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \\ b_3(t) \\ b_4(t) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Finalmente, al resolver la expresión (13), se obtuvieron los identificadores asociados a los parámetros desconocidos,

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \frac{\Delta_1(t)}{\det[P(t)]} \\ b &= \frac{\Delta_2(t)}{\det[P(t)]} \\ k_1 &= \frac{\Delta_3(t)}{\det[P(t)]} \\ k_1 &= \frac{\Delta_4(t)}{\det[P(t)]} \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + \epsilon)$$

Cabe destacar que tanto la matriz $P(t)$ como $Q(t)$ dependen únicamente de la respuesta vibratoria del sistema, mientras que el vector de parámetros $\{\Theta\}$ resulta identificable de manera algebraica siempre que se cumpla la condición $\det[P(t)] \neq 0$ [18]. De acuerdo con lo reportado en la literatura, esta condición se mantiene válida dentro de un intervalo pequeño de tiempo, definido por: $(t_0, t_0 + \epsilon]$, donde ϵ representa un valor positivo suficientemente pequeño.

Desarrollo de los identificadores asociados a los parámetros físicos m_2 y $(c_2 + c_L)$

En esta parte, se procedió a estimar los parámetros correspondientes a la masa suspendida m_2 , equivalente a una cuarta parte del peso total del chasis, y al coeficiente de amortiguamiento equivalente $(c_2 + c_L)$ del sistema de suspensión regenerativo.

Para el desarrollo de los identificadores se partió de la ecuación (1), incorporando los parámetros previamente identificados en la resolución de la ecuación (13) como datos de entrada, por lo que se tiene la siguiente ecuación:

$$m_2 \ddot{x}_2(t) + (c_2 + c_L)(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) = F_0 \quad (14)$$

Al aplicar un tratamiento matemático análogo al empleado en la ecuación (2), se obtienen las siguientes ecuaciones en el dominio del tiempo:

$$m_2 \left\{ 2 \int^{(2)} \ddot{x}_2(t) - 4 \int t \ddot{x}_2(t) + t^2 \ddot{x}_2(t) \right\} + (c_2 + c_L) \left\{ -2 \int^{(2)} t(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) + \int t^2 (\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) \right\} = \int^{(2)} t^2 F_1(t) \quad (15)$$

$$m_2 \left\{ 2 \int^{(3)} x_1(t) - 4 \int^{(2)} t x_1(t) + \int t^2 x_1(t) \right\} + (c_2 + c_L) \left\{ -2 \int^{(3)} t(x_2(t) - x_1(t)) + \int^{(2)} t^2 (x_2(t) - x_1(t)) \right\} = \int^{(3)} t^2 F_1(t) \quad (16)$$

Con el fin de obtener un sistema con el número adecuado de ecuaciones e incógnitas, la ecuación (15) se inte-

gró una vez. Así, las ecuaciones (15) y (16) conforman un sistema lineal de dos ecuaciones con dos incógnitas, que puede representarse de forma matricial análoga a la ecuación (12) como sigue:

$$P_1(t) = \begin{pmatrix} c_{11}(t) & c_{12}(t) \\ c_{21}(t) & c_{22}(t) \end{pmatrix}, Q_1(t) = \begin{pmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{pmatrix} \quad (17)$$

Finalmente, al resolver dicho sistema se determinaron los valores estimados de los parámetros desconocidos:

$$\left. \begin{aligned} m_2 &= \frac{\Delta_5(t)}{\det[P_1(t)]} \\ (c_2 + c_L) &= \frac{\Delta_6(t)}{\det[P_1(t)]} \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + \epsilon)$$

Desarrollo de los identificadores asociados a los parámetros eléctricos $(R_i + R_e)$ y L

Para concluir el proceso de identificación, se procedió a la estimación de los parámetros eléctricos correspondientes a la resistencia equivalente $(R_i + R_e)$, la inductancia (L) y un factor de acoplamiento, los cuales caracterizan el comportamiento dinámico del circuito de recolección de energía del sistema. Se partió de la ecuación (3) sobre la cual se aplica la misma metodología empleada previamente en las ecuaciones (1) y (2), permitiendo obtener la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{L}{R_e} \left\{ \int^2 V(t) - \int t V(t) \right\} + \frac{(R_i + R_e)}{R_e} \left\{ -\int^2 t V(t) \right\} + \frac{k_e K}{r} \left\{ \int^2 x_1(t) - \int t x_1(t) \right\} = -\int^2 t F_2(t) \quad (18)$$

Considerando que existen tres términos a identificar, se requiere la formulación de un sistema de ecuaciones de 3×3 . Con este fin, la ecuación (18) se integró dos veces de manera iterativa, dando lugar a las siguientes expresiones:

$$\frac{L}{R_e} \left\{ \int^3 V(t) - \int^2 t V(t) \right\} + \frac{(R_i + R_e)}{R_e} \left\{ -\int^3 t V(t) \right\} + \frac{k_e K}{r} \left\{ \int^3 x_1(t) - \int^2 t x_1(t) \right\} = -\int^3 t F_2(t) \quad (19)$$

$$\frac{L}{R_e} \left\{ \int^4 V(t) - \int^3 t V(t) \right\} + \frac{(R_i + R_e)}{R_e} \left\{ -\int^4 t V(t) \right\} + \frac{k_e K}{r} \left\{ \int^4 x_1(t) - \int^3 t x_1(t) \right\} = -\int^4 t F_2(t) \quad (20)$$

Estas ecuaciones son un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas que pueden representarse de forma matricial, análoga a las desarrolladas en secciones anteriores:

$$P_2(t) = \begin{pmatrix} e_{11}(t) & e_{12}(t) & e_{13}(t) \\ e_{21}(t) & e_{22}(t) & e_{23}(t) \\ e_{31}(t) & e_{32}(t) & e_{33}(t) \end{pmatrix}, Q_2(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{pmatrix} \quad (21)$$

La resolución del sistema permitió obtener los términos desconocidos:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{R_e} &= \frac{\Delta_7(t)}{\det[P_2(t)]} \\ \frac{(R_i + R_e)}{R_e} &= \frac{\Delta_8(t)}{\det[P_2(t)]} \\ \frac{k_e K}{r} &= \frac{\Delta_9(t)}{\det[P_2(t)]} \end{aligned} \right\} \forall t \in (t_0, t_0 + \epsilon)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas para identificar los parámetros físicos del sistema de suspensión basado en un amortiguador regenerativo electromecánico, correspondiente a un cuarto de automóvil (Figura 1). Se plantearon dos escenarios de simulación en Matlab/Simulink, la primera considerando una excitación armónica, mientras que en la segunda se aplica una señal aleatoria. Los parámetros físicos empleados en cada simulación se detallan en las Tablas 1 y 2. Para la integración numérica de las ecuaciones del sistema se utilizó el método de Runge-Kutta ya que presenta mayor precisión y estabilidad en los identificadores desarrollados.

TABLA 1

PARÁMETROS FÍSICOS DE LA SUSPENSIÓN IMPLEMENTANDO UNA RED MECÁNICA C4 BASADA EN INERSOR

PARÁMETRO	VALOR
b	217 kg
k_1	22 000 N/m
k_2	10 000 N/m
c_2	1067 (N·s)/m
m_2	320 kg
m_1	45 kg

TABLA 2

PARÁMETROS FÍSICOS DEL CIRCUITO DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA

PARÁMETRO	VALOR
k_e	0.065 V/rad
r	0.033 m
κ	22.6
L_e	9.4×10^{-4} H
R_i	10 Ω
R_e	10 Ω

A. SIMULACIÓN DE LOS IDENTIFICADORES DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN BAJO EXCITACIÓN ARMÓNICA

Para evaluar el desempeño de los identificadores de los parámetros físicos m_2 , $(c_2 + c_L)$, b , k_1 , k_2 , $(R_i + R_e)$ y L , se consideró como fuente de excitación un camino que puede representarse mediante una función armónica, la cual se define a partir de:

$$x_0 = 0.2 \sin(10t) \quad (22)$$

donde x_0 corresponde al desplazamiento aplicado en la base del sistema, considerando una amplitud de ± 0.2 m y una frecuencia de 10 rad/s. En la Figura 2 se muestra el perfil armónico de vibración empleado en las simulaciones.

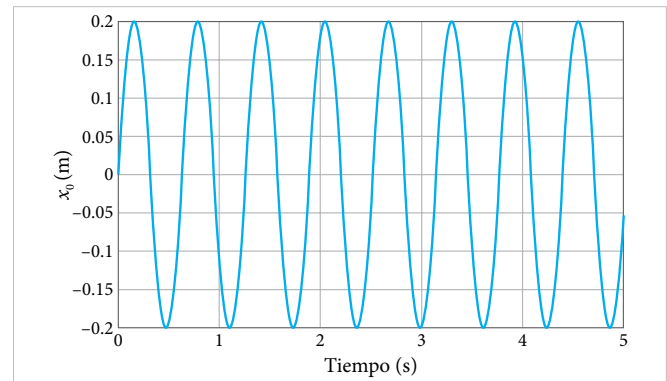


Figura 2. Respuesta vibratoria del sistema al considerar una excitación armónica.

Las Figuras 3 a 9 ilustran con claridad la evolución de los identificadores desarrollados en el transcurso del tiempo evidenciando la rapidez, precisión y efectividad del método para aproximarse a los valores reales del sistema en un lapso muy corto de tiempo.

Estas gráficas muestran un acercamiento progresivo y estabilización a los valores reales de los parámetros. Asimismo, permite detectar posibles fluctuaciones y evaluar la consistencia del proceso de identificación, aspectos fundamentales para corroborar la robustez de la metodología aplicada.

Este análisis resulta clave para medir el desempeño de los identificadores y determinar su viabilidad en los escenarios reales o prácticos, donde la rapidez y precisión en la estimación de parámetros son esenciales para garantizar el óptimo y correcto funcionamiento del sistema.

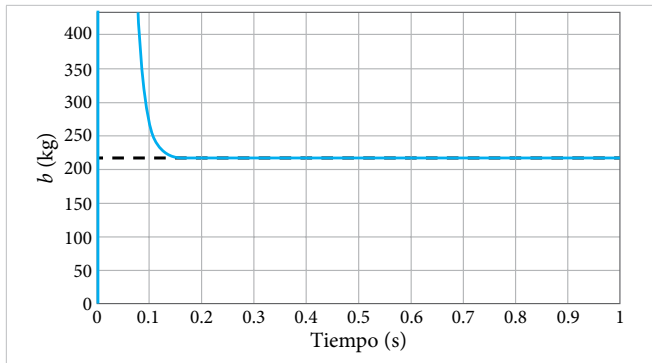


Figura 3. Identificación de la inercia b del amortiguador electromecánico bajo una señal armónica.

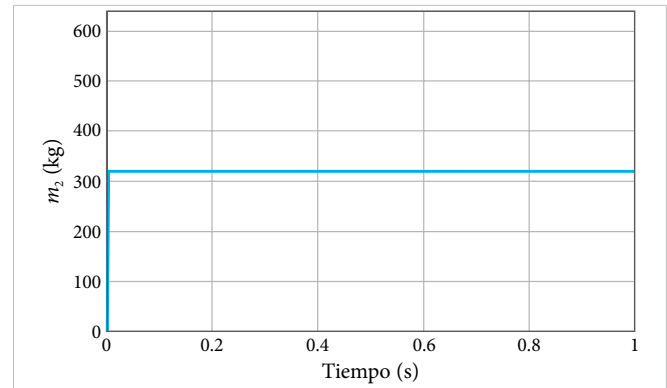


Figura 7. Identificación de la masa del chasis m_2 de un cuarto de vehículo bajo una señal armónica.

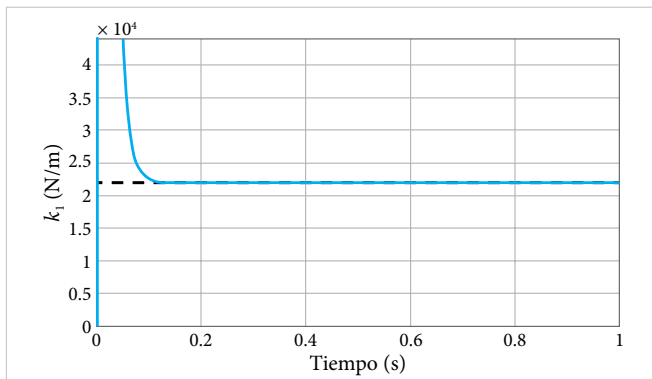


Figura 4. Identificación del coeficiente de rigidez del neumático k_1 bajo una señal armónica.

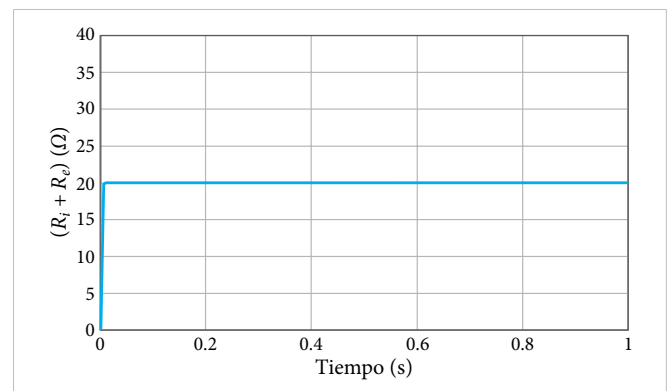


Figura 8. Identificación de la resistencia equivalente ($R_i + R_e$) del circuito de recolección de energía bajo una señal armónica.

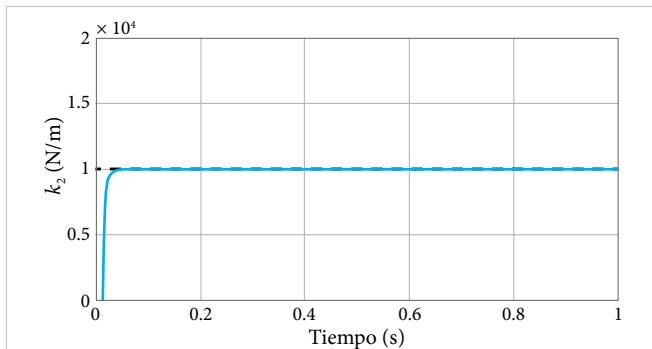


Figura 5. Identificación del coeficiente de rigidez de la suspensión k_2 bajo una señal armónica.

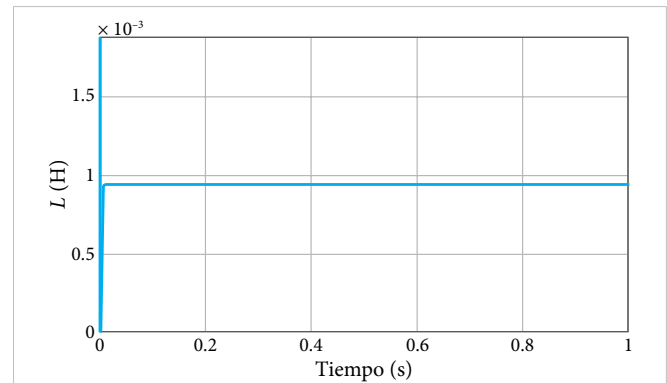


Figura 9. Identificación de la inductancia L del circuito de recolección de energía bajo una señal armónica.

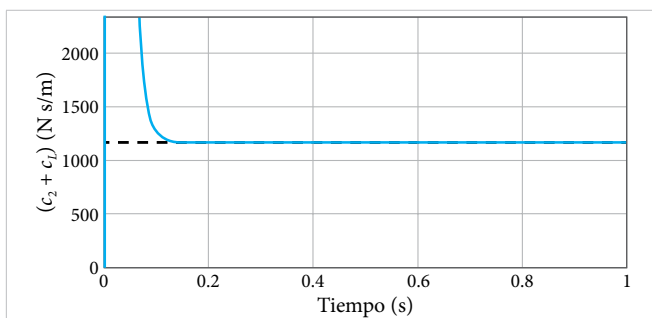


Figura 6. Identificación del coeficiente de amortiguamiento equivalente ($c_2 + c_L$) de la suspensión bajo una señal armónica.

La revisión de las Figuras 3 a 9 evidencian que los identificadores propuestos logran alinearse con rapidez a los parámetros físicos de la suspensión y del circuito de recolección de energía. Esta convergencia veloz confirma la eficiencia del método aplicado y valida su capacidad para estimar con precisión los parámetros de la suspensión de un cuarto de automóvil bajo condiciones de excitación armónica.

B. SIMULACIÓN DE LOS IDENTIFICADORES DE LA SUSPENSIÓN BAJO EXCITACIÓN ALEATORIA

A continuación, se evaluó la robustez de los estimadores desarrollados mediante la técnica de identificación algebraica. Para ello, la suspensión se sometió a una señal de entrada aleatoria que simula un perfil irregular de la carretera. La [Tabla 3](#) presenta los niveles de rugosidad utilizados para generar las excitaciones estocásticas del camino [19]. Estas pruebas son esenciales para verificar la capacidad de los estimadores frente a variaciones imprevistas y oscilaciones en las condiciones de entrada, asegurando que los identificadores funcionen de manera confiable y óptima bajo escenarios de operación realistas.

TABLA 3
RUGOSIDAD DE LA CARRETERA. NORMA ISO 8608 [19]

GRADO DEL PERFIL DE LA CARRETERA	$G_x(\eta_0)(10^{-6}) \text{ m}^3, \eta_0 = 0.1[\text{m}^{-1}]$ MEDIA GEOMÉTRICA
Clase - A	16
Clase - B	46
Clase - C	256
Clase - D	1024
Clase - E	4096
Clase - F	65 536
Clase - G	262 144

La señal aleatoria que representa el perfil irregular de la carretera se generó a partir de la ecuación diferencial estocástica:

$$\dot{x}_0 = -2\pi f_0 x_0(t) + 2\pi\eta W(t)\sqrt{G_x(\eta_0)V(t)} \quad (23)$$

donde $f_0 = 0.0628 \text{ Hz}$ es la frecuencia de corte, mientras que $\eta = 0.1[\text{m}^{-1}]$ define la frecuencia espacial, $G_x(\eta_0)$ denota el coeficiente de rugosidad de la carretera, $W(t)$ describe un proceso estocástico estacionario (ruido blanco gaussiano) y x_0 es el perfil irregular de la carretera [20].

Los perfiles empleados para las simulaciones son generados a partir de la ecuación diferencial (23), la cual permite obtener trayectorias de referencia con características aleatorias. En este estudio se adoptó un perfil de clase C, ya que su comportamiento representa de forma más realista las condiciones de desplazamiento de un vehículo sobre un camino o carretera.

La [Figura 10](#) muestra el perfil de la carretera de clase C, considerando una velocidad de conducción de 60 km/h. A continuación, se muestran los resultados obtenidos

de los identificadores sometidos a esta perturbación de entrada:

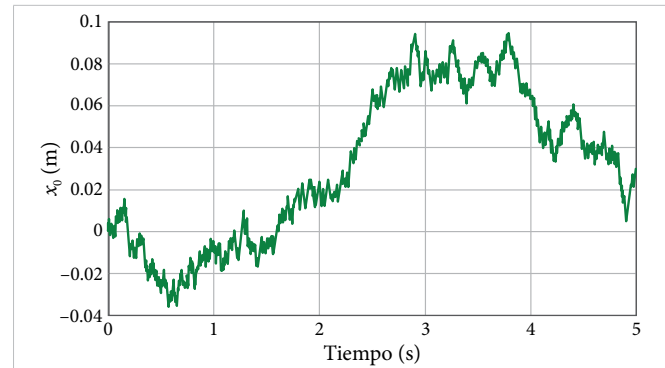


Figura 10. Perfil artificial de la carretera de clase C.

Las [Figuras 11 a 17](#) representan la respuesta dinámica de los identificadores cuando el sistema es excitado mediante la señal aleatoria. En dichas gráficas, las líneas discontinuas corresponden a los valores de referencia de los parámetros, mientras que las continuas describen las estimaciones obtenidas mediante el procedimiento propuesto. Los resultados evidencian que los estimadores logran una convergencia rápida hacia los valores reales, alcanzando estabilidad en intervalos menores a 0.2 segundos.

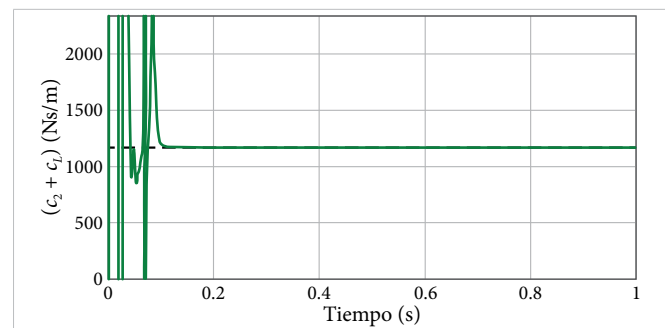


Figura 11. Identificación del coeficiente de amortiguamiento equivalente $(c_2 + c_L)$ de la suspensión bajo una señal aleatoria.

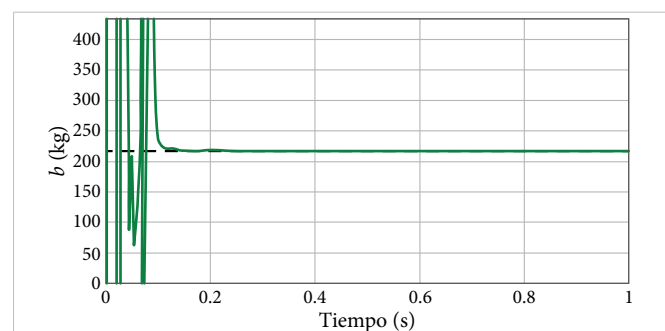


Figura 12. Identificación de la inercia b del amortiguador electromecánico bajo una señal aleatoria.

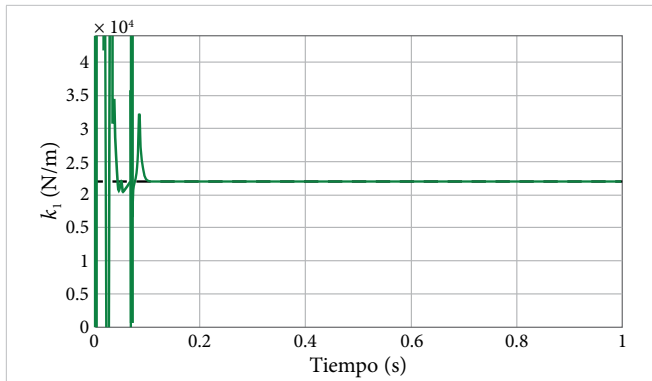


Figura 13. Identificación del coeficiente de rigidez del neumático k_1 bajo una señal aleatoria.

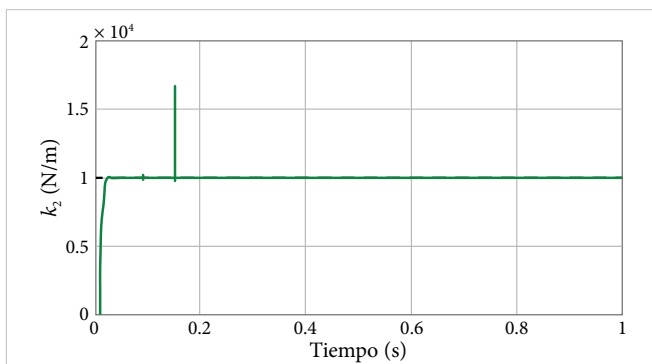


Figura 14. Identificación del coeficiente de rigidez de la suspensión k_2 bajo una señal aleatoria

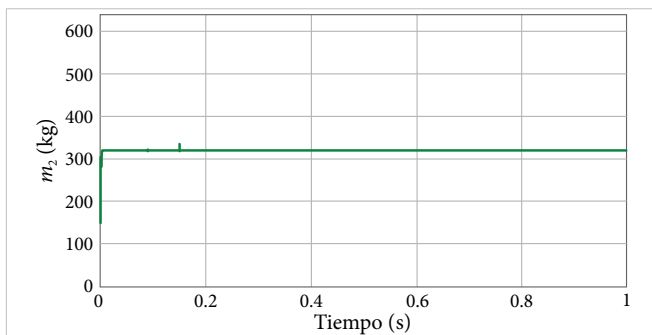


Figura 15. Identificación de la masa del chasis m_2 de un cuarto de vehículo bajo una señal aleatoria.

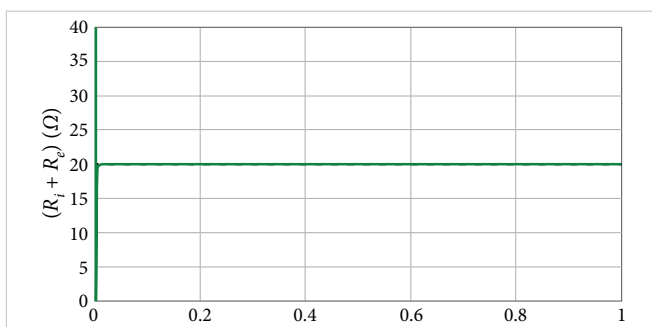


Figura 16. Identificación de la resistencia equivalente ($R_f + R_e$) del circuito de recolección de energía bajo una señal aleatoria.

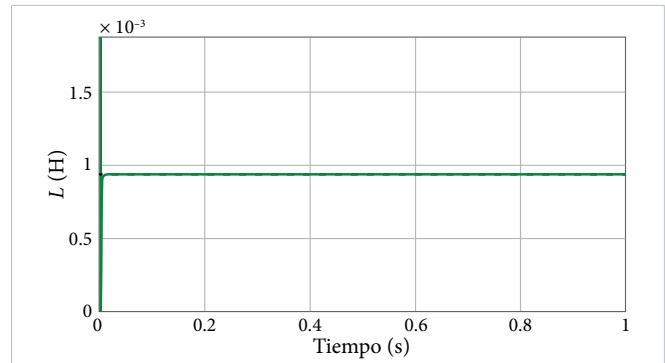


Figura 17. Identificación de la inductancia L del circuito de recolección de energía bajo una señal aleatoria.

C. PRUEBA DE ROBUSTEZ PARA EL IDENTIFICADOR DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE ($c_2 + c_L$)

A continuación se analizó la respuesta del identificador correspondiente al amortiguamiento equivalente del sistema, al ser expuesto a diversas excitaciones de tipo aleatorio, con el propósito de evaluar su desempeño bajo condiciones de entrada variables. Para esto, se llevaron a cabo simulaciones en perfiles de carretera tipo A, B y C, descritas con anterioridad.

Los resultados mostrados en la Figura 18 evidencian que el identificador mantiene un desempeño estable frente a distintos tipos de irregularidades del camino. En dicha gráfica, la línea discontinua representa el valor de referencia del parámetro analizado, mientras que las líneas continuas ilustran la respuesta obtenida por el identificador bajo diversas condiciones de excitación.

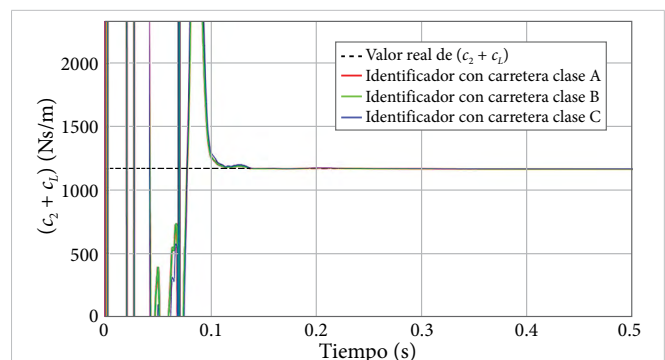


Figura 18. Respuesta del identificador del coeficiente de amortiguamiento equivalente ($c_2 + c_L$) ante distintas señales aleatorias.

Se observa que la estimación converge rápidamente hacia el valor real, alcanzando estabilidad en intervalos inferiores a 0.2 segundos, sin depender del perfil de entrada aplicado al sistema.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un conjunto de identificadores destinados a estimar los parámetros físicos de una suspensión automotriz basada en amortiguadores electromecánicos de un cuarto de vehículo. La estimación de parámetros se llevó a cabo mediante el enfoque de identificación algebraica, utilizando como base el modelo dinámico correspondiente a la suspensión mostrada en la [Figura 1](#).

El método permitió determinar parámetros asociados a la masa suspendida, la inercia del amortiguador electromecánico, la rigidez de la suspensión y el neumático, el coeficiente de amortiguamiento del dispositivo de fluido viscoso, resistencia equivalente e inductancia del circuito de recolección de energía. Dado que los identificadores algebraicos se basan en la respuesta vibratoria del sistema, se evaluaron mediante dos tipos de excitaciones: una de naturaleza armónica y otra aleatoria.

Los resultados obtenidos evidenciaron que, bajo una excitación armónica, los identificadores convergen de forma rápida y estable hacia los valores físicos reales en lapsos muy cortos de tiempo, tanto para el sistema de suspensión como para el circuito de recolección de energía. En las representaciones gráficas se aprecia cómo los identificadores mantienen un comportamiento estable alrededor de los valores de referencia, lo que confirma su precisión y consistencia.

Cuando se aplicaron las señales aleatorias, con el fin de emular el comportamiento de la carretera, los identificadores conservaron un desempeño robusto frente a incertidumbres paramétricas, ruido y efectos no modelados. Además, la convergencia hacia los valores reales se alcanzó en tiempos menores a 0.2 segundos, lo que demuestra la eficiencia del método algebraico propuesto y su potencial aplicación en entornos reales, contribuyendo a optimizar el funcionamiento de suspensiones regenerativas basadas en amortiguadores electromecánicos en vehículos.

Como trabajo futuro, se propone extender la técnica de identificación algebraica a sistemas de suspensión de medio vehículo y de vehículo completo equipados con amortiguadores regenerativos electromecánicos. El objetivo es validar el desempeño de la técnica en escenarios de simulación más realistas y complejos.

REFERENCIAS

- [1] C. A. de Sousa, S. L. Pereira y R. S. Guedes, "Review and trends in regenerative braking energy recovery for traction power system with inverter substation in subway's of São Paulo city", *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 30, p. 100443, jun. 2024, doi: [10.1016/j.jrtpm.2024.100443](https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100443).
- [2] A. Gabriel-Buenaventura y B. Azzopardi, "Energy recovery systems for retrofitting in internal combustion engine vehicles: A review of techniques", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 955-964, en. 2015, doi: [10.1016/j.rser.2014.08.083](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.083).
- [3] J. L. Míguez, M. Á. Gómez, S. Rodríguez y J. Porteiro, "Geostrategic study of the evolution of energy harvesting systems based on the patent activity of flywheels and regenerative shock absorbers", *Energy Rep.*, vol. 12, pp. 1777-1793, dic. 2024, doi: [10.1016/j.egy.2024.07.061](https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.07.061).
- [4] D. Tuncer y E. Yilmaz Ulu, "Contribution of regenerative suspension module to charge efficiency and range in hydrogen fuel cell electric vehicles", *Int J Hydrogen Energy*, vol. 75, pp. 547-556, jul. 2024, doi: [10.1016/j.ijhydene.2024.03.219](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.219).
- [5] X.-X. Bai, W.-M. Zhong, Q. Zou, A.-D. Zhu y J. Sun, "Principle, design and validation of a power-generated magnetorheological energy absorber with velocity self-sensing capability", *Smart Mater Struct*, vol. 27, n.º 7, pp. 1-18, jul. 2018, doi: [10.1088/1361-665X/aac7ef](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aac7ef).
- [6] J. Song et al., "An electromagnetic-pneumatic hybrid regenerative shock absorber for extended range of space exploration vehicles", *Mech Syst Signal Process*, vol. 210, p. 111161, mar. 2024, doi: [10.1016/j.ymssp.2024.111161](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111161).
- [7] H. Zhu, Y. Li, W. Shen y S. Zhu, "Mechanical and energy-harvesting model for electromagnetic inertial mass dampers", *Mech Syst Signal Process*, vol. 120, pp. 203-220, abr. 2019, doi: [10.1016/j.ymssp.2018.10.023](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.10.023).
- [8] R. Zhang, X. Wang y Z. Liu, "A novel regenerative shock absorber with a speed doubling mechanism and its Monte Carlo simulation", *J Sound Vib*, vol. 417, pp. 260-276, mar. 2018, doi: [10.1016/j.jsv.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.12.017).
- [9] R. Zhang, X. Wang, E. Al, S. John, L. Zuo y C. H. Wang, "A novel indirect-drive regenerative shock absorber for energy harvesting and comparison with a conventional

- direct-drive regenerative shock absorber”, *Appl Energy*, vol. 229, pp. 111-127, nov. 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.07.096](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.096).
- [10] W. Salman et al., “A high-efficiency energy regenerative shock absorber using helical gears for powering low-wattage electrical device of electric vehicles”, *Energy*, vol. 159, pp. 361-372, sept. 2018, doi: [10.1016/j.energy.2018.06.152](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.152).
- [11] X. Yang, T. Zhang, Y. Shen, Y. Liu, V. C. Bui y D. Qiu, “Tradeoff analysis of the energy-harvesting vehicle suspension system employing inerter element”, *Energy*, vol. 308, p. 132841, 2024, doi: [10.1016/j.energy.2024.132841](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132841).
- [12] E. Y. Santos, E. Barredo, J. G. Mendoza y J. F. Canseco, “Identificadores algebraicos para un sistema de suspensión pasivo basado en inersor”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 22, n.º 1, pp. 69-79, abr. 2025, doi: [10.20983/culcyt.2025.1.2.7](https://doi.org/10.20983/culcyt.2025.1.2.7).
- [13] E. Barredo, J. G. Mendoza, L. A. Baltazar y S. J. Landa, “Identificación algebraica de los parámetros físicos de un sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 21, n.º 1, pp. 4-12, 2024, doi: [10.20983/culcyt.2024.1.2.1](https://doi.org/10.20983/culcyt.2024.1.2.1).
- [14] H. Sira-Ramírez y M. Fliess, “On discrete-time uncertain visual based control of planar manipulators: an online algebraic identification approach”, *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002*, Las Vegas, NV, EUA, 2002, pp. 4509-4514 vol. 4, doi: [10.1109/CDC.2002.1185084](https://doi.org/10.1109/CDC.2002.1185084).
- [15] D. Hernandez-Alcantara, R. Morales-Menendez, L. Amezcua-Brooks, O. Sename y L. Dugard, “Fault estimation methods for semi-active suspension systems”, *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, México, 2015, pp. 1-5, doi: [10.1109/ROPEC.2015.7395138](https://doi.org/10.1109/ROPEC.2015.7395138).
- [16] J. R. Trapero, “Técnicas de identificación algebraicas y espectrales de señales armónicas: aplicaciones en mecatrónica y economía”, tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca, España, 2008.
- [17] M. A. A. Abdelkareem, R. Zhang, X. Jing, X. Wang y M. K. A. Ali, “Characterization and implementation of a double-sided arm-toothed indirect-drive rotary electromagnetic energy-harvesting shock absorber in a full semi-trailer truck suspension platform”, *Energy*, vol. 239, pp. 1-21, en. 2022, doi: [10.1016/j.energy.2021.121976](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121976).
- [18] M. Fliess y H. Sira-Ramírez, “An algebraic framework for linear identification”, *ESAIM: COCV*, vol. 9, pp. 151-168, feb. 2003, doi: [10.1051/cocv:2003008](https://doi.org/10.1051/cocv:2003008).
- [19] G. E. Zheng, W. Weirui, L. I. Guangping y R. Daogong, “Design, parameter optimisation y performance analysis of active tuned inerter damper (TID) suspension for vehicle”, *J. Sound Vib.*, vol. 525, p. 116750, may. 2022, doi: [10.1016/j.jsv.2022.116750](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116750).
- [20] B. Huang, C.-Y. Hsieh, F. Golnaraghi y M. Moallem, “Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation”, *J. Sound Vib.*, vol. 357, pp. 16-34, nov. 2015, doi: [10.1016/j.jsv.2015.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.004).

APÉNDICE

$$\begin{aligned}\Delta_1(t) = & -a_{12}a_{23}a_{34}b_4 + a_{12}a_{23}a_{44}b_3 + a_{12}a_{24}a_{33}b_4 - a_{12}a_{24}a_{43}b_3 \\ & - a_{12}a_{33}a_{44}b_2 + a_{12}a_{34}a_{43}b_2 + a_{13}a_{22}a_{34}b_4 - a_{13}a_{22}a_{44}b_3 \\ & - a_{13}a_{24}a_{32}b_4 + a_{13}a_{24}a_{42}b_3 + a_{13}a_{32}a_{44}b_2 \\ & - a_{13}a_{34}a_{42}b_2 - a_{14}a_{22}a_{33}b_4 + a_{14}a_{22}a_{43}b_3 + a_{14}a_{23}a_{32}b_4 \\ & - a_{14}a_{23}a_{42}b_3 - a_{14}a_{32}a_{43}b_2 + a_{14}a_{33}a_{42}b_2 + a_{22}a_{33}a_{44}b_1 \\ & - a_{22}a_{34}a_{43}b_1 - a_{23}a_{32}a_{44}b_1 + a_{23}a_{34}a_{42}b_1 + a_{24}a_{32}a_{43}b_1 \\ & - a_{24}a_{33}a_{42}b_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_2(t) = & a_{11}a_{23}a_{34}b_4 - a_{11}a_{23}a_{44}b_3 - a_{11}a_{24}a_{33}b_4 + a_{11}a_{24}a_{43}b_3 \\ & + a_{11}a_{33}a_{44}b_2 - a_{11}a_{34}a_{43}b_2 - a_{13}a_{21}a_{34}b_4 + a_{13}a_{21}a_{44}b_3 \\ & + a_{13}a_{24}a_{31}b_4 - a_{13}a_{24}a_{41}b_3 - a_{13}a_{31}a_{44}b_2 + a_{13}a_{34}a_{41}b_2 \\ & + a_{14}a_{21}a_{33}b_4 - a_{14}a_{21}a_{43}b_3 - a_{14}a_{23}a_{31}b_4 + a_{14}a_{23}a_{41}b_3 \\ & + a_{14}a_{31}a_{43}b_2 - a_{14}a_{33}a_{41}b_2 - a_{21}a_{33}a_{44}b_1 + a_{21}a_{34}a_{43}b_1 \\ & + a_{23}a_{31}a_{44}b_1 - a_{23}a_{34}a_{41}b_1 - a_{24}a_{31}a_{43}b_1 + a_{24}a_{33}a_{41}b_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_3(t) = & -a_{11}a_{22}a_{34}b_4 + a_{11}a_{22}a_{44}b_3 + a_{11}a_{24}a_{32}b_4 - a_{11}a_{24}a_{42}b_3 \\ & -a_{11}a_{32}a_{44}b_2 + a_{11}a_{34}a_{42}b_2 + a_{12}a_{21}a_{34}b_4 - a_{12}a_{21}a_{44}b_3 \\ & -a_{12}a_{24}a_{31}b_4 + a_{12}a_{24}a_{41}b_3 + a_{12}a_{31}a_{44}b_2 - a_{12}a_{34}a_{41}b_2 \\ & -a_{14}a_{21}a_{32}b_4 + a_{14}a_{21}a_{42}b_3 + a_{14}a_{22}a_{31}b_4 - a_{14}a_{22}a_{41}b_3 \\ & -a_{14}a_{31}a_{42}b_2 + a_{14}a_{32}a_{41}b_2 + a_{21}a_{32}a_{44}b_1 - a_{21}a_{34}a_{42}b_1 \\ & -a_{22}a_{31}a_{44}b_1 + a_{22}a_{34}a_{41}b_1 + a_{24}a_{31}a_{42}b_1 - a_{24}a_{32}a_{41}b_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_4(t) = & a_{11}a_{22}a_{33}b_4 - a_{11}a_{22}a_{43}b_3 - a_{11}a_{23}a_{32}b_4 + a_{11}a_{23}a_{42}b_3 \\ & + a_{11}a_{32}a_{43}b_2 - a_{11}a_{33}a_{42}b_2 - a_{12}a_{21}a_{33}b_4 + a_{12}a_{21}a_{43}b_3 \\ & + a_{12}a_{23}a_{31}b_4 - a_{12}a_{23}a_{41}b_3 - a_{12}a_{31}a_{43}b_2 + a_{12}a_{33}a_{41}b_2 \\ & + a_{13}a_{21}a_{32}b_4 - a_{13}a_{21}a_{42}b_3 - a_{13}a_{22}a_{31}b_4 + a_{13}a_{22}a_{41}b_3 \\ & + a_{13}a_{31}a_{42}b_2 - a_{13}a_{32}a_{41}b_2 - a_{21}a_{32}a_{43}b_1 + a_{21}a_{33}a_{42}b_1 \\ & + a_{22}a_{31}a_{43}b_1 - a_{22}a_{33}a_{41}b_1 - a_{23}a_{31}a_{42}b_1 + a_{23}a_{32}a_{41}b_1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\det[P(t)] = & a_{11}a_{22}a_{33}a_{44} - a_{11}a_{22}a_{34}a_{43} - a_{11}a_{23}a_{32}a_{44} + a_{11}a_{23}a_{34}a_{42} \\ & + a_{11}a_{24}a_{32}a_{43} - a_{11}a_{24}a_{33}a_{42} - a_{12}a_{21}a_{33}a_{44} + a_{12}a_{21}a_{34}a_{43} \\ & + a_{12}a_{23}a_{31}a_{44} - a_{12}a_{23}a_{34}a_{41} - a_{12}a_{24}a_{31}a_{43} + a_{12}a_{24}a_{33}a_{41} \\ & + a_{13}a_{21}a_{32}a_{44} - a_{13}a_{21}a_{34}a_{42} - a_{13}a_{22}a_{31}a_{44} + a_{13}a_{22}a_{34}a_{41} \\ & + a_{13}a_{24}a_{31}a_{42} - a_{13}a_{24}a_{32}a_{41} - a_{14}a_{21}a_{32}a_{43} + a_{14}a_{21}a_{33}a_{42} \\ & + a_{14}a_{22}a_{31}a_{43} - a_{14}a_{22}a_{33}a_{41} - a_{14}a_{23}a_{31}a_{42} + a_{14}a_{23}a_{32}a_{41}\end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}a_{11} &= 2\int^{(2)} x_1(t) - 4\int tx_1(t) + t^2x_1(t) \\ a_{21} &= 2\int^{(3)} x_1(t) - 4\int^{(2)} tx_1(t) + \int t^2x_1(t) \\ a_{31} &= 2\int^{(4)} x_1(t) - 4\int^{(3)} tx_1(t) + \int^{(2)} t^2x_1(t) \\ a_{41} &= 2\int^{(5)} x_1(t) - 4\int^{(4)} tx_1(t) + \int^{(3)} t^2x_1(t) \\ a_{21} &= 2\int^{(2)} (x_2(t) - x_1(t)) - 4\int t(x_2(t) - x_1(t)) + t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ a_{22} &= 2\int^{(3)} (x_2(t) - x_1(t)) - 4\int^{(2)} t(x_2(t) - x_1(t)) + \int t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ a_{23} &= 2\int^{(4)} (x_2(t) - x_1(t)) - 4\int^{(3)} t(x_2(t) - x_1(t)) + \int^{(2)} t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ a_{24} &= 2\int^{(5)} (x_2(t) - x_1(t)) - 4\int^{(4)} t(x_2(t) - x_1(t)) + \int^{(3)} t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ a_{31} &= \int^{(2)} t^2x_1(t) \\ a_{32} &= \int^{(3)} t^2x_1(t) \\ a_{33} &= \int^{(4)} t^2x_1(t) \\ a_{34} &= \int^{(5)} t^2x_1(t) \\ a_{41} &= \int^{(2)} t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ a_{42} &= \int^{(3)} t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ a_{43} &= \int^{(4)} t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ a_{44} &= \int^{(5)} t^2(x_2(t) - x_1(t)) \\ b_1 &= \int^{(2)} t^2F_0(t) \\ b_2 &= \int^{(3)} t^2F_0(t) \\ b_3 &= \int^{(4)} t^2F_0(t) \\ b_4 &= \int^{(5)} t^2F_0(t)\end{aligned}$$

Además,

$$\Delta_5(t) = -c_{12}d_2 + c_{22}d_1$$

$$\Delta_6(t) = c_{11}d_2 - c_{21}d_1$$

$$\det [P_1(t)] = c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}$$

con

$$c_{11} = 2\int^{(2)} x_2(t) - 4\int tx_2(t) + t^2x_2(t)$$

$$c_{12} = 2\int^{(3)} x_1(t) - 4\int^{(2)} tx_1(t) + \int t^2x_1(t)$$

$$c_{21} = -2\int^{(2)} t(x_2(t) - x_1(t)) + \int t^2(x_2(t) - x_1(t))$$

$$c_{22} = -2\int^{(3)} t(x_2(t) - x_1(t)) + \int^{(2)} t^2(x_2(t) - x_1(t))$$

$$d_1 = \int^{(2)} t^2F_1(t)$$

$$d_2 = \int^{(3)} t^2F_1(t)$$

Por último,

$$\Delta_7(t) = e_{12}e_{23}f_3 - e_{12}e_{33}f_2 - e_{13}e_{22}f_3 + e_{13}e_{32}f_2 + e_{22}e_{33}f_1 - e_{23}e_{32}f_1$$

$$\Delta_8(t) = -e_{11}e_{23}f_3 + e_{11}e_{33}f_2 + e_{11}e_{21}f_3 - e_{13}e_{31}f_2 - e_{21}e_{33}f_1 + e_{23}e_{31}f_1$$

$$\Delta_9(t) = e_{11}e_{22}f_3 - e_{11}e_{32}f_2 - e_{12}e_{21}f_3 + e_{12}e_{31}f_2 + e_{21}e_{32}f_1 - e_{22}e_{31}f_1$$

$$\det [P_2(t)] = e_{11}e_{22}e_{33} - e_{11}e_{23}e_{32} - e_{12}e_{21}e_{33} + e_{12}e_{23}e_{31} + e_{13}e_{21}e_{32} - e_{13}e_{22}e_{31}$$

donde

$$e_{11} = \int^2 v(t) - \int tv(t)$$

$$e_{12} = \int^3 v(t) - \int^2 tv(t)$$

$$e_{13} = \int^4 v(t) - \int^3 tv(t)$$

$$e_{21} = -\int^2 tv(t)$$

$$e_{22} = -\int^3 tv(t)$$

$$e_{23} = -\int^4 tv(t)$$

$$e_{31} = \int^2 x_1(t) - \int tx_1(t)$$

$$e_{32} = \int^3 x_1(t) - \int^2 tx_1(t)$$

$$e_{33} = \int^4 x_1(t) - \int^3 tx_1(t)$$

$$f_1 = -\int^2 tF_2(t)$$

$$f_2 = -\int^3 tF_2(t)$$

$$f_3 = -\int^4 tF_2(t)$$

Optimización de la calidad y productividad en la manufactura de pastas mediante DMAIC y herramientas Lean-Six Sigma

Optimization of Quality and Productivity in Pasta Manufacturing using DMAIC and Lean-Six Sigma Tools

Gissel Guadalupe Morales Medina¹ , Erick Uriel Morales Cruz¹ , Jair Jared Pérez Ambrosio¹  

¹ Licenciatura en Ingeniería Industrial, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo mejorar la calidad y productividad del proceso de elaboración de pastas en una empresa ubicada en Tizayuca, Hidalgo, México, mediante la aplicación de la metodología Six Sigma DMAIC. Se empleó un enfoque cuantitativo basado en la recolección y análisis de datos, apoyado en herramientas como Project Charter, VoC-CtQ, hoja de verificación, AMEF, diagrama de Ishikawa, diagrama de Pareto y diferentes medidas de control. Los resultados evidenciaron que la principal causa de la variabilidad en la longitud de la pasta se relacionaba con la desalineación entre la charola y la tolva en la etapa de vibrado, así como con condiciones deficientes de secado. A partir del análisis de riesgos, se desarrollaron propuestas de mejora priorizadas mediante una matriz de Eisenhower e implementadas para reducir la merma y estabilizar el proceso. Después de su aplicación, los números prioritarios de riesgo (NPR) disminuyeron significativamente en las etapas críticas, confirmando la eficacia de las acciones correctivas. La mejora obtenida demuestra el valor del enfoque DMAIC para identificar causas raíz, optimizar parámetros operativos y fortalecer el control estadístico del proceso. Este estudio aporta evidencia práctica del impacto de Lean-Six Sigma en la industria alimentaria mexicana y su potencial para elevar la calidad y satisfacción del cliente.

PALABRAS CLAVE: Six Sigma; DMAIC; mejora de procesos; industria alimentaria; control de calidad.

ABSTRACT

The present study aims to improve the quality and productivity of the pasta manufacturing process in a company located in Tizayuca, Hidalgo, Mexico, through the application of the Six Sigma DMAIC methodology. A quantitative approach was employed based on data collection and analysis, supported by tools such as the Project Charter, VoC-CtQ, check sheet, FMEA, Ishikawa diagram, Pareto chart, and control charts. The results showed that the main cause of variability in pasta length was related to the misalignment between the tray and the hopper in the vibrating stage, as well as deficient drying conditions. Based on the risk analysis, improvement proposals were developed, prioritized using an Eisenhower matrix, and implemented to reduce waste and stabilize the process. After implementation, the RPN values decreased significantly in the critical stages, confirming the effectiveness of the corrective actions. The improvement achieved demonstrates the value of the DMAIC approach for identifying root causes, optimizing operational parameters, and strengthening statistical process control. This study provides practical evidence of the impact of Lean-Six Sigma in the Mexican food industry and its potential to enhance product quality and customer satisfaction.

KEYWORDS: Six Sigma; DMAIC; process improvement; food industry; quality control.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Jair Jared Pérez Ambrosio
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo / Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
DIRECCIÓN: Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, col. Carboneras, C. P. 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México
CORREO ELECTRÓNICO: pe440881@uaeh.edu.mx

Fecha de recepción: 8 de diciembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 31 de marzo de 2026. **Fecha de publicación:** 23 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

En un mundo globalizado y altamente competitivo, la calidad es de gran relevancia para asegurar el éxito de cualquier organización en el ámbito mundial. Debido a la amplia y diversa competencia, las empresas se ven obligadas a actualizarse y mejorar constantemente para seguir permaneciendo en el mercado, lo que indica que deben implementar estrategias o herramientas de mejora continua que ayuden a garantizar la eficiencia de los procesos internos y principalmente la satisfacción del cliente.

Desde sus orígenes, a principios del siglo XX, metodologías como Lean, Six Sigma y las siete herramientas de la calidad han sido esenciales para la mejora continua de procesos. La literatura señala que estas herramientas son determinantes para resolver la mayoría de los problemas de las organizaciones [1].

De acuerdo con la historia de la calidad, W. Edwards Deming y Joseph Juran fueron algunos de los principales pioneros en introducir estos conceptos en la industria japonesa, logrando así su transformación de manera sorprendente [2]. A raíz de esto, conforme fueron avanzando las investigaciones, surgieron metodologías, como Lean y Six Sigma, desarrolladas por Toyota y Motorola respectivamente [3], [4], que fueron diseñadas para eliminar todo lo que no genera valor y reducir la variabilidad en los procesos.

La metodología Six Sigma se apoya en el ciclo DMAIC como su principal herramienta de mejora continua, ya que ayuda a perfeccionar los procesos existentes y hacerlos más eficientes al reducir errores y variabilidad [5].

Existen múltiples beneficios al implementar estas herramientas, por ejemplo, se incrementa la productividad, se reducen costos, aumenta la eficiencia operativa, y principalmente, como ya se mencionó, eleva la calidad de los productos y servicios [6]. Sin embargo, no solo se trata de mejorar la eficiencia operativa, sino de reforzar la capacidad de respuesta de cualquier organización ante las necesidades del mundo cambiante. Por ello, al aplicar herramientas de calidad también crecen los estándares de desempeño.

Las principales herramientas que se desarrollaron a lo largo de esta investigación son principalmente el ciclo DMAIC, que pertenece a la metodología Six Sigma,

y, dentro de este mismo, se utilizaron las siete herramientas básicas de calidad (diagrama de causa y efecto, hoja de verificación, histograma, diagrama de Pareto, diagrama de dispersión, gráfica de control y estratificación), Project Charter, Voice of the Customer (VoC) y Critical to Quality (CtQ), entre otras.

Uno de los casos de éxito de la aplicación de DMAIC en la industria automotriz es, por ejemplo, la implementación de esta metodología, que pertenece a Six Sigma, como elemento clave para lograr una reducción en la variabilidad de los procesos de una industria maquiladora del sector automotriz [7]. Además, permitió realizar una evaluación previamente para que después se implementarán las mejoras en el sistema.

De acuerdo con Rodríguez [8], el resultado de implementar esta metodología en una empresa del sector acuícola significó una reducción de costos impresionante, ya que gracias a ella se logró revelar las causas principales de dichos costos que estaban asociados a la falta de estandarización, fallas en la comunicación y la rotación del personal. Una vez identificadas las causas raíz, se establecieron mejoras en el sistema que fortalecieron el ambiente de trabajo, los costos de distribución disminuyeron y la variabilidad estadística mejoró.

Dado el impacto positivo de esta metodología, se decidió implementarla en este artículo como herramienta principal para la solución de un problema específico de una empresa mexicana mencionada. Por ello, el objetivo del presente trabajo es presentar el desarrollo de la metodología DMAIC Six Sigma aplicada a la mejora de la calidad de productividad de una empresa que se encuentra en el municipio de Tizayuca, Hidalgo, México, la cual se dedica a producir pastas y *pellets*, y que actualmente está sufriendo un problema debido a la variabilidad de longitud que existe en el tamaño final de las pastas.

El desarrollo de este artículo consiste en la exposición de la metodología utilizada, sustentada en fundamentos teóricos. Posteriormente, se contextualiza la problemática mediante la descripción de la situación actual de la empresa. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la investigación, seguidos de una discusión sobre la aplicación de la herramienta DMAIC de Six Sigma. Finalmente, se plantean las conclusiones correspondientes.

II. METODOLOGÍA

En este trabajo se asumió un enfoque cuantitativo, dado que se llevó a cabo la recolección de datos numéricos así como también del uso de herramientas estadísticas, lo cual condujo a la implementación de la metodología Six Sigma DMAIC. La [Figura 1](#) incluye un resumen de los pasos de la metodología.

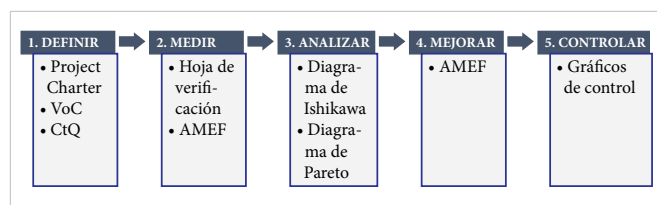


Figura 1. Metodología DMAIC y herramientas utilizadas.

FASE 1: DEFINIR

La fase de definir es la parte más importante y esencial de esta metodología, dado que es donde se determina el problema a resolver y aparecen los diferentes KPI, también conocidos como indicadores de calidad, que permiten obtener un amplio conocimiento sobre la situación actual [9], y también se establece un objetivo de mejora. Por ello, en esta fase se utilizaron las herramientas Project Charter, Voice of the Customer (VoC) y Critical to Quality (CtQ), las cuales se definen a continuación.

- Project Charter es un acuerdo desarrollado por las partes interesadas (clientes y prestadores de servicios/productos) para obtener el compromiso, recursos y responsabilidades de ambos grupos, así como compartir la idea del porqué se realiza el proyecto, los tiempos y límites establecidos antes de comenzar [10].
- VoC proporciona información relacionada a las necesidades, deseos y expectativas de los clientes acerca de un producto o servicio, permitiendo a las empresas alinearse a esos requerimientos y optando mejoras continuas.
- CtQ es una herramienta que, en conjunto con el VoC (Voice of the Customer), permite alinear y especificar las necesidades en relación a las características del producto/servicio que esté demandando el cliente de forma cuantificable [11].

FASE 2: MEDIR

En la segunda fase, que permite evaluar de forma actual el proceso que se desea mejorar en función del problema encontrado [12], ocurre la recolección de datos para cuantificar las ineficiencias que existan dentro del proceso [13]. Dicha evaluación se hace por medio de la aplicación de una hoja de verificación que posibilita observar de manera visual aquellos problemas que mayormente se presentan dentro del proceso y poder tener una visión más general de lo que está sucediendo. Con el objeto de profundizar aún más en el examen de la situación, se emprende un Análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF), pues esta herramienta desglosa fallas y sus posibles riesgos, así como las medidas que se tienen en ese momento.

FASE 3: ANALIZAR

Una vez obtenida la información recopilada de la fase 2, se puede pasar a determinar y analizar la causa raíz del problema que está impidiendo y repercutiendo en los procesos y estándares de calidad. En esta parte pretende encontrar patrones que muestren el comportamiento del proceso, permitiendo de igual forma hallar posibles áreas y oportunidades de mejora que dan pauta a la fase siguiente.

De igual forma, se considera es aquí donde se busca comprender la causa raíz del problema presentado en la fase 1, a través del uso de diversas herramientas estadísticas [14] que, en este proyecto, fueron el diagrama de causa-efecto, también conocido como de Ishikawa, y el diagrama de Pareto.

FASE 4: MEJORAR

Una vez obtenida la información previa necesaria, dentro de esta fase se pretende encontrar soluciones, acciones y herramientas que permitan atacar de forma positiva esta causa raíz. Asimismo, en esta etapa del proyecto es importante observar que las propuestas de mejora reduzcan o corrijan el problema, teniendo presente que se busca atacar el origen del problema y no sus efectos [15]. Para ello, en el presente proyecto se llevaron a cabo lluvias de ideas que permitieron obtener diferentes alternativas de mejoramiento, completando herramientas como el AMEF, y se implementó una matriz de priorización con el fin de agilizar las partes más esenciales de la mejora, dado que utiliza un formato de

cuatro cuadrantes, agrupando la información de acuerdo a su importancia.

FASE 5: CONTROLAR

Esta es la última fase de la metodología, la cual permite a la organización, empresa u área mantener las acciones de mejora de forma estable, pues se enfoca en mantener un seguimiento constante de los procesos a través del monitoreo de diversas herramientas.

De acuerdo a un caso de estudio presentado por Echeverría [16], y con éxito positivo en una empresa, que el uso de gráficos de control permitió corroborar si dicho proceso se mantiene estable o no, puesto que la finalidad de estos es justamente analizar y monitorear la variabilidad de los procesos. Por esta razón, en la presente investigación también empleó esta herramienta estadística con el fin de tener una amplia veracidad de que dichos procesos estén trabajando de manera eficiente o, por el contrario, revisar nuevamente la fase 4 e implementar nuevas propuestas de mejora en caso de que dicho proceso no se haya mantenido estable.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan a continuación por cada una de las etapas de la metodología.

FASE 1. PROJECT CHARTER, VoC Y CtQ (DEFINIR)

Project Charter

Como parte inicial de este proyecto, se aplicó la herramienta Project Charter, la cual permite definir claramente los elementos importantes para un proyecto de mejora, tales como la descripción del problema o caso de estudio; los objetivos, tanto el general como los específicos; las métricas de éxito y el alcance del proyecto. Este recurso es muy utilizado en metodologías como Six Sigma y Lean Manufacturing, ya que facilita la comprensión y alineación del equipo de trabajo con el proyecto.

Como se puede observar en la [Tabla 1](#), el objetivo principal de este proyecto es implementar mejoras en el proceso productivo de una empresa con el fin de disminuir el porcentaje de merma en el proceso de vibrado, el cual se derivó de la aplicación de las herramientas VoC y CtQ.

TABLA 1
PROJECT CHARTER

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Título del proyecto	Reducción de la merma generada por la ruptura de la pasta
Caso	En el proceso de producción de pastas, se detectó que la pasta llega en buen estado desde los proveedores, sin embargo, se presentan rupturas en las fases consecutivas del proceso, específicamente en la zona del vibrador, lo que genera merma y rechazo del producto por mala apariencia.
Objetivo general	Disminuir el porcentaje de merma en el proceso de vibrado.
Objetivos específicos	– Determinar las causas de la fractura de la pasta en el proceso de vibración. – Analizar las dimensiones actuales de la máquina (vibrador). – Medir la variabilidad de la longitud de la pasta. – Proponer un rediseño para evitar la ruptura de la pasta. – Evaluar la mejora.
Métricas (CtQ)	– Porcentaje de merma antes y después de la mejora. – Porcentaje de pastas fuera de tolerancia.
Alcance del proyecto	Departamento de producción, calidad y planeación de proyectos.

Voice of Customer (VoC)

El VoC forma parte del Despliegue de la Función de Calidad (Quality Function Deployment, QFD) y se entiende como el proceso de identificar las necesidades del cliente, estructurarlas y darles prioridad [17].

En congruencia con este enfoque, en esta investigación se aplicó esta herramienta con el fin de identificar, conocer y analizar las necesidades, expectativas y quejas de los clientes para traducir esta información en requerimientos clave para la mejora de los procesos y la calidad del producto.

Para la recolección de información se emplearon diversas fuentes, entre las que destacan:

- Porcentaje de rechazos. Se realizó el análisis de los rechazos que se observaron en el último trimestre con respecto al producto.
- Encuestas a clientes. Se aplicaron 100 encuestas a clientes finales de manera aleatoria para conocer su punto de vista.
- Quejas y sugerencias registradas. Se revisaron todas las quejas, opiniones y sugerencias de los clientes

registradas durante un periodo de tiempo mediante los medios físicos y redes sociales.

Posteriormente, la información obtenida fue analizada y estructurada mediante un diagrama de afinidad, que es una herramienta que facilita la estructuración de datos cualitativos al agrupar ideas similares en categorías representativas, de tal manera que ayuda a identificar patrones y tendencias en las opiniones de los clientes.

Como resultado de este análisis, se identificaron tres principales necesidades: 1) consistencia en tamaño y forma: se requiere uniformidad en la longitud y grosor; 2) calidad del producto: que los productos finales cuenten con buena apariencia y sin rupturas y 3) durabilidad: la pasta presenta mucha fragilidad durante su manipulación.

CtQ

A partir de estas necesidades se establecieron los Críticos para la Calidad (Critical to Quality, CtQ) para traducir la *voz del cliente* en características medibles que ayuden a la mejora de los procesos (Tabla 2).

TABLA 2
VoC - CtQ

VoC	CtQ
Consistencia en tamaño y forma	Longitud promedio de pasta dentro del límite de tolerancia
Calidad del producto	Porcentaje de piezas defectuosas por lote
Mayor durabilidad	Resistencia mínima de la pasta

Los CtQ seleccionados como prioritarios para este estudio son la longitud promedio de la pasta, el porcentaje de piezas rotas en un lote y la resistencia de la pasta

Estos indicadores pueden representar la base para implementar estrategias de mejora, de acuerdo con los requerimientos de los clientes.

FASE 2. HOJA DE VERIFICACIÓN Y AMEF (MEDIR)

Hoja de verificación

Durante el análisis del proceso de elaboración de la pasta, se llevó a cabo la inspección de 30 pequeños lotes diarios, considerando una población de 300 lotes como producción promedio, dado que se optó por tomar un

muestreo sistemático durante cinco días porque dicha elaboración se realiza continuamente y, además, esta técnica es rápida y fácil. Al final del análisis, se obtuvo 150 muestras. El intervalo de muestreo se determinó tras dividir el tamaño de la población (300) sobre el número de muestras a tomar (30), arrojando así un intervalo de 10 lotes, lo cual significó que cada 10 lotes se tomaría una nueva muestra de la línea de producción.

Dado que las muestras fueron recolectadas en la etapa final del proceso como una última inspección final aplicada temporalmente, los defectos arrojados en la Tabla 3 corresponden a distintas etapas de la producción, por lo cual se realizó un análisis integral del proceso con el fin de clasificarlos según su posible origen, permitiendo posteriormente identificar la etapa crítica responsable de la mayor contribución a la merma.

TABLA 3
HOJA DE VERIFICACIÓN

TIPO DE DEFECTO	FRECUENCIA
Dimensiones fuera de rango	40
Fragilidad durante manipulación	31
Producto rechazado por variaciones no clasificadas (otros)	24
Masa de pasta porosa	19
Masa de pasta muy húmeda	13
Textura no uniforme	11
Pasta con rebabas	6
Empaque dañado	4
Producto fuera de gramaje	2
Total	150

Se puede apreciar de manera descendente aquellos hallazgos que tuvieron un impacto importante dentro de la producción de pastas, donde se observa también que los defectos que tuvieron mayor número de apariciones son cuatro, con valores de 40, 31, 24 y 19: *dimensiones fuera de rango, fragilidad durante manipulación, producto rechazado y masa de pasta porosa*, respectivamente. Sin embargo, se observan otros defectos, que, dada su frecuencia, no representan un enfoque alarmante, pero sí es de gran importancia atenderlos para descartar posibles problemas en un futuro.

AMEF

Como parte de los resultados de esta fase y para enriquecer la información, se obtuvo un AMEF de proceso (Tablas 4-A y 4B) que recopiló la siguiente información

con la ayuda de la hoja de verificación, que permitió desglosar aún mejor los defectos presentados y dio paso a una medición más amplia y precisa de cómo se encon-

traba dicho proceso para posteriormente poder analizarlos. A continuación se muestra el AMEF de proceso.

TABLA 4-A
AMEF DEL PROCESO: ANÁLISIS DEL MODO Y EFECTO DE LA FALLA POTENCIAL

N.º PROC.	OPERACIÓN	MODO DE FALLA POTENCIAL	EFECTO DE FALLA POTENCIAL	S	CAUSA POTENCIAL	O
1	Molienda	Granulometría irregular	Afectación de la textura de la pasta	3	Aspas desalineadas o sin filo	4
		Daño térmico al almidón	Gelatinización pronta, falta de firmeza, desintegración	7	Incremento de la temperatura por fricción	4
2	Tamizado	Dispersión del trigo desigual	Secado no uniforme o puntos frágiles	2	Tamices en mal estado, mala calibración o tiempo inadecuado	3
3	Mezclado Amasado	Aire atrapado en la pasta	Formación de burbujas, debilidad estructural de la pasta	4	Velocidad de mezclado incorrectamente	5
		Distribución y adición incorrecta de ingredientes	Paro en la producción, mal consistencia final	8	Error por factor humano,	2
		Exceso de humedad en la pasta	Tiempo excesivo de secado, falta de consistencia	6	Control deficiente de humedad durante el proceso	4
4	Extrusión	Deformación o rupturas de la pasta	Pasta con formas irregulares o rotas	4	Presión inadecuada de extrusión, falta de humedad o matriz dañada	2
		Porosidad o compactación deficiente	Flujo de pasta y velocidad de extrusión irregular	2	Pasta quebradiza al secar y sin firmeza	4
		Contaminación cruzada	Inclusión de partículas extrañas en el producto	8	Falta de limpieza en las matrices, descuido humano	1
5	Cortado	Dimensiones incorrectas	Producto fuera de especificación (mermas)	5	Error de calibración de corte	3
		Formación de rebabas	Malformación de la pasta o <i>pellets</i>	3	Mala alineación de las cuchillas	2
		Rotura de piezas	Generación de mermas y rebaba por mal corte	4	Presión de corte inadecuada	2
6	Secado	Secado no homogéneo	Partes blandas(húmedas)	5	Mala distribución del aire, tiempo diferente de secado	3
		Roturas internas de la pasta	Pasta con estabilidad y firmeza fuera de especificaciones	8	Tiempo de secado incorrecto, ventilación con diferentes temperaturas	4
7	Vibrado	Rotura de pasta seca	Producto fuera de especificación (mermas)	7	Secado fuera de especificaciones	6
		Daño en el producto	Rechazo de producto	8	Separación alta de dispensador, diseño inadecuado de criba o equipo	4
8	Dispensador	Incorrecta distribución por empaque	Rechazo de lotes y paro de línea	4	Calibración inadecuada del equipo	2
9	Empaquetado	Uso de material de baja calidad	Daño del empaque durante su manejo	3	Aceptación errónea de material de baja calidad, manejo incorrecto del producto	1
		Incorrecto sellado del producto	Reducción de la calidad producto y vida útil, rechazo de lotes	2	Temperatura incorrecta de sellado	4

Abreviaturas. Proc.: proceso; S: severidad; O: ocurrencia.

Para ponderar *severidad*, *ocurrencia* y *detención* en el AMEF, se usaron las tablas con los valores obtenidos

por la AQS (American Society for Quality), que es la comunidad de expertos en calidad más grande del mundo.

TABLA 4-B
AMEF DEL PROCESO: CONTROLES EXISTENTES DE PREVENCIÓN Y DETENCIÓN

No. PROC.	OPERACIÓN	CONTROLES EXISTENTES DE PREVENCIÓN DE PROCESO	CONTROLES EXISTENTES DE DETENCIÓN DE PROCESO	D	NPR
1	Molienda	Calibración inicial y mantenimientos programados	Inspección granular	3	36
		Sensores de temperatura	Inspección de humedad de la pasta	2	56
2	Tamizado	Mantenimiento a tamizadores, reporte de tiempos	Inspección granular	2	12
3	Mezclado Amasado	Automatización de mezclado	Inspección visual de burbujas y textura	3	60
		Check list de adición y tiempos de mezclado	Revisión final de actividad	2	32
		Detector de humedad durante el proceso	Inspección de humedad de la pasta final	4	96
4	Extrusión	Verificación de presión y calibración	Inspección durante la extrusión	3	24
		Control de temperatura y monitoreo	Muestreo de producto	5	40
		Mantenimiento y desinfección controlada	Inspeccionar producto después del paso por matriz	2	16
5	Cortado	Control de longitudes	Inspección de tamaño	4	60
		Ajuste periódico	Inspección de producto post-corte	4	24
		Ajuste de presión de acuerdo a la pasta	Inspección de producto durante corte	2	16
6	Secado	Evaluaciones de ventilación uniformes	Muestras durante el proceso	5	75
		Monitoreo de temperatura y tiempo de secado	No se hace	9	288
7	Vibrado	No se hace	Inspección final de medidas	5	210
		No se hace	Inspección final de medidas	6	192
8	Dispensador	Sensores de peso	Inspección de lotes	3	24
9	Empaquetado	Verificación visual del empaque	Inspección final de lotes	6	18
		Control de temperatura y monitoreo	Inspección final de lotes	4	32

Abreviaturas. Proc.: proceso; D: detención.

De acuerdo al estudio realizado, se observa que en los diversos procesos de la producción de pasta o *pellets* existen diversas formas de llevar un control previo al siguiente proceso, sin embargo, muchas veces estos controles pueden fallar o no existir, como lo fue para el proceso 7 (vibrado), donde no se cuenta con un control de prevención sino que solo tiene los de detención del proceso.

Esta herramienta permite observar los números de prioridad de riesgo, teniendo así los siguientes valores más altos de NPR: 288, 210 y 192, obtenidos al multiplicar los valores de severidad, ocurrencia y detección que corresponden al proceso de secado y vibrado.

FASE 3. DIAGRAMAS DE ISHIKAWA Y PARETO (ANALIZAR)

Diagrama de Ishikawa

La Figura 2 muestra el diagrama de Ishikawa elaborado para conocer las causas raíz del problema y que se ca-

racteriza por estar dividido en seis categorías: Medición, Material, Mano de obra (personal), Medio ambiente (Entorno), Métodos y Máquinas.

Cada categorías cuenta con dos posibles causas que se enlazan al concepto principal (Figura 2).

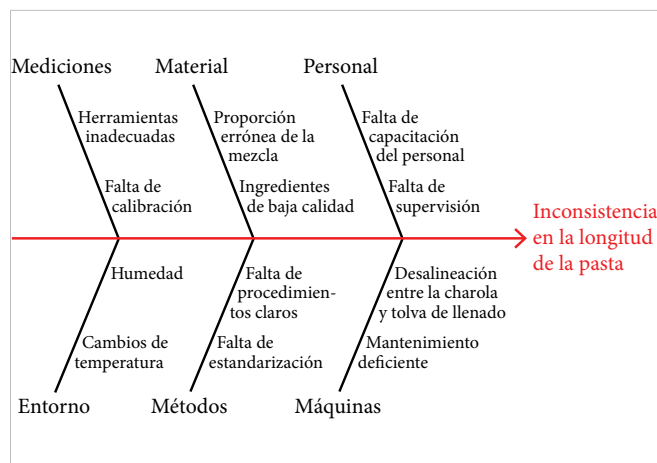


Figura 2. Diagrama de Ishikawa.

Diagrama de Pareto

Esta herramienta permite identificar y priorizar los problemas que se presentaron en el diagrama anterior (Figura 2). En la presente investigación, se recolectaron los datos durante dos meses para identificar con qué frecuencia ocurría cada defecto, sin embargo, y antes de pasar a dichos resultados, se optó por realizar un diagrama de Pareto (Figura 3) a partir de los datos recolectados del AMEF mostrados en la Tabla 5, con la intención de tener una comparativa entre ambos estudios para, finalmente, tomar una decisión más certera sobre las cosas a priorizar. A continuación se muestran los resultados de cada NPR obtenidos en la fase anterior:

TABLA 5
MODOS DE FALLA Y NPR

MODOS DE FALLA	NPR
Granulometría irregular	36
Daño térmico al almidón	56
Dispersión del trigo desigual	12
Aire atrapado en la pasta	60
Distribución y adición incorrecta de ingredientes	32
Exceso de humedad en la pasta	96
Deformación o rupturas de la pasta	24
Porosidad o compactación deficiente	40
Contaminación cruzada	16
Dimensiones incorrectas	60
Formación de rebabas	24
Rotura de piezas	16
Secado no homogéneo	75
Roturas internas de la pasta	288
Rotura de pasta seca	210
Daño en el producto	192
Incorrecta distribución por empaque	24

De acuerdo con la información, se obtuvo el diagrama de Pareto (Figura 3), en la que se observa que dentro de las causas primordiales con mayor NPR, y como primera hipótesis sobre el problema, se encuentran las *roturas internas de la pasta*, *roturas de pasta seca* y *daño en el producto*, lo cual sugiere que la solución al problema se encuentra en dichas causas.

Una vez planteado el primer elemento a comparar, a continuación se muestra la Tabla 6 con las frecuencias registradas durante los dos meses sobre los defectos mostrados en el diagrama de Ishikawa (Figura 2)

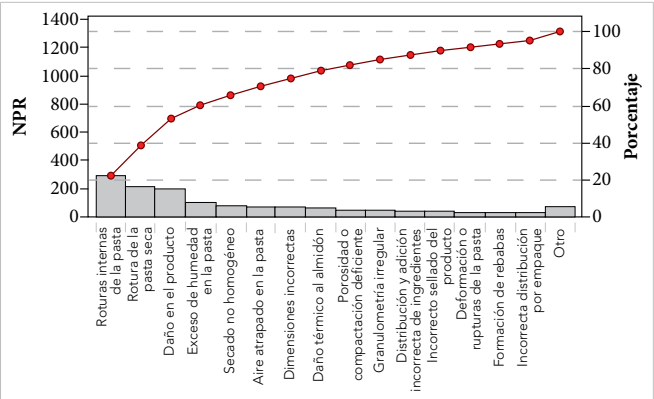


Figura 3. Diagrama de Pareto - Modos de falla.

TABLA 6
CAUSAS Y FRECUENCIA DE DEFECTOS

DEFECTOS	FRECUENCIA	%
Falta de capacitación del personal	22	36.67
Falta de supervisión	25	41.67
Mantenimiento deficiente	4	6.67
Desalineación entre charola y tolva de llenado	45	75.00
Ingredientes de baja calidad	3	5.00
Proporción errónea de la mezcla	3	5.00
Falta de estandarización	2	3.33
Falta de procedimientos claros	20	33.33
Herramientas inadecuadas	10	16.67
Falta de calibración	30	50
Cambios de temperatura	1	1.67
Condiciones inadecuadas	1	1.67

A partir de esta información se elaboró el diagrama de Pareto (Figura 4) que muestra la información siguiente:

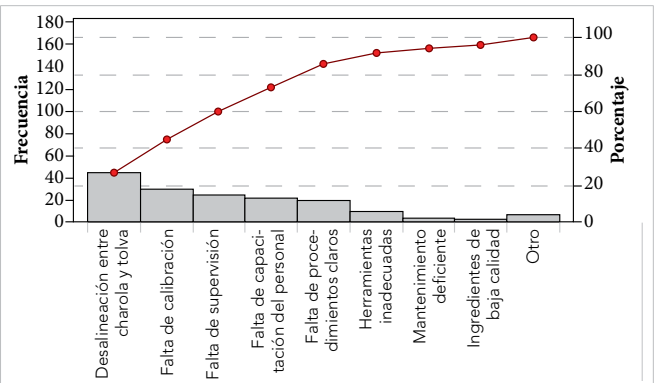


Figura 4: Diagrama de Pareto.

En la Figura 4 se observa que la principal razón por la que existe inconsistencia en la longitud de la pasta es porque la charola y la tolva están desalineadas, es decir, la posición de cada una es incorrecta, lo que hace que exista una variación en el tamaño de la pasta.

De acuerdo a ambos análisis, se observa que aunque en el AMEF el NPR más alto es roturas internas de la pasta (proceso de secado), no es el principal problema a solucionar, puesto que, en la práctica (véase el segundo Pareto, [Figura 4](#)), la principal razón por la que hay inconsistencia en la longitud de la pasta se debe a la desalineación entre la charola y la tolva, lo que también está entre los NPR altos del AMEF ([Tabla 4](#)) y que pertenece al proceso de vibrado como daño en el producto.

FASE 4. AMEF Y MATRIZ EISENHOWER (MEJORAR)

Después de haber detectado la causa del problema, se llevó a cabo una serie de propuestas de mejoras ([Tabla](#)

7) generadas durante una lluvia de ideas que permitan reducir los índices de NPR de cada uno de los procesos, que, aunque no todos afectaban directamente el problema en dicho momento, pueden llegar a ser un problema real en un futuro. Por tanto, se optó por un enfoque en lo que más urge y se recurrió a una matriz de Eisenhower con la ponderación de los NPR del AMEF.

Con base en el AMEF implementado ([Tabla 4](#)) se generaron las siguientes propuestas de mejora mostradas en la [Tabla 7](#), de acuerdo a los controles actuales de prevención y detención de proceso que permitirán reducir los índices de NPR.

TABLA 7
PROPUESTAS DE MEJORA (AMEF)

OPERA- CIÓN	CAUSA POTENCIAL	ACCIONES RECOMENDADAS	RESPONSABLE	RESULTADO DE ACCIONES TOMADAS
Molienda	Aspas desalineadas o sin filo	Capacitación técnica a operarios	RH y Calidad	Molienda uniforme
	Incremento de la temperatura por fricción	Monitorear velocidad de rotación	Producción y Calidad	Temperatura constante
Tamizado	Tamices en mal estado, mala calibración o tiempo inadecuado	Capacitaciones técnicas sobre calibrado e inspección	RH y Calidad	Granulometría homogénea y adecuada
Mezclado/ Amasado	Velocidad de mezclado incorrectamente,	Monitorear velocidad mezclado	Producción y Calidad	Pasta uniforme y suave
	Error por factor humano,	Automatización de ingredientes	Producción	Pasta homogénea
	Control deficiente de humedad durante el proceso	Colocar campana de extracción de humedad	Mantenimiento y Producción	Mayor estabilidad y control de la humedad ambiental
Extrusión	Presión inadecuada de extrusión, falta de humedad o matriz dañada	Realizar pruebas de calibración de máquinas	Asegurador de calidad y mantenimiento	Presión constante y calibración correcta
	Pasta quebradiza al secar y sin firmeza	Ajuste de parámetros de extrusión	Producción	Compactación perfecta
	Falta de limpieza en las matrices, descuido humano	Capacitación constante sobre Buenas Prácticas de Manufactura (BPM)	RH y Calidad	Producto libre de contaminantes
Cortado	Error de calibración de corte	Realizar pruebas de calibración de máquinas	Asegurador de calidad y mantenimiento	Control estable de dimensiones
	Mala alineación de las cuchillas	Mantenimiento y limpieza constante	Producción y mantenimiento	Eliminación de rebabas y control de cortado
	Presión de corte inadecuada	Estandarizar la presión de corte	Producción	Reducción de merma y rebaba
Secado	Mala distribución del aire, tiempo diferente de secado	Implementación de secado automatizado	Producción y Planeación	Secado homogéneo y controlado
	Tiempo de secado incorrecto, ventilación con diferentes temperaturas	Diseño de experimentos	Asegurador de calidad y producción	Ventilación uniforme y estructura estable
Vibrado	Secado fuera de especificaciones	Implementación durante el proceso	Asegurador de calidad	Estabilización y control de las especificaciones
	Separación alta de dispensador, diseño inadecuado de criba o equipo	Implementación de un <i>fixture</i>	Asegurador de calidad y mantenimiento	Estabilización del producto durante su proceso, altura correcta
Dispensador	Calibración inadecuada del equipo	Implementar un programa de calibración o reemplazo	Mantenimiento y producción	Correcto gramaje en los productos
Empaquetado	Aceptación errónea de material de baja calidad, manejo incorrecto del producto	Mejorar proceso de aceptación de materiales	Asegurador de calidad y logística	Materiales con las especificaciones correctas
	Temperatura incorrecta de sellado	Mantenimiento constante de maquinado	Mantenimiento	Aseguramiento de cero fallas en la temperatura

De acuerdo a cada una de las causas potenciales presentadas en el AMEF principal (Tabla 4) se tuvieron las propuestas escritas en la Tabla 7, así como los responsables de llevar a cabo dichas acciones recomendadas y los resultados que se esperaban obtener de la implementación de cada una de ellas.

Para un control eficaz sobre la implementación de cada una de estas recomendaciones, se realizó la siguiente Matriz de Eisenhower (Tabla 8) que muestra el orden de importancia de cada una de ellas.

TABLA 8
MATRIZ DE EISENHOWER

		URGENTE	NO URGENTE
		Hacer	Programar
Importante	Diseño de experimentos		Colocar campana de extracción de humedad
	Implementación durante el proceso		Implementación de secado automatizado
	Implementación de un <i>fixture</i>		Monitorear velocidad mezclado
			Realizar pruebas de calibración de máquinas
			Monitorear velocidad de rotación
			Ajuste de parámetros de extrusión
			Capacitación técnica a operarios
		Delegar	Eliminar
No importante	Automatización de ingredientes		
	Mantenimiento constante de maquinado		
	Realizar pruebas de calibración de máquinas		
	Mantenimiento y limpieza constante		
	Implementar un programa de calibración o remplazo		
	Mejorar proceso de aceptación de materiales		
	Capacitación constante sobre BPM		
	Estandarizar la presión de corte		
	Capacitaciones técnicas sobre calibrado e inspección		

La Tabla 8 muestra que las acciones recomendadas que más urgían son las de la sección “Hacer” y, posterior a ella, sigue la de “Programar” y por último “Delegar”, ya que en este caso no hubo acciones que hayan sido eliminadas.

Como resultado de la implementación de estas acciones de mejora, se obtuvieron de NPR expuestos en la Tabla 9, que muestran los resultados de haber llevado a cabo correctamente cada una de las acciones y mejoras recomendadas en dichos procesos.

De acuerdo a los nuevos índices NPR mostrados en la Tabla 9, se puede observar una disminución considerable de cada uno de ellos en especial de los que representaban un problema mayor, lo cual indica que se

resolvió de forma eficaz el problema principal, que era una inconsistencia en la longitud de la pasta. Asimismo, se cumplió con el objetivo de reducir la merma en el proceso de vibrado, dando una disminución del 80 %.

FASE 5. CONTROLAR

Dentro de esta fase se establecieron criterios de monitoreo para asegurar la estabilidad del proceso, mediante la definición de límites de especificación y el seguimiento de indicadores clave de calidad (CtQ). Se propone la implementación de gráficos de control tipo $\bar{X}$ -R como herramienta de vigilancia estadística, sin embargo, debido a la disponibilidad limitada de datos posteriores a la mejora, su aplicación queda planteada como trabajo futuro. No obstante, se definieron acciones de control

tales como la calibración periódica de equipos, la estandarización de parámetros operativos y la verificación continua del cumplimiento de especificaciones, mismas que fueron implementadas a nivel operativo dentro de

la empresa. En este sentido, el monitoreo continuo asociado a dichas acciones queda fuera del alcance temporal del presente estudio, por lo que no se incluyen representaciones gráficas de control.

TABLA 9
RESULTADOS IMPLEMENTADOS DENTRO DEL AMEF (ÍNDICES NRP)

OPERACIÓN	CAUSA POTENCIAL	S	O	D	NPR FINAL
Molienda	Aspas desalineadas o sin filo	3	2	2	12
	Incremento de la temperatura por fricción	7	2	1	14
Tamizado	Tamices en mal estado, mala calibración o tiempo inadecuado	2	2	1	4
Mezclado/ Amasado	Velocidad de mezclado incorrectamente,	4	3	1	12
	Error por factor humano,	8	1	1	8
	Control deficiente de humedad durante el proceso	6	2	2	24
Extrusión	Presión inadecuada de extrusión, falta de humedad o matriz dañada	4	2	1	8
	Pasta quebradiza al secar y sin firmeza	2	2	3	12
	Falta de limpieza en las matrices, descuido humano	8	1	1	8
Cortado	Error de calibración de corte	5	2	2	20
	Mala alineación de las cuchillas	3	1	1	3
	Presión de corte inadecuada	4	2	2	16
Secado	Mala distribución del aire, tiempo diferente de secado	5	1	1	5
	Tiempo de secado incorrecto, ventilación con diferentes temperaturas	8	1	1	8
Vibrado	Secado fuera de especificaciones	7	1	1	7
	Separación alta de dispensador, diseño inadecuado de criba o equipo	8	1	1	8
Dispensador	Calibración inadecuada del equipo	4	1	1	4
Empaque- tado	Aceptación errónea de material de baja calidad, manejo incorrecto del producto	3	1	1	3
	Temperatura incorrecta de sellado	2	1	1	2

IV. CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología DMAIC permitió identificar, analizar y corregir de manera efectiva la principal causa de la inconsistencia en la longitud de la pasta: la desalineación entre la charola y la tolva en el proceso de vibrado. A través del uso integrado de herramientas como el Project Charter, VoC-CtQ, hojas de verificación, AMEF, diagramas de Ishikawa y Pareto, así como la matriz de Eisenhower, fue posible priorizar los modos de falla, estructurar las acciones de mejora y establecer controles robustos para minimizar su ocurrencia, mismos que han sido propuestos dentro de las acciones recomendadas del AMEF.

Los resultados evidenciaron una reducción significativa de los principales NPR del proceso, particularmente en las etapas de secado y vibrado, las cuales representaban los riesgos más críticos. Además, la estandarización y ajuste de parámetros operativos, la implementación de un *fixture* para el vibrador y la mejora en prácticas de calibración y monitoreo contribuyeron a estabilizar el proceso, disminuir la merma con un resultado favorable del 80 % y mejorar la uniformidad del producto final en cuanto a consistencia física.

De manera general, este estudio demuestra que la metodología Six Sigma, combinada con herramientas de calidad clásicas y análisis estadístico, constituye un enfoque

eficaz para resolver problemas complejos en la industria alimentaria. La mejora obtenida en la estabilidad del proceso reafirma el potencial de DMAIC como una estrategia sostenible para incrementar la productividad, la calidad y la satisfacción del cliente. También, se recomienda continuar con el monitoreo mediante gráficos de control y evaluar futuras aplicaciones de diseño de experimentos (DOE) para optimizar parámetros críticos del proceso.

REFERENCIAS

- [1] K. Ishikawa, *What Is Total Quality Control? The Japanese Way*. Englewood Cliffs, NJ, EUA: Prentice Hall, 1985
- [2] J. R. Evans y W. M. Lindsay, *Administración y control de la calidad*, 8.ª ed., México: Cengage Learning, 2011.
- [3] J. P. Womack, D. T. Jones, y D. Roos, *The Machine That Changed the World*, Nueva York: Free Press, 1990.
- [4] P. S. Pande, R. P. Neuman, y R. R. Cavanagh, *The Six Sigma Way*, Nueva York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] T. Pyzdek y P. A. Keller, *The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels*, 4.ª ed. Nueva York, NY, EUA: McGraw-Hill, 2014.
- [6] M. R. J. Cotos y A. E. Vázquez, “Beneficios del uso de la metodología Six Sigma en el sector manufacturero: Artículo de revisión de literatura”, tesis de grado, Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú, 2024.
- [7] L. E. García, G. Fernández y A. Brenis, “Mejora del Sistema de Medición: Un caso aplicado a la Industria Automotriz”, *Conciencia Tecnológica*, n.º 45, pp. 41-46, 2013.
- [8] A. Rodríguez, J. Quevedo y R. Garcilazo, “Reducción de costos logísticos en una empresa agroexportadora de conchas de abanico”, *Pakamuros*, vol. 12, n.º 4, pp. 116-129, dic. 2024, doi: [10.37787/3pyv6658](https://doi.org/10.37787/3pyv6658).
- [9] V. Ortiz y H. F. Pardo, “Importancia y ventajas de los KPI (Key Performance Indicators) en los proyectos: enfoque de procesos en el sector petrolero”, trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/9609>
- [10] C. McKeever, “The project charter-blueprint for success,” *Crosstalk*, vol. 19, n.º 1, en. 2006.
- [11] I. Lipponen, “Developing quality through systematic process improvement: a DMAIC approach”, tesis de maestría, LUT University, Lappeenranta, Finlandia, 2024. [En línea]. Disponible: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/168374>
- [12] R. García-González, J. A. Paredes-Castañeda y E. Bayona-Ibáñez, “DMAIC como herramienta para implementar un sistema de mejora para incrementar la productividad en la industria del sombrero”, *Ingenio*, vol. 20, n.º 1, pp. 8-15, 2023. doi: [10.22463/2011642X.3371](https://doi.org/10.22463/2011642X.3371).
- [13] M. A. Martínez y J. Morales, *Lean Seis Sigma para la mejora de procesos*, Elche, España: Editorial Electrónica UMH, 2022.
- [14] A. G. Guamán, J. C. Moyano, J. C. Cayán y E. F. García, *Six Sigma: pasos para la mejora continua de procesos*, Quito, Ecuador: Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador, 2023.
- [15] H. Gutiérrez y R. De la Vara, *Control estadístico de Calidad y Seis Sigma*, México: McGraw-Hill, 2009.
- [16] J. D. Echeverría, “Nivel de pedidos perfectos de la empresa Pastas Comarrico S.A.S. en la ciudad de Barranquilla utilizando la metodología Seis Sigma”, trabajo de grado, Universidad de los Andes, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/1992/51583>
- [17] A. Griffin y J. R. Hauser, “The voice of the customer”, *Marketing Science*, vol. 12, n.º 1, pp. 1-27, 1993, doi: [10.1287/mksc.12.1.1](https://doi.org/10.1287/mksc.12.1.1).

Edición especial

Estrategia de Gestión para la Transición hacia una Economía Circular

La V Conferencia Internacional América Sustentable (V CIAS) es organizada con el objetivo de ofrecer un espacio para difundir y generar conocimiento y experiencias entre académicos, investigadores, estudiantes, profesionales y público en general de Latinoamérica. La colaboración entre universidades es esencial para la difusión y la transferencia de conocimiento entre distintas líneas de investigación. La quinta edición fue trabajada en conjunto entre la Universidad Santo Tomás (Chile), la Universidad Santa María La Antigua (Panamá), la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (Colombia), la Universidad de Lima (Perú) y la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México).

Los artículos publicados en esta Edición Especial de la revista CULCYT presentan propuestas innovadoras hacia una transición a la economía circular con el objetivo de ofrecer soluciones sobre problemas reales, enfocadas en impactos sociales, ambientales y económicos.

Esta quinta edición se llevó a cabo de manera híbrida. En la Universidad Santo Tomás fue la inauguración del evento de manera presencial y se transmitió en vivo a través de su canal de YouTube, lo que permitió su visibilidad para el público en general. La inauguración contó la presencia de la Dra. Elsa Echeverría Olivares, Rectora de la UST, y de la Mtra. María Margarita Guadalupe Gaytán Aguirre, Secretaría Académica de la

UACJ. Además, se tuvo la plática inaugural “La misión Lucy: explorando lo inexplorado”, impartida por la Dra. Adriana C. Ocampo, geóloga planetaria y exdirectora del programa de ciencia NASA. Los días del evento fueron el 8 y el 9 de noviembre de 2025, en los que se compartieron experiencias y análisis de investigaciones entre los expositores.

El V CIAS 2025 contó con un total de 34 ponencias que se incluyeron en las memorias del evento y se recibieron 11 trabajos en extenso para publicar en la Edición Especial “Estrategia de Gestión para la Transición hacia una Economía Circular”, donde en este volumen 23, número 1 (enero-abril 2026), se publican estos artículos correspondientes a las líneas de investigación que se presentaron en el V CIAS 2025.

Agradecemos de antemano por el trabajo colaborativo que se llevó a cabo a través del Comité Organizador, representado por la Dra. Soledad Vianey Torres Argüelles, la Dra. Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy, la Mtra. Gabriela Álvarez Vega, la Mtra. Yohanna Abarzúa Calfuquir, el Dr. Leonardo Rodríguez Córdova y el Dr. Rodrigo Barraza Alonso.

Dra. Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy
Editora Invitada de la Edición Especial
V CIAS 2025

Modelo para la creación de una *spin-off* en Ciudad Juárez: consideraciones y prácticas

Model for Creating a Spin-off in Ciudad Juárez: Considerations and Practices

Tomás Francisco Limones Meraz¹ , Roberto Romero López¹ , Mario Macario Ruiz Grijalva² 

¹ Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

² Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México

RESUMEN

El objetivo de este proyecto de investigación es realizar un planteamiento metodológico para crear una *spin-off* a partir del resultado de los trabajos de investigación y de gestión de proyectos de innovación y desarrollo tecnológico generados por parte de alumnos, maestros y profesores investigadores en las Instituciones de Educación Superior de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. A través de un estudio de carácter cualitativo, analítico descriptivo y de revisión exploratoria de la literatura internacional existente sobre este tema, se identificó material e información importante, lo cual fue vinculado y ordenado de acuerdo al modelo propuesto por el Centro Europeo de Empresas e Innovación de Ciudad Real (CEEI). Se estructuraron los hallazgos encontrados, formulando propuestas en un ordenamiento lógico y de conocimiento. Se consultó, principalmente, fuentes de las investigaciones realizadas en México, España, Colombia, Chile, Argentina y Costa Rica. También, se incluye un análisis de las normativas mexicanas identificables que dan sustento a la formalización en la creación de una *spin-off* en la región y algunas actividades de gestión, que son aspectos importantes cuando se adopta este modelo. Finalmente, se concluye con algunas recomendaciones para integrar la *spin-off* a una economía circular, como una base para fortalecer los procesos administrativos y operativos en forma eficiente y sostenible de la empresa.

PALABRAS CLAVE: *spin-off*; proyectos; innovación; investigación; tecnológicos.

ABSTRACT

The objective of this research project is to develop a methodological approach for creating a spin-off company based on the results of research and project management work in innovation and technological development generated by students, teachers, and research professors at Higher Education Institutions in Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico. Through a qualitative, analytical, descriptive, and exploratory review of existing international literature on this topic, important material and information were identified, linked, and organized according to the model proposed by the European Business and Innovation Centre of Ciudad Real (CEEI). The findings were structured, and proposals were formulated in a logical and knowledge-based framework. Sources consulted primarily included research conducted in Mexico, Spain, Colombia, Chile, Argentina, and Costa Rica. An analysis of identifiable Mexican regulations that support the formalization of spin-off creation in the region and some management activities, which are important aspects when adopting this model, is also included. Finally, the report concludes with some recommendations for integrating the spin-off into a circular economy, as a basis for strengthening the company's administrative and operational processes in an efficient and sustainable manner.

KEYWORDS: spin-off; projects; innovation; research; Technological.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Tomás Francisco Limones Meraz

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

CORREO ELECTRÓNICO: tlimones@itcj.edu.mx

Fecha de recepción: 1 de diciembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 30 de enero de 2026. **Fecha de publicación:** 23 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

El término *spin-off* identifica empresas de nueva creación que suelen nacer a partir de las necesidades que se identifican de otra empresa, sea pública o privada, o de los resultados de las investigaciones realizadas en universidades y centros de investigación pública, las cuales, al formalizarse, adquieren independencia jurídica, técnica y comercial, constituyéndose como empresas de nueva creación [1], [2], [3]. Las *spin-off* nacen usualmente en el seno de la universidad y son resultado de una intencionalidad manifiesta de difundir y aprovechar conocimiento y tecnología como resultado de la investigación y vincularlo comercialmente con el entorno, aportando o regresando a la sociedad productos o servicios tecnológicos con valor agregado e innovadores [4], [2], [5], [6], [7], [8], [9].

Otra alternativa de surgimiento de nuevas empresas *spin-off* de base tecnológica [10], [11], [12], lo constituyen los centros de investigación en ciencia o tecnología dentro del ámbito universitario, donde el personal investigador que identifica una oportunidad comercial innovadora surgida en el laboratorio o centro de investigación, posee un dominio tal en el conocimiento técnico de alto nivel del proyecto que, aunado al desarrollo de su educación y la trayectoria profesional del investigador, permite valorar la oportunidad y propensión a emprender, con la opción de establecerse como un empresario [13], [10].

Las *spin-off* son consideradas como un instrumento para la transferencia de la investigación a la sociedad, siendo uno de los mecanismos de transferencia de tecnología de referencia para ser aplicados al entorno productivo con valor comercial [2], dado que crean nuevos productos, procesos y formas de organización, y son particularmente innovadoras, de gran aceptación en el mercado y altamente competitivas con una ágil adaptación ante cambios [14], además de que aportan de manera positiva al desarrollo económico de la comunidad, incrementando los empleos y contribuyendo a la sociedad, explotan el conocimiento y brindan apoyo tanto a los alumnos, docentes y académicos, así como a las universidades, empresas y gobierno [5].

La creación de *spin-off* universitarias potencian, además, las redes empresariales al propiciar que se utilicen tecnologías avanzadas, fomentando el establecimiento de la cooperación entre la empresa, la universidad y

otros agentes [7], recomendándose la importancia de cambiar el rol de una universidad enfocada únicamente al aspecto académico, hacia una universidad integrada al desarrollo económico, es decir, una institución con espíritu empresarial, en donde se transforme el conocimiento en desarrollo de productos y procesos innovadores y de pasos a la formalización de la transferencia tecnológica hacia los sectores productivos y sociales de las regiones [15].

Las universidades son organizaciones complejas que se caracterizan por ser entidades dinámicas, multidisciplinarias, que albergan altas capacidades en materia de generación de valor en el ámbito cultural, social, académico e investigativo, formulando un ecosistema donde el emprendimiento transita desde los individuos hasta las empresas, bajo el entendido de que las universidades no solamente cumplen un rol de formadores de emprendedores, sino que integran diferentes elementos como la investigación, la innovación y el vínculo externo que permiten que surjan nuevos emprendimientos y se transfieran a toda la sociedad su carácter científico y su enfoque humanista [16], y contribuyen con la producción, transmisión y transferencia del conocimiento dentro de sus tres funciones básicas que son la docencia, la investigación y la extensión, definida esta como la proyección social de la institución para poner al servicio de la comunidad, los productos y servicios derivados de la docencia y la investigación [17], [10], [18].

Las universidades también juegan un papel importante en la innovación y la creación de una cultura de emprendimiento en la comunidad investigadora para la creación de empresas, a través del fomento en las competencias de gestión de recursos, la planeación, la persistencia, la flexibilidad y la generación de redes de contacto las cuales se convierten en pilares en el desarrollo de cualquier profesional [19], [20], jugando un papel determinante en la formación de futuros gestores de *spin-off* [19], quienes inciden de manera directa en la gestión de las políticas internas para la asignación de fondos, así como el desarrollar metodologías y describir experiencias que definen mejores y buenas prácticas en el desarrollo e interrelación entre las universidades y centros de investigación con el sector productivo [7].

En las pequeñas empresas, los gestores suelen ser los propietarios y prefieren evitar cualquier forma de financiación que suponga la entrada de nuevos accionistas, con la consiguiente pérdida de control sobre su

empresa. Conforme a este argumento, cuando las *spin-off* obtienen altas rentabilidades, prefieren utilizar los recursos generados para iniciar las nuevas actividades y, en caso de recurrir a financiación externa, optan por fondos que no limiten su capacidad de gestión y toma de decisiones (habitualmente deuda a corto plazo, cuyas restricciones suelen ser menores que en la de largo plazo). Desde la perspectiva de la teoría, cuanto mayor es el tamaño de la empresa, mayor es el conflicto entre directivos y accionistas, debido a una mayor separación entre propiedad y control [4]. Las empresas con mayores oportunidades de crecimiento suelen contar con un porcentaje elevado de activos intangibles, entre los que destacan los gastos en I & D y la propiedad intelectual [4].

Estudios han demostrado que el proceso de creación de Empresas de Base Científico-Tecnológica (EBCT), que son organizaciones que utilizan sus conocimientos científicos y tecnológicos para crear nuevos productos, procesos o servicios de alto valor añadido y suelen surgir como *spin-offs*, requiere de un conjunto articulado de instrumentos legislativos, culturales y de financiación, además de infraestructura física adecuada, para que tengan una cierta protección y acompañamiento que aumente el grado de supervivencia y de éxito comercial [7], [21]. Una decisión importante al constituir una *spin-off* es la elección de su forma jurídica, a través de la cual se realizará su operatividad empresarial.

En un estudio colectivo de casos en España [21], se analizaron las ventajas de desarrollar una *spin-off* universitaria cooperativa y su papel en el desarrollo de la economía social. Sus principales características son la prestación de servicios y su interés por cubrir las expectativas de la comunidad, satisfaciendo las necesidades y aspiraciones de sus socios a través de una gestión y estructura democrática, y sus resultados mostraron una menor importancia hacia la generación de la riqueza y una elevada importancia a la transferencia del conocimiento, haciendo posible exista una relación de trabajo del socio con la cooperativa a través de contratos de investigación o convenios de colaboración con la universidad [21], [22].

En las universidades de Latinoamérica se está fomentando la cultura emprendedora para su creación, por los beneficios económicos que se generan para la universidad y los investigadores participantes [23]. En México, Colombia, Chile y Brasil es un tema reciente, en gran medida por las políticas de algunos de estos países que

son poco flexibles [23]. Estas acciones limitan la oportunidad de crear *spin-off* a partir de los resultados de trabajo colaborativo entre estudiantes y maestros investigadores, lo cual constituye una oportunidad para que las entidades gubernamentales realicen una revisión y adecuación a las normas y procedimientos que rigen la creación de *spin-off* en estos países.

A. ACTIVIDADES EMPRENDEDORAS EN LAS UNIVERSIDADES

A partir de un estudio empírico sobre las características de las *spin-off* [24], en dos fuentes consultadas se identifican las actividades emprendedoras principales que se llevan a cabo en las universidades: en la primera de ellas se hace referencia a cinco grandes actividades emprendedoras [25] y la segunda es una clasificación en donde se reseñan ocho [26]. A continuación se muestran, en síntesis, estas actividades emprendedoras [25], [26].

- Proyectos científicos de gran escala. De ahí se obtienen grandes proyectos de investigación financiados externamente por medio de subvenciones públicas o recursos de fuentes industriales.
- Consultoría. Venta de la experiencia del personal científico o tecnológico para resolver un problema específico.
- Enseñanza externa. Provisión de cursos extra a personal o estudiantes no universitarios y organizaciones externas; regalías por publicaciones.
- Investigación contratada. La universidad desarrolla proyectos de investigación específicos para organizaciones externas.
- Patentes/licencias. Es la explotación de patentes o licencias de resultados de investigación por parte de la industria.
- Empresas *spin-off*. Es la formación de nuevas empresas u organizaciones para explotar los resultados de la investigación de miembros de la universidad.
- Ventas. Venta comercial de productos desarrollados en la propia universidad, por ejemplo, un nuevo software.
- Servicio de pruebas técnicas. Es la provisión de evaluación y calibración de instrumental o maquinaria para organizaciones o individuos externos a la universidad.

Estas actividades emprendedoras en las universidades típicamente se dan en un proceso de vinculación efectiva con los sectores productivos y sociales, siendo factores que favorecen el desarrollo universitario y de las empresas e impulsan el crecimiento económico y social de la región donde estas se localizan.

B. CARACTERÍSTICAS DEL EMPRENDEDOR ACADÉMICO

Para el desarrollo de las actividades de emprendimiento en las universidades es necesaria la participación de la comunidad universitaria, la cual se identifica a través de características específicas enmarcadas por la trayectoria y productividad de las personas, sean estudiantes, docentes o investigadores. El perfil emprendedor que emerge de la academia es considerado un factor determinante para desarrollo y éxito de una *spin-off* [27], que comúnmente se caracteriza por ser una persona extrovertida, con una estabilidad laboral académica, teniendo habilidades de docencia e investigadoras, con una visión y disposición a involucrarse en actividades emprendedoras, así como de un intelecto y experiencia reconocidos [1], [28].

La [Tabla 1](#) muestra la definición de estas características a partir de un estudio realizado mediante la aplicación de una encuesta a 44 *spin-off* académicas [29], donde, a través de un análisis univariante y aplicando estadísticos no paramétricos, dio como resultado: 1) características del emprendedor académico, 2) motivaciones para emprender y detección de oportunidades emprendedoras, 3) factores de innovación y formación y 4) factores de intraemprendimiento, mismos que son referenciados en las tablas correspondientes [29].

TABLA 1
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPRENDEDORES ACADÉMICOS [29]

CARACTERÍSTICA	AFIRMATIVO
Es investigador	77.8 %
Ha ocupado puestos de gestión en la universidad	69.6 %
Es profesor adjunto	68.8 %
Mantiene su relación con la universidad	64.3 %
Realizó actividad de consultoría	63.0 %
Fondos públicos de financiación de proyectos	60.0 %
Ha creado un grupo de investigación	58.8 %
Es profesor de tiempo completo	54.5 %
Es profesor asociado	40.0 %

Estos resultados en porcentaje representan las características que identifican al emprendedor académico, en forma sumativa o única, como la persona con mayor potencialidad de emprender en la universidad, con competencias y experiencias que lo distinguen.

C. HABILIDADES QUE CARACTERIZAN A ESTUDIANTES RELACIONADOS CON LA CREACIÓN DE SPIN-OFF

Otro aspecto importante obtenido a partir de los resultados de la revisión bibliográfica es aquel que identifica las habilidades y conocimientos que caracterizan a los estudiantes que han participado en la creación de una *spin-off*.

Se han realizado diferentes estudios que definen el potencial emprendedor en estudiantes, como el llevado a cabo con alumnos de educación superior en el que, mediante un instrumento de recolección de la información y un enfoque cuantitativo, se logró identificar el potencial emprendedor de las personas, midiendo 21 habilidades relacionadas a la creación de empresas [20].

En otro trabajo, efectuado en la universidad del sureste de Veracruz [30] sobre los factores que afectan la cultura emprendedora, se encontró que, al realizar una encuesta a 200 personas, los resultados arrojados identifican las capacidades personales que debe de tener un estudiante emprendedor, dentro de las que se encuentran su participación en actividades de emprendimiento, la creatividad, el trabajo en equipo, la iniciativa para emprender algún proyecto, el liderazgo y los recursos financieros para el emprendimiento.

Un estudio adicional, realizado en la universidad de Guanajuato [3], logró identificar capacidades adicionales, dentro de las que destacan la extroversión, la disposición a actuar, la asunción de riesgos, el compromiso, los estudios a nivel de posgrado, la trayectoria profesional sobresaliente, la experiencia en gestión de empresas y, en menor medida, antecedentes familiares orientados al emprendimiento, así como pasión por trabajar en proyectos de vinculación y extensión con la investigación que realizan [3].

De acuerdo a la literatura consultada, a continuación se enlistan las capacidades personales que caracterizan a los estudiantes emprendedores [20], [3], [30].

- Creatividad

- Trabajo en equipo (carisma y empatía)
- Iniciativa
- Propensión al riesgo
- Liderazgo
- Compromiso
- Participación en actividades de emprendimiento
- Económicas
- Autoeficacia
- Resiliencia
- Optimismo
- Identificación de oportunidades
- Locus de control
- Tolerancia a la frustración
- Persistencia
- Negociación (procesos de comunicación)
- Manejo del estrés
- Relaciones estratégicas (relaciones de contacto)
- Autonomía
- Flexibilidad
- Estudios a nivel de posgrado
- Trayectoria profesional
- Experiencia en gestión de empresas

- Antecedentes familiares
- Pasión por trabajar

La preparación y logro de estas capacidades personales en el estudiante abona a las posibilidades de éxito al realizar la apertura de la *spin-off*, por lo cual es recomendable llevar a cabo un autodiagnóstico a fin de encontrar las áreas de oportunidad y de desarrollo necesarias para el emprendedor.

D. TIPOS DE SPIN-OFF

La bibliografía contemporánea caracteriza las definiciones de los tipos de *spin-off*, centrada desde una perspectiva del origen universitario o cuando emergen de una empresa.

La [Tabla 2](#) muestra los tipos de *spin-off* identificados en la revisión de la literatura, estructurando los resultados básicamente en origen *universitario* o *corporativo* o *empresarial*, y se incluyen además las referencias de los autores que coinciden y aportan en su definición.

TABLA 2
TIPOS DE SPIN-OFF

ÁMBITO	TIPO	CATEGORIZACIÓN	PERSPECTIVA	REF.
Universitario	1) Estudiantiles	– Sociales	1) Independiente: Miembros de la comunidad universitaria o egresados, crean una nueva empresa para explotar comercialmente el conocimiento acumulado durante sus actividades académicas. 2) Vinculada: Los miembros de la comunidad científica o investigadora con espíritu emprendedor o la propia universidad promueven la creación de una nueva empresa para explotar comercialmente una tecnología generada en el seno de la universidad. 3) <i>Joint Venture</i> : La universidad impulsa en este caso la creación de una nueva empresa en la comunidad para explotar comercialmente una tecnología con grandes perspectivas de futuro que espera reporte recursos financieros externos. La persona emprendedora mantiene su puesto en la universidad y lo compatibiliza con su actividad en la <i>spin-off</i> (intraemprendedor).	[4], [24], [11]
	2) Académicas	– Espontaneas o planificadas		[21], [31], [32]
	3) Híbridas	– Consultoría y contratos I&D		[33], [34], [35]
	4) Ortodoxa	– Licenciamiento de propiedad intelectual – Producto o activos – De base tecnológica-científica, con o sin patentamiento – Con capital o sin capital externo – Promovidas por el investigador o inventor – Promovidas por emprendedores, compradores o inversionistas externos vinculado con la universidad		[36], [37]
Corporativo o empresarial	5) Subsidiarias	– Organizaciones que surgen desde iniciativas empresariales. – Surge de una organización madre existente.	6) Se trata de un modelo lineal de innovación impulsado desde la ciencia o desde el mercado, según que la iniciativa para el desarrollo y comercialización de la tecnología la tome la universidad o la empresa. En este caso el emprendedor deja la universidad para dedicarse a la nueva empresa (extraemprendedor).	[38], [39], [40] [41]

E. CARACTERÍSTICAS QUE IDENTIFICAN UNA SPIN-OFF UNIVERSITARIA

En un estudio realizado a ocho titulares de empresas *spin-off* universitarias en México, estas deben cumplir con las características siguientes [3]:

- Tener a la universidad como organización matriz.
- El conocimiento que se comercializa deberá ser técnico, tecnológico o científico, procedente de una investigación en ciencias o ingenierías.
- Contar con su propia figura jurídica.
- El emprendedor académico debe proceder de la universidad de origen, es decir, que el emprendedor tiene o tenía un puesto como investigador, profesor y/o estudiante de posgrado, previo a la fundación de la empresa.
- El emprendedor puede o no mantenerse vinculado con la universidad.
- Puede surgir de forma espontánea o planeada.
- Se identificó además en este estudio que los colaboradores de la *spin-off* usualmente comparten algunas características, como gusto por la investigación y la ejecución de proyectos, cualidades extrovertidas, trayectoria académica destacada, participación en la vida colegiada de la universidad, así como disposición para el trabajo con equipos multidisciplinarios, mostrando liderazgo tanto en investigación como en administración de proyectos [3].

E. FACTORES MOTIVACIONALES PARA LA CREACIÓN DE UNA SPIN-OFF

El análisis bibliográfico identifica que la creación de una *spin-off* se ve influenciada por factores motivacionales de los emprendedores, los cuales estimulan su deseo de desarrollar una empresa.

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos en un estudio empírico en Costa Rica [24] a 10 empresas *spin-off*, los cuales se conjugan y comparan con los factores determinantes de un estudio realizado en la creación de *spin-off* españolas, incluyendo en la parte comparativa los factores identificados [10]. Adicionalmente, también se hizo un estudio empírico con 10 emprendedores académicos [24], cuyos resultados determinan, a través de un análisis univariante y aplicando estadísticos no paramétricos, los factores motivacionales para crear una *spin-off* cooperativa, datos que se incluyen en la tabla siguiente [21], [42].

TABLA 3
FACTORES MOTIVACIONALES EN LA CREACIÓN DE SPIN-OFF

NÚM.	ÍTEM	REF.
1	Poner en práctica conocimientos técnicos.	[24], [42], [21], [29], [10]
2	Ventajas de trabajar por cuenta propia (independiente).	[24], [42], [21], [29], [10]
3	Detección de una oportunidad de negocio.	[24], [42], [21], [10]
4	Afán de ganar más dinero que trabajando a sueldo.	[24], [42], [21], [29], [10]
5	Lo propuso o animó la empresa o el instituto en el que trabaja.	[24], [42], [21], [10]
6	El deseo de avanzar en el conocimiento tecnológico.	[21], [29]
7	Insatisfacción laboral.	[42], [21], [29]
8	Saber que satisface una necesidad de mercado.	[42], [29]
9	Prestigio o estatus del empresario.	[24], [42], [29], [10]
10	La mejora del entorno del trabajo personal.	[21], [29]
11	Realización personal.	[42], [21]
12	El deseo de desarrollar las ideas propias.	[29]
13	El deseo de asumir y cumplir responsabilidades más amplias.	[29]
14	Dificultades percibidas en la carrera profesional anterior.	[29], [10]
15	El deseo de probar la habilidad propia en la creación de una nueva empresa.	[29]
16	El deseo de hacer algo que otros no podían.	[29]
17	Ejemplo y referencia de empresas exitosas.	[21]
18	El deseo de un empleo seguro y permanente.	[29]
19	Campañas de fomento a la creación de empresas.	[21]
20	Consejo de amigos.	[21]
21	Actitud existente en la sociedad hacia la creación de empresas.	[21]
22	Influencia de familiares emprendedores.	[21]
23	La calidad del producto o servicio.	[42]

Los resultados obtenidos identifican con mayor impacto los siguientes 7 de los 23 factores definidos por diferentes autores como relevantes en la creación de una *spin-off*, en orden descendente: 1) poner en práctica los conocimientos técnicos, 2) la ventaja de trabajar en forma independiente, 3) la detección de una oportunidad de negocio, 4) el afán de ganar más dinero, 5) lo animó el instituto o empresa donde labora, 6) el deseo de avanzar en el conocimiento tecnológico y 7) la insatisfacción laboral.

G. FACTORES DETERMINANTES (RELEVANTES) EN LA CREACIÓN DE UNA SPIN-OFF ACADÉMICA

En el análisis bibliográfico se identificaron recomendaciones sobre la importancia de conjugar equipos de tra-

bajo para crear una *spin-off* con personas de diferentes disciplinas, considerándose como una estrategia para cubrir los requerimientos de habilidades y conocimientos específicos necesarios en las diferentes áreas e incluyendo el impulso a las reuniones con empresarios que pueden aportar su experiencia y conocimiento en las cuestiones más importantes que se van a encontrar durante el desarrollo del proyecto de emprendimiento [43]. En un estudio realizado en el Instituto Tecnológico de

Costa Rica [44], buscando la retroalimentación de los diferentes sectores, se realizó una entrevista a funcionarios en donde, a partir de la información obtenida, se identificó los factores determinantes para la creación de *spin-off* académicas, las cuales son referenciados en la Tabla 4 [28]. En general, son cuatro los factores identificados en los que se dosifican los diferentes aportes de los autores que contribuyen en esta temática en la caracterización y atributo de cada factor.

TABLA 4
FACTORES DETERMINANTES EN LA CREACIÓN DE UNA *SPIN-OFF* ACADÉMICA

FACTORES	ATRIBUTOS	CARACTERÍSTICAS	REF.
Individuales	- Antecedentes y perfil emprendedor. - Motivación personal. - Aplicación del conocimiento en la práctica.	- El perfil del emprendedor académico exitoso, incluye aspectos como un alto grado académico, avance en la categoría profesional. - Haber ocupado puestos importantes en la universidad, realizar y crear grupos de investigación y haber realizado vinculación con el sector productivo. - El avance de la ciencia y sus aplicaciones, la búsqueda de la innovación y el afán por captar oportunidades de negocio. - Entre otros aspectos se encuentra la necesidad de logro y reconocimiento.	[24], [44], [45], [42], [21] [46], [28], [47], [48], [49]
Organizativos y de gestión	- Disponibilidad de recursos y capacidades de la universidad. - La financiación de su investigación y su naturaleza. - La calidad de los investigadores. - Índice del esfuerzo del investigador. - Índice de competitividad investigadora. - Estrategias de apoyo a la generación de <i>spin-off</i>. - La existencia de incubadoras de tecnología. - Contar con oficinas de transferencia de tecnología. - Los sistemas de recompensa a la transferencia de tecnología. - Las prácticas de dotación del personal que pertenezcan a la OTRI.* - La flexibilidad en el diseño de las políticas universitarias en la transferencia de tecnología. - Dedicar mayores recursos a la transferencia de tecnología. - Eliminar las posibles barreras culturales y de información que obstruyen el proceso de transferencia de tecnología.	- Estos se basan en el análisis de los recursos humanos y de la organización de la universidad para impulsar la creación de <i>spin-off</i>. - Recursos públicos provenientes del Estado y fondos externos que incluyen aportes de empresas privadas, organismos internacionales y organizaciones no gubernamentales. - Llevar registros o análisis de los índices relacionados con la calidad de la investigación. - Índice competitividad y del esfuerzo del investigador en la cual se miden proyectos aprobados sobre los presentados. - Cantidad de investigadores y en los proyectos de investigación. - Estrategias de apoyo a la generación de <i>spin-off</i> de la universidad. - Apoyo en el análisis y requerimientos legales para implementar las denominadas empresas auxiliares. - Instrumentos para facilitar la vinculación universidad-empresa.	[24], [44], [45], [42], [21] [46], [28], [50], [47], [51] [48], [49]
Institucionales	- Las estructuras y políticas universitarias para facilitar la creación de empresas. - Facilitar la comercialización con normas, estructuras y políticas. - Promover la vinculación con el sector empresarial. - Historia y tradición de la universidad.	- Alude a que aquellas universidades que estimulen la actividad de emprendedurismo, reflejándose en mayores niveles de comercialización y mayores tasas de actividad institucional. - Las universidades cuya misión, cultura o tradición se han dirigido en mayor medida a la creación de empresas o a la colaboración con ellas, presentan una mayor propensión a crear <i>spin-off</i> universitarias. - Facilitar que los académicos brinden servicios al sector productivo, generando una importante dinamización de los servicios.	[24], [45], [42], [21], [46] [51], [47], [51], [49]
Ambientales o externos	El acceso al capital riesgo.	- La influencia de estos en el espíritu empresarial académico. - Presencia y cercanía de empresas de capital riesgo. - Valorar si la legislación del país y la universidad favorece la creación de las <i>spin-off</i> universitarias, la que puede constituirse en un freno o en un estímulo a la creación de este tipo de empresas. - Las universidades situadas en contextos altamente tecnológicos y emprendedores generan un mayor número de <i>spin-off</i>, en comparación con aquellas situadas en entornos menos favorecedores.	[24], [42], [21], [46], [28] [49]

* OTRI: Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación toma como referencia la estructura definida por el Centro Europeo de Empresas e Innovación de Ciudad Real (CEEI) para la creación de empresas, combinándolo con un análisis bibliométrico descriptivo y de citas [8] sobre indicadores identificados que transmiten consideraciones y prácticas a tomar en cuenta durante la creación de una *spin-off*. La Figura 1 muestra los pasos de la metodología.

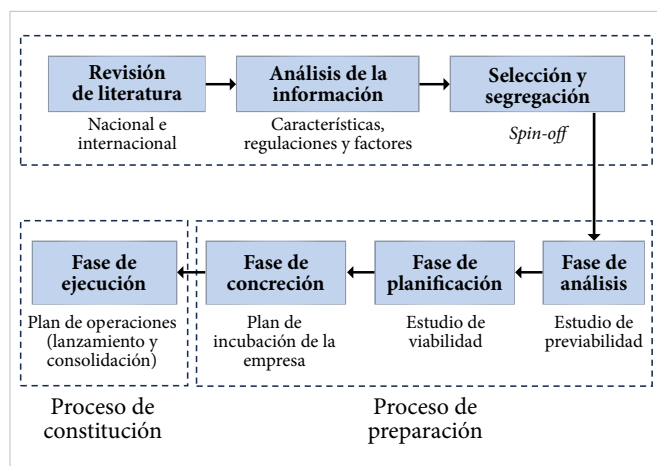


Figura 1. Etapas para la formalización de las *spin-off* académicas.

A. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

A partir de la selección de la temática de investigación, se da inicio a la búsqueda de bases de datos relevantes al tópico y se recopilan las publicaciones pertinentes, las cuales deben ser revisadas y analizadas y, enseguida, se valora el aporte de estas al estado de la investigación, sus tendencias y el impacto de la potencial contribución a la temática.

B. FASE DE ANÁLISIS

En esta fase se lleva a cabo un estudio de previabilidad por parte del emprendedor, dando inicio a un análisis y valoración de la idea en donde se identifican las potencialidades del proyecto *spin-off*.

Además, se incluye un autoanálisis por parte del emprendedor acerca de las principales características identificadas como fortalezas del proyecto, así como sus áreas de oportunidad que son consideradas para subsanar. Se realiza una valoración adicional sobre la segmentación y orientación del mercado.

C. FASE DE PLANIFICACIÓN

Esta etapa ocurre una vez que se ha definido la oportunidad de negocio como resultado de análisis de la idea. Durante el desarrollo de la fase de planificación de proyecto de *spin-off* se da inicio al estudio de viabilidad [11]. El emprendedor y su equipo de trabajo deben elaborar la descripción detallada de la idea del proyecto, considerando incluir personal con conocimientos de producción y venta del producto identificado [52], donde se incluya un análisis descriptivo de la maquinaria, equipo, materiales, mano de obra, métodos, así como el medio utilizado. Se desarrolla el diseño preliminar del producto, complementando el análisis de los requerimientos, dentro de los que se encuentran las características de los recursos humanos administrativos y operativos necesarios para la producción. La valoración de mercado realizada en la fase de análisis es utilizada para definir una estrategia de *marketing*, finalizando la planeación con un planteamiento sobre la previsión económica y financiera necesaria.

D. FASE DE CONCRECIÓN DEL PROYECTO. ETAPA DE INCUBACIÓN

En esta fase, que es la concreción de la incubación de la *spin-off*, se sortean algunas dificultades, por lo cual es recomendable un acompañamiento de expertos mentores y técnicos especializados en el producto o proceso seleccionado e, inclusive, en el área comercial [4]. Esta etapa incluye también la identificación de las actividades y características de la empresa en producto o servicio; el plan de *marketing* sobre el precio, la promoción, la distribución y venta; el plan de desarrollo de recursos humanos en cuanto a sueldos, salarios, prestaciones, contrataciones, despidos, incentivación, capacitación, entrenamiento, descripción de puestos; y la estructura legal de la empresa que considera la personalidad jurídica, permisos, licencias, instalaciones, higiene, seguridad y ecología, entre otros.

Es recomendable que en la selección del lugar de apertura de la *spin-off* se tomen en cuenta, de ser posible, algunos aspectos importantes, como son la condición en términos legales del local, las promociones o incentivos gubernamentales para la apertura, la disponibilidad de la mano de obra y la localización de la proveeduría, entre otros. Un factor importante que es considerado en la planeación son las actividades de gestión en los requerimientos económicos y financieros del proyecto, den-

tro de los que se incluyen inversiones, financiamientos, amortizaciones, balances contables, estado de resultados, retenciones y prestaciones, entre otros. Finalmente, y no menos importante, se encuentra la planeación para la definición de los requerimientos y adquisición de las M del proceso, que son maquinaria, mano de obra, material, método y medio ambiente.

E. FASE DE EJECUCIÓN

En esta etapa se procede a consolidar los requerimientos planteados en las fases de análisis, planificación y concreción para lanzar el producto o proceso del proyecto *spin-off*. Con el fin de alcanzar la competencia y facultad de operación es necesario poner en marcha cada una de las actividades consideradas durante estas etapas. El proceso de creación de la empresa *spin-off* inicia con los trámites legales de constitución y formalización, los cuales contemplan la definición de la distribución de los beneficios, las relaciones entre los socios y las gestiones laborales, comerciales y de marcas o patentes.

Antes de la etapa de operación, se debe definir el financiamiento con el cual contará la empresa, considerando créditos bancarios, ángeles inversionistas, asociados, programas de apoyo gubernamental, convocatorias de apoyo regionales, estatales, nacionales o internacionales. Estos recursos se destinan a las adquisiciones previstas de los insumos y componentes, así como maquinaria, equipo, herramientas y accesorios necesarios para llevar a cabo la operación de producción en serie del producto. Es importante considerar que la prueba y validación de la funcionalidad del equipo productivo, así como de la infraestructura, debe ser validada previo a su utilización en la fabricación del producto.

Otro aspecto fundamental en la etapa de operación es contar con el personal operativo, administrativo y de soporte certificado para cubrir los requerimientos necesarios en la fabricación del producto.

Con los elementos descritos hasta aquí, es posible fabricar las primeras partes con una corrida piloto, con cuyos resultados se valida el producto y el proceso, permitiendo con ello la producción en masa. Una vez que la *spin-off* lanza su producto al mercado, la empresa comienza a generar rendimientos económicos propios. En este momento, la *spin-off* está lista para ser independiente y autónoma.

III. RESULTADOS

La revisión de la literatura encontrada durante el desarrollo de esta investigación identifica las principales propuestas que los diferentes autores a nivel nacional e internacional consideran importante que sean consideradas para iniciar la formalización y apertura de una *spin-off* universitaria. Durante la revisión, se han identificado y plasmado en este documento un compendio de las principales actividades emprendedoras que se llevan a cabo en las universidades, los rasgos característicos de los emprendedores académicos, los tipos de *spin-off* que emergen como empresas, los elementos distintivos que identifican a una *spin-off* universitaria, los factores motivacionales para constituirla, así como las variables que son determinantes para su creación.

A. BARRERAS Y RETOS QUE ENFRENTA EL EMPRENDEDOR ACADÉMICO AL CREAR UNA SPIN-OFF

Sin embargo, también se han identificado barreras a las cuales se enfrentan los emprendedores académicos al crear una *spin-off*, algunos de los cuales [24] manifiestan haber tenido problemas y retos durante su formalización [10]. Al prestar especial atención al análisis de estos obstáculos, se pueden identificar, con una mayor comprensión, los retos en actividades y conocimientos necesarios que deben ser cubiertos por los emprendedores de las universidades antes de iniciar con la apertura de la *spin-off* [53]. La Tabla 5 muestra el compendio de factores que representan retos que pueden ser gestionados por el emprendedor antes de dar formalidad y compromisos de participación en el ecosistema de emprendimiento.

A. ASPECTOS RELEVANTES QUE CARACTERIZAN AL EMPRENDEDOR ACADÉMICO

La figura del emprendedor académico ha sido considerada como una característica importante en la creación de una *spin-off*, dada la relevancia de su vínculo directo durante la formación de esta. La Tabla 6 es un compendio de los aspectos principales que se abordan en la literatura y que son características de los emprendedores académicos, lo cual permite identificar que la mayoría estos son investigadores que se encuentran en una etapa avanzada de su carrera académica y que tienen un reconocimiento en su organización, así como una amplia experiencia laboral y de emprendimiento en la academia [24], [4].

TABLA 5
BARRERAS Y RETOS QUE ENFRENTA EL EMPRENDEDOR ACADÉMICO AL CREAR UNA SPIN-OFF

DIMENSIÓN	PROBLEMA	REF.
Económica	Falta de recursos financieros	[24], [53]
	Carencia de equipo-maquinaria	[24]
	Ubicación geográfica de la empresa	[24]
	Pobre inversión de la universidad en I+D+i	[54], [23]
Tecnológica	Problemas en el desarrollo del producto	[24], [53]
	Tecnología inmadura	[24]
	Técnicos especializados	[24]
	Falta de información sobre <i>know-how</i>	[53]
Administrativa	Apoyo insuficiente por parte de la institución	[54], [10], [9]
	Gestión empresarial	[24], [53]
	La falta de políticas internas en la estructura administrativa, legal e institucional para direccionar apropiadamente el emprendimiento	[24], [23], [9]
	Mercado inmaduro (falta información)	[24], [53]
	Poca cultura y noción sobre negocios y emprendimiento de la academia y los investigadores	[54], [23], [53], [9]
	Reducido número y características de los investigadores dedicados a la generación de conocimiento	[23]
	Falta de contactos externos. Vinculación empresarial mínima	[53], [9]
	Falta de colaboración de un emprendedor externo	[53], [9]
	Unidades de emprendimiento poco estructuradas y con funciones dispersas	[9]
	Problemas en la protección de productos	[53]
	Relaciones con el centro de investigación de procedencia	[53]
Humana	Recurso humano capacitado	[24], [53]
	Comunicación	[24]
	Elevado nivel de riesgo	[53]
	Formación de potenciales colaboradores	[53]
	Falta de tiempo	[53]
	Tamaño pequeño del mercado	[53]
	Falta de mercado objetivo o poco desarrollado	[54], [53]
	Falta de confianza en sus capacidades	[53]
	Incompatibilidad con las tareas universitarias	[53]
	Problemas de carácter familiar	[53]

TABLA 6
ASPECTOS RELEVANTES DE UN EMPRENDEDOR ACADÉMICO

NÚM.	ASPECTOS RELEVANTES	REF.
1	Aquellos investigadores que han alcanzado un mayor rango académico, con mayor número de publicaciones y prestigio tienen una mayor probabilidad de crear una empresa	[24], [4] [26], [35] [55], [56] [57]
2	Experiencia en actividades emprendedoras dentro de la academia, lo cual le permite adquirir las habilidades y capacidades necesarias para la obtención y gestión de los recursos requeridos para llevar a la práctica una idea de negocio	
3	La calidad y productividad científica y su participación en las redes sociales	
4	Productividad en trabajos de investigación que se dirigen hacia el establecimiento de los factores que influyen en la probabilidad de que un investigador decida crear una empresa	
5	Los investigadores crean empresas al final de su carrera (<i>spin-off</i>), planteando la posibilidad de obtener retornos financieros de su capital intelectual	
6	Para los científicos, crear una empresa es un medio para apropiarse del valor de su propiedad intelectual y para acceder a mecanismos de financiación adicionales para el desarrollo de futuras investigaciones	[58], [59]
7	Los investigadores que realizaban actividades de consultoría con empresas privadas, agencias gubernamentales u organizaciones asociadas con su campo de investigación muestran una mayor probabilidad de crear una empresa	[60]

El proceso de creación de Empresas de Base Científico-Tecnológica requiere de un conjunto articulado de instrumentos legislativos, culturales y de financiación. La conjugación de la información obtenida a partir de la revisión bibliografía ha permitido identificar diferentes factores que muestran un panorama genérico importante a ser considerado durante las gestiones para la apertura de una empresa *spin-off*. La información incluye el conocimiento contemporáneo sobre las principales actividades emprendedoras que se realizan en las universidades, las características más comunes de los emprendedores académicos, los tipos de empresas *spin-off* identificadas en la bibliografía, así como las principales características que identifican a una *spin-off* universitaria, que incluye los factores que son determinantes y que motivan a los emprendedores a formalizarla.

El análisis identifica, además, las barreras y retos que usualmente enfrentan los emprendedores académicos al constituir una *spin-off*, los cuales pueden ser atenuados por los aspectos relevantes de conocimientos y habilidades que caracterizan a docentes, investigadores y estudiantes relacionados con la creación de una empresa de esta índole.

Las *spin-off* son un instrumento potencial de desarrollo económico y tecnológico para los sectores focalizados en las regiones, dada la facultad de transferencia de conocimiento y tecnología que se gesta a partir de los productos y procesos generados, contribuyendo a las cadenas de valor ya establecidas. La Figura 2 muestra el mapa en bloques del modelo para la estructuración y creación de una *spin-off* académica, mostrando las actividades a realizar en dos secciones, siendo la primera el proceso previo a la creación de la *spin-off* y la segunda correspondiente al proceso de su creación. La Tabla 7 presenta el detalle del compendio obtenido de factores y características que forman parte de un proceso de estructuración y desarrollo de una *spin-off*, representando un modelo que plantea en forma organizada las etapas a ser consideradas para su desarrollo y formalización.

Este proceso de desarrollo de la *spin-off* que se presenta como una alternativa a considerar por el emprendedor académico, se divide en dos etapas: la del proceso previo a la formación de la *spin-off* y la de su constitución.

Las consideraciones de desarrollo para la primera etapa incluyen tres secciones: 1) el estudio de previabilidad donde la idea de negocio es analizada y valorada; 2) el

estudio de viabilidad técnica y comercial, donde se da inicio a la planificación de la empresa, y 3) el plan empresa, donde se da inicio al desarrollo del proyecto, definiendo y concretando los requerimientos necesarios para la puesta en marcha de la *spin-off*. En la última sección se consolida la constitución y la operación, durante la cual es ejecutado el plan operativo y de comercialización del producto.

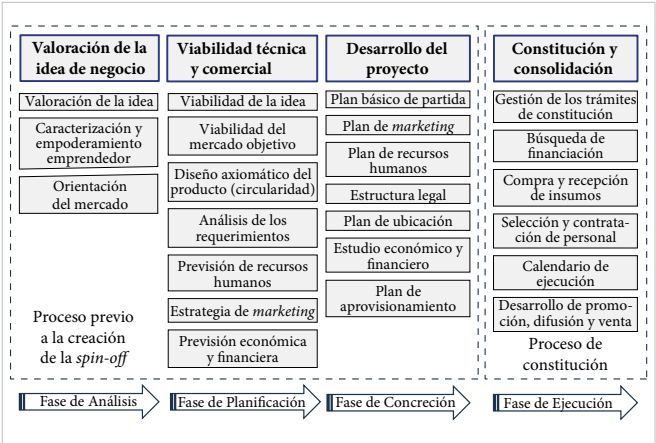


Figura 2. Mapa del modelo para la estructuración y creación de una *spin-off* académica

B. NORMATIVIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA SPIN-OFF

La normatividad federal, estatal e institucional de México tiene un sentido de libertad hacia el desarrollo de empresas de base tecnológica y favorece la participación de miembros de las comunidades. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos 2025 establece las bases generales de coordinación entre la federación, estados y municipios para la consolidación del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Por su parte, el Plan Nacional de Innovación 2019-2024 plantea en uno de sus objetivos la creación de emprendimientos de base científica y tecnológica con enfoque socioambiental, buscando alcanzar una mayor independencia científica y tecnológica y articulando la colaboración entre los diferentes órdenes de gobierno, Instituciones de Educación Superior (IES) y centros de investigación. Además, el Programa Especial en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación 2022-2024 incluye como elemento fundamental la generación de EBCT en todas sus etapas de crecimiento, promoviendo la incorporación creciente de personas tecnológicas como líderes de desarrollo tecnológico e innovación, así como el fortalecimiento de cadenas productivas.

TABLA 7
MODELO PARA LA ESTRUCTURACIÓN Y CREACIÓN DE UNA SPIN-OFF ACADÉMICA

PROCESO PREVIO A LA CREACIÓN DE SPIN-OFF			PROCESO DE CONSTITUCIÓN DE SPIN-OFF
ESTUDIO DE PREVIABILIDAD (VALORACIÓN DE LA IDEA NEGOCIO)	ESTUDIO DE VIABILIDAD (VIABILIDAD TÉCNICA COMERCIAL)	PLAN DE EMPRESA (DESARROLLO DEL PROYECTO)	PLAN DE OPERACIÓN (CONSTITUCIÓN Y CONSOLIDACIÓN)
Valoración de la idea • Por ponderación de factores • Valoración de la idea; uso de W*	Viabilidad de la idea • Análisis de las M • Diagrama causa-efecto • Revisión por mentores, expertos y asociados	Plan básico de partida • Presentación de los promotores • Actividad de la futura empresa • Producto o servicio	Gestión y trámites de constitución • Distribución de los beneficios de las <i>spin-off</i> • Relaciones con socios y accionistas • Gestiones laborales • Gestión de marcas, patentes y regalías • Gestiones laborales • Gestiones comerciales
Características y empoderamiento del emprendedor • Perfil • Trayectoria y productividad • Autodiagnóstico FODA • Oportunidades de mejora	Viabilidad del mercado objetivo • Dimensión, segmentación • Clientes (demanda o necesidad no satisfecha) • Proveedores • Competencia (empresas competidoras) • Análisis DAFO • Diferenciación • Posicionamiento	Plan de marketing • Política de precios • Política de promoción • Política de distribución o venta	
Orientación al mercado • Valoración y potencialidad de la idea • Segmentación de mercado		Plan de recursos humanos • Sueldos, salarios, prestaciones, contrataciones, despidos • Técnicas de incentiva-ción y motivación • Descripción de puestos • Capacitación continua • Entrenamiento	Búsqueda de financiación • Recepción y valoración de materiales y componentes • Recepción e instalación de maquinaria, equipo y herramientas • Pruebas y liberación de la infraestructura
	Diseño axiomático del producto • Dominio del cliente • Dominio funcional • Dominio físico • Dominio del proceso • Dominio en la economía circular (uso de materiales de alta durabilidad y bajo en carbono, de energías renovables)		Selección y contratación de personal • Personal de confianza • Personal operativo
	Análisis de los requerimientos • Del producto (definición y calidad) • De proceso (definición y cálculo)	Estructura legal • Forma jurídica • Permisos, licencias solicitadas (STPS, SHCP, Protección Civil) • Requisitos legales de instalaciones • Requisitos de higiene, seguridad y ecología • Requisitos legales del producto o servicio (COFEPRIS, SADER) • Requisitos de exportación	Calendario de ejecución • Pruebas piloto • Validación de proceso • Validación de producto
	Previsión de recursos humanos • Aspectos legales • Técnicas para reclutar y seleccionar		Desarrollo de actuaciones de promoción, difusión y venta • Negociación • Trato con clientes • Trato con proveedores • Trato con equipos multidisciplina-rios • Comunicación efectiva • Oportunidades de nuevos negocios
	Estrategia de marketing • Cómo fijar precios • Cómo ofertar el producto o servicio • Identificación de nuevas aplicaciones • Gestión de PI	Plan de ubicación • Análisis de ponderación de criterios • Términos legales, incentivos gubernamentales, mano de obra, proveeduría	
	Previsión económica y financiera • Proyección presupues-taria • Plan económico	Plan de estudio económico y financiero • Inversiones y financiación • Ingresos • Costos de personal • Amortizaciones • Cuenta de pérdidas y ganancias • Balance provisional de la situación • Retenciones e IVA • Previsión de tesorería	
		Plan de aprovisionamiento • Materiales, equipamiento, infraestructura	
FASE DE ANÁLISIS	FASE DE PLANIFICACIÓN	FASE DE CONCRECIÓN	FASE DE EJECUCIÓN

* W: uso de preguntas interrogativas para describir y obtener respuestas detalladas de la idea de negocio (*What, Where, When Who, Why, Which, Whose y How*).

La Ley Federal de Responsabilidades Administrativas de los Servidores Públicos 2015 autoriza al personal de los centros públicos de investigación, mediante los

órganos de gobierno de dichos centros, con previa autorización del órgano de control interno de las instituciones, a participar o vincularse con proyectos de

investigación científica y desarrollo tecnológico en relación con terceros, en la que se incluye la transferencia de conocimiento, licenciamientos, colaboración como socios accionistas de empresas privadas de base tecnológica o como colaboradores o beneficiarios en actividades con fines de lucro derivadas de cualquier figura de propiedad intelectual perteneciente a la propia institución, centro o entidad, según corresponda.

Desde una perspectiva local, el Plan Estatal de Desarrollo Chihuahua 2022-2027 incluye como estrategia desarrollar talento para el fortalecimiento de micro, pequeñas y medianas empresas y emprendimientos competitivos, promoviendo y vinculando el acceso a la juventud al financiamiento de proyectos productivos y asociatividad para el emprendimiento, implementando talleres especializados para el fortalecimiento de emprendimientos de alto impacto.

Finalmente, el Tecnológico Nacional de México, órgano educativo del ámbito federal más grande de México, con 254 instituciones, dentro de sus objetivos contempla formar profesionales e investigadores aptos para la aplicación y generación de conocimientos que les proporcionen las habilidades para la solución de problemas, con pensamiento crítico, sentido ético, actitudes emprendedoras, de innovación y capacidad creativa para incorporar avances científicos y tecnológicos, fortaleciendo la cultura innovadora y emprendedora; coordinando y estableciendo vinculación con el sector productivo de bienes y servicios para fomentar la creación de empresas y propiciando el apoyo a la constitución de asociaciones, sociedades y fondos que tengan por objeto impulsar el desarrollo de los servicios educativos y actividades de investigación e innovación a su cargo. La [Tabla 8](#) muestra normas que rigen las condiciones para la creación de *spin-off* en México.

TABLA 8
NORMAS RELACIONADAS CON LA CREACIÓN DE *SPIN-OFF* EN MÉXICO

NORMA	DESCRIPCIÓN
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, reforma DOF 15-04-2025, en el art. 73, párrafo XXIX-F (p. 76)	–El congreso está facultado para expedir leyes tendientes a la promoción de la inversión mexicana, la regulación de la inversión extranjera, la transferencia de tecnología y la generación, difusión y aplicación de los conocimientos científicos y tecnológicos que requiere el desarrollo nacional. Asimismo, para legislar en materia de ciencia, tecnología e innovación, estableciendo bases generales de coordinación entre la Federación, las entidades federativas, los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, en el ámbito de sus respectivas competencias, así como la participación de los sectores social y privado, con el objeto de consolidar el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.
Plan Nacional para la Innovación, mandado en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024	–3. Objetivos del Plan Nacional para la Innovación; Indicador 2) La creación de emprendimientos de base científica y tecnológica con enfoque socioambiental. –Objetivo prioritario 2, Alcanzar una mayor independencia científica y tecnológica y posiciones de liderazgo mundial, a través del fortalecimiento y la consolidación tanto de las capacidades para generar conocimientos científicos de frontera, como de la infraestructura científica y tecnológica, en beneficio de la población. –Objetivo Prioritario 6, Articular la colaboración entre los diferentes niveles de gobierno, IES y centros de investigación, para optimizar y potenciar el aprovechamiento y reutilización de datos e información sustantiva y garantizar la implementación de políticas públicas con base científica en beneficio de la población.
Programa Especial en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación 2021-2024	–6.4.- Relevancia del Objetivo prioritario 4: Articular capacidades de las humanidades, ciencia y tecnología para que el conocimiento científico se traduzca en soluciones sustentables mediante el desarrollo tecnológico e innovación y el fortalecimiento de la soberanía nacional y la independencia tecnológica a favor de la sociedad, el ambiente, la riqueza biocultural y los bienes comunes. –Se incorpora como elemento fundamental la generación de EBCT en todas sus etapas de crecimiento, promoviendo la incorporación creciente de personas tecnólogas como líderes de desarrollo tecnológico e innovación, así como el fortalecimiento de las cadenas productivas, en congruencia con las vocaciones regionales y ventajas comparativas del país, con responsabilidad ética, social y ambiental, así como con pertinencia pluricultural, y orientado a la atención de problemas prioritarios de nuestro país. Se apoyará la generación de cadenas de valor industrial considerando los ciclos de vida completa de los productos como soluciones tecnológicas integrales, desde su extracción y procesamiento de materias primas, su construcción, instalación y mantenimiento, hasta su reciclado. Se privilegiará la formación de circuitos cortos de valor con alto contenido nacional. –Se impulsará que las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, cuando así sea el caso, consideren, adopten o implementen los resultados de las actividades de investigación humanística y científica, desarrollo tecnológico e innovación apoyadas por el Estado, a través de convenios de colaboración o coordinación.
Ley Federal de Responsabilidades Administrativas de los Servidores Públicos 24 de marzo de 2015	–XII En el caso del personal de los centros públicos de investigación, los órganos de gobierno de dichos centros, con la previa autorización de su órgano de control interno, podrán determinar los términos y condiciones específicas de aplicación y excepción a lo dispuesto en esta fracción, tratándose de los conflictos de intereses que puede implicar las actividades en que este personal participe o se vincule con proyectos de investigación científica y desarrollo tecnológico en relación con terceros de conformidad con lo que establezca la Ley de Ciencia y Tecnología.

TABLA 8 (CONT.)
NORMAS RELACIONADAS CON LA CREACIÓN DE SPIN-OFF EN MÉXICO

NORMA	DESCRIPCIÓN
Ley General de Responsabilidades Administrativas, última reforma publicada DOF 02-01-2025, art. 37	–Las Personas Servidoras Públicas de los centros públicos de investigación, instituciones de educación y las entidades de la Administración Pública Federal de conformidad con las disposiciones aplicables en la materia que realicen actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación podrán realizar actividades de vinculación con los sectores público, privado y social, y recibir beneficios, en los términos que para ello establezcan los órganos de gobierno de dichos centros, instituciones y entidades, con la previa opinión de la Secretaría, sin que dichos beneficios se consideren como tales para efectos de lo contenido en el artículo 52 de esta Ley. –Las actividades de vinculación a las que hace referencia el párrafo anterior, además de las previstas en disposiciones legales especializadas en la materia, incluirán la participación de investigación científica y desarrollo tecnológico con terceros; transferencia de conocimiento; licenciamientos; participación como socios accionistas de empresas privadas de base tecnológica o como colaboradores o beneficiarios en actividades con fines de lucro derivadas de cualquier figura de propiedad intelectual perteneciente a la propia institución, centro o entidad, según corresponda. Dichas Personas Servidoras Públicas incurrirán en conflicto de intereses cuando obtengan beneficios por utilidades, regalías o por cualquier otro concepto en contravención a las disposiciones aplicables en la Institución.
En el Plan Estatal de Desarrollo Chihuahua 2022-2027	–Eje 1, Juventud, la línea de acción no. 1, tiene como estrategia desarrollar talento para el fortalecimiento de MIPYMES y emprendimientos competitivos; la línea de acción no. 2, tiene como estrategia Promover y vincular el acceso a la juventud al financiamiento de proyectos productivos y asociatividad para el emprendimiento, además en el –Eje 2, Desarrollo y crecimiento de micros, pequeñas y medianas empresas (MIPYMES), en Ciencia, tecnología e innovación, en la línea de acción 2, tiene como estrategia implementar talleres especializados para emprendimientos de alto impacto para la colocación de financiamiento y/o inversión, además de promover la creación de fondo estatal de emprendimiento e innovación tecnológica.
Secretaría de Educación Pública. Decreto que crea el Tecnológico Nacional de México, 2014, art. 2.	–(IX) Fortalecer la cultura innovadora y emprendedora, así como la movilidad del personal docente y de estudiantes para incrementar la competitividad a nivel nacional e internacional. –(XXI) Promover, de conformidad con las disposiciones jurídicas aplicables, la protección y explotación de los derechos de propiedad intelectual que deriven de las actividades que lleven a cabo “LOS INSTITUTOS, UNIDADES Y CENTROS”. –(XXX) Coordinar y establecer vinculación con el sector productivo de bienes y servicios para fomentar la creación de empresas y generar programas de empleo y de formación de capital humano que coadyuven al desarrollo de la comunidad. –(XXXI) Propiciar y apoyar la constitución de asociaciones, sociedades y fondos que tengan por objeto impulsar el desarrollo de los servicios educativos y actividades de investigación e innovación a su cargo y coordinar las acciones de las personas físicas o morales que contribuyan a la realización de su objeto y, en caso de resultar conveniente, representar a la Secretaría de Educación Pública ante las personas morales mencionadas, de conformidad con las disposiciones aplicables.

La normatividad para crear una *spin-off* en México se basa principalmente en el Programa Especial en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación, en forma genérica, ya que no existe un marco legal procedimental que rija su creación, por lo cual las regulaciones y políticas deberán ser desarrolladas en forma específica en cada universidad o centro de investigación, buscando alcanzar los planteamientos presentados por cada órgano del gobierno.

La creación de una *spin-off* implica el establecimiento de un sistema de gobernanza que incluya una estructura jurídica independiente, con normativas y procesos internos [61]¹, con su propio plan de negocio, mecanismos y lineamientos que rijan las relaciones de trans-

ferencia de conocimiento y tecnología, la propiedad intelectual, la formalización de contratos para el uso de la tecnología y la definición de la participación (capital social o en junta directiva) de la comunidad universitaria, así como los beneficios y compromisos de los emprendedores. La normativa interna que definan las universidades [61] no debe ser rígida y debe considerar criterios de impulso al desarrollo económico y cohesión social de las regiones [12]. La evolución de estas normas facilita y estimula las acciones de investigación y participación en el desarrollo de proyectos de emprendedurismo en la comunidad académica, flexibilizado el proceso para la creación de empresas e impulsando iniciativas para comercializar la tecnología desarrollada en sus instituciones.

IV. CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación, se han identificado las principales características de las *spin-off* que se

¹ Reunión realizada con la Dra. María del Pilar Monserrat Pérez Hernández, directora del Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, abr. 2025.

derivan de las actividades de investigación y desarrollo de proyectos en las universidades en el ámbito nacional e internacional, relacionando las iniciativas que estimularon a los emprendedores académicos a crear empresas.

En México, se ha contemplado en la normatividad de los diferentes órganos de gobierno que rigen los procesos de investigación, innovación y desarrollo de proyectos, que se promueva la participación de la comunidad universitaria en el emprendimiento y la creación de empresas de base tecnológica como resultado de las actividades académicas, sin embargo, no existe un marco legal específico que identifique la estructura procedimental para su creación. Esto representa un reto para las IES, pero también una oportunidad de poder desarrollar un sistema de gobernanza con una estructura jurídica que se adecue a las necesidades y características de su comunidad académica, así como de los sectores productivos y sociales de sus regiones.

Es importante considerar e incluir programas de emprendimiento en el orden reticular de las diferentes carreras, con el fin de estimular en forma disruptiva su participación en los proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico y en la creación de empresas, e introducir en los programas de emprendimiento la integración de empresas *spin-off* a una economía circular, considerando la perspectiva del diseño axiomático durante el desarrollo del producto-proceso.

También, se recomienda generar estratégicamente programas de promoción y difusión que permeen una transformación ideológica y cultural en la comunidad universitaria a participar en un ecosistema de investigación, innovación y desarrollo tecnológico abierto, en la búsqueda de estimular el emprendimiento y la creación de empresas, así como el desarrollo tecnológico y económico del país.

Los autores ven el potencial de fortalecer la creación de empresas *spin-off* a través del desarrollo de dos futuras investigaciones que lleguen a generar, primero, el desarrollo de una propuesta de sistema de gobernanza, con una estructura genérica que pueda ser adoptada y tenga la flexibilidad de ser enriquecida con los estilos y formas administrativas de las diferentes IES y, segundo, una propuesta para la comercialización de los productos que sean generados en las IES.

REFERENCIAS

- [1] CEEI. *Manual para la creación de Spin Off*. Accedido: sept. 2025. [En línea]. Disponible: https://www.camaracr.org/uploads/tx_icticontent/Manual_Spin-off_01.pdf
- [2] P. Zachman, W. López y A. Redchuk, “Abordaje de *Spin off* universitario desde BPM y SOA pertinentes con el Desarrollo Local”, *Repositorio UNLZ*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unlz.edu.ar/handle/123456789/104>. [Accedido: sept. 2025].
- [3] M. C. Rangel, A. López y R. Molina, “Caracterización de *spin-off* universitarias de base tecnológica: el caso de una universidad pública en el estado de Guanajuato”, *R. G. Secr.*, vol. 13, n.º 1, p. 23-47, abr. 2022, doi: [10.7769/gesec.v13i1.1246](https://doi.org/10.7769/gesec.v13i1.1246).
- [4] J. M. Beraza y A. Rodríguez, “Factores Determinantes de la Utilización de las *Spin-offs* como Mecanismos de Transferencia de Conocimiento en las Universidades”, *IEDEE*, vol. 16, n.º 2, pp. 115-135, may.-ag., 2010, doi: [10.1016/S1135-2523\(12\)60115-4](https://doi.org/10.1016/S1135-2523(12)60115-4).
- [5] J. R. López, M. C. Morales y S. A. Romero-Rubio, “Aportación de la universidad emprendedora y las *spin-off* al desarrollo”, en *Business Intelligence Big Data y Contabilidad Tridimensional*, J. D. Canabal et al. Montería, Colombia: Publicaciones Unisinú, 2020, cap. XXXII.
- [6] E. Robin Golob, “Generating spin-offs from university-based research: An institutional and entrepreneurial analysis”, disertación doctoral en Planificación Urbana, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, may. 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.proquest.com/openview/9b788f5cdcfcafd212fb03c34d25dad0>
- [7] M. A. Méndez, J. L. Hernández, J. A. Lino y M. González, “Estudio Exploratorio de las *Spin Off* desde la Perspectiva de los Gestores Universitarios”, *Eur. Sci. J.*, vol.10, n.º16, 2014, doi: [10.19044/esj.2014.v10n16p%25p](https://doi.org/10.19044/esj.2014.v10n16p%25p).
- [8] J. R. López, D. E. Zazueta, G. Guzmán y K. P. Olguín, “Las Empresas *Spin-Off* Académicas y su aportación al Desarrollo Económico”, *Academia Journals*, vol. 9, n.º 1, pp. 960-965, 2017. [En línea]. Disponible: https://www.academia.edu/81494581/Las_empresas_Spin_off_academicas_y_su_aportacion_al_desarrollo_economico

- [9] M. A. Sánchez y P. Martínez, *Metodología para la Creación de Empresas Basadas en Investigación y Desarrollo Tecnológico*, 1.ª ed. México: Instituto Nacional del Emprendedor, 2017.
- [10] P. Ortin, V. Salas, M. V. Trujillo, F. Vendrell, “La Creación de *Spin-Off* Universitarias en España: Características, Determinantes y Resultados”, *Economía Industrial*, vol. 368, pp. 79-95, 2008. [En línea]. Disponible: https://ddd.uab.cat/pub/artpub/2008/145517/ecoind_a2008n368p79iSPA.pdf
- [11] S. Bravo, J. Benavides, M. Bravo, M. Wagner y J. Londoño, *Características emprendedoras y modelos de Spin-off académicos. Análisis de casos en Colombia* (Col. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales). Editorial Universidad Santiago de Cali, 2021.
- [12] R. A. Villalba “Modelo de Gestión Plus para la Creación de Empresas de Base Tecnológica *Spin Off*”, tesis de maestría, Universidad EAN, Bogotá, mar. 2019. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10882/9481>
- [13] A. Pedraza, C. D. Ortiz y S. A. Pérez, “Perfil emprendedor del estudiante de la Universidad Industrial de Santander”, *Rev. Digit. Educ. Ing.*, vol. 10, n.º 19, pp. 141-150, 2015, doi: [10.26507/rei.v10n19.550](https://doi.org/10.26507/rei.v10n19.550).
- [14] K. Simón Elorz, coord., *La creación de empresas de base tecnológica. Una experiencia práctica*. Valencia: ANCES, CEIN, 2003. [En línea]. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/275959242>
- [15] R. Valera, “Hacia una universidad con espíritu empresarial”, *Forum Empresarial*, vol. 10, n.º 1, pp. 70-84, 2005.
- [16] N. L. Montoya, “Emprendimiento en las Universidades”, *Eficiencia*, vol. 1, n.º 3, 2021, doi: [10.15765/5eh0dt50](https://doi.org/10.15765/5eh0dt50).
- [17] S. Zuniga-Jara, J. Barraza-Carvajal, N. Sanhueza-Muñoz, S. Soza-Amigo, “Midiendo la Creación de Valor en una Universidad”, *Form. Univ.*, vol. 11, n.º 3, pp. 87-96, jun. 2018, doi: [10.4067/S0718-50062018000300087](https://doi.org/10.4067/S0718-50062018000300087).
- [18] M. C. Betancur y K. J. Garay, *En la Senda de una Hoja de Ruta de Spin-Off Universitarias en Colombia*. Medellín, COLCIENCIAS - ruta MEDELLIN - tecnova, 2015. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/344405001_En_la_senda_de_una_Hoja_de_Ruta_de_Spin-off_universitarias_en_Colombia
- [19] Y. A. Herrera, K. J. Medina y A. Quiñonez, “Acercamiento a la relación de las *Spin-Off* Universitarias con el emprendimiento social en el Pacífico Colombiano”, *Academia.edu*. Accedido: sept. 2025. [En línea]. Disponible: https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/64536968/Articulo_Prospecta_Barranquilla-libre.pdf
- [20] O. M. Gómez, “Actitudes emprendedoras de estudiantes universitarios: caso de una institución de educación superior en Colombia”, *Tendencias*, vol. 24 n.º 1, pp. 174-197, 2023, doi: [10.22267/rtend.222302.220](https://doi.org/10.22267/rtend.222302.220).
- [21] E. Seguí-Mas, F. Sarrión-Viñes, G. Tormo-Carbó y V. Oltra, “Estudio del emprendimiento académico bajo fórmulas de economía social: análisis de las *spin-off* universitarias cooperativas”, *CIRIEC-España*, n.º 78, pp. 101-124, ag. 2013. [En línea]. Disponible: https://ciriec-revistaeconomia.es/wp-content/uploads/CIRIEC_7805_Segui_et_al.pdf
- [22] C. Vargas, “Las *spin-offs* académicas y su posible configuración como empresas de economía social”, *REVESCO*, vol. 107, pp. 186-205, 2012, doi: [10.5209/rev_REVE.2012.v107.38748](https://doi.org/10.5209/rev_REVE.2012.v107.38748).
- [23] M. T. Maldonado-Sada, F. C. Caballero-Rico y L. Ruvalcaba-Sánchez, “Retos para las *spin-off* académicas en México como resultado de la valorización económica de I+D+i de las universidades”, *Ciencia UAT*, vol. 14, n.º 1, pp. 85-101, 2019, doi: [10.29059/cienciauat.v14i1.1136](https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1136).
- [24] M. Monge-Agüero, A. J. Briones, D. Garcia-Perez-de-Lema, “El Emprendedor Académico: Caso del Instituto Tecnológico de Costa Rica”, *Rev. Humanitas*, vol. 9, n.º 9, pp. 66-83, 2012.
- [25] K. Seashore, D. Blumenthal, M. E. Gluck y M. A. Stoto, “Entrepreneurs in academe: An Exploration of Behaviors among Life Scientists”, *Adm. Sci. Q.*, vol. 34, n.º 1, pp. 110-131, 1989, doi: [10.2307/2392988](https://doi.org/10.2307/2392988).
- [26] D. Jones-Evans, “Universities, technology transfer and spin-off activities – Academia entrepreneurship in different European regions”, University of Glamorgan, Reino Unido, reporte n.º 1042, ag. 1998.
- [27] S. T. Morales-Gualdron, A. Gutiérrez-Gracia y S. Roig-Dobón, “The entrepreneurial motivation in academia: a multidimensional construct”, *Ingenio*, doc.

- de trabajo n.º 2008/11, 2008. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/236268033_The_entrepreneurial_motivation_in_academia_a_multidimensional_construct
- [28] R. P. OShea, H. Chugh y T. Allen, “Determinants and consequences of university spinoff activity: a conceptual framework”, *J Technol Transfer*, vol. 33, n.º 6, pp. 653-666, 2008, doi: [10.1007/s10961-007-9060-0](https://doi.org/10.1007/s10961-007-9060-0).
- [29] M. Monge, “Factores asociados al éxito competitivo en las *Spin-off* académicas de las universidades públicas costarricenses”, *SBIR*, vol. 2, n.º 2, pp. 54-70, 2018, doi: [10.26784/sbir.v2i2.136](https://doi.org/10.26784/sbir.v2i2.136).
- [30] Y. J. Juarez-Juarez, L. S. Vázquez-López, J. L. Sánchez-Leyva, y H. C. Zapata-Lara, “Cultura emprendedora en estudiantes universitario”, *Teoría Educativa*, vol.3, n.º 8, pp. 27-32, jun. 2019, doi: [10.35429/JET.2019.8.3.27.32](https://doi.org/10.35429/JET.2019.8.3.27.32).
- [31] R. Botero, S. Gómez, J. C. Giraldo, C. A. Castro y W. Perdomo, “Implementación de *spin off* en el área de informática en Colombia”, *Ing. USBMed*, vol. 5, n.º 2, pp. 12-17, jul.-dic. 2014. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6833263.pdf>
- [32] F. Pirnay, B. Surlemont y F. Nlemvo, “Toward a typology of university spin-offs”, *Small Bus. Econ.*, vol. 21, n.º 4, pp. 355-369, 2003, doi: [10.1023/A:1026167105153](https://doi.org/10.1023/A:1026167105153).
- [33] N. Nicolau y S. Birley, “Academia Networks in a trichotomous categorisation of University spinouts”, *J. Bus. Ventur.*, vol. 18, n.º 3, pp. 333-359, 2003, doi: [10.1016/S0883-9026\(02\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S0883-9026(02)00118-0).
- [34] E. Bellini, G. Capaldo, A. Edström, M. Kaulio, M. Raffa, M. Riccardia y G. Zollo, “Strategic paths of academic spin-offs: A comparative analysis of Italian and Swedish cases”, en *44th ICSB Conference*, Nápoles, jun. 20-23, 1999.
- [35] S. Shane, *Academic Entrepreneurship. University Spinoffs and Wealth Creation* (Serie New Horizons in Entrepreneurship). Cheltenham-Northampton: Edward Elgar Publishing, 2004, doi: [10.4337/9781843769828](https://doi.org/10.4337/9781843769828).
- [36] A. Grandi y R. Grimaldi, “Academics’ organizational characteristics and the generation of successful business ideas”, *J. Bus. Ventur.*, vol. 20, n.º 6, pp. 821-845, 2005, doi: [10.1016/j.jbusvent.2004.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2004.07.002).
- [37] R. Van-Dierdonck y K. Debackere, “Academic entrepreneurship at Belgian Universities”, *RyD Management*, vol. 18, n.º 4, pp. 341-353, 1988, doi: [10.1111/j.1467-9310.1988.tb00609.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.1988.tb00609.x).
- [38] D. H. McQueen y J. T. Wallmark, “University Technical Innovation: Spin-offs and Patents”, en *University Spin-off Companies: Economic Development, Faculty Entrepreneurs, and Technology Transfer*, A. M. Brett, D. V. Gibson y R. W. Smilor, eds. Göteborg, Suecia: Rowman & Littlefield Publishers, 1991.
- [39] D. Di Gregorio y S. Shane, “Why do some universities generate more start-ups than others?”, *Res. Policy*, vol. 32, n.º 32, pp. 209-227, 2003, doi: [10.1016/S0048-7333\(02\)00097-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00097-5).
- [40] A. Lockett y M. Wright, “Resources, capabilities, risk capital and the creation of university spin-out companies”, *Res. Policy*, vol. 34, n.º 7, pp. 1043-1057, sept. 2005, doi: [10.1016/j.respol.2005.05.006](https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.05.006).
- [41] A. Tübke, *Success Factors of Corporate Spin-Offs* (Serie ISEN, vol. 2). EUA: Springer, 2004.
- [42] M. Monge-A, A. Briones-Peñalver y D. García-Pérez de Lema, “Elementos para el diseño de una estrategia que promueva la creación de *spin-offs* académicas en las universidades públicas costarricenses”, *Tecnología en Marcha*, vol. 29, n.º 2, pp. 25-42, 2016, doi: [10.18845/tm.v29i2.2689](https://doi.org/10.18845/tm.v29i2.2689).
- [43] D. Rodeiro, M. J. Rodríguez y S. Fernández, “El Desarrollo de las *Spin-Offs* Universitarias; Obstáculos y Políticas de Apoyo”, en *Innovación y Emprendimiento con Base en las Ciencias*, X. Vence y D. Rodeiro, coords. Universidad de Santiago de Compostela, 2014, cap. 2, pp. 23-47.
- [44] M. Monge, A. J. Briones y D. García, “Factores determinantes de la creación de las *Spin Off* académicas: caso del Instituto Tecnológico de Costa Rica”, *Cuadernos de Administración*, vol. 27, n.º 46, pp. 23-38, jul.-dic. 2011.
- [45] M. Aceytuno y M. A. de Paz, “La creación de *spin-off* universitarias: el caso de la Universidad de Huelva”, *Economía industrial*, vol. 368, pp. 97-111, 2008.
- [46] C. Fong, “Transferencia de Conocimiento de la Universidad a la Empresa: La Creación de Empresas *Spin-off* de Origen Universitario”, *Sistemas, Cibernética e Informática*, vol. 7, n.º 1, pp. 81-88, 2010.

- [47] E. B. Roberts, *Entrepreneurs in High Technology Lesson from MIT and Beyond*. New York-Oxford: Oxford University Press, 1991.
- [48] A. Martinelli, M. Meyer y N. Von Tunzelmann, “Becoming an entrepreneurial university? A case study of knowledge exchange relationships and faculty attitudes in a medium-sized, research-oriented university”, *J. Technol. Transf.*, vol. 33, n.º 3, pp. 259-283, 2008, doi: [10.1007/s10961-007-9031-5](https://doi.org/10.1007/s10961-007-9031-5).
- [49] M. Henrekson y N. Rosenberg, “Designing Efficient Institutions for Science-Based Entrepreneurship: Lesson from the US and Sweden”, *J. Technol. Transf.*, vol. 26, n.º 3, pp. 207-231, 2001.
- [50] D. C. McClelland, *The achieving society*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold, 1961.
- [51] D. Djokovic y V. Souitaris, “Spinouts from academic institutions: A literature review with suggestions for further research”, *J. Technol. Transf.*, vol. 33, n.º 3, pp. 225-247, 2008, doi: [10.1007/s10961-006-9000-4](https://doi.org/10.1007/s10961-006-9000-4).
- [52] H. Mintzberg, J. B. Quinn y J. Voyer, *El Proceso Estratégico: Conceptos, Contextos y Casos*, México: Prentice Hall, 1997.
- [53] D. Rodeiro, S. Fernández, A. Rodríguez y L. Otero, “Obstáculos para las *Spin-Offs* Universitarias en España y Galicia”, *Revista Galega de Economía*, vol. 19, n.º 1, pp. 175-198, 2010.
- [54] J. V. Martínez y V. A. Martínez, “Creadores de Empresas de Base Tecnológica (*Spin-off*), Identificando su Perfil Óptimo en México”, *Hitos*, año 25, n.º 73, pp. 315-333, 2019, doi: [10.19136/hitos.a25n73.3624](https://doi.org/10.19136/hitos.a25n73.3624).
- [55] S. Shane y R. Khurana, “Bringing individuals back in: The effects of career experience on new firm founding”, *Ind. Corp. Change*, vol. 12, n.º 3, pp. 519-543, 2003, doi: [10.5465/APBPP.2001.6133762](https://doi.org/10.5465/APBPP.2001.6133762).
- [56] D. B. Audretsch, T. Aldridge y A. Oettl, “The Knowledge Filter and Economic Growth: The Role of Scientist Entrepreneurship”, doc. sobre Entrepreneurship, Growth and Public Policy, n.º 1106, 2006.
- [57] W. Ding y T. Stuart, “When Do Scientists Become Entrepreneurs? The Social Structural Antecedents of Commercial Activity in the Academic Life Sciences”, *Am. J. Soc.*, vol. 112, n.º 1, pp. 97-144, jul. 2006, doi: [10.1086/502691](https://doi.org/10.1086/502691).
- [58] M. Feldman, I. Feller, J. Bercovitz y R. Burton, “Equity and the Technology Transfer Strategies of American Research Universities”, *Manag. Sci.*, vol. 48, n.º 1, pp. 105-121, 2002.
- [59] C. Franzoni y F. Lissoni, “Academic entrepreneurship, patents and spin-offs: critical issues and lessons for Europe”, Università Commerciale Luigi Bocconi, WP n.º 180, sept. 2006. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/5010490_Academic_entrepreneurship_patents_and_spin-offs_critical_issues_and_lessons_for_Europe
- [60] R. Landry, N. Amara e I. Rherrad, “Why are some university researchers more likely to create spin-offs than others? Evidence from Canadian universities”, *Res. Policy*, vol. 35, n.º 10, pp. 1599-1615, 2006, doi: [10.1016/j.respol.2006.09.020](https://doi.org/10.1016/j.respol.2006.09.020).
- [61] M. P. M. Pérez y M. G. Calderón, “Avances normativos en la creación de empresas *spin off* universitarias en México”, *Entreciencias*, vol. 7, n.º 20, pp. 53-64, ag.-nov. 2019, doi: [10.22201/enesl.20078064e.2019.20.68321](https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.20.68321).

DOCUMENTOS OFICIALES

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos . Texto vigente. Última reforma publicada DOF 15-04-2025. Artículo 73, párrafo XXIX-F (p. 76).

Plan Nacional para la Innovación Mandatado en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, Gobierno de México.

Programa Especial en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación 2021-2024. Programa Institucional CONACYT 2020-2024.

Ley Federal de Responsabilidades Administrativas de los Servidores Públicos. Última reforma DOF 14-07-2014.

Ley General de Responsabilidades Administrativas. Última reforma publicada DOF 02-01-2025, art. 37, Cámara de Diputados de H. Congreso de la Unión.

Plan Estatal de Desarrollo Chihuahua 2022-2027, Ediciones del Gobierno del Estado, 2022

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)

por el apoyo brindado a Tomás Francisco Limones Meraz a través del programa de Estancias Posdoctorales Académicas en México 22 (3), en la realización de este artículo.

Control ecoeficiente para equipos de prueba eléctrica en la industria electrónica

Eco-efficient control for electrical testing equipment in the electronics industry

Geu M. Puentes-Conde^{1a,b} , Ernesto Sifuentes de la Hoya^{1c} , Javier Molina Salazar^{1b} , Francisco Javier Enríquez-Aguilera^{1c} , Guadalupe Navarro Enriquez² 

¹ {^a Doctorado en Tecnología}, {^b Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura}, {^c Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación}, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Mecatrónica; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México

RESUMEN

Este artículo presenta la implementación de un sistema de control ecoeficiente para equipos de prueba eléctrica en la manufactura de alarmas para la detección de humo, monóxido de carbono (CO) y gases explosivos. El propósito principal es reducir el impacto ambiental asociado a los procesos industriales mediante la optimización del consumo de energía e insumos. El sistema integra hardware y software para la gestión autónoma de tarjetas electrónicas, fuentes de alimentación y estaciones de cómputo, y coordina automáticamente diversos modos de operación. Esta estrategia permite prolongar la vida útil de los componentes y reducir el consumo eléctrico durante los periodos de inactividad. Los resultados experimentales muestran una disminución del 25 % en el consumo energético durante la operación normal mediante el control de periféricos en hibernación y una reducción total del 100 % tras intervalos de inactividad, además de una disminución de entre 8.7 % y 10 % en el uso de gases de prueba (CO y metano). En conjunto, la propuesta constituye una alternativa de bajo costo, replicable y orientada a la sostenibilidad energética y ambiental en sistemas de prueba industrial, con potencial para optimizar la eficiencia de los procesos productivos.

PALABRAS CLAVE: control ecoeficiente; sustentabilidad energética; equipos de prueba eléctrica; optimización energética; reducción de emisiones.

ABSTRACT

This research demonstrates the implementation of an eco-efficient control system for electrical test equipment used in manufacturing smoke, carbon monoxide (CO), and explosive gas detection alarms. The main goal is to reduce the environmental impact of industrial processes by optimizing energy use and decreasing gas consumption. The system merges hardware and software to independently manage electronic boards, power supplies, and computer stations, automatically coordinating different operating modes. This approach extends component lifespan and decreases energy use during idle times. Experimental results show a 25% reduction in energy consumption during normal operation through peripheral hibernation control, and a complete 100% reduction after periods of inactivity, along with an 8.7% to 10% decrease in test gas usage (CO and CH₄). Overall, the solution is low-cost, easy to replicate, and aims to enhance energy and environmental sustainability in industrial test systems, with the potential to boost production efficiency.

KEYWORDS: eco-efficient control; energy sustainability; electrical testing equipment; energy optimization; emission reduction.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Ernesto Sifuentes de la Hoya
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: esifuent@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de octubre de 2025. **Fecha de aceptación:** 19 de marzo de 2026. **Fecha de publicación:** 24 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria enfrenta una presión creciente para impulsar la innovación tecnológica y, al mismo tiempo, desarrollar productos y servicios con un enfoque sostenible. Este desafío se sitúa en un contexto global marcado por la crisis climática, la escasez de recursos naturales y el crecimiento constante de la población mundial. Bajo estas condiciones, resulta indispensable adoptar prácticas que reduzcan la generación de residuos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la liberación de contaminantes. Dichas acciones se relacionan estrechamente con el concepto de *ecoeficiencia*, introducido por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) en 1992, y definido como una estrategia empresarial orientada a generar mayor valor con menor impacto ambiental [1]. En esta misma línea, la ecoeficiencia debe enfocarse en la mejora de los procesos de manufactura, de manera que se optimice el uso de los recursos y se reduzca la degradación ambiental, manteniendo al mismo tiempo la rentabilidad económica [2]-[3].

De acuerdo con datos del Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP), Ciudad Juárez constituye una región de gran relevancia industrial, albergando un total de 416 plantas de manufactura que representan aproximadamente el 11.8 % de la superficie urbana [4]. Este escenario justifica el desarrollo de la presente investigación, enfocada en el sector de la manufactura de productos electrónicos, donde los equipos de prueba eléctrica resultan ser herramientas indispensables para evaluar el desempeño de circuitos impresos (PCB) mediante la aplicación de estímulos eléctricos, térmicos y ambientales, entre otros, con el propósito de verificar su funcionalidad [5]-[6]. La Figura 1 muestra un equipo de prueba eléctrica diseñado principalmente para la calibración y validación de alarmas de humo, de CO y de gas explosivo [7].



Figura 1. Equipo de prueba eléctrica para prueba de alarmas de CO y gas explosivo.

Sin embargo, el sistema actual carece de características ecoeficientes entre hardware y software; por ejemplo, Monagas *et al.* [8] presentan un prototipo de un equipo de prueba eléctrica *in-circuit* modular, de bajo costo y compacto, que integra controles que permiten un funcionamiento óptimo, lo que posibilita el desarrollo y la aplicación de controles ecoeficientes en el equipo de prueba en el presente estudio.

La Figura 2 presenta el diagrama de bloques general del equipo de prueba, conformado por una computadora central que, a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI), coordina el funcionamiento de las tarjetas de control, las tarjetas de prueba y el medidor de CO y de gas explosivo. La comunicación entre estos módulos se establece mediante el protocolo serial RS-232, complementada con fuentes de alimentación y una tarjeta de adquisición y control PCI-6320 de National Instruments (NI). Este dispositivo es responsable del monitoreo de sensores y actuadores, lo que permite una gestión integral y de alta precisión de las variables críticas del sistema.

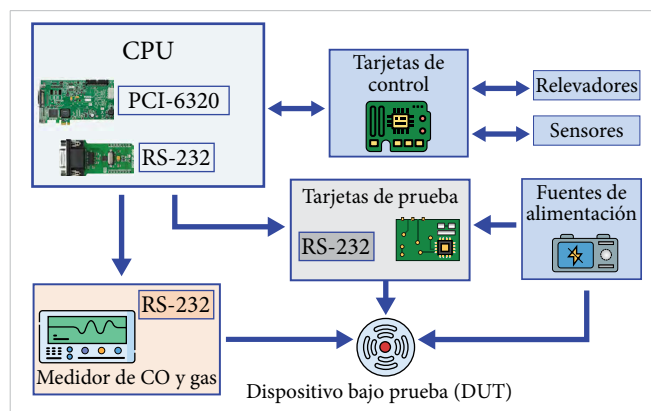


Figura 2. Esquema general en bloques del equipo de prueba propuesto.

La distribución y la capacidad operativa del equipo de prueba propuesto dependen directamente del número de tarjetas de prueba instaladas. La Figura 3 muestra la capacidad de una tarjeta individual para controlar un nido compuesto por ocho dispositivos bajo prueba (*Device Under Test*, DUT) mediante la comunicación UART y la aplicación de estímulos de voltaje proporcionados por una fuente de alimentación.

El sistema de prueba permite procesar hasta 64 unidades por ciclo operativo. Esta capacidad se fundamenta en una arquitectura modular compuesta por ocho tar-

jetas de prueba, cada una vinculada de forma independiente a una fuente de alimentación dedicada.

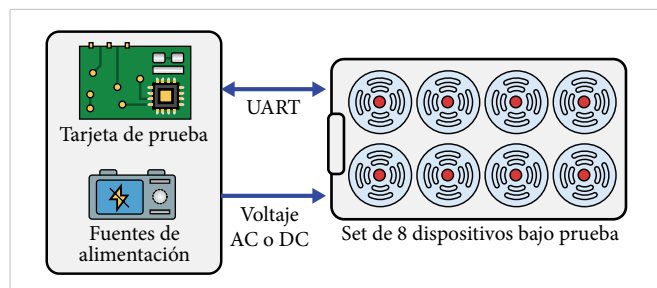


Figura 3. Prueba del dispositivo bajo prueba (DUT) por tarjeta.

Los componentes interactúan simultáneamente mediante la comunicación RS-232, mientras que el control de periféricos —sensores y relevadores— se realiza a través de los puertos digitales de la tarjeta NI PCI-6320. La Figura 4 presenta el diagrama de flujo del funcionamiento general del equipo de prueba eléctrica.

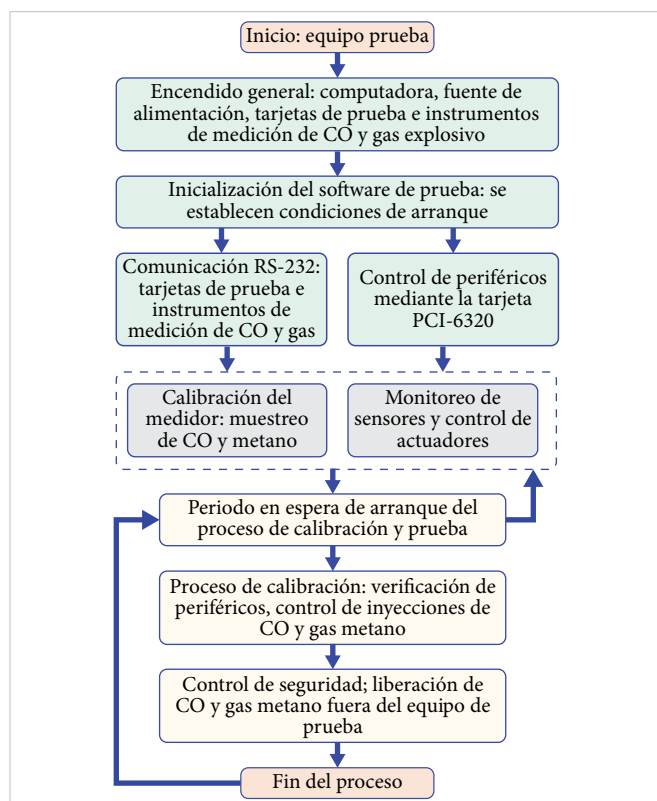


Figura 4. Diagrama de funcionamiento general del equipo de prueba.

Es relevante señalar que el instrumento de medición empleado para obtener las lecturas de referencia requiere un proceso constante de calibración, condición indispensable para garantizar la precisión y la confi-

bilidad de los resultados. Este procedimiento se lleva a cabo mediante el muestreo de gases estándar, que se establecen como referencia para realizar una interpolación lineal entre diferentes concentraciones conocidas: aire limpio a 0 ppm, monóxido de carbono (CO) a 150 ppm y metano (CH₄) a 5000 ppm, 12 000 ppm y 20 000 ppm como gas explosivo.

En esta investigación, el objetivo principal es incrementar la eficiencia operativa del equipo de prueba propuesto y, al mismo tiempo, minimizar su impacto ambiental mediante la optimización del uso de los recursos. Las acciones implementadas se centran en: (i) la reducción del consumo energético en distintos modos de operación de las tarjetas de prueba, incluyendo el control de fuentes de alimentación durante periodos de inactividad y la desconexión total tras lapsos prolongados sin operación; (ii) la optimización del proceso de calibración del medidor de CO y gas explosivo, garantizando precisión y estabilidad en las mediciones; y (iii) el monitoreo y control sistemático de los insumos empleados. La integración de estos mecanismos permite disminuir el consumo eléctrico y asegurar un uso más eficiente y sostenible de los recursos.

II. METODOLOGÍA

El diseño metodológico adoptado en esta investigación corresponde a un enfoque experimental-descriptivo. Este se fundamenta en la manipulación controlada del equipo de prueba propuesto mediante la integración de hardware y software, con el propósito de optimizar el consumo de energía eléctrica y disminuir el uso de insumos. Asimismo, se documenta en detalle el comportamiento esperado del sistema durante el proceso, lo que permite analizar cómo las modificaciones implementadas inciden directamente en la eficiencia energética y la gestión de recursos.

A. ARQUITECTURA DE SOFTWARE Y CONTROL DEL SISTEMA

El código fuente del equipo de prueba propuesto se desarrolla en el entorno orientado a objetos LabWindows/CVI de National Instruments (NI) en ANSI C. Esta plataforma permite integrar y orquestar controles a través de programación para: (i) gestionar los modos de operación de las tarjetas electrónicas mediante un conjunto de comandos o instrucciones vía comunicación RS-232; (ii) gobernar mediante señales digitales las fuentes de alimentación a través de la tarjeta NI PCI-6320 que interactúa con una tarjeta de potencia para el control de

relevadores y sensores; y (iii) ejecutar instrucciones de desconexión eléctrica vía software, tanto del equipo de prueba, como de la estación de cómputo tras prolongados periodos de inactividad.

Por otra parte, la disminución del uso de insumos mediante rutinas de control incorporadas al código fuente para la autocalibración inteligente del instrumento de medición, con el fin de minimizar los recursos de funcionamiento del equipo. Asimismo, la implementación de una interfaz gráfica para la supervisión, el registro y la gestión de insumos en tiempo real mediante la integración de la información en una base de datos SQL y la generación de notificaciones automáticas por correo electrónico. Esta configuración garantiza la trazabilidad operativa y una respuesta temprana ante las desviaciones.

B. CONTROL DE TARJETAS DE PRUEBA

Las tarjetas de prueba constituyen los elementos clave en el funcionamiento del equipo propuesto, ya que están directamente vinculadas a la conversión de la comunicación RS-232 a UART. Bajo este esquema se establece una relación maestro-esclavo, en la que la computadora central actúa como maestro y las tarjetas de prueba como esclavos que ejecutan las instrucciones recibidas. Esta arquitectura asegura un control jerárquico y eficiente, garantizando que los dispositivos bajo prueba (Device Under Test, DUT) respondan con precisión a los estímulos programados.

De acuerdo con el diagrama de flujo de la Figura 4, una vez que el sistema se enciende, las tarjetas permanecen en operación normal, es decir, en estado de espera, hasta que se inicia un proceso de prueba. Sin embargo, para incrementar la eficiencia energética, incorporan modos de operación avanzados que permitan reducir el consumo durante los periodos de inactividad. Vía RS-232, la computadora inicializa en estados de bajo consumo, lo que permite una gestión dinámica de los recursos.

La implementación de dichos modos requiere modificaciones en la programación de los microcontroladores integrados en cada tarjeta, así como la definición de nuevos comandos e instrucciones que permitan la transición entre los distintos estados de operación: modo normal, modo *sleep* y modo bajo consumo. Estos modos, resumidos en la Tabla 1, permiten adaptar el consumo energético a las necesidades del proceso en curso.

TABLA 1
MODOS DE OPERACIÓN DE LAS TARJETAS DE PRUEBA

MODOS DE OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN	CONSUMO ESPERADO	APLICACIÓN PRINCIPAL
Normal	La tarjeta permanece activa y lista para ejecutar procesos de prueba, recibiendo y transmitiendo datos en tiempo real.	100 % (consumo nominal)	Ejecución de pruebas eléctricas y validación de los DUT.
<i>Sleep</i>	Estado de suspensión parcial; algunos periféricos se desactivan, pero se mantiene la comunicación mínima para reactivación inmediata.	40–60 % del consumo nominal	Periodos cortos de inactividad entre pruebas.
Bajo consumo	Estado de hibernación profunda; la mayoría de los módulos se apagan y solo se conserva la lógica esencial para la reactivación.	< 10 % del consumo nominal	Periodos prolongados de inactividad o espera.

La Figura 5 muestra el esquema de comunicación propuesto para gestionar la activación y el control de dichos modos en una tarjeta específica, lo que consolida un sistema más eficiente y sostenible.

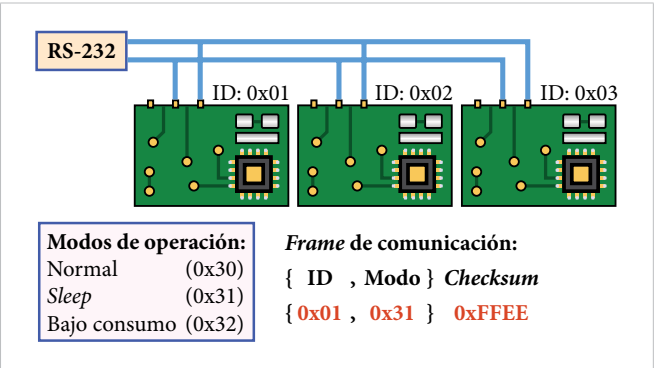


Figura 5. Modo operación propuesta en las tarjetas de prueba.

Otro aspecto fundamental del sistema propuesto es que cada tarjeta de prueba cuenta con una fuente de alimentación dedicada, encargada de suministrar los estímulos de voltaje a los DUT. De esta forma, el control de encendido y apagado de dichas fuentes puede gestionarse con precisión mediante la tarjeta de control y la tarjeta NI PCI-6320, como se muestra en la Figura 6. Este mecanismo de control selectivo resulta esencial para optimizar el consumo energético, ya que permite desactivar individualmente las fuentes durante periodos de inactividad o en ausencia de *sets* completos de unidades bajo prueba (DUT).

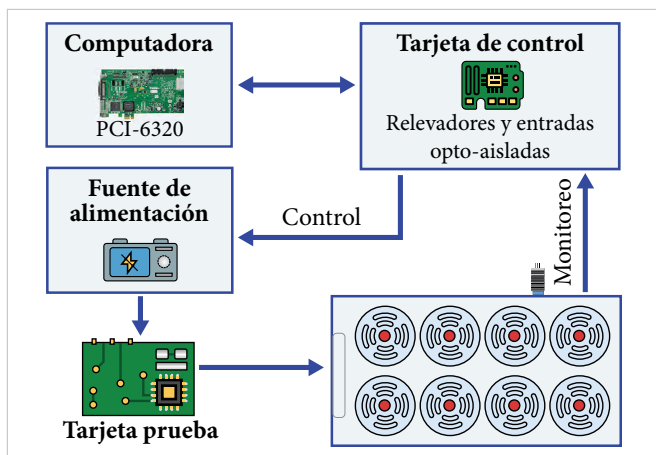


Figura 6. Control de fuentes de alimentación.

En consecuencia, se favorece una operación más eficiente, prolongando la vida útil de los componentes y reduciendo el impacto ambiental asociado al uso continuo de la energía eléctrica. La [Figura 7](#) presenta el diagrama de flujo correspondiente al control energético de las tarjetas de prueba eléctrica y de la computadora, desarrollado en esta investigación.

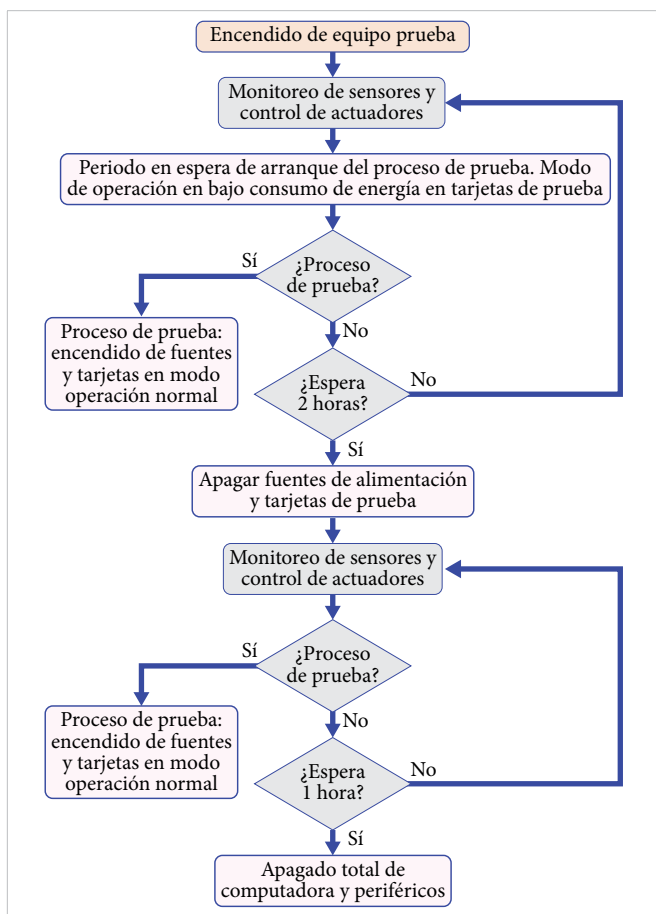


Figura 7. Control energético propuesto.

Dicho esquema describe de manera sistemática la secuencia de decisiones y acciones implementadas para gestionar los diferentes modos de operación, optimizar el consumo energético y garantizar la desconexión total del sistema tras periodos prolongados de inactividad.

C. CONTROL DE CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

En el código fuente del equipo de prueba, desarrollado en LabWindows/CVI de NI, se implementó un hilo de programación adicional dedicado a las rutinas de autocalibración del equipo de medición. Este hilo de programación, independiente del sistema principal, automatiza la calibración mediante una tarjeta de control que comunica con la computadora vía RS-232 y con el medidor a través del protocolo ModBus RS-232, lo que permite controlar remotamente tanto el instrumento como las electroválvulas de cada gas. El sistema gestiona los tiempos de calibración y el flujo de aire limpio, así como el de monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄), con el propósito de reducir el consumo de insumos. La [Figura 8](#) muestra el esquema general de control entre la computadora, la tarjeta de control y el medidor.

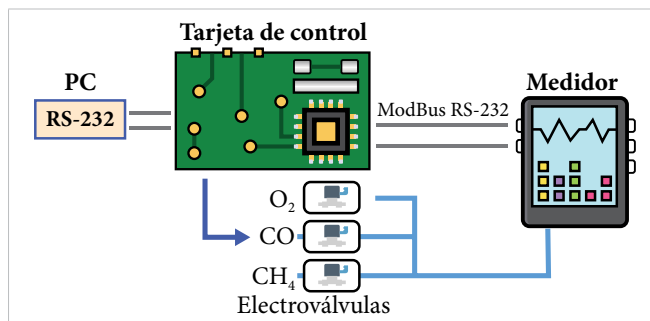


Figura 8. Control para el proceso de auto-calibración del medidor.

El proceso de autocalibración del instrumento de medición se describe en el diagrama de flujo de la [Figura 9](#). Dicho procedimiento se activa únicamente al iniciar una prueba, de modo que la calibración automática solo se ejecuta cuando es requerida para el proceso de validación. De lo contrario, aun cuando el medidor se encuentre descalibrado, el proceso no se ejecuta, lo que evita ciclos de calibración innecesarios y permite mantener el instrumento en modo de bajo consumo durante los periodos de inactividad. El procedimiento es gestionado por software, encargado de controlar con precisión los tiempos de muestreo del flujo de gas mediante las electroválvulas y de ajustar la calibración del medidor con base en las lecturas obtenidas y el estándar de gas seleccionado.

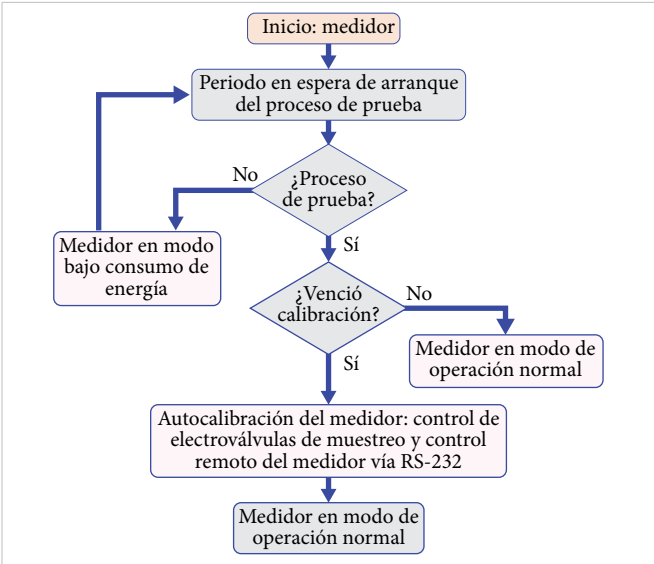


Figura 9. Control de auto calibración del medidor propuesto.

D. MONITOREO DE INSUMOS

El consumo de tanques de gas para las diferentes concentraciones de CO y metano, junto con sus estándares de calibración correspondientes, constituye información crítica para gestionar de manera eficiente el uso diario, semanal o mensual y realizar proyecciones de consumo. Con este propósito, se desarrolló una interfaz gráfica en el entorno LabWindows/CVI de NI para el monitoreo remoto de los tanques de gas.

El sistema administra los datos mediante una base de datos centralizada, habilitada para enviar alertas y notificaciones por correo electrónico sobre el comportamiento, garantizando así una supervisión continua y oportuna. La Figura 10 muestra el esquema general del sistema, conformado por una computadora, un adquirente de datos USB-1208FS-PLUS y la lectura analógica de 4-20 mA proveniente de sensores de presión (OMEGA: DPG1000DAR-3KG-1N) instalados en cada tanque según el tipo de gas.

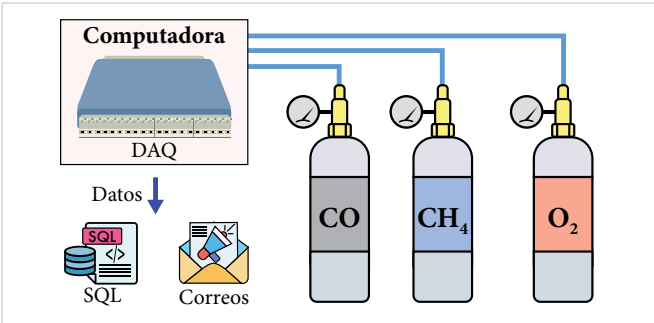


Figura 10. Monitoreo de insumos vía hardware/software.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación son de carácter cuantitativo, ya que se basan en la comparación de datos experimentales registrados antes y después de la implementación de los controles en el equipo de prueba. Este análisis permite evaluar la reducción del consumo de energía eléctrica y de otros recursos, al tiempo que se garantiza la continuidad y la rentabilidad del proceso productivo.

La Tabla 2 presenta el desempeño del equipo de prueba en un entorno de producción real, considerando una jornada laboral típica de 7:00 a 16:30 horas. Dichos resultados constituyen la base para analizar el impacto de las estrategias propuestas en la eficiencia energética y en la sostenibilidad operativa del sistema.

TABLA 2
TIEMPO DISPONIBLE

DESCRIPCIÓN	TIEMPO
Jornada laboral	9,5 h
Proceso de prueba	16 min
Carga y descarga de unidades bajo prueba	7 min
Descanso: desayuno y comida	50 min

De acuerdo con el tiempo efectivo de operación del equipo, y considerando la eliminación de los periodos de descanso, se dispone de un total de 520 minutos productivos por jornada. Bajo estas condiciones, el sistema puede ejecutar hasta 22 ciclos completos de prueba, lo que permite dimensionar su desempeño en un entorno real de manufactura. La Figura 11 muestra la implementación de temporizadores mediante software que controlan automáticamente el consumo de energía.

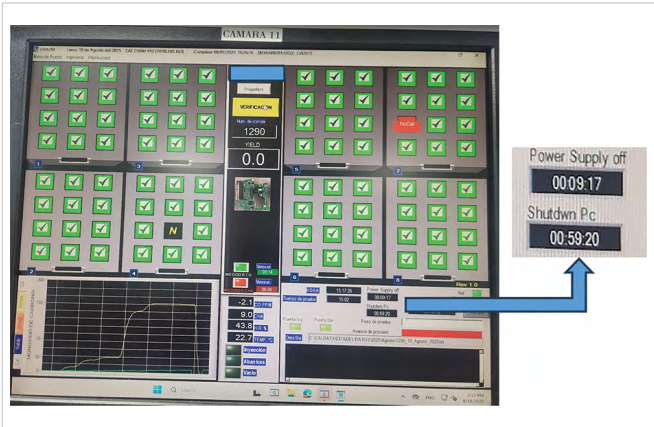


Figura 11. Control energético vía software.

El primero controla el encendido y el apagado de las fuentes de alimentación tras 10 minutos de inactividad, mientras que el segundo gestiona el apagado total de la computadora tras 1 hora de inactividad. Estos mecanismos se desarrollaron con base en la metodología descrita en la sección anterior y constituyen una estrategia clave para optimizar el uso de los recursos del sistema de prueba.

Los resultados de la implementación de los controles se obtuvieron a partir de mediciones realizadas de forma aleatoria en distintos días a lo largo de un mes completo (20 días hábiles). Posteriormente, los datos fueron ponderados, observándose una tendencia consistente en los patrones de uso del equipo. La [Tabla 3](#) presenta un esquema comparativo de los tiempos de operación, contrastando el desempeño del sistema en su funcionamiento convencional —sin controles de eficiencia energética— con el del sistema mejorado mediante la estrategia propuesta.

TABLA 3
COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE OPERACIÓN

OPERACIÓN	TIEMPO DE OPERACIÓN (min)	
	SISTEMA NORMAL	SISTEMA MEJORADO
Consumo energía normal	570	361
Bajo consumo de energía	0	178
Apagado de fuentes	0	30
Ahorro total	0	0

Los resultados muestran una reducción del consumo energético en diferentes modos de operación, es decir, en la operación normal, del 36 %, atribuida a la implementación de los controles de eficiencia. De este total, un 31 % corresponde al funcionamiento en modo de bajo consumo de las tarjetas de prueba, mientras que el 5 % restante se asocia al apagado selectivo de las fuentes de alimentación. La [Figura 12](#) presenta un gráfico comparativo de los modos de operación, lo que ilustra la distribución del consumo en cada estado.

Es importante señalar que el control de apagado de las fuentes de alimentación se activa tras 10 minutos de inactividad del equipo. Asimismo, aunque en la [Tabla 3](#) no se registra el modo de ahorro total de consumo energético, durante el estudio se identificaron cuatro ocurrencias en distintos días hábiles en las que este modo sí se activó. Dichos casos corresponden a jornadas en las que el equipo no se utilizó nuevamente, lo que permitió activar el control de apagado total, resultando particu-

larmente útil para gestionar periodos de inactividad entre jornadas laborales.

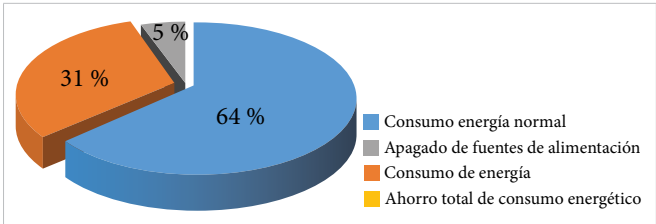


Figura 12. Distribución del tiempo entre los diferentes modos de operación del equipo.

Por otra parte, la [Tabla 4](#) presenta las mediciones del consumo eléctrico en cada modo de operación del equipo de prueba, realizadas directamente en la red eléctrica mediante un amperímetro de gancho Fluke-325. Estos resultados permiten cuantificar con precisión la eficiencia alcanzada en cada estado operativo.

TABLA 4
CONSUMO ELÉCTRICO

OPERACIÓN	CORRIENTE ELÉCTRICA (A)
Operación normal del equipo	2.1
Bajo consumo de energía	0.7
Apagado de fuentes de alimentación	0.4
Ahorro total de consumo energético	0

Con base en la Ecuación (1) y considerando un voltaje de alimentación de 110 VAC, se calculó la potencia activa del equipo a partir de las mediciones de consumo eléctrico obtenidas en los distintos modos de operación, tal como se reporta en la [Tabla 3](#). Este cálculo permite establecer una relación directa entre el estado operativo del sistema y la energía demandada, proporcionando un indicador objetivo de la eficiencia alcanzada. La [Tabla 5](#) representa el consumo energético por cada modo de operación,

$$P = VI \tag{1}$$

TABLA 5
CONSUMO ENERGÉTICO

OPERACIÓN	CORRIENTE ELÉCTRICO (kW)
Operación normal del equipo	0.231
Bajo consumo de energía	0.077
Apagado de fuentes de alimentación	0.044
Ahorro total de consumo energético	0

La [Tabla 6](#) presenta el consumo energético correspondiente a una jornada laboral de 9.5 horas, calculado a partir de los datos obtenidos en los diferentes modos de operación reportados en las [Tablas 3](#) y [5](#). Estos resultados evidencian una reducción total del consumo energético de hasta un 25 %, lo que confirma la efectividad de los controles implementados.

TABLA 6
COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE OPERACIÓN

OPERACIÓN	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh)	
	SISTEMA NORMAL	SISTEMA MEJORADO
Consumo energía normal	2.1945	1.3898
Bajo consumo de energía	-	0.2284
Apagado de fuentes	-	0.022
Ahorro total	-	0
Total	2.1945	1.6402

En cuanto al proceso de calibración del instrumento de medición, constituye un aspecto crítico, ya que garantiza mediciones de referencia confiables.

Previo a esta investigación, la calibración se realizaba manualmente por personal técnico de mantenimiento, mediante la activación mecánica de válvulas para el muestreo de gases estándar. Aunque funcional, esta solución presentaba limitaciones, pues tanto el tiempo de muestreo como el flujo de cada tipo de gas dependían del criterio del técnico y de la decisión manual sobre cuándo calibrar, lo que generaba ineficiencia en la gestión de recursos.

Con el sistema propuesto, el control del proceso de autocalibración del medidor se ejecuta de forma automatizada desde la computadora, activándose únicamente al inicio de un proceso de prueba y con base en la fecha y la hora de la última calibración. Esta estrategia permite visualizar el vencimiento de la calibración del instrumento, como se ilustra en la [Figura 13](#), y asegura un uso más eficiente de los insumos.

La [Figura 14](#) muestra el hilo de programación independiente desarrollado en esta investigación, encargado de establecer la comunicación entre la computadora, la tarjeta de control y el medidor para ejecutar el proceso de calibración. Al operar en paralelo al sistema principal de prueba, se permite que las rutinas de autocalibración se ejecuten sin interferir en el funcionamiento normal del equipo.



Figura 13. Calibración del medidor.

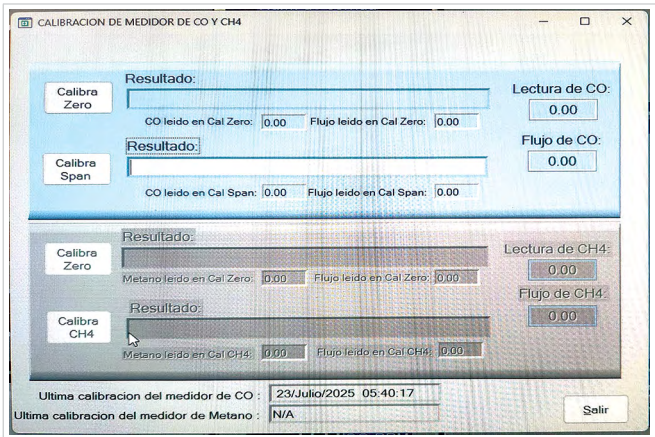


Figura 14. Control del proceso de autocalibración del medidor.

En este esquema, la computadora actúa como nodo maestro que envía las instrucciones de calibración, la tarjeta de control actúa como intermediaria en la gestión de señales y protocolos de comunicación, y el medidor recibe los comandos a través del protocolo ModBus RS-232 y ejecuta las acciones necesarias para la calibración, como la activación de electroválvulas y la selección del gas de referencia. El proceso puede iniciarse de forma automática o semiautomática, lo que ofrece flexibilidad al usuario y asegura la trazabilidad de cada ciclo.

Entre los beneficios obtenidos destaca una reducción mensual del 8.7 % al 10 % en el consumo de tanques de gas (CO y CH₄), lo que contribuye al ahorro de recursos y a la disminución del impacto ambiental, dado que los gases de calibración se liberan parcialmente durante el proceso. La automatización de los tiempos de muestreo, la selección del estándar y el control de válvulas permiten reducir la variabilidad humana y asegurar la calidad metrológica.

Finalmente, tras la implementación de los controles de energía y la optimización del proceso de calibración, se desarrolló un sistema de monitoreo remoto de tanques utilizando el entorno LabWindows/CVI de NI junto con el hardware correspondiente. La [Figura 15](#) muestra el programa implementado en la computadora de supervisión, en el que es posible visualizar gráficamente la tendencia de consumo de cada gas, registrar el historial de uso y acceder a reportes configurables por periodo (diario, semanal o mensual). Esta interfaz también permite al usuario interactuar con el sistema, consultar datos almacenados en la base de datos SQL y generar respaldos automáticos para asegurar la trazabilidad de la información.



Figura 15. Monitoreo y gestión de insumos.

Por su parte, la [Figura 16](#) muestra físicamente el área de control de tanques, compuesta por los sensores de presión conectados a los cilindros de CO y CH₄, el adquirente de datos y la infraestructura de comunicación que conecta los registros con la estación de monitoreo.

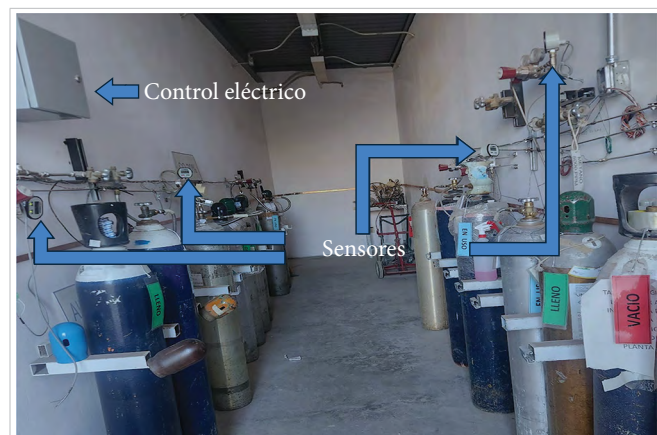


Figura 16. Zona de tanques.

Este módulo no solo permite medir en tiempo real los niveles de gas en cada tanque, sino que también incorpora rutinas de alarma que envían notificaciones automáticas por correo electrónico al personal responsable cuando se detecta un cambio en el tanque o una condición crítica de presión. Gracias a estas funciones, el sistema habilita estrategias de mantenimiento predictivo, asegura la continuidad operativa y facilita la reposición oportuna de insumos, contribuyendo de manera significativa a la eficiencia y sostenibilidad del proceso productivo.

IV. CONCLUSIONES

El sistema de control propuesto para el equipo de prueba eléctrica demostró ser una alternativa eficaz para incrementar la eficiencia operativa y reducir el consumo de recursos en la industria electrónica. La integración de hardware y software permitió gestionar de forma autónoma las tarjetas electrónicas, las fuentes de alimentación y la computadora central, logrando una reducción del 25 % en el consumo energético durante la operación normal y la eliminación total del consumo durante periodos prolongados de inactividad.

Asimismo, el control inteligente de insumos permitió una disminución de entre 8.7 % y 10 % en el uso de gases de calibración (CO y CH₄), contribuyendo no solo a la reducción de costos, sino también a la mitigación del impacto ambiental asociado a su liberación.

El desarrollo de rutinas de autocalibración y el monitoreo remoto de tanques de gas representaron avances relevantes en la automatización y la trazabilidad de los procesos, asegurando una mayor confiabilidad en las mediciones y una gestión eficiente de los recursos.

Si bien los resultados obtenidos son alentadores, aún existen áreas susceptibles de optimización, en particular en la automatización del proceso de calibración y en el manejo integral de los insumos. En este sentido, se recomienda profundizar en la integración de tecnologías emergentes, tales como algoritmos de inteligencia artificial, sistemas de monitoreo inalámbrico o arquitecturas IoT, con el propósito de ampliar la aplicabilidad de la propuesta a otros tipos de equipos industriales y de consolidar un equilibrio sostenible entre desempeño, eficiencia energética y ahorro de recursos.

REFERENCIAS

- [1] K. Madden, *Eco-efficiency Learning Module*. WBCSD - Five Winds Int., 2006. [En línea]. Disponible: <https://docs.wbcsd.org/2006/08/EfficiencyLearningModule.pdf>
- [2] R. G. Gusmão, R. de Freitas, L. Veiga, O. Gonçalves y W. Leal, "Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review", *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 890-904, 2017, doi: [10.1016/j.jclepro.2017.07.166](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.166).
- [3] K. Salonitis, "Manufacturing Energy Efficiency and Industry 4.0", *Energies*, vol. 16, n.º 5, p. 2268, feb. 2023, doi: [10.3390/en16052268](https://doi.org/10.3390/en16052268).
- [4] IMIP, "Catálogo-directorio de empresas manufactureras", Instituto Municipal de Investigación y Planeación, Ciudad Juárez, Chih., México. Accedido: ag. 15, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.imip.org.mx/directorio/Infografias.pdf>
- [5] N. Petkov y M. Ivanova, "Printed circuit board and printed circuit board assembly methods for testing and visual inspection: A review", *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 13, n.º 4, pp. 2566-2585, 2024, doi: [10.11591/eei.v13i4.7601](https://doi.org/10.11591/eei.v13i4.7601).
- [6] A. Buckroyd, *In-Circuit Testing*, Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [7] First Alert Products, "First Alert". [firstalert.com](https://www.firstalert.com/). Accedido: ag. 15, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.firstalert.com/>
- [8] J. E. Monagas, A. Sarmiento y A. Vega, "Low-cost programmable modular system to perform in-circuit test (ICT): Full development of the hardware, software, and mechanics of an ICT machine", en *Proceedings of the 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, pp. 1-7, 2016, doi: [10.1109/TAEE.2016.7528359](https://doi.org/10.1109/TAEE.2016.7528359).

Sustentabilidad y seguridad en el transporte de mercancías en Ciudad Juárez: un análisis multicriterio con el método TOPSIS

Sustainable and Security Freight Transportation in Juarez City: A Multicriteria Analysis Using TOPSIS Method

Johana Medina Zárate¹ , Iván Juan Carlos Pérez Olguín¹  , Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy¹ ,
Consuelo Catalina Fernández Gaxiola² 

¹ Doctorado en Tecnología, Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

² Ingeniería en Logística Internacional, Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es evaluar ocho alternativas de transporte de mercancías en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, considerando criterios de tiempo, distancia recorrida, seguridad y emisiones de CO₂, con un enfoque especial en la sustentabilidad ambiental y operativa. El presente trabajo identifica la opción eficaz, segura y sustentable que facilite la toma de decisiones empresariales frente a los desafíos logísticos actuales. Para ello, se aplica la metodología multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés), a través del método TOPSIS (Técnica de la Orden de Preferencia por Similitud de la Solución Ideal), destacado por su capacidad para seleccionar la alternativa que mejor se aproxima a la solución óptima en un escenario con múltiples criterios. El estudio se realizó bajo un enfoque cuantitativo, mediante la construcción de una matriz de decisión con datos de rutas de transporte y asignando las ponderaciones adecuadas basadas en la logística sustentable. Los resultados muestran que la Ruta 7 presenta el mejor equilibrio entre eficiencia logística, seguridad y reducción de emisiones. Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad mediante simulación de Monte Carlo, confirmando la robustez del *ranking* obtenido.

PALABRAS CLAVE: sustentabilidad; seguridad; toma de decisiones multicriterio; TOPSIS; transporte.

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate eight freight transportation alternatives in Juarez City, considering criteria such as travel time, distance covered, safety, and CO₂ emissions, with a particular focus on environmental and operational sustainability. This study identifies the most efficient, safe, and sustainable option to support business decision-making in the face of current logistical challenges. To achieve this, a Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) approach is applied through the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution), recognized for its ability to select the alternative that best approximates the optimal solution in scenarios involving multiple criteria. The study is conducted under a quantitative approach, using a decision matrix constructed with transportation route data and assigning appropriate weights based on sustainable logistical principles. The results show that Route 7 offers the best balance between logistical efficiency, safety, and emissions reduction. Additionally, a sensitivity analysis was carried out using a Monte Carlo simulation, confirming the robustness of the ranking obtained.

KEYWORDS: sustainability; security; multicriteria decision-making; TOPSIS; transportation.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Iván Juan Carlos Pérez Olguín

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chih., México

CORREO ELECTRÓNICO: ivan.perez@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 26 de enero de 2026. **Fecha de publicación:** 29 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

El estado de Chihuahua se ha consolidado como un eje estratégico en el desarrollo económico de México gracias a su sólida infraestructura industrial y su posición geográfica privilegiada. Actualmente, la entidad cuenta con 55 parques industriales, de los cuales 41 se ubican en Ciudad Juárez, lo que refuerza su papel como polo de atracción para empresas nacionales e internacionales en sectores clave, como el automotriz, aeroespacial, tecnológico y logístico. También, Juárez es el municipio más poblado de Chihuahua, con 1 512 450 habitantes, condición que fortalece su relevancia como centro económico y comercial. Esta ventaja se complementa con la presencia de uno de los cruces fronterizos más importantes del mundo, que conecta directamente con El Paso, Texas, facilitando diariamente el tránsito de miles de personas y el intercambio comercial binacional [1].

La dinámica económica de la región se refleja en los flujos de comercio exterior: entre enero y abril de 2025, las importaciones alcanzaron un valor de 24 925 millones USD, mientras que las exportaciones sumaron 25 475 millones USD. Así mismo, en los primeros cinco meses del año se contabilizó el tránsito de 409 929 vehículos de carga por los cuatro cruces internacionales. Estos indicadores evidencian la relevancia estratégica de Ciudad Juárez como plataforma logística y nodo esencial de conectividad en la relación México - Estados Unidos [2].

No obstante, este dinamismo económico ha traído consigo importantes desafíos en materia de movilidad y sustentabilidad. El padrón vehicular de Ciudad Juárez asciende a 752 696 unidades, de las cuales el 96.4 % corresponden a vehículos particulares y el 1.6 % a camiones de carga, experimentando un aumento del 9.5 % entre 2023 y 2024 [3]. Este crecimiento, sumado al tránsito internacional, se traduce en congestión vial, mayores tiempos de traslado y un incremento en las emisiones contaminantes, reflejado en episodios frecuentes de mala calidad del aire. A ello se añade la complejidad de las condiciones de seguridad en la ciudad, donde la incidencia delictiva en algunas zonas y rutas de transporte representa un factor de riesgo adicional que influye en la eficiencia operativa y en los costos logísticos.

Ante este panorama, surge la necesidad de contar con herramientas de análisis que permitan evaluar alternativas de transporte bajo una perspectiva integral. El desafío es aún mayor ante las proyecciones de crecimiento

del comercio transfronterizo: se estima que el volumen de mercancías que cruza la frontera México-Texas se duplicará entre 2019 y 2050, con el autotransporte como modo predominante. De no gestionarse bajo un enfoque sostenible, este incremento podría comprometer las metas nacionales de descarbonización y desarrollo sostenible. En este escenario, resulta indispensable optimizar las rutas actuales de transporte de carga mediante criterios integrados de seguridad, eficiencia logística y sustentabilidad ambiental [4].

A pesar del avance en políticas de sustentabilidad, su aplicación en América Latina y el norte de México enfrenta importantes desafíos. En Carchi, Ecuador, se ha identificado una alta conciencia ambiental entre transportistas, pero una parte significativa de las empresas carece de planes claros para iniciar acciones de mitigación [5]. De manera similar, en el sur de Sonora, una empresa transportista mostró una correlación débil entre las prácticas ambientales y la competitividad empresarial, lo que indica que la sustentabilidad aún no se integra como factor estratégico en las actividades productivas [6].

En este marco, el transporte urbano se ha consolidado como un tema de investigación prioritario, reflejado en el creciente número de publicaciones que abordan aspectos como la eficiencia, la sustentabilidad, la gestión ambiental y la planificación de ciudades de bajas emisiones de carbono [6], [8].

Por consiguiente, la metodología de toma de decisiones multicriterio (Multi-Criteria Decision-Making, MCDM) es un marco adecuado para abordar problemas complejos en ámbitos sociales, ambientales y logísticos, ya que permiten ponderar simultáneamente diversos criterios que pueden presentar conflictos entre sí [7], [8], [9]. Además, es reconocida como una rama actual de la investigación de operaciones, vinculada con la optimización de múltiples objetivos [10].

Dentro de este ámbito, el proceso de jerarquía (AHP, por sus siglas en inglés) ha sido ampliamente aplicado debido a su flexibilidad y adaptabilidad en distintos sectores. De acuerdo con [12], este método resulta útil en áreas tan diversas como el transporte público, la logística, el transporte marítimo y la operación del transporte terrestre. Asimismo, en [13] se muestra su aplicación en el caso de Madrid, donde se evaluó la viabilidad de diferentes tecnologías de motores en autobuses de

transporte público, considerando criterios económicos y ambientales para determinar la alternativa sustentable. Por su parte, en [14] se propone una integración metodológica difusa AHP-DEMATEL-VIKOR, con la finalidad de evaluar la cadena de suministro social sustentable mediante el análisis del lenguaje natural y la clasificación holística de los criterios en función de las opiniones de expertos y partes interesadas.

Finalmente, el método TOPSIS también ha cobrado relevancia en el campo de la MCDM. En [15] se documenta su aplicación en la optimización de rutas turísticas en Nong Khai, Tailandia, a través de un modelo matemático que integra múltiples criterios relevantes para los turistas. Este enfoque constituye una propuesta metodológica innovadora que contribuye a la planificación turística sustentable, destacando la versatilidad del método en escenarios más allá del transporte urbano.

La sustentabilidad no se limita a conservar las condiciones existentes, sino que busca generar mejoras continuas en los aspectos económicos, sociales y ambientales de una región [16]. Esta perspectiva no solo fortalece la toma de decisiones estratégicas, sino que también contribuye a la construcción de sistemas más resilientes y responsables frente a los desafíos actuales.

En tal contexto, este artículo tiene como objetivo facilitar la toma de decisiones en la selección de rutas, integrando criterios complejos y sus interrelaciones como tiempo, distancia, seguridad e impacto ambiental, mediante la aplicación del método TOPSIS. Este enfoque permite identificar las alternativas más cercanas a la solución ideal, aportando una herramienta eficaz para promover la logística sustentable en Ciudad Juárez.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado, ya que se utilizan datos reales de rutas de transporte de mercancías en Ciudad Juárez, con el propósito de identificar la alternativa que sea segura y sustentable. Para ello, se empleó el método TOPSIS, ampliamente utilizado en la MCDM por su capacidad de evaluar de manera simultánea diversos criterios de carácter conflictivo y establecer un *ranking* objetivo de alternativas [17].

Las alternativas que se evalúan corresponden a ocho rutas de transporte de mercancía de una empresa lo-

calizada en Ciudad Juárez, dedicada a la proveeduría de partes automotrices. Para cada ruta se consideraron cuatro criterios:

- Tiempo de traslado (minutos): refleja la eficiencia operativa.
- Distancia recorrida (km): asociada al consumo de combustible y desgaste vehicular.
- Emisiones de CO₂ (kg): indicador del impacto ambiental y de la sustentabilidad de la operación.
- Seguridad: asociada a los sectores con mayor índice de inseguridad en la ciudad.

Los criterios tiempo, distancia y CO₂ se evalúan como criterios indirectos, ya que los valores menores representan mejor desempeño, y la seguridad como directo, a niveles más altos, mayor ventaja. En la [Figura 1](#) se muestra el mapa de Ciudad Juárez, en el cual se distinguen mediante códigos de color los diferentes niveles de seguridad por zona. Asimismo, se señalan los recorridos correspondientes a las Rutas 1 a la 4, mientras que en la [Figura 2](#) se presentan los trayectos de las Rutas 5 a la 8.

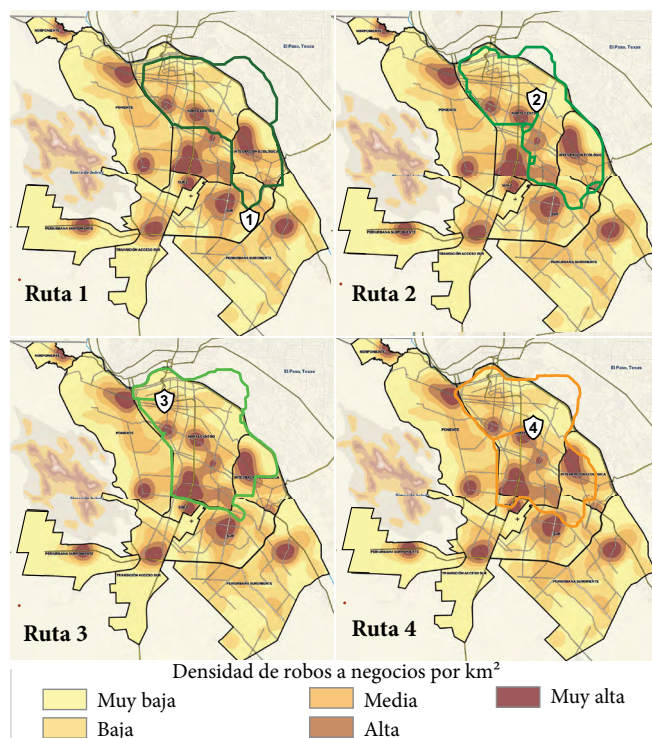


Figura 1. Mapa de Ciudad Juárez con código de colores y rutas identificadas de la 1 a la 4. Adaptado de [3].

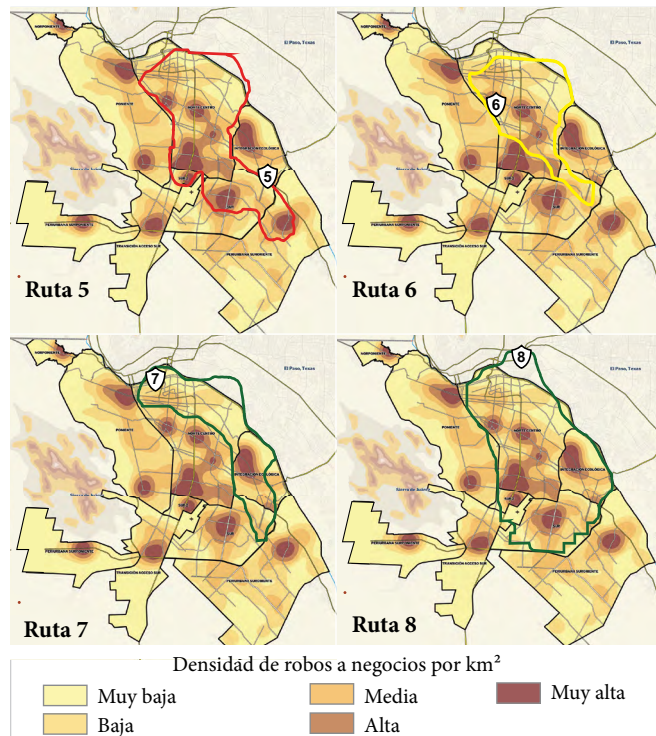


Figura 2. Mapa de Ciudad Juárez con código de colores y rutas identificadas de la 5 a la 8. Adaptado de [3].

A. ASIGNACIÓN DE PESOS

Los pesos se asignaron mediante ponderación directa para evitar el sesgo operativo que suele presentarse cuando los transportistas otorgan poca relevancia a criterios ambientales y de seguridad.

Se seleccionaron valores que reflejan equilibrio entre eficiencia logística y principios de sustentabilidad, garantizando una evaluación más alineada con los objetivos de movilidad responsable, considerando que el transporte en México constituye uno de los principales generadores de emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) a nivel nacional [18]. Asimismo, la seguridad, ya que se encuentra entre los tres problemas principales de la ciudad [19]. Se otorgaron pesos más significativos, seguido por el tiempo de traslado y, finalmente, la distancia:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 0.30 & \text{Seguridad} &= 0.30 \\ \text{Tiempo} &= 0.20 & \text{Distancia} &= 0.20 \end{aligned}$$

Esta distribución corresponde al objetivo de darle prioridad a las rutas seguras y que reduzcan la huella ambiental, sin descuidar la eficiencia logística.

B. CONSTRUCCIÓN DE MATRIZ DE DECISIÓN

La matriz de decisión se elaboró con los valores correspondientes a cada ruta y criterio. Los datos provienen de registros de operación y mediciones realizadas en los recorridos de transporte. Para el cálculo de emisiones de CO₂, se consideró un consumo de 0.4 litros de diésel por cada kilómetro recorrido [20]. Asimismo, se utilizó el factor de emisión de 2.69 de kg de CO₂ por litro de diésel consumido [21].

Para el criterio de seguridad se definió una escala del 3 al 10, asignando 3 a la zona con mayor inseguridad y 10 a la más segura, con base en la información proporcionada por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) sobre las áreas con mayor incidencia delictiva en la ciudad. El IMIP es un organismo público descentralizado del municipio de Juárez, con autonomía técnica y jurídica, y es responsable de la generación de estudios y proyectos de planeación urbana. Su labor se orienta a promover el desarrollo ordenado y sustentable de la ciudad bajo una visión de corto, mediano y largo plazo [3], [22]. La [Tabla 1](#) muestra la información relacionada a las 8 rutas de transporte de mercancías.

TABLA 1
INFORMACIÓN CORRESPONDIENTE A CADA RUTA

RECORRIDO	TIEMPO	CO ₂	DISTANCIA	SEGURIDAD
Ruta 1	150	106.63	99.1	8
Ruta 2	104	56.65	52.65	7
Ruta 3	93	63.38	58.9	6
Ruta 4	90	55.25	51.0	4
Ruta 5	121	88.98	83.0	3
Ruta 6	108	61.55	57.	5
Ruta 7	102	72.84	67.7	9
Ruta 8	257	185.39	172.3	10

C. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MÉTODO TOPSIS

El procedimiento TOPSIS se fundamenta en una serie de operaciones matemáticas que permiten evaluar el grado de cercanía de cada alternativa de solución ideal [23]. A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas en cada etapa del análisis [23], [24].

- Normalización de la matriz de decisión. Para eliminar la influencia de las unidades de medida, la ma-

triz de decisión $X = x_{ij}$ se transforma en una matriz normalizada $R = [x_{ij}]$ mediante la Ecuación (1):

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (1)$$

- b) Matriz ponderada. La matriz normalizada se multiplica por los pesos de los criterios, generando la matriz ponderada $V = [v_{ij}]$ con el uso de la Ecuación (2).

$$v_{ij} = w_j * n_j \quad (2)$$

- c) Determinación de las soluciones de referencia. Ideal positiva, compuesta por los valores mínimos de cada criterio, calculada con la Ecuación (3), e ideal negativa, integrada por los valores máximos, calculada con la Ecuación (4).

$$S_i^+ = [\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$S_i^- = [\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2]^{1/2} \quad (4)$$

- d) Coeficiente de cercanía. Se obtiene el coeficiente de cada alternativa a la solución ideal mediante el uso de la Ecuación (5).

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (5)$$

A continuación, se muestran las tablas que dieron como resultado después de dar seguimiento al método TOPSIS. La [Tabla 2](#) muestra los valores normalizados.

TABLA 2
VALORES NORMALIZADOS

RECORRIDO	TIEMPO	CO ₂	DISTANCIA	SEGURIDAD
Ruta 1	0.3837	0.3946	0.3946	0.4104
Ruta 2	0.2660	0.2096	0.2096	0.3591
Ruta 3	0.2379	0.2345	0.2345	0.3078
Ruta 4	0.2302	0.2044	0.2045	0.2052
Ruta 5	0.3095	0.3293	0.3293	0.1539
Ruta 6	0.2763	0.2278	0.2277	0.2565
Ruta 7	0.2609	0.2695	0.2696	0.4617
Ruta 8	0.6574	0.6860	0.6860	0.5130

La [Tabla 3](#) muestra los resultados obtenidos mediante la aplicación del método TOPSIS para las ocho rutas analizadas. En la primera parte se observan los valores normalizados de los criterios considerados: tiempo de traslado, emisiones de CO₂, seguridad y distancia recorrida. Posteriormente, se calculan las distancias de cada alternativa respecto a la solución ideal positiva S_i^+ y a la solución ideal negativa S_i^- .

El valor S_i^+ indica qué tan lejos se encuentra cada ruta de la mejor alternativa posible, mientras que S_i^- indica la cercanía con respecto a la peor alternativa. La suma ($S_i^+ + S_i^-$) se utiliza como denominador en el cálculo del coeficiente de cercanía.

Finalmente, en la parte inferior de la tabla se incluyen los vectores de referencia V_i^+ y V_i^- que corresponden a los valores ideales positivos y negativos para cada criterio.

TABLA 3
RESULTADOS DEL MÉTODO TOPSIS

RECORRIDO	TIEMPO	CO ₂	DISTANCIA	SEGURIDAD	S_i^+	S_i^-	$S_i^+ + S_i^-$
Ruta 1	0.0767	0.1184	0.0789	0.1231	0.0812	0.1413	0.2225
Ruta 2	0.0532	0.0629	0.0419	0.1077	0.0468	0.1985	0.2453
Ruta 3	0.0476	0.0704	0.0469	0.0923	0.0625	0.1889	0.2514
Ruta 4	0.0460	0.0613	0.0409	0.0616	0.0923	0.1941	0.2865
Ruta 5	0.0619	0.0988	0.0659	0.0462	0.1178	0.1462	0.2641
Ruta 6	0.0553	0.0683	0.0455	0.0769	0.0780	0.1846	0.2625
Ruta 7	0.0522	0.0809	0.0539	0.1385	0.0287	0.1933	0.2220
Ruta 8	0.1315	0.2058	0.1372	0.1536	0.1935	0.1077	0.3012
V_i^+	0.0460	0.0613	0.0409	0.1539			
V_i^-	0.1315	0.2058	0.1372	0.0462			

Con el fin de comprobar la robustez y estabilidad de los resultados obtenidos se realizó un análisis de sensibilidad mediante la técnica de simulación de Monte Carlo. Esta simulación es una herramienta complementaria que permite examinar la robustez del *ranking* de alternativas ante una amplia variación en la ponderación de los criterios [25]. El procedimiento se ejecutó en Google Colab mediante código en Python y para el análisis se generaron 1000 escenarios aleatorios.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del método TOPSIS permitió ordenar las ocho rutas de transporte en función del tiempo de traslado, seguridad, distancia recorrida y emisiones de CO₂, dando prioridad a aquellos recorridos más cercanos a la solución ideal. Los resultados muestran que la Ruta 7 obtuvo un coeficiente de cercanía C_i de 0.8706, indicando que es la mejor alternativa en cuestión de sustentabilidad.

Esta ruta combina un tiempo de 102 minutos, un nivel de seguridad alto con escala establecida de 9 y emisiones de CO₂ de 72.84 kg.

Estos resultados refuerzan que la eficiencia logística contribuye directamente a la reducción de emisiones en contextos urbanos. En México, el CO₂ representa el 71 % de los gases de efecto invernadero (GEI), y el sector del transporte es uno de los principales emisores, aportando el 17.9 % de las emisiones totales de CO₂ a nivel nacional. Específicamente, el autotransporte de carga por sí solo es responsable de casi el 30 % de las emisiones del sector terrestre [26].

Por el contrario, la Ruta 8 presentó el coeficiente más bajo, $C_i = 0.3576$, esto debido a su mayor tiempo de traslado, distancia recorrida y emisiones de CO₂, a pesar de ubicarse en la zona con mayor seguridad. Este resultado hace evidente que la seguridad, aunque prioritaria, no compensa las desventajas operativas y ambientales cuando los demás criterios se ven severamente afectados.

El *ranking* obtenido evidencia un patrón constante: las rutas más cortas y rápidas tienden a generar menores emisiones, lo que confirma la interdependencia entre criterios logísticos y ambientales. Sin embargo, se observó que algunas rutas intermedias, como la 2 ($C_i = 0.8094$) y la 3 ($C_i = 0.7513$) alcanzaron coeficientes cercanos al ideal, lo que sugiere que se tienen varias alter-

nativas competitivas que se pueden adaptar a diferentes condiciones operativas.

Los resultados mostrados en la [Tabla 4](#) son coherentes con investigaciones previas que han buscado alternativas económicas y sustentables en el transporte turístico y la cadena de suministro [10], [11]. Tal como lo señalan [10] y [15], TOPSIS constituye una herramienta robusta para equilibrar objetivos con frecuencia conflictivos, como la eficiencia logística y la reducción de emisiones contaminantes. En contexto, su aplicación en Ciudad Juárez aporta evidencia práctica sobre cómo los análisis multicriterio pueden orientar la logística hacia decisiones más responsables en seguridad y sustentabilidad.

TABLA 4
RANKING FINAL

RECORRIDO	P_i	RANKING
Ruta 1	0.8706	1
Ruta 2	0.8094	2
Ruta 3	0.7513	3
Ruta 4	0.7030	4
Ruta 5	0.6777	5
Ruta 6	0.6351	6
Ruta 7	0.5538	7
Ruta 8	0.3576	8

La [Tabla 5](#) muestra los resultados del análisis de sensibilidad, en donde se observa que la Ruta 7 se mantuvo como la mejor alternativa en un 63.6 % de los escenarios evaluados, lo que evidencia la robustez del modelo.

TABLA 5
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MONTE CARLO

RECORRIDO	FRECUENCIA	PROBABILIDAD (%)
Ruta 7	636	63.60
Ruta 2	294	29.40
Ruta 4	52	5.20
Ruta 3	17	1.70
Ruta 8	1	0.10
Ruta 1	0	0
Ruta 6	0	0
Ruta 5	0	0

Los resultados del estudio se alinean con la evidencia reportada en el caso Aptiv, donde la dimensión tecnológica funge como eje de resiliencia operativa y susten-

tabilidad ambiental [27]. La Ruta 7, identificada como la mejor alternativa mediante TOPSIS, logró identificar eficiencia (tiempo y distancia) con la reducción de CO₂, coherente con la estrategia de la industria automotriz, que prioriza operaciones justo a tiempo para disminuir tiempos de traslado y, en consecuencia, las emisiones.

IV. CONCLUSIONES

El estudio confirmó la eficacia del método TOPSIS como herramienta para la evaluación de alternativas de transporte en escenarios con múltiples criterios.

Entre las ocho rutas, la Ruta 7 se identificó como la más sustentable, al presentar el mejor equilibrio entre tiempo, seguridad, distancia y emisiones de CO₂, y la Ruta 8 resultó ser la menos recomendable, debido a su alto consumo energético y mayor impacto ambiental.

El análisis evidenció que la reducción en tiempo y distancia de recorrido contribuye de manera directa a la disminución de emisiones, confirmando la relación entre eficiencia logística y sustentabilidad ambiental.

El enfoque metodológico aplicado puede replicarse en otros contextos urbanos e industriales, constituyendo una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en materia de movilidad sustentable y segura. La presente investigación ofrece una herramienta metodológica efectiva para la toma de decisiones en el transporte de carga; no obstante, es importante reconocer ciertas limitaciones que delinear el alcance del estudio y sugieren áreas de trabajo futuro.

Las limitaciones de la presente investigación radican en la muestra operativa, ya que el análisis de rutas se restringió a la información de una sola empresa, en la cual se cubren únicamente ocho rutas. Además del criterio de seguridad, se basó en una clasificación de zona preestablecida según su incidencia delictiva. Finalmente, la cuantificación de emisiones de CO₂ se realizó mediante un factor estimado y aunque esta aproximación es útil para la comparación, no incluye la variabilidad real del consumo por tipo de vehículo o antigüedad de la flota.

Finalmente, se recomienda como línea de investigación la incorporación de criterios adicionales, tales como costos operativos, escenarios dinámicos o la integración de modelos híbridos, con el objetivo de enriquecer la evaluación multicriterio y ampliar su alcance.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

- Dar prioridad a rutas con mejor equilibrio de tiempo-seguridad-emisiones para envíos de alto valor y entregas con baja tolerancia de demoras.
- Diseñar programas de incentivos a los operadores por eficiencia al volante.
- Explorar el consolidar cargas y ventanas de operación fuera de horario de ventanas para reducir congestiones y emisiones.

REFERENCIAS

- [1] I. Molina, “ELAM-FAW. Ensamblando el futuro de los vehículos pesados en México”, *Mexico Industry*, año 28, n.º 333, p. 44, may. 2025.
- [2] INDEX, “Información Estadística Mensual. 9 de mayo 2025”, Asociación de Maquiladoras, A.C. Index Juárez, 2025. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://indexjuarez.com/wp-content/uploads/2025/05/9-de-mayo-2025.pdf>
- [3] F. Aguilar, T. Castañeda, F. I. Montañez y A. Morales, “Radiografía Socioeconómica del Municipio de Juárez 2024. Así comenzó 2025”, Instituto Municipal de Investigación y Planeación, México, 1.ª ed., 2025. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://www.imip.org.mx/imip/files/radiografia/Radiografia2024-2025.pdf>
- [4] R. Sandoval, “El futuro del transporte de mercancías en la frontera México-Texas. El requerimiento de infraestructura para el desarrollo sostenible”, *ENERLAC*, vol. VII, n.º 2, pp. 67-85, dic. 2023.
- [5] R. V. Portilla, E. S. de la Cruz y D. H. Nazate, “Impacto ambiental de la logística en el transporte internacional de mercancías”, *CT*, vol. 4, n.º 1, pp. 106-117, en. 2024.
- [6] M. P. Martínez, O. M. Castro, A. G. Ozuna y A. G. Ruiz, “El Transporte de Carga Terrestre Sustentable y Eficiente en el Sur del Estado de Sonora”, *Veritas*, vol. 6, n.º 1, pp. 1632-1648, mar. 2025, doi: [10.61616/rvdc.v6i1.475](https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i1.475).
- [7] A. F. Momena et al., “Ranking and Challenges of Supply Chain Companies Using MCDM Methodology”, *Logistics*, vol. 8, n.º 3, sept. 2024, doi: [10.3390/logistics8030087](https://doi.org/10.3390/logistics8030087).

- [8] T. K. Bhatia, A. Kumar, S. S. Appadoo, Y. Gajpal y M. K. Sharma, “Mehar Approach for Finding Shortest Path in Supply Chain Network”, *Sustainability*, vol. 13, n.º 7, p. 4016, abr. 2021, doi: [10.3390/su13074016](https://doi.org/10.3390/su13074016).
- [9] S. A. R. Khan, Z. Yu, H. Golpira, A. Sharif y A. Mardani, “A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions”, *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 123357, en. 2021, doi: [10.1016/j.jclepro.2020.123357](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123357).
- [10] S. Hajduk, “Multi-Criteria Analysis in the Decision-Making Approach for the Linear Ordering of Urban Transport Based on TOPSIS Technique”, *Energies*, vol. 15, n.º 1, dic. 2021, doi: [10.3390/en15010274](https://doi.org/10.3390/en15010274).
- [11] M. Hamurcu y T. Eren, “Strategic Planning Based on Sustainability for Urban Transportation: An Application to Decision-Making”, *Sustainability*, vol. 12, n.º 9, abr. 2020, doi: [10.3390/su12093589](https://doi.org/10.3390/su12093589).
- [12] S. Moslem, M. K. Saraji, A. Mardani, A. Alkharabsheh, S. Duleba and D. Esztergár-Kiss, “A Systematic Review of Analytic Hierarchy Process Applications to Solve Transportation Problems: From 2003 to 2022”, en *IEEE Access*, vol. 11, pp. 11973-11990, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3234298](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234298).
- [13] L. Rivero, M. A. De Vicente y A. Romero-Ania, “Managing Sustainable Urban Public Transport Systems: An AHP Multicriteria Decision Model”, *Sustainability*, vol. 13, n.º 9, p. 4614, abr. 2021, doi: [10.3390/su13094614](https://doi.org/10.3390/su13094614).
- [14] R. Guo y Z. Wu, “Social sustainable supply chain performance assessment using hybrid fuzzy-AHP-DEMATEL-VIKOR: a case study in manufacturing enterprises”, *Environ Dev Sustain*, vol. 25, n.º 11, pp. 12273-12301, nov. 2023, doi: [10.1007/s10668-022-02565-3](https://doi.org/10.1007/s10668-022-02565-3).
- [15] W. Phuangpornpitak, W. Boonchom, K. Suphan, W. Chiengkul y T. Tantipanichkul, “Application of TOPSIS-LP and New Routing Models for the Multi-Criteria Tourist Route Problem: The Case Study of Nong Khai, Thailand”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, n.º 4, ag. 2024, doi: [10.48084/etasr.7523](https://doi.org/10.48084/etasr.7523).
- [16] A. Majidi, S. M. J. Mirzapour y S. Hashemkhani, “Sustainability Ranking of the Iranian Major Ports by Using MCDM Methods”, *Mathematics*, vol. 9, n.º 19, oct. 2021, doi: [10.3390/math9192451](https://doi.org/10.3390/math9192451).
- [17] S. K. Sahoo S. S. Goswami, “A Comprehensive Review of Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) Methods: Advancements, Applications, and Future Directions”, *Decis. Mak. Adv.*, vol. 1, n.º 1, dic. 2023, doi: [10.31181/dma1120237](https://doi.org/10.31181/dma1120237).
- [18] GIZ-ICM, *Acciones clave para detonar la transición del transporte de carga en México*, 1.ª ed. México: GIZ, 2021. [En línea]. Disponible: <https://imt.mx/descarga-archivo.html>
- [19] “Así estamos Juárez 2025”, Plan Estratégico de Juárez, 2025. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://planjuarez.org/wp-content/uploads/2025/06/AEJ2025.pdf>
- [20] O. S. Serrano-Guevara, J. I. Huertas, A. E. Mogro y L. F. Quirama, “Consumo energético de vehículos pesados en México”, *Inf. Tec.*, vol. 87, n.º 1, pp. 29-30, dic. 2022, doi: [10.23850/22565035.5123](https://doi.org/10.23850/22565035.5123).
- [21] EPA. “Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias”. EPA.gov. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos>
- [22] Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2025, “Incidencia Delictiva 2006-2024”, Municipio de Juárez, Chih. [En línea]. Disponible: <https://www.imip.org.mx/imip/node/357>
- [23] U. A. Gómez-Rivera, I. J. C. Pérez-Olguín, A. H. Alanís-Pérez, L. A. Pérez-Domínguez y L. C. Méndez-González, “Development of A Multi-Criteria Analysis Tool with a Focus on Classical, Robust Techniques and Weighting Values”, en *Proc. of the 10th Annu. World Conf. of the Society for Industrial and Systems Engineering*, sept. 23-24, 2021, pp. 92-104. [En línea]. Disponible: <https://ieworldconference.org/content/SISE2021/Papers/G%C3%B3mez-Rivera.pdf>
- [24] S.-J. Chen y C.-L. Hwang, “Fuzzy Multiple Attribute Decision Making”, en *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, H. Dawid y A. Kleine, eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992, vol. 375, doi: [10.1007/978-3-642-46768-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4).

- [25] A. Velasco y R. Gerike, “Sensitivities of weighting methods in the sustainability assessment of public transport in Latin American cities”, *Transp. Res. Interdiscip. Persp.*, vol. 30, p. 101362, mar. 2025, doi: [10.1016/j.trip.2025.101362](https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101362).
- [26] K. V. V. Martínez, V. F. Fernández, M. D. H. Ripalda, y J. A. J. García, “Emisiones de CO₂ en el Autotransporte de Carga Terrestre en México: Análisis y Estrategias”, *Pistas Educativas*, vol. 46, n.º 149, 2025.
- [27] P. C. Inzunza, O. Valenzuela-Valenzuela, D. L. Castro-Cuadras, y C. C. Cuevas, “Dimensiones estratégicas de

sostenibilidad y resiliencia en la cadena de suministro de la empresa Aptiv”, *Economía y Negocios*, vol. 6, n.º 1, pp. 3-23, abr. 2024, doi: [10.33326/27086062.2024.1.1854](https://doi.org/10.33326/27086062.2024.1.1854).

RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo brindado durante la realización de este documento, mediante la beca otorgada bajo el CVU 552705.

Diseño sostenible de perfiles de elevador: mejorando la eficiencia aerodinámica en aeronaves experimentales

Sustainable elevator profile design: improving aerodynamic efficiency in experimental aircraft

Jeannette Abril Nevárez Sánchez¹ , Arturo Paz Pérez¹  

¹ Ingeniería aeronáutica, Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

El presente trabajo se centra en el diseño sostenible de perfiles de elevador, orientado a mejorar la eficiencia aerodinámica en aeronaves experimentales para así reducir el consumo de combustible y el impacto ambiental asociado. Se compararon tres perfiles aerodinámicos (NACA 2412, NACA 0012 y S2050) mediante simulaciones en dos plataformas de dinámica de fluidos computacional, evaluando su desempeño bajo condiciones específicas de una aeronave experimental. El análisis de las propiedades reveló que el perfil NACA 0012 ofrece la mayor eficiencia, destacando por generar el levantamiento necesario con menor resistencia al avance. La selección de este perfil responde a principios de eco-innovación, pues una mayor eficiencia aerodinámica significa en una reducción de potencia requerida y, por ende, en un menor consumo de combustible y emisiones contaminantes durante la operación. Aunque el estudio no consideró todos los perfiles disponibles, la selección del NACA 0012 constituye una mejora significativa respecto a alternativas comúnmente empleadas, ya que se alinea con los objetivos de sostenibilidad y optimización de recursos en la aviación experimental. En consecuencia, la implementación de este perfil en el elevador no solo favorece un diseño más eficiente, sino que también impulsa la ecoinnovación en el sector aeronáutico, contribuyendo considerablemente a una industria con menor impacto ambiental.

PALABRAS CLAVE: Dinámica de Fluidos Computacionales; combustible; elevador; eficiencia aerodinámica; perfil aerodinámico.

ABSTRACT

This work focuses on the sustainable design of elevator profiles, aimed at improving aerodynamic efficiency in 28 experimental aircraft in order to reduce fuel consumption and the associated environmental impact. Three aerodynamic profiles (NACA 2412, NACA 0012, and S2050) were compared using simulations on two computational fluid dynamics platforms, evaluating their performance under specific conditions of an experimental aircraft. Analysis of the properties revealed that the NACA 0012 profile offers the highest efficiency, standing out for generating the necessary lift with less drag. The selection of this profile is in line with eco-innovation principles, as greater aerodynamic efficiency means a reduction in the power required and, therefore, lower fuel consumption and pollutant emissions during operation. Although the study did not consider all available profiles, the selection of NACA 0012 constitutes a significant improvement over commonly used alternatives, as it aligns with the objectives of sustainability and resource optimization in experimental aviation. Consequently, the implementation of this profile in the elevator not only promotes a more efficient design, but also drives eco-innovation in the aeronautical sector, contributing significantly to an industry with a lower environmental impact.

KEYWORDS: Computational Fluid Dynamics; fuel; elevator; aerodynamic efficiency; airfoil.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Arturo Paz Pérez

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chih., México

CORREO ELECTRÓNICO: arturo.paz@uacj.mx

Fecha de recepción: 22 de octubre de 2025. **Fecha de aceptación:** 26 de enero de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el impacto ambiental asociado a cada ámbito de la sociedad ha adquirido una relevancia creciente, convirtiéndose en un tema prioritario para la investigación y la toma de decisiones a nivel global. Uno de dichos ámbitos es la industria aeronáutica, que se encuentra en continuo crecimiento, lo que trae consigo un aumento en su demanda y, por ende, en su consumo. Esto, en términos ambientales, significa una mayor emisión de gases contaminantes.

En la industria aeronáutica es esencial el área de diseño para mejorar el desempeño y estabilidad de las aeronaves no solo dirigidas al uso comercial, sino también las experimentales no tripuladas, elaboradas con diversos fines. Este estudio tiene como objetivo el encontrar el perfil aerodinámico con mejor eficiencia aerodinámica, entre diversas opciones, para el elevador de una aeronave experimental no tripulada, la cual está destinada a la exploración y reconocimiento de áreas reducidas bajo condiciones de vuelo específicas, como lo son una velocidad de crucero de 15 m/s y una altura de 150 m sobre Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Los perfiles aerodinámicos son una pieza clave en el diseño de una aeronave, pero no solo aquellos aplicados en las alas, sino también en las otras superficies de control, como lo es el elevador. Para un grato desempeño de dichas superficies, se busca una relación entre el coeficiente de levantamiento y el coeficiente de arrastre adecuados para la aeronave específica. Sin embargo, existen una infinidad de diseños y sus diversos comportamientos, así como el incremento de la contaminación causada por las mencionadas aeronaves.

Este estudio busca identificar y evaluar distintos perfiles aerodinámicos para maximizar la eficiencia aerodinámica, manteniendo un enfoque en el estabilizador horizontal, mientras que se considera el levantamiento y el arrastre, utilizando como variable principal el ángulo de ataque.

La pregunta central de esta investigación es: ¿cuál de los perfiles aerodinámicos propuestos representa una reducción en la potencia requerida?, de la cual se derivan cuatro preguntas que guiarán el rumbo de la investigación y determinan el desempeño de la aeronave: ¿cuál de los perfiles aerodinámicos propuestos se adapta de manera más adecuada a las necesidades específicas de

la aeronave?, ¿cuál es el rango de ángulos de ataque en el que el perfil aerodinámico seleccionado alcanza su máxima eficiencia aerodinámica?, ¿a partir de qué ángulo de ataque el perfil aerodinámico comienza a entrar en pérdida? y ¿el desempeño del elevador mejora significativamente al incorporar *winglets*?

Con base en dichas preguntas, se tiene como hipótesis que el perfil aerodinámico que presente mejor desempeño en base a las necesidades de la aeronave es el NACA 2412, debido a su constante uso en el área de la industria aeronáutica. De la misma forma se espera un adecuado funcionamiento, específicamente en ángulos de ataque entre 8° y 10°, para, después de los 10°, comenzar a entrar en pérdida. Asimismo, se tiene la hipótesis que el agregar *winglets* es una ventaja en el desempeño del elevador.

Como base de esta investigación, se tienen estudios previos que presumen la importancia de un control eficientes en las aeronaves que sustenta un rendimiento apto, un vuelo seguro y una menor emisión de gases contaminantes, como [1] y [2], que presentaron los principios básicos que rigen la aerodinámica y fenómenos que tienen repercusiones en ella, o [3] y [4] que presumen el uso de perfiles aerodinámicos y su desempeño, mientras que, por otra parte, en [5] se explica cómo hacer que los procesos industriales sean más amigables con el medio ambiente.

El alcance de esta investigación radica en el análisis teórico y revisión de estudios previos del tema para alcanzar con el objetivo final de reducir el impacto ambiental de la industria aeronáutica, además de contribuir al conocimiento existente sobre la optimización de perfiles aerodinámicos en elevadores de aeronaves, aportando datos empíricos y simulaciones que validen o refuten la hipótesis planteada, todo lo anterior enfocado en una aeronave experimental no tripulada para el reconocimiento y exploración de áreas reducidas. Este conjunto de conocimientos permitirá la expansión en el diseño de aeronaves más eficientes y seguras, adaptadas a las exigencias del vuelo moderno, reduciendo emisiones de gases contaminantes.

A. CONTEXTO GENERAL

La ciencia que estudia los fluidos se llama mecánica de fluidos y se divide en hidrostática y dinámica de fluidos. A su vez, la dinámica de fluidos se subdivide en hidráulica, dinámica de gases y aerodinámica [1]. Esta

última estudia las fuerzas (arrastre-resistencia y sustentación-levantamiento) ejercidas por el aire sobre los cuerpos en él, como las aeronaves. También se contemplan distintas variables que afectan el flujo del aire, tales como presión, densidad, temperatura y velocidad [1], [2].

La aerodinámica es la base de la mecánica de vuelos, la cual estudia cómo las fuerzas y principios físicos influyen en las aeronaves. Son cuatro las fuerzas principales que actúan sobre una aeronave, dos de ellas ya mencionadas: sustentación, arrastre, peso y empuje. Estas fuerzas críticas son generadas principalmente por las alas y el empenaje, el cual contiene dos superficies de mando y control de vuelo: *rudder* y elevador. Este se encuentra posicionado de forma horizontal y da estabilidad longitudinal, rigiéndose por el eje transversal de la aeronave [6].

Estas fuerzas de sustentación y arrastre se dan principalmente por la geometría de la superficie de mando y control de vuelo. El perfil aerodinámico, que se define como la sección transversal del ala, puede ser simétrico o asimétrico [3]. Un perfil aerodinámico cuenta con diferentes partes (borde de ataque, borde de salida, cuerda, línea de curvatura media, ordenada máxima de la línea de curvatura máxima, espesor máximo, posición de la ordenada máxima, posición del espesor máximo y radio de la curvatura del borde de ataque) que se relacionan entre sí para determinar su geometría [7].

Si bien existen distintas nomenclaturas para el diseño de un perfil aerodinámico que rigen la geometría de estos, la más común es la nomenclatura NACA de 4 dígitos, donde cada uno representa una característica específica de la geometría en relación con la cuerda. El primer dígito da la ordenada máxima del perfil en porcentaje, el segundo representa la posición de la ordena máxima en la décima de la cuerda, mientras que los dos últimos determinan el espesor máximo en porcentaje de la cuerda [3], [4]. Asimismo, dichas fuerzas varían dependiendo del ángulo de ataque, el cual se define como el ángulo entre la cuerda y la dirección de la corriente del aire (viento relativo) [7].

Por otra parte, las fuerzas de sustentación y arrastre se ven afectadas por la configuración general del mando y control de vuelo, como lo es el empenaje. Se pueden encontrar diversos tipos de configuración del empenaje. De acuerdo con [8], algunas de las configuraciones de empenaje más destacadas son la convencional, empenaje en T, cruciforme, empenaje en H y *boom-mounted*.

La configuración del empenaje tiene relación directa con la eficiencia de este. Por ejemplo, en [9] se demuestra que configuraciones con estabilizadores horizontales externos mejoran entre 30 % y 50 % la relación entre sustentación y arrastre, lo que se traduce a una mayor eficiencia aerodinámica en comparación con los empenajes convencionales.

La eficiencia aerodinámica en una aeronave es un punto crítico, no solo en cuestión de diseño y desempeño, sino también en aspectos sociales, tales como el medio ambiente. La industria aeronáutica ha ganado popularidad, lo que se ve reflejado en el incremento de vuelos comerciales y, por ende, también en el crecimiento de los gases emitidos por las aeronaves. Esta industria no solo involucra los vuelos comerciales, sino también aeronaves de índole experimental que también emiten dichos gases.

De acuerdo con la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), en su reporte núm. 2/2022, el sector transportista generó el 28 % del dióxido de carbono total emitido. El sector aeronáutico se encuentra en una constante búsqueda de diseños innovadores, comúnmente relacionados con problemas sociopolíticos, como las crisis de aceite y combustibles [10] y, al ser uno de los mayores contribuyentes al sector transportista, es necesario seguir en la búsqueda de alternativas para la reducción de emisión de CO₂. Se ha pronosticado una posible reducción del 50 % de dichas emisiones para el año 2050 si se hacen modificaciones significativas a los diseños actuales de las aeronaves comerciales [10]. Esto lleva a la industria a la comprensión de conceptos importantes en la actualidad como ecoinnovación y ecodiseño.

Se define a la ecoinnovación como la innovación que pretenden reducir los riesgos ambientales en comparación con aquellas alternativas ya existentes. Al aplicar la ecoinnovación en el desarrollo de soluciones sostenibles en fases previas del diseño de un producto, nace el ecodiseño, el cual considera el impacto ambiental en cada consideración de un diseño, ya sea de productos, servicios o métodos: funcionalidad, costos, materiales, e incluso en el ciclo de vida [5]. Aplicar estas propuestas puede contribuir a lograr una industria más sustentable, reduciendo significativamente el impacto que ocasiona en el medio ambiente.

Existen distintas maneras para potenciar la sustentabilidad en la industria aeronáutica, por ejemplo, uso de

materiales más ligeros, energías sustentables, diseño de procesos de producción con menor índice de residuos, optimización de rutas aéreas y mejor gestión del tráfico aéreo, predicción de fallas y mantenimiento eficiente [11]. Por su parte, se presume que la implementación de Superficies Inteligentes Reconfigurables (RIS) en vehículos aéreos no tripulados representaría un aumento en la eficiencia energética, lo que supondría una reducción del impacto ambiental [12].

Para validar los resultados con el menor consumo de recursos, con regularidad se utilizan las simulaciones por medio de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) [13], [14], que ayuda a la predicción de datos. Utilizar este recurso en simulaciones previas a la manufactura es una ventaja, pues reduce costos, materiales y tiempo, sobre todo al momento de diseñar prototipos o aeronaves

II. METODOLOGÍA

Para la ejecución de este proyecto, se diseñó un conjunto de actividades esenciales que permitieron alcanzar los objetivos establecidos. A continuación, se presenta la metodología seguida, detallando las fases y procedimientos clave implementados a lo largo del proceso.

A. PROPUESTA DE PERFILES AERODINÁMICOS

Como primer paso se propusieron tres diferentes perfiles aerodinámicos que se consideraron adecuados para el uso en aeronaves experimentales: NACA 2412, S2050 y NACA 0012.

El perfil NACA 2412, que se muestra en la [Figura 1](#), se propuso debido al comportamiento que presentan sus coeficientes de levantamiento y arrastre, así como por su alto coeficiente de levantamiento en comparación a los otros dos perfiles.

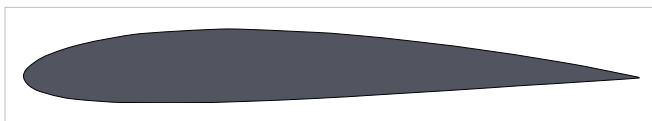


Figura 1. Perfil aerodinámico NACA 2412.

Por su parte, el perfil NACA 0012, expuesto en la [Figura 2](#), presenta una relación entre coeficientes de levantamiento y arrastre bastante estrecha, lo que conlleva una eficiencia aerodinámica con un comportamiento poco variable.

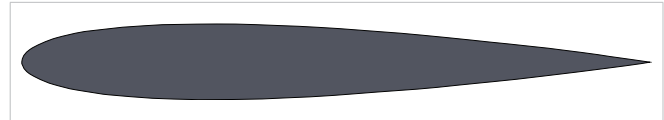


Figura 2. Perfil aerodinámico NACA 0012.

Por lo contrario, el perfil aerodinámico S2050, presentado en la [Figura 3](#), muestra valores de los coeficientes de levantamiento y de arrastre con un comportamiento bastante similar: llega cierto punto del coeficiente de levantamiento en el que el coeficiente de arrastre se reduce y, en contraparte, con valores negativos del coeficiente de levantamiento pasa lo contrario.



Figura 3. Perfil aerodinámico S2050.

C. COMPARACIÓN DE DATOS Y SELECCIÓN DEL PERFIL

Esta etapa consistió en evaluar cada perfil en dos velocidades (200 m/s y 300 m/s), utilizando una cuerda de 1.3 m, y como resultado se generaron diferentes números de Reynolds. Los datos de desempeño (coeficientes de levantamiento y arrastre) de cada perfil se obtuvieron mediante Airfoil Tools [15]. Luego, se compilaron los datos en una hoja de Microsoft Excel con la finalidad de facilitar el análisis de estos: se calculó la eficiencia aerodinámica total (Ecuación (1)) con ayuda de dichos datos recopilados y con ellos se comparó el desempeño de los perfiles. Así se llegó a la decisión de escoger uno para ser implementado en la aeronave.

$$\text{eficiencia aerodinámica total} = \frac{C_L}{C_{DT}} \quad (1)$$

donde C_L = coeficiente de levantamiento y C_{DT} = coeficiente de arrastre total, ambos proporcionados por Airfoil Tools.

Para la comparación se utilizaron 10 datos de cada tipo de perfil, con los mismos ángulos de ataque para cada uno y la misma velocidad (200 m/s).

Como se observa en la [Tabla 1](#), al comparar el perfil alar, NACA 0012 es el que nos muestra un mejor desempeño, considerando las necesidades de nuestra aeronave. Por ello, este fue seleccionado para llevar a cabo el prototipo correspondiente. Se descartó el perfil S2050, dada su baja eficiencia aerodinámica y alto coeficiente

de arrastre. Mientras que, por otra parte, el perfil NACA 2412 no se seleccionó debido a su gran variabilidad y gran rango de valores que presenta en la eficiencia aerodinámica. Se optó por el perfil NACA 0012 debido

a las necesidades de la aeronave: mayor levantamiento, mejor eficiencia aerodinámica (entre los perfiles propuestos) y menor variación en esta.

TABLA 1
COMPARACIÓN DE LOS PERFILES PROPUESTOS

AOA	NACA 2412			S2050			NACA 0012		
	CL	CD	EFICIENCIA AERODINÁMICA	CL	CD	EFICIENCIA AERODINÁMICA	CL	CD	EFICIENCIA AERODINÁMICA
7°	0.9886	0.01195	82.72803347	0.9739	0.01206	80.75456053	0.7843	0.01041	75.34101825
7.5°	1.0133	0.01228	82.51628664	1.0244	0.01291	79.3493416	0.8492	0.01088	78.05147059
8°	1.0858	0.01293	83.97525135	1.0749	0.01367	78.63204097	0.9138	0.01137	80.36939314
8.5°	1.1341	0.01354	83.75923191	1.1239	0.01459	77.03221385	0.9683	0.01192	81.23322148
9°	1.1807	0.01426	82.79803647	1.1716	0.0156	75.1025641	1.0138	0.01238	81.8901454
9.5°	1.2271	0.01494	82.1352075	1.2175	0.01676	72.64319809	1.059	0.01298	81.58705701
10°	1.2709	0.01577	80.58972733	1.259	0.01837	68.53565596	1.1056	0.01351	81.83567728
10.5°	1.3144	0.01654	79.46795647	1.2995	0.01994	65.17051153	1.1519	0.0142	81.11971831
11°	1.3557	0.01738	78.00345224	1.34	0.02133	62.82231599	1.1994	0.01484	80.82210243
11.5°	1.3909	0.0184	75.5923913	1.3786	0.02278	60.51799824	1.2457	0.0156	79.8525641

Siglas: AOA: ángulo de ataque; CL: coeficiente de levantamiento; CD: coeficiente de arrastre.

Las Figuras 4, 5 y 6 presentan una comparación visual del desempeño de los perfiles aerodinámicos propuestos. Estas gráficas muestran cómo el perfil NACA 0012 ofrece menor variabilidad en su eficiencia aerodinámica, en comparación con los NACA 2412 y S2050.

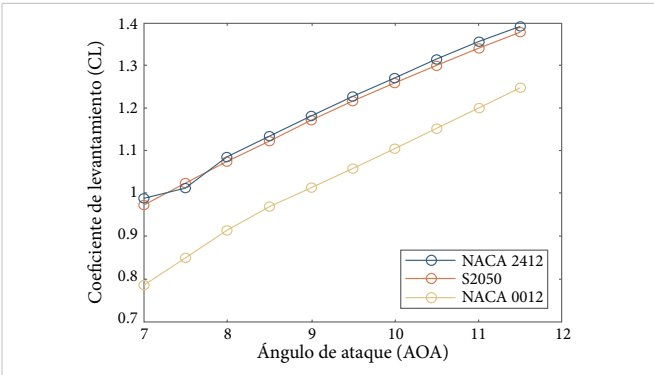


Figura 4. Comparación de coeficientes de levantamiento de los perfiles propuestos. Las gráficas de las Figuras 4-6 se hicieron mediante Matlab y los códigos utilizados se encuentran en los anexos.

Al realizar una comparación de los coeficientes de levantamiento contra el ángulo de ataque, presentada en la Figura 4, se observa los perfiles NACA 2412 y S2050 muestran un alto coeficiente de levantamiento, no obstante, el perfil NACA 2412 es ligeramente variable en comparación al S2050, mientras que el perfil NACA

0012 presenta un menor coeficiente de levantamiento, pero con un comportamiento más constante.

En la comparación de coeficientes de arrastre contra el ángulo de ataque, expuesta en la Figura 5, se aprecia que el perfil S2050 muestra un alto coeficiente de arrastre y cómo este se eleva conforme el ángulo de ataque lo hace. Por el contrario, los perfiles NACA 2412 y NACA 0012 presentan bajos coeficientes de arrastre, sin cambios violentos en su comportamiento. Dado que el perfil NACA 0012 tiene un coeficiente de arrastre menor, se presume que mejoraría la eficiencia de la aeronave.

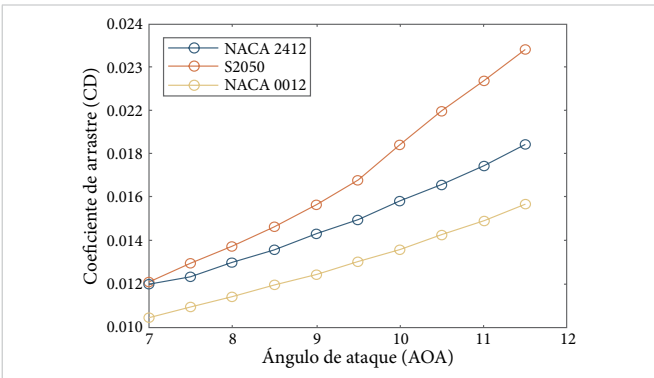


Figura 5. Comparación de coeficientes de arrastre de los perfiles propuestos.

Al comparar la eficiencia aerodinámica en función del ángulo de ataque (Figura 6), se observa cómo el perfil NACA 0012 presenta un mejor desempeño, pues su comportamiento es menos variable respecto a los otros dos perfiles, mientras que el NACA 2412 y el S2050 manifiesta un desempeño en decadencia.

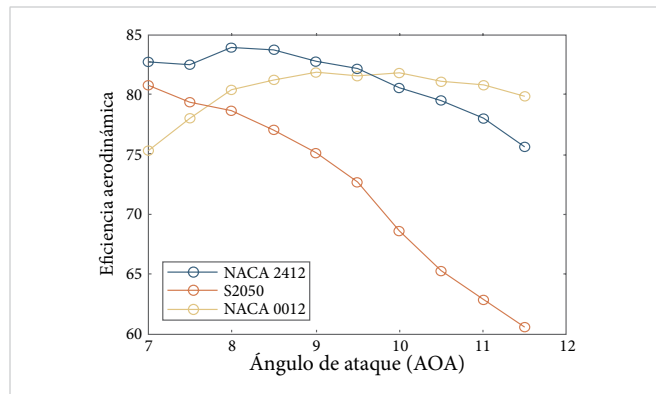


Figura 6. Comparación de eficiencia aerodinámica de los perfiles propuestos.

Como se mencionó con anterioridad, se seleccionó el perfil aerodinámico NACA 0012 en base a su bajo coeficiente de arrastre y a su eficiencia aerodinámica menos variable. Aun cuando el coeficiente de levantamiento es menor al de los otros dos perfiles propuestos, el resto de sus características representan una ventaja al aplicarse en la aeronave a estudiar.

C. GENERACIÓN DEL PERFIL AERODINÁMICO MEDIANTE CAD Y CFD

Después de seleccionar el perfil aerodinámico, se realizó un moldeado 3D del mismo mediante el software SolidWorks. Para continuar, el archivo se guardó con la extensión *.igs para así no tener inconvenientes al ser importada al software que se utilizaría para las pruebas por técnicas de dinámica de fluidos computacionales, en este caso, ANSYS Workbench 2025 R1 versión estudiantil, en el cual se trabajaría mediante su función Fluid Flow (Fluent).

Como primer paso, tras importar la geometría, esta se editó en DesignModeler (Figura 7), donde se creó una escala con factor 0.2, dado que la versión del software lo requería. También se hizo una rotación en la parte del elevador del estabilizador horizontal, lo que permitiría la manipulación del ángulo de este. Se agregó un cerco de 0.1 m del eje Y en ambos sentidos y 0.15 m de los ejes X y Z, en ambos sentidos, para crear las condi-

ciones de un túnel de viento, y se creó una booleana de sustracción.

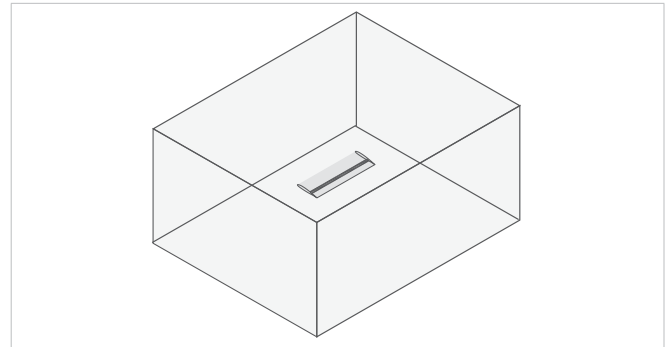


Figura 7. Geometría en el módulo de DesignModeler de ANSYS.

Posteriormente, se insertó un mallado específico tipo hexaedro dominante (Figura 8) en todo el cuerpo, lo cual generó 138 188 nodos y 169 698 elementos. Luego, se pasó esta geometría a la función de *fluent*, en donde se agregaron las condiciones de frontera y se procesó el cuerpo por medio de un modelo de flujo laminar, obteniendo así los resultados pertinentes.

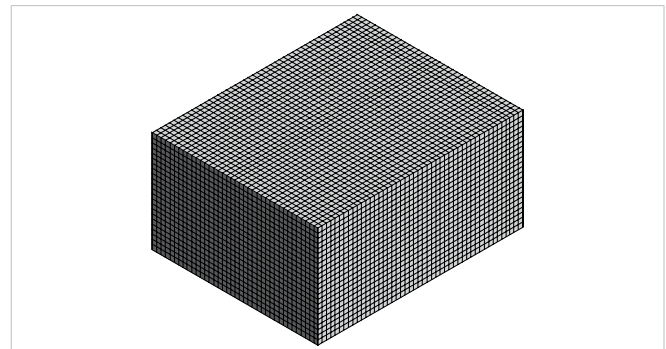


Figura 8. Mallado específico tipo hexaedro dominante aplicado en la geometría.

Dichas condiciones de frontera mencionadas se obtienen en base al principio de similitud de flujo [1]. Los flujos son dinámicamente similares si los patrones de líneas de corriente son similares, las distribuciones de la relación de condiciones a través del flujo son las mismas al comparlas con coordenadas adimensionales y si las fuerzas de coeficientes son iguales. Todo esto enfocado en dos parámetros principales: el número de Reynolds y el número Mach.

Se buscó tener las condiciones reales que se muestran en la Tabla 2, teniendo como objetivo un vuelo a alturas de 150 metros sobre el nivel de Ciudad Juárez, es decir, 1281 metros sobre el nivel del mar. Estas condiciones

reales se basaron en [1] y para su obtención fue necesario interpolar.

TABLA 2
CONDICIONES DE FRONTERA REALES A UNA ALTURA
DE 1281 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

ASPECTO	DIMENSIÓN REAL
Cuerda (cm)	20
Velocidad (m/s)	15
Temperatura (°K)	279.8335
Presión (Pa)	86 856.97
Densidad (kg/m ³)	1.081333

Se utilizó el principio de similitud de flujo para obtener las condiciones de frontera que se usarían en las pruebas computacionales de flujo a escala, regido por las fórmulas de número Mach y número de Reynolds, con ayuda de la relación entre cuerdas, de donde se tienen la Ecuación (2) y Ecuación (3).

$$M_1 = \frac{V_1}{a_1} \propto \frac{V_1}{\sqrt{T_1}} \quad (2)$$

$$M_2 = \frac{V_2}{a_2} \propto \frac{V_2}{\sqrt{T_2}} \quad (3)$$

donde las propiedades de la Ecuación (2), con subíndice 1, pertenecen a las condiciones reales, mientras que las propiedades de la Ecuación (3), con subíndice 2, están ligadas a las condiciones escaladas, por lo que se obtiene la Ecuación (4).

$$\frac{V_1}{\sqrt{T_1}} = \frac{V_2}{\sqrt{T_2}} \quad (4)$$

Con esto, se tiene lo presentado en la Ecuación (5).

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad (5)$$

Con este fin, es necesario contar con una temperatura para las condiciones escaladas, por lo que se propuso 288.15 °K, con lo que se procedió a la Ecuación (6), dando como resultado la velocidad a escala.

$$V_2 = \frac{15 \text{ m}}{\sqrt{\frac{288.15 \text{ °K}}{279.8335 \text{ °K}}}} = 15.22126401 \text{ m/s} \quad (6)$$

Después, con ayuda del número de Reynolds se tiene las Ecuaciones (7) y (8).

$$R_1 = \frac{\rho_1 V_1 c_1}{\mu_1} \propto \frac{\rho_1 V_1 c_1}{\sqrt{T_1}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{\rho_2 V_2 c_2}{\mu_2} \propto \frac{\rho_2 V_2 c_2}{\sqrt{T_2}} \quad (8)$$

Al despejar, se tiene las Ecuaciones (9) y (10).

$$\frac{\rho_1 V_1 c_1}{\sqrt{T_1}} = \frac{\rho_2 V_2 c_2}{\sqrt{T_2}} \quad (9)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \left(\frac{c_1}{c_2} \right) \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad (10)$$

Así, sabiendo que $M_1 = M_2$, se obtiene la Ecuación (11).

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (11)$$

Al tener una relación entre cuerdas de 5 unidades, se da la Ecuación (12), mientras que, con ayuda de la ecuación para un gas ideal, se presenta la Ecuación (13), la cual, al ser despejada, da como resultado la presión a escala en la Ecuación (14).

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{c_1}{c_2} = 5 \quad (12)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\rho_2 T_2}{\rho_1 T_1} = 5 \left(\frac{288.15 \text{ °K}}{279.8335 \text{ °K}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 5.148597291$$

$$\begin{aligned} p_2 &= (5.148597291)p_1 \\ &= (5.148597291)(86\,856.97) \text{ Pa} \\ &= 447\,911.56 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (14)$$

Con la Ecuación (12), también es posible obtener la densidad a escala, como se muestra en la Ecuación (15).

$$\begin{aligned} p_2 &= 5(p_1) = 5(1.0813333 \text{ kg/m}^3) \\ p_2 &= 5.406665 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (15)$$

Dadas todas las ecuaciones resueltas con anterioridad, en la [Tabla 3](#) se observan las condiciones de frontera a escala que fueron utilizadas en la simulación CFD.

TABLA 3
CONDICIONES DE FRONTERA CON UN FACTOR DE
ESCALA 0.2

ASPECTO	DIMENSIÓN ESCALADA
Cuerda (cm)	4
Velocidad (m/s)	15.221264
Temperatura (°K)	288.15
Presión (Pa)	4 471 911.56
Densidad (kg/m ³)	5.406665

Para el elevador al que se le agregaron *winglets* se realizó el mismo proceso con iguales condiciones y en la parte de DesignModeler se utilizaron exactamente las mismas operaciones que con elevador sin *winglet*, como se muestra en la [Figura 9](#).

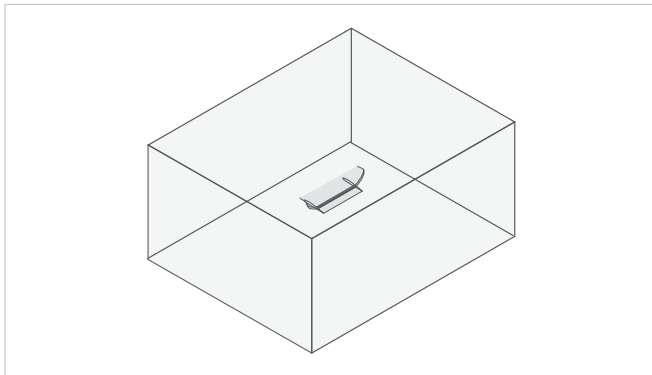


Figura 9. Geometría con *winglets* en el módulo de DesignModeler de ANSYS.

Por otra parte, en el proceso de mallado se usó un mallado automático ([Figura 10](#)), el cual generó 103 284 nodos y 575 783 elementos.

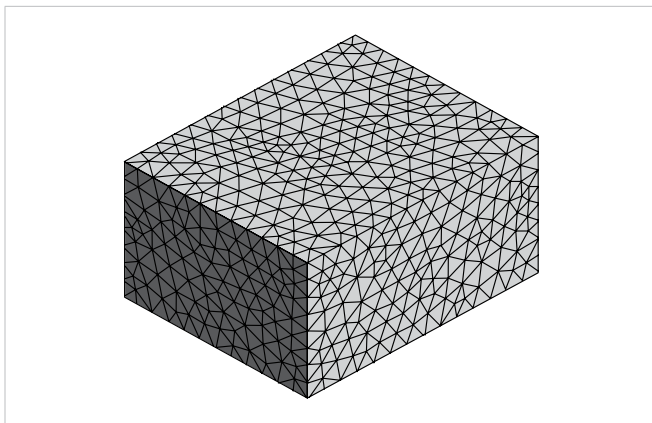


Figura 10. Mallado automático aplicado en la geometría con *winglets*.

Después de obtener las condiciones de frontera, se agregaron las variables de salida que se busca obtener en ambos perfiles: coeficiente de levantamiento, coeficiente de arrastre, levantamiento y arrastre, todos ellos evaluados en el sólido.

Por medio de la opción de parámetros, se varió el ángulo de ataque para así tener registro del comportamiento de la pieza a distintos ángulos, con lo que se verificaría cuál de los ángulos de ataque para el elevador es el más satisfactorio dadas las necesidades de la aeronave a estudiar.

Con el fin de corroborar los datos obtenidos, se realizó la simulación del perfil aerodinámico seleccionado (NACA 0012 con *winglets*), con aquellos ángulos de ataque más y menos favorables, en un software distinto (SolidWorks 2024 versión estudiantil). Para ello se utilizaron las mismas condiciones previamente presentadas en la [Tabla 3](#), pues también se recurrió una escala de 0.2 en todo el cuerpo.

Tras tener la geometría importada en el software, la cual fue modificada cada cambio de ángulo de ataque, se le aplicó la escala y las condiciones de frontera pertinentes: se agregó el tipo de gas (aire), así como temperatura y presión. También se le añadieron paredes de 0.1 m en todos los ejes, tanto positivos como negativos, como límites para hacer la simulación y, como siguiente paso, se agregó un mallado automático a cada sólido. En la [Tabla 4](#) se muestran el número de celdas que se crearon con dicho mallado, dando un promedio de 73 804.

TABLA 4
CELAS CREADAS PARA EL SÓLIDO CON DISTINTOS
ÁNGULOS DE ATAQUE

AOA	CELAS CREADAS
15	88 476
13	74 149
10	75 460
-10	69 208
-13	73 514
-15	62 014

Como ejemplo del mallado y encapsulado de la geometría dentro del software, en las [Figuras 11](#) y [12](#) se muestran dichos pasos, utilizando la geometría con un ángulo de ataque de 0°.

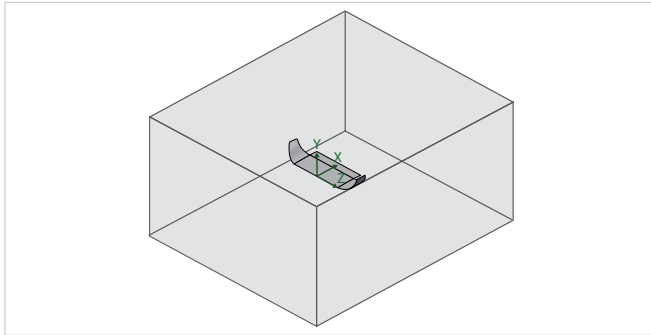


Figura 11. Encapsulado de la geometría en SolidWorks.

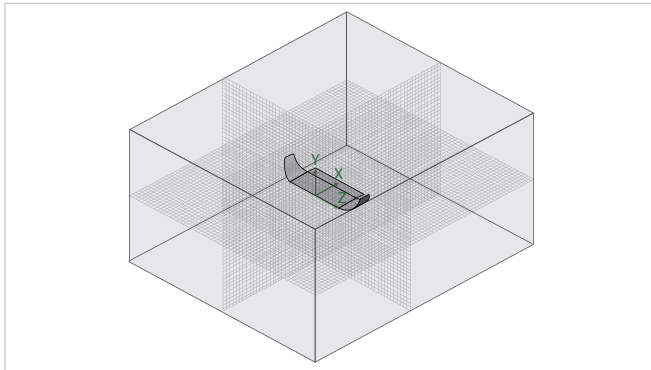


Figura 12. Mallado automático a la geometría en SolidWorks.

En la simulación hecha por medio de SolidWorks los resultados para levantamiento y arrastre fueron dados en Newtons, por lo que se tuvieron que realizar los cálculos oportunos para llegar a los coeficientes y, de la misma forma, a la eficiencia aerodinámica. Para ello, se hizo uso de las Ecuación (16) y Ecuación (17):

$$C_L = \frac{L}{q_\infty S} \quad (16)$$

donde L corresponde al levantamiento, q_∞ a la presión dinámica y S al área de la superficie alar.

$$C_D = \frac{D}{q_\infty S} \quad (17)$$

donde D corresponde al arrastre, q_∞ a la presión dinámica y S al área de la superficie alar.

Para la calcular la presión dinámica, se utilizó la Ecuación (18), de la cual, al ser sustituida con los valores correspondientes, se obtuvo la Ecuación (19).

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2 \quad (18)$$

donde ρ_∞ representa la densidad y v_∞ la velocidad.

$$q_\infty = \frac{1}{2} (5.406665 \text{ kg/m}^3) (15.221264 \text{ m/s})^2 \quad (19)$$

$$q_\infty = 626.3266665 \text{ Pa}$$

Y para el cálculo de área de la superficie se utilizó la Ecuación (20) que al ser sustituida se generó la Ecuación (21).

$$S = c * a \quad (20)$$

donde c representa la longitud de la cuerda y a la longitud de la envergadura que, al ser un perfil finito, resultó de 0.12 m.

$$S = (0.04 \text{ m}) * (0.12 \text{ m}) = 0.0048 \text{ m}^2 \quad (21)$$

Con esto planteado, se logró obtener con certeza los coeficientes necesarios para el estudio, dadas las fuerzas de levantamiento y arrastre. Con ellos, también se realizó una comparación de métodos utilizados.

Cabe resaltar que se realizaron las simulaciones por medio de un modelo de flujo laminar, debido al número de Reynolds de la aeronave real. Al tener la formula del número de Reynolds (Ecuación (22)) y con base en las condiciones reales de vuelo a las que la aeronave se someterá, es decir, aquellas a 1281 m sobre el nivel del mar, se tiene un número de Reynolds dentro del régimen de flujo laminar para perfiles aerodinámicos.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (22)$$

donde la ρ es densidad, V velocidad) y L dimensión lineal, en este caso, longitud de cuerda, que se presentan en la [Tabla 2](#), mientras que μ representa la viscosidad dinámica, la cual se obtuvo con ayuda de las tablas publicadas en [16] y la interpolación de los datos que estas proporcionan. Al sustituir, se tiene la Ecuación (23).

$$Re = \frac{(1.081333 \text{ kg/m}^3)(15 \text{ m/s})(0.2 \text{ m})}{(1.7620808 \times 10^{-5} \text{ kg/m*s})} \quad (23)$$

$$Re = 184\,100.5307$$

Se obtiene así un valor de número de Reynolds de 184 100.5307. Este, de acuerdo con [17], está dentro del régimen de flujo laminar, pues expone que, para perfiles aerodinámicos, el flujo permanece laminar cuando el número de Reynolds es menor a 500 000.

Asimismo, se llevó a cabo un estudio independiente para demostrar que los resultados de los coeficientes de levantamiento y arrastre no cambian significativamente con el refinamiento o engrosamiento de la malla. Al tener una malla base con un tamaño de elemento de 29.265 mm, se realizaron pruebas con un mallado más fino y otras con uno más grueso, agregando y restando alrededor de un 50 % del tamaño de la malla. Para dichas pruebas, se obtuvieron los números de elementos y nodos que presentan en la [Tabla 5](#).

TABLA 5
COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE ELEMENTOS Y NODOS ENTRE DISTINTOS TAMAÑOS DE ELEMENTO DE LA MALLA

MALLA	TAMAÑO DE ELEMENTO	NÚMERO DE ELEMENTOS	NÚMERO DE NODOS
Fina	15 mm	845 021	152 587
Base	29.265 mm	575 783	103 284
Gruesa	45 mm	416 124	74 714

Con ello, se corrieron distintas simulaciones para obtener los coeficientes de levantamiento y arrastre, donde, al compararlos, se expondría la poca variación entre ellos, haciendo así de la malla base una opción pertinente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante CFD se presentan en la [Tabla 6](#), haciendo una comparación del coeficiente de levantamiento (CL), coeficiente de arrastre (CD), con su ángulo de ataque (AOA) correspondiente, así como con su eficiencia aerodinámica (EA).

TABLA 6
COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE CFD: CL, CD, EA vs. AOA PARA EL ELEVADOR SIN WINGLETS

AOA	CL	CD	EA
15	4.16×10^{-4}	8.53×10^{-5}	4.88
13	3.67×10^{-4}	7.43×10^{-5}	4.934700113
11	3.21×10^{-4}	6.63×10^{-5}	4.834389875
10	3.06×10^{-4}	6.22×10^{-5}	4.911177131
9	2.71×10^{-4}	5.83×10^{-5}	4.658933081
8	2.26×10^{-4}	5.34×10^{-5}	4.228369771
7	2.29×10^{-4}	5.17×10^{-5}	4.43500526
5	1.52×10^{-4}	4.54×10^{-5}	3.336782594
3	1.02×10^{-4}	4.21×10^{-5}	2.423168989

TABLA 6 (CONT.)
COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE CFD: CL, CD, EA vs. AOA PARA EL ELEVADOR SIN WINGLETS

AOA	CL	CD	EA
1	3.57×10^{-5}	3.95×10^{-5}	0.906006328
0	-3.28×10^{-6}	3.57×10^{-5}	-0.091914684
-1	-3.64×10^{-5}	3.63×10^{-5}	-1.001958628
-3	-1.02×10^{-4}	4.04×10^{-5}	-2.529540209
-5	-1.67×10^{-4}	4.60×10^{-5}	-3.626763732
-7	-2.30×10^{-4}	5.08×10^{-5}	-4.5240
-8	-2.26×10^{-4}	5.38×10^{-5}	-4.196785443
-9	-2.77×10^{-4}	5.82×10^{-5}	-4.759547873
-10	-3.07×10^{-4}	6.26×10^{-5}	-4.914080112
-11	-3.20×10^{-4}	6.47×10^{-5}	-4.948548343
-13	-3.68×10^{-4}	7.46×10^{-5}	-4.940023257
-15	-4.16×10^{-4}	8.48×10^{-5}	-4.900617301

Para una mejor comprensión de dichos resultados, estos se exponen en la [Figura 13](#) (el código utilizado se encuentra en los [anexos](#)).

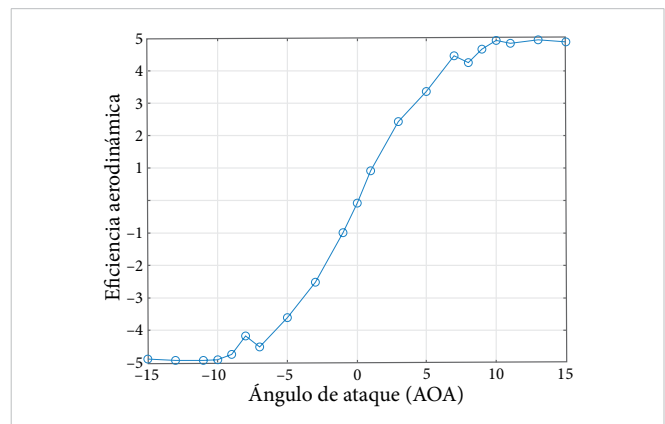


Figura 13. Comparación de la eficiencia aerodinámica vs. AOA con los datos obtenidos mediante CFD para elevador sin winglet.

En lo que corresponde al elevador con *winglets*, se obtuvieron los resultados de la [Tabla 7](#) al comparar sus coeficientes y la eficiencia aerodinámica.

TABLA 7
COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE CFD: CL, CD, E. A. vs. AOA PARA EL ELEVADOR CON WINGLETS

AOA	CL	CD	E. A.
15	2.82×10^{-4}	6.67×10^{-5}	4.222813103
13	0.000253188	6.11×10^{-5}	4.143105269
11	0.000215988	5.46×10^{-5}	3.954739612

TABLA 7 (CONT.)
COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE CFD:
CL, CD, EA vs. AOA PARA EL ELEVADOR CON WINGLETS

AOA	CL	CD	EA
10	0.000204242	5.19×10^{-5}	3.932911807
9	0.000181916	4.91×10^{-5}	3.707228978
8	0.000168337	4.66×10^{-5}	3.614643505
7	0.000147282	4.41×10^{-5}	3.342361258
5	0.000106994	3.98×10^{-5}	2.689738153
3	7.04×10^{-5}	3.65×10^{-5}	1.92813243
1	2.77×10^{-5}	3.41×10^{-5}	0.812144438
0	9.32×10^{-6}	3.36×10^{-5}	0.277504598
-1	-1.13×10^{-5}	3.40×10^{-5}	-0.332295562
-3	-5.30×10^{-5}	3.62×10^{-5}	-1.463599402
-5	-9.25×10^{-5}	3.94×10^{-5}	-2.347029567
-7	-0.000130592	4.35×10^{-5}	-3.00
-8	-0.000149429	4.58×10^{-5}	-3.265131116
-9	-0.000165202	4.84×10^{-5}	-3.411354488
-10	-0.00018277	5.11×10^{-5}	-3.577335928
-13	-0.000232046	6.01×10^{-5}	-3.859981434
-15	-0.000269788	6.64×10^{-5}	-4.06080595

Para la mejor interpretación de estos, se generó la gráfica que se observa en la [Figura 14](#) (código en [anexos](#)).

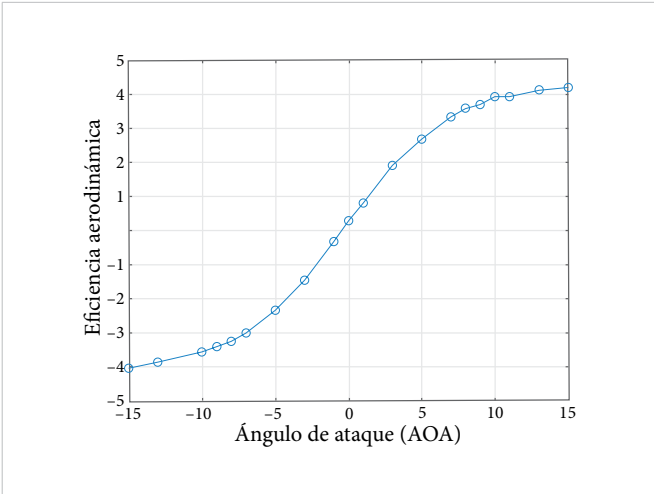


Figura 14. Comparación de la eficiencia aerodinámica del perfil NACA0012 vs. AOA con los datos obtenidos mediante CFD para elevador con winglet.

Como se mencionó anteriormente, en la comprobación mediante un segundo software (SolidWorks), se obtuvieron los datos de fuerzas de levantamiento y arrastre, por lo que fue necesario calcular los coeficientes. En la [Tabla 8](#) se muestran los resultados de la segunda simulación, tanto en Newtons como en forma de coeficiente, con sus respectivas eficiencias aerodinámicas y ángulos de ataque.

TABLA 8
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SEGUNDA SIMULACIÓN EN LOS ÁNGULOS DE ATAQUE SELECCIONADOS

AOA	LEVANTAMIENTO (N)	ARRASTRE (N)	CL	CD	EA
15	0.617	0.131	0.20523103	0.043574173	4.709923664
13	0.37	0.182	0.123072092	0.060538164	2.032967033
10	0.216	0.126	0.071847492	0.041911037	1.714285714
-10	-0.464	0.154	-0.154339056	0.051224601	-3.012987013
-13	-0.514	0.176	-0.17097042	0.058542401	-2.920454545
-15	-0.588	0.209	-0.195584839	0.069519101	-2.813397129

Lo anterior se evaluó solo en los ángulos de ataque con mejor y peor comportamiento de aquellos evaluados con anterioridad, con el fin de tener una comprobación de los resultados obtenidos mediante ANSYS.

Los resultados mencionados proporcionan la validación de la comparación realizada en un inicio, pues el perfil aerodinámico NACA 0012, siendo el seleccionado para ser utilizado en una aeronave experimental no

tripulada destinada al reconocimiento y exploración de áreas reducidas, representa un desempeño grato respecto a las condiciones a las que se espera volar la aeronave.

A continuación, en la [Tabla 9](#) se muestra una comparación con las variables de mayor interés durante la investigación, con sus respectivos ángulos de ataque, para cada uno de los métodos utilizados.

TABLA 9
COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS SELECCIONADOS

AOA	VARIABLE ANALIZADA	MÉTODO A (ANSYS)	MÉTODO B (SOLIDWORKS)	VARIANZA MÍNIMA ESPERADA	MEJOR MÉTODO
15	Eficiencia aerodinámica	4.2228	4.709923664	± 0.15	A
	Velocidad (m/s)	17.45	17.827	± 0.002	A
	Presión (Pa)	4.30×10^6	445 742.04	$\pm 0.01 \times 10^6$	A
13	Eficiencia aerodinámica	4.1431	2.032967033	± 0.15	A
	Velocidad (m/s)	17.4	17.139	± 0.002	A
	Presión (Pa)	4.54×10^6	446 901.84	$\pm 0.01 \times 10^6$	A
10	Eficiencia aerodinámica	3.9329	1.714285714	± 0.15	A
	Velocidad (m/s)	16.18	17.002	± 0.002	A
	Presión (Pa)	4.86×10^6	446 986.61	$\pm 0.01 \times 10^6$	A
-10	Eficiencia aerodinámica	-3.5773	-3.01298701	± 0.15	A
	Velocidad (m/s)	17.15	17.1955	± 0.002	A
	Presión (Pa)	4.90×10^6	446 886.93	$\pm 0.01 \times 10^6$	A
-13	Eficiencia aerodinámica	-3.8599	-2.92045455	± 0.15	A
	Velocidad (m/s)	17.28	16.33	± 0.002	A
	Presión (Pa)	4.51×10^6	446 956.56	$\pm 0.01 \times 10^6$	A
-15	Eficiencia aerodinámica	-4.0608	-2.81339713	± 0.15	A
	Velocidad (m/s)	17.42	17.1885	± 0.002	A
	Presión (Pa)	4.22×10^6	447 036.01	$\pm 0.01 \times 10^6$	A

A partir de esta comparación, se identifican diferencias significativas entre los métodos analizados, destacando el método A (ANSYS Workbench) como el más adecuado. Esto se atribuye no solo a la mayor estabilidad de los resultados obtenidos, sino también a una definición más precisa de las condiciones de frontera y del malla. Asimismo, a diferencia del método B (SolidWorks), en el A se incorporó la condición de no deslizamiento, lo que contribuye a una representación más realista del fenómeno estudiado.

De igual forma, se justifica que se haya optado por el modelo de flujo laminar estacionario porque tiene un número de Reynolds menor a 500 000 y, por tanto, se encuentra dentro de los parámetros para que se utilice. Este régimen es adecuado debido a que la capa límite permanece laminar sobre la mayor parte de la superficie y también porque no se detectan fluctuaciones turbulentas que resulten significativas, es decir, el flujo se mantiene ordenado y predecible.

Sin embargo, esto puede traer consigo limitaciones, por ejemplo, que este modelo no logra capturar fenómenos de transición que podrían ocurrir cerca del borde de sa-

lida o en ciertos ángulos poco favorables o que presenta menos precisión en la predicción de separación del flujo a la superficie y, si se requiere una mayor velocidad que indique el aumento significativo del número de Reynolds ($Re > 500\,000$), sería necesario cambiar a un modelo turbulento para obtener resultados más precisos.

Por otra parte, el estudio independencia de malla probó que es adecuado el uso del mallado base para llevar a cabo las simulaciones de vuelo. En la [Tabla 10](#) se presentan la comparación de los resultados del coeficiente de levantamiento con las distintas mallas (se agregó también la varianza), mientras que en la [Figura 15](#) se muestran dichos resultados del coeficiente de levantamiento.

TABLA 10
ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA: COEFICIENTE DE LEVANTAMIENTO

AOA	MALLA			VARIANZA
	FINA	BASE	GRUESA	
15	2.89×10^{-4}	2.82×10^{-4}	2.64×10^{-4}	1.61728×10^{-10}
11	0.00021415	0.000215988	0.000187923	2.46437×10^{-10}
10	0.000204701	0.000204242	0.000174743	2.9464×10^{-10}
9	0.00018235	0.000181916	0.000193401	4.23709×10^{-11}

TABLA 10 (CONT.)
ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA: COEFICIENTE DE
LEVANTAMIENTO

AOA	MALLA			VARIANZA
	FINA	BASE	GRUESA	
8	0.000168114	0.000168337	0.000181178	5.59319×10^{-11}
5	1.10×10^{-4}	0.000106994	9.13×10^{-5}	1.03546×10^{-10}
1	2.95×10^{-5}	2.77×10^{-5}	4.90×10^{-5}	1.3896×10^{-10}
0	9.51×10^{-6}	9.32×10^{-6}	2.85×10^{-5}	1.21055×10^{-10}
-1	-1.27×10^{-5}	-1.13×10^{-5}	6.80×10^{-6}	1.18546×10^{-10}
-5	-9.32×10^{-5}	-9.25×10^{-5}	-7.35×10^{-5}	1.25115×10^{-10}
-7	-0.0001315	-0.00013059	-0.000108189	1.74396×10^{-10}
-8	-0.00014705	-0.00014943	-0.000164499	8.95468×10^{-11}
-9	-0.00016841	-0.0001652	-0.000144898	1.62539×10^{-10}
-10	-0.0001845	-0.00018277	-0.00016415	1.27318×10^{-10}
-15	-0.00027123	-0.00026979	-0.000245955	2.01505×10^{-10}
		Promedio		1.44242×10^{-10}

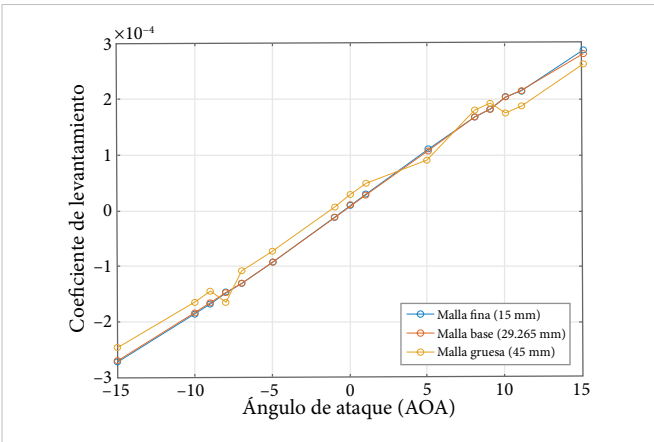


Figura 15. Convergencia de coeficientes de levantamiento entre distintos tamaños de malla.

Asimismo, en la [Tabla 11](#) se expone la comparación de los resultados del coeficiente de arrastre al aplicarse distintas mallas y la [Figura 16](#) se exponen estos datos del coeficiente de arrastre.

TABLA 11
ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA: COEFICIENTE DE
ARRASTRE

AOA	MALLA			VARIANZA
	FINA	BASE	GRUESA	
15	6.83×10^{-5}	6.67×10^{-5}	6.46×10^{-5}	3.26802×10^{-12}
11	5.50×10^{-5}	5.46×10^{-5}	5.23×10^{-5}	2.20693×10^{-12}
10	4.93×10^{-5}	5.19×10^{-5}	4.98×10^{-5}	1.94907×10^{-12}
9	4.93×10^{-5}	4.91×10^{-5}	4.98×10^{-5}	1.34464×10^{-13}

TABLA 11 (CONT.)
ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA: COEFICIENTE DE
ARRASTRE

AOA	MALLA			VARIANZA
	FINA	BASE	GRUESA	
8	4.46×10^{-5}	4.66×10^{-5}	4.75×10^{-5}	2.14848×10^{-12}
5	4.04×10^{-5}	3.98×10^{-5}	3.90×10^{-5}	4.88561×10^{-13}
1	3.44×10^{-5}	3.41×10^{-5}	3.44×10^{-5}	3.74531×10^{-14}
0	3.40×10^{-5}	3.36×10^{-5}	3.38×10^{-5}	4.77957×10^{-14}
-1	3.43×10^{-5}	3.40×10^{-5}	3.39×10^{-5}	5.14214×10^{-14}
-5	4.00×10^{-5}	3.94×10^{-5}	3.87×10^{-5}	4.32072×10^{-13}
-7	4.41×10^{-5}	4.35×10^{-5}	4.24×10^{-5}	7.84712×10^{-13}
-8	4.62×10^{-5}	4.58×10^{-5}	4.70×10^{-5}	4.03494×10^{-13}
-9	4.89×10^{-5}	4.84×10^{-5}	4.72×10^{-5}	7.69098×10^{-13}
-10	5.16×10^{-5}	5.11×10^{-5}	4.92×10^{-5}	1.56549×10^{-12}
-15	6.71×10^{-5}	6.64×10^{-5}	6.35×10^{-5}	3.61989×10^{-12}
		Promedio		1.1938×10^{-12}

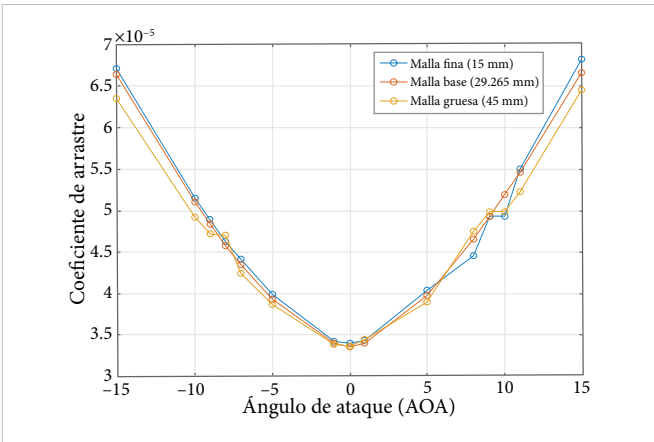


Figura 16. Convergencia de coeficientes de arrastre entre distintos tamaños de malla.

Se presume la poca varianza que existe entre los datos, así como también la grata aproximación entre estos en las gráficas ([Figuras 15](#) y [16](#)). Por esta razón se aceptó el uso de la malla base (con un tamaño de elemento de 29.265 mm) como adecuada para la simulación llevada a cabo.

En [\[18\]](#) se hace uso de CFD para evaluar el perfil NACA 0012 al tener un *flap* flexionado, como el de la geometría que se utiliza en esta investigación, y si bien no se hace la adición de *winglets* y tiene condiciones más reales y estrictas, dicho trabajo ayuda como una tercera comprobación (después de la simulación inicial y mediante la segunda simulación), pues expone cómo al aumentar el ángulo de ataque del *flap* también crece el coeficiente de levantamiento, con un comportamiento poco variable.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que el perfil aerodinámico NACA 0012 es la opción óptima para el elevador de la aeronave experimental no tripulada. Este perfil ofrece un alto rendimiento gracias a su estabilidad en eficiencia aerodinámica y bajo coeficiente de arrastre, lo que permite alcanzar velocidades de 15 m/s con menor consumo de combustible, cumpliendo así con los objetivos del estudio.

No obstante, se rechazan las hipótesis planteadas, pues to que, contrario a lo que se pensaba, el perfil seleccionado fue el NACA 0012 y no el NACA 2412. Tampoco se acertó en las hipótesis planteadas respecto al ángulo de ataque: se esperaba que su máxima eficiencia aerodinámica se presentará entre los 8° y 10° para después entrar en pérdida. Sin embargo, dados los resultados presentados con anterioridad, se puede observar que el rango de ángulos de ataque en donde se presenta una mayor eficiencia aerodinámica es cercano a los 13° y, poco después de este, comienza a entrar en pérdida.

De forma contraria, se acertó la última hipótesis, en donde se esperaba que al agregar *winglets* se obtuvieran mejores resultados: pues gracias a los *winglets* se observa una mayor estabilidad en los valores de la eficiencia aerodinámica. Se seleccionó el perfil aerodinámico con *winglets* como el más apto debido a cuestiones de estabilidad que contribuirían a la reducción en la potencia requerida, pues este es el fin que se busca con esta investigación.

Los cambios violentos o repentinos en los valores de eficiencia aerodinámica, como los que se obtienen en el perfil sin *winglets*, crean una mayor resistencia al aire, lo que provoca que sea necesario mayor empuje para su buen desempeño. También representa una reacción tardía a la adaptación de la superficie con relación a las condiciones del viento, ocasionando problemas de control para el controlador (piloto).

El perfil aerodinámico NACA 0012 presentó una eficiencia aerodinámica superior a los otros perfiles evaluados dentro del rango de ángulos de ataque de 10° a 14°; confirmando su idoneidad para el elevador de la aeronave experimental. Además, cuenta con un coeficiente de arrastre menor en un 20 %, en comparación a las alternativas, lo que contribuye al buen desempeño de la superficie de control. De la misma manera, se tiene

una eficiencia aerodinámica con poca variabilidad. Su comportamiento, de acuerdo con el ángulo de ataque, repercute directamente tanto en el régimen de ascenso como en el de descenso de la aeronave, es decir, la velocidad en la que la aeronave gana (ascenso) o pierde (descenso) altura, pues la posición de la nariz afecta directamente en estas velocidades.

Se resalta la importancia de la selección del perfil alar, siendo un paso fundamental en el diseño de una aeronave, no solo para las alas, sino también para el estabilizador horizontal. Es crucial tomar en cuenta todas las superficies de mando y control de vuelo para un óptimo desempeño de la aeronave en general, pues dicho desempeño no solo determina la calidad y seguridad del vuelo, sino también repercute en los efectos que la aeronave tiene sobre el medio ambiente: al tener una mayor estabilidad en ascenso, vuelo y descenso se reduce considerablemente el empuje que la aeronave necesita para poder realizar las fases del vuelo de forma satisfactoria, por lo que la potencia requerida también se reduce. Dicha reducción en la potencia necesaria se traduce directamente a una disminución en el combustible requerido para llevar a cabo un vuelo, lo que en consecuencia también reduce los gases dañinos que la aeronave emite.

Cabe resaltar que la afirmación en la reducción de empuje y arrastre requeridos por la aeronave se basan en las formulas de la mecánica de vuelos, presentadas a continuación:

$$T_r = \frac{W}{\frac{C_L}{C_D}} \quad (24)$$

$$P_r = T_r * V \quad (25)$$

donde, en la Ecuación (24), T_r es el empuje requerido por la aeronave, determinado por el peso de esta y la eficiencia aerodinámica, la cual, al verse en aumento, causa una disminución en el empuje requerido, mientras que en la Ecuación (25), la potencia requerida (P_r) será mayor cuando el empuje requerido y la velocidad sean mayores.

Implementar pequeños cambios en cada fase del diseño puede contribuir satisfactoriamente no solo a la finalidad del producto generado, sino también a como impactará su vida útil, con un enfoque socioambiental, en el mundo actual.

REFERENCIAS

- [1] J. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 6.^a ed. Nueva York, EUA: McGraw-Hill Education, 2017.
- [2] I. Da Riva, “Aerodinámica”, en Curso de Conferencias Sobre Tecnología Aeronáutica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, oct.-dic. 1991.
- [3] D. R. Flores, “Diseño de Perfiles Aerodinámicos”, tesis de grado, ESIME, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2006.
- [4] S. Pinzón, “El Perfil Alar y su Nomenclatura NACA”, *Ciencia y Poder Aéreo*, vol. 8, n.º 1, pp. 26-32, en.-dic. 2013.
- [5] E. G. Paipa-Sanabria, D. Gonzales y J. Coronado, “Understanding Eco-Innovation: A Critical Examination of Theories and Tools for Achieving Societal Sustainability”, *J Sustain Res*, vol. 7, n.º 1, pp. 1-25, mar. 2025, doi: [10.20900/jsr20250013](https://doi.org/10.20900/jsr20250013).
- [6] E. E. D. Delarze y E. M. P. Reyes, “Análisis Numérico de la Estabilidad y Control de una Aeronave no Tripulada”, en *Mecánica Computacional vol. XXII, ENIEF 2003 - XXII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*, 2003, pp. 1136-1148.
- [7] A. I. Carmona, *Aerodinámica y Actuaciones del Avión*, 10.^a ed. Madrid, España: Paraninfo, 2000.
- [8] S. Ravikanth *et al.*, “A Effect of Elevator Deflection on Lift Coefficient Increment”, *IJMER*, vol. 5, n.º 6, pp. 9-25, 2015.
- [9] J. Kentfield, “Lift/Drag Ratios of Aircraft with Outboard Horizontal Stabilizers”, en *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, en. 2008, pp. 1-11, doi: [10.2514/6.2008-299](https://doi.org/10.2514/6.2008-299).
- [10] I. Abrantes, A. F. Ferreira, L. B. Magalhães, M. Costa, y A. Silva, “The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions”, *Renew Energy*, vol. 223, p. 119937, 2024, doi: [10.1016/j.renene.2024.119937](https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.119937).
- [11] G. Mutanov, Z. Omirbekova, A. A. Shaikh y Z. Issayeva, “Sustainability-Driven Green Innovation: Revolutionising Aerospace Decision-Making with an Intelligent Decision Support System”, *Sustainability*, vol. 16, n.º 1, p. 41, 2024, doi: [10.3390/su16010041](https://doi.org/10.3390/su16010041).
- [12] C. Y. Goh, C. Y. Leow y R. Nordin, “Energy Efficiency of Unmanned Aerial Vehicle with Reconfigurable Intelligent Surfaces: A Comparative Study”, *Drones*, vol. 7, n.º 2, p. 98, 2023, doi: [10.3390/drones7020098](https://doi.org/10.3390/drones7020098).
- [13] R. A. Márquez, M. A. Martínez y M. J. Martínez, “Diseño de superficies de control para aeronaves radiocontroladas. Caso: prototipo clase Micro SAE Aero Design”, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n.º 104, pp. 71-82, jul. 2021, doi: [10.17533/udea.redin.20210740](https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210740).
- [14] F. Mohamad y M. Y. Yusri, “Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations of Wavy Leading Edge NACA0012 Wings”, *J. Aeronaut. Astronaut. Aviat.*, vol. 56, n.º 1S, pp. 477-485, 2024, doi: [10.6125/JoAAA.202403_56\(1S\).35](https://doi.org/10.6125/JoAAA.202403_56(1S).35).
- [15] “Airfoil Tools”. airfoiltools.com. Accedido: ag. 19, 2024. [En línea]. Disponible: <http://airfoiltools.com>
- [16] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 1.^a ed. Nueva York, NY: McGraw-Hill, 2006.
- [17] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7.^a ed. McGraw-Hill, 2011.
- [18] B. Steenwijk y P. Druetta, “Numerical Study of Turbulent Flows over a NACA 0012 Airfoil: Insights into Its Performance and the Addition of a Slotted Flap”, *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 13, p. 7890, 2023, doi: [10.3390/app13137890](https://doi.org/10.3390/app13137890).

ANEXOS

Código utilizado en la Figura 4

```
% Datos de los perfiles de elevador
AOA = [7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5];
CL_NACA2412 = [0.9886, 1.0133, 1.0858, 1.1341, 1.1807, 1.2271, 1.2709, 1.3144, 1.3557, 1.3909];
CD_NACA2412 = [0.01195, 0.01228, 0.01293, 0.01354, 0.01426, 0.01494, 0.01577, 0.01654,
```

```
0.01738, 0.0184];
Efficiency_NACA2412 = CL_NACA2412 ./ CD_NACA2412;
CL_S2050 = [0.9739, 1.0244, 1.0749, 1.1239, 1.1716, 1.2175, 1.259, 1.2995, 1.34, 1.3786];
CD_S2050 = [0.01206, 0.01291, 0.01367, 0.01459, 0.0156, 0.01676, 0.01837, 0.01994, 0.02133, 0.02278];
Efficiency_S2050 = CL_S2050 ./ CD_S2050;
CL_NACA0012 = [0.7843, 0.8492, 0.9138, 0.9683, 1.0138, 1.059, 1.1056, 1.1519, 1.1994, 1.2457];
CD_NACA0012 = [0.01041, 0.01088, 0.01137, 0.01192, 0.01238, 0.01298, 0.01351, 0.0142, 0.01484, 0.0156];
Efficiency_NACA0012 = CL_NACA0012 ./ CD_NACA0012;
% Gráfico de coeficientes de levantamiento (CL)
figure;
plot(AOA, CL_NACA2412, '-o', 'DisplayName', 'NACA 2412');
hold on;
plot(AOA, CL_S2050, '-o', 'DisplayName', 'S2050');
plot(AOA, CL_NACA0012, '-o', 'DisplayName', 'NACA 0012');
hold off;
xlabel('Ángulo de ataque (AOA)');
ylabel('Coeficiente de levantamiento (CL)');
title('Comparación de coeficientes de levantamiento');
legend('Location', 'Best');
```

Código utilizado en la Figura 5

```
% Datos de los perfiles de elevador
AOA = [7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5];
CL_NACA2412 = [0.9886, 1.0133, 1.0858, 1.1341, 1.1807, 1.2271, 1.2709, 1.3144, 1.3557, 1.3909];
CD_NACA2412 = [0.01195, 0.01228, 0.01293, 0.01354, 0.01426, 0.01494, 0.01577, 0.01654, 0.01738, 0.0184];
Efficiency_NACA2412 = CL_NACA2412 ./ CD_NACA2412;
CL_S2050 = [0.9739, 1.0244, 1.0749, 1.1239, 1.1716, 1.2175, 1.259, 1.2995, 1.34, 1.3786];
CD_S2050 = [0.01206, 0.01291, 0.01367, 0.01459, 0.0156, 0.01676, 0.01837, 0.01994, 0.02133, 0.02278];
Efficiency_S2050 = CL_S2050 ./ CD_S2050;
CL_NACA0012 = [0.7843, 0.8492, 0.9138, 0.9683, 1.0138, 1.059, 1.1056, 1.1519, 1.1994, 1.2457];
CD_NACA0012 = [0.01041, 0.01088, 0.01137, 0.01192, 0.01238, 0.01298, 0.01351, 0.0142, 0.01484, 0.0156];
Efficiency_NACA0012 = CL_NACA0012 ./ CD_NACA0012;
% Gráfico de coeficientes de arrastre (CD)
figure;
plot(AOA, CD_NACA2412, '-o', 'DisplayName', 'NACA 2412');
hold on;
plot(AOA, CD_S2050, '-o', 'DisplayName', 'S2050');
plot(AOA, CD_NACA0012, '-o', 'DisplayName', 'NACA 0012');
hold off;
xlabel('Ángulo de ataque (AOA)');
ylabel('Coeficiente de arrastre (CD)');
title('Comparación de coeficientes de arrastre');
legend('Location', 'Best');
```

Código utilizado en la Figura 6

```
% Datos de los perfiles de elevador
AOA = [7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5];
CL_NACA2412 = [0.9886, 1.0133, 1.0858, 1.1341, 1.1807, 1.2271, 1.2709, 1.3144, 1.3557, 1.3909];
CD_NACA2412 = [0.01195, 0.01228, 0.01293, 0.01354, 0.01426, 0.01494, 0.01577, 0.01654, 0.01738, 0.0184];
```

```
Efficiency_NACA2412 = CL_NACA2412 ./ CD_NACA2412;  
CL_S2050 = [0.9739, 1.0244, 1.0749, 1.1239, 1.1716, 1.2175, 1.259, 1.2995, 1.34, 1.3786];  
CD_S2050 = [0.01206, 0.01291, 0.01367, 0.01459, 0.0156, 0.01676, 0.01837, 0.01994, 0.02133,  
0.02278];  
Efficiency_S2050 = CL_S2050 ./ CD_S2050;  
CL_NACA0012 = [0.7843, 0.8492, 0.9138, 0.9683, 1.0138, 1.059, 1.1056, 1.1519, 1.1994,  
1.2457];  
CD_NACA0012 = [0.01041, 0.01088, 0.01137, 0.01192, 0.01238, 0.01298, 0.01351, 0.0142,  
0.01484, 0.0156];  
Efficiency_NACA0012 = CL_NACA0012 ./ CD_NACA0012;  
% Gráfico de eficiencia aerodinámica  
figure;  
plot(AOA, Efficiency_NACA2412, '-o', 'DisplayName', 'NACA 2412');  
hold on;  
plot(AOA, Efficiency_S2050, '-o', 'DisplayName', 'S2050');  
plot(AOA, Efficiency_NACA0012, '-o', 'DisplayName', 'NACA 0012');  
hold off;  
xlabel('Ángulo de ataque (AOA)');  
ylabel('Eficiencia aerodinámica');  
title('Comparación de eficiencia aerodinámica');  
legend('Location', 'Best');
```

Código utilizado en la Figura 13

```
% Datos de los cuatro perfiles de elevador  
AOA = [15,13,11,10,9,8,7,5,3,1,0,-1,-3,-5,-7,-8,-9,-10,-11,-13,-15];  
Efficiency_NACA0012 = [4.88E+00, 4.934700113, 4.834389875, 4.911177131, 4.658933081,  
4.228369771, 4.43500526, 3.336782594, 2.423168989, 0.906006328, -0.091914684, -1.001958628,  
-2.529540209, -3.626763732, -4.5240E+00, -4.196785443, -4.759547873, -4.914080112,  
-4.948548343, -4.940023257, -4.900617301];  
% Gráfico de eficiencia aerodinámica  
figure;  
plot(AOA, Efficiency_NACA0012, '-o','DisplayName', 'NACA 0012');  
hold on;  
hold off;  
grid on;  
xlabel('Ángulo de ataque (AOA)');  
ylabel('Eficiencia aerodinámica');  
title('Eficiencia Aerodinámica del perfil NACA0012 sin Winglets');
```

Código utilizado en la Figura 14

```
% Datos de los cuatro perfiles de elevador  
AOA = [15,13,11,10,9,8,7,5,3,1,0,-1,-3,-5,-7,-8,-9,-10,-13,-15];  
Efficiency_NACA0012 = [4.222813103, 4.143105269, 3.954739612, 3.932911807, 3.707228978,  
3.614643505, 3.342361258, 2.689738153, 1.92813243, 0.812144438, 0.277504598, -0.332295562,  
-1.463599402, -2.347029567, -3.00E+00, -3.265131116, -3.411354488, -3.577335928,  
-3.859981434, -4.06080595];  
% Gráfico de eficiencia aerodinámica  
figure;  
plot(AOA, Efficiency_NACA0012, '-o','DisplayName', 'NACA 0012');  
hold on;  
hold off;  
grid on;  
xlabel('Ángulo de ataque (AOA)');  
ylabel('Eficiencia aerodinámica');  
title('Eficiencia Aerodinámica del perfil NACA0012 con Winglets');
```

Código utilizado en la Figura 15

```
% Datos coeficientes de levantamiento  
AOA = [15,11,10,9,8,5,1,0,-1,-5,-7,-8,-9,-10,-15];
```

```
CL_MFINA = [2.89E-04, 0.000214146, 0.000204701, 0.00018235, 0.000168114, 1.10E-04, 2.95E-  
05, 9.51E-06, -1.27E-05, -9.32E-05, -0.000131504, -0.000147049, -0.000168407, -0.000184501,  
-0.000271232];  
CL_MBASE = [2.82E-04, 0.000215988, 0.000204242, 0.000181916, 0.000168337, 0.000106994,  
2.77E-05, 9.32E-06, -1.13E-05, -9.25E-05, -0.000130592, -0.000149429, -0.000165202,  
-0.00018277, -0.000269788];  
CL_MGRUESA = [2.64E-04, 0.000187923, 0.000174743, 0.000193401, 0.000181178, 9.13E-05, 4.90E-  
05, 2.85E-05, 6.80E-06, -7.35E-05, -0.000108189, -0.000164499, -0.000144898, -0.00016415,  
-0.000245955];  
% Gráfico de coeficientes de levantamiento  
figure;  
hold on;  
plot(AOA, CL_MFINA, '-o','DisplayName', 'Malla Fina (15mm)');  
plot(AOA, CL_MBASE, '-o','DisplayName', 'Malla Base (29.265mm)');  
plot(AOA, CL_MGRUESA, '-o','DisplayName', 'Malla Gruesa (45mm)');  
hold off;  
grid on;  
xlabel('Ángulo de ataque (AOA)');  
ylabel('Coeficiente de Levantamiento');  
title('Convergencia de Coeficientes de Levantamiento Entre Distintos Tamaños de Malla');  
legend('Location', 'Best');
```

Código utilizado en la Figura 16

```
% Datos coeficientes de arrastre  
AOA = [15,11,10,9,8,5,1,0,-1,-5,-7,-8,-9,-10,-15];  
CD_MFINA = [6.83E-05, 5.50E-05, 4.93E-05, 4.93E-05, 4.46E-05, 4.04E-05, 3.44E-05, 3.40E-05,  
3.43E-05, 4.00E-05, 4.41E-05, 4.62E-05, 4.89E-05, 5.16E-05, 6.71E-05];  
CD_MBASE = [6.67E-05, 5.46E-05, 5.19E-05, 4.91E-05, 4.66E-05, 3.98E-05, 3.41E-05, 3.36E-05,  
3.40E-05, 3.94E-05, 4.35E-05, 4.58E-05, 4.84E-05, 5.11E-05, 6.64E-05];  
CD_MGRUESA = [6.46E-05, 5.23E-05, 4.98E-05, 4.98E-05, 4.75E-05, 3.90E-05, 3.44E-05, 3.38E-  
05, 3.39E-05, 3.87E-05, 4.24E-05, 4.70E-05, 4.72E-05, 4.92E-05, 6.35E-05];  
% Gráfico de coeficientes de arrastre  
figure;  
hold on;  
plot(AOA, CD_MFINA, '-o','DisplayName', 'Malla Fina (15mm)');  
plot(AOA, CD_MBASE, '-o','DisplayName', 'Malla Base (29.265mm)');  
plot(AOA, CD_MGRUESA, '-o','DisplayName', 'Malla Gruesa (45mm)');  
hold off;  
grid on;  
xlabel('Ángulo de ataque (AOA)');  
ylabel('Coeficiente de Arrastre');  
title('Convergencia de Coeficientes de Arrastre Entre Distintos Tamaños de Malla');  
legend('Location', 'Best');
```

Red neuronal para la detección inteligente de residuos orgánicos: hacia una solución ambiental sostenible

Neuronal Network for Intelligent Detection of Organic Waste: Towards a Sustainable Environmental Solution

Guadalupe Navarro Enríquez^{1a}, Trinidad Reyes Portillo^{1b}, Dionisio Navarrete Baloes^{1c}, Irving Bruno López Santos^{1a}, Quetzal Elohim Bastarrachea Almodóvar^{1d}, Geu M. Puentes-Conde² 

¹ {^a Departamento de Ingeniería Eléctrica/Electrónica/Mecatrónica}, {^b Programa de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial y Logística}, {^c Programa de Ingeniería en Sistemas}, {^d Programa de Ingeniería Mecánica}, Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, Chihuahua, México

² Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

El crecimiento poblacional es un fenómeno global que, a lo largo de las últimas décadas, ha cobrado una relevancia crítica en el contexto del desarrollo económico y de la sostenibilidad ambiental. A medida que la población mundial supera los 8000 millones, las naciones enfrentan el desafío de equilibrar el crecimiento económico con la protección del medio ambiente [1]. Por ello, se desarrolló un modelo basado en redes neuronales convolucionales para residuos orgánicos. La metodología consistió en la construcción de un *dataset* con 1000 imágenes de desechos en hogares y escuelas, el entrenamiento del modelo YOLOv5x mediante el descenso de gradiente y la evaluación de métricas. En los resultados iniciales se observó un rendimiento limitado; no obstante, al incrementar el número de épocas y mejorar la calidad del *dataset*, la precisión alcanzó el 80 %. Esto evidencia la importancia de contar con imágenes de alta calidad para optimizar el aprendizaje automático, así como la necesidad de ajustes iterativos durante el entrenamiento del modelo. En conclusión, la investigación confirma la viabilidad de aplicar la visión artificial a la clasificación de residuos. El modelo se limitó a residuos orgánicos. Estos avances contribuyen al fortalecimiento de la cultura ambiental y al desarrollo de sistemas inteligentes que promuevan prácticas sostenibles en México.

PALABRAS CLAVE: residuos orgánicos; redes neuronales convolucionales; visión artificial; clasificación de residuos; YOLOv5x.

ABSTRACT

By 2025, the population was recorded at 129.7 million, and it is estimated to reach 148.2 million by 2050. This increase generates a greater demand for resources and an increase in the production of urban solid waste, the classification of which remains a challenge due to lack of knowledge and citizen interest [1]. Therefore, a convolutional neural network-based model for organic waste was developed. The methodology consisted of constructing a dataset with 1000 images of waste from homes and schools, training the YOLOv5x model using gradient descent, and evaluating metrics. Initial results showed limited performance; however, by increasing the number of epochs and improving the quality of the dataset, accuracy reached 80%. This highlights the importance of high-quality images for optimizing machine learning, as well as the need for iterative adjustments during model training. In conclusion, the research confirms the feasibility of applying computer vision to waste classification. The model was limited to organic waste. These advances help strengthen environmental culture and develop intelligent systems that promote sustainable practices in Mexico.

KEYWORDS: eco-efficient control; organic waste; convolutional neural networks; computer vision; waste classification; YOLOv5x.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Geu M. Puentes Conde

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chih., México

CORREO ELECTRÓNICO: al252030@alumnos.uacj.mx

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 19 de marzo de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



Licencia Creative Commons



I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional es un problema severo en todo el mundo. En particular, se prevé que la población mexicana continúe aumentando en décadas futuras, para alcanzar en el año 2040 un total de 144 millones 476 530 personas [2]. Aunado a esto, el consumo masivo de productos para satisfacer las necesidades de alimentación genera una gran cantidad de residuos que van a parar al relleno sanitario.

En Ciudad Juárez, Chihuahua, México, como parte de las acciones ciudadanas respecto del desecho de residuos domiciliarios, ha iniciado la separación en orgánicos e inorgánicos, buscando su aprovechamiento. De acuerdo con la información obtenida de las encuestas de percepción ciudadana en 2021, en la [Figura 1](#) se muestra que el 26.5 % de la población sí separa sus residuos, mientras que el 73.5 % no lo hace.

Existen distritos que colaboran más con la separación de residuos domiciliarios en comparación con otros, por ejemplo, los distritos 3 y 8 con 30.0 % y 30.6 %, mientras que en la mayoría de los distritos es de menos del 30 %, imposibilitando procesos de compostaje y reciclado o reúso de materiales.

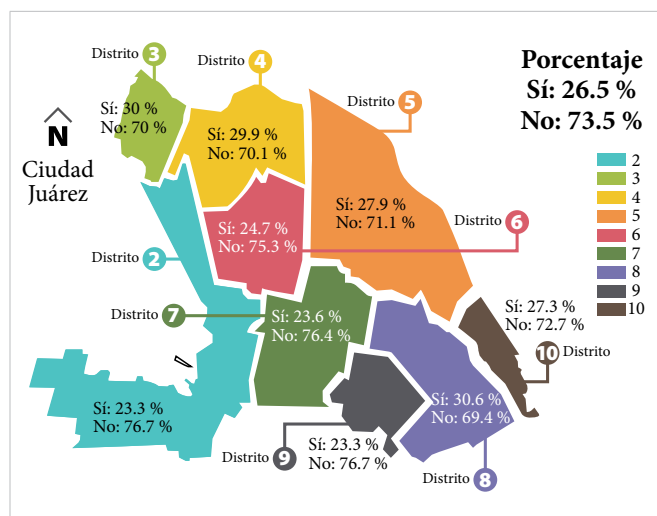


Figura 1. Distritos de reciclaje y separación. Fuente: Así Estamos Juárez, Encuesta de Percepción Ciudadana 2021.

El relleno sanitario de Ciudad Juárez consta de una macrocelda con el 45 % de capacidad libre y se tiene una proyección de otra macrocelda 3 (200 hectáreas) con capacidad de recibir 2400 toneladas diarias (comparado con las 2300 de la celda actual) y una vida útil de 15

años. Esto resulta por demás relevante, dado que se prevé un aumento del 1 % anual en cuanto a la generación de residuos sólidos para los próximos 10 años, haciendo urgente contar con un plan adecuado de residuos municipales, con visión de circularidad. Los residuos, según el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, se componen de la siguiente manera: plásticos 19.62 %, papel 5.07 %, cartón 6.06 % y metal 2.43 %, entre otros, siendo los más importantes para el presente estudio los de comida 33.07 % y los de jardinería 10.84 %.

Por ende, las recomendaciones para establecer un programa de separación de residuos deben centrarse en la adecuación del servicio de recolección por tipo de residuo, en la oferta de incentivos o en la aplicación de sanciones, entre otras medidas [3]. Por tal motivo, es importante que se fomente la cultura del manejo de residuos en cada uno de los niveles educativos, a través de las materias de desarrollo sustentable o relacionadas.

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) constituye una de las mayores preocupaciones a nivel mundial debido al impacto social y ambiental que producen. Alrededor del 50 % de los RSU está compuesto por residuos orgánicos (RO) y, actualmente, las principales prácticas de gestión de estos resultan inadecuadas, lo que favorece el avance del calentamiento global [4].

El enfoque de cero residuos tiene como finalidad evitar que no se generen estos y asegurar que la mayor parte de los materiales producidos se reutilicen, reciclen, composten o valoricen, reduciendo al mínimo los desechos que se envían a disposición final [5]. Considerando que los residuos orgánicos se podrían reducir si se tuviera conocimiento en el tema, el objetivo de la presente investigación es ayudar a la correcta clasificación para realizar el tratamiento adecuado. Una opción que debe tomarse en cuenta antes de comenzar a tratar el residuo es la separación, también conocida como segregación, aunque es un problema evidente el hecho de que las personas no saben identificar los tipos de residuos que producen.

Hoy en día, la tecnología avanza y se considera en este estudio el aprovechamiento de herramientas que faciliten la clasificación. El manejo integral de residuos urbanos no solo consiste en reciclar y reutilizar, sino también en emplear las opciones más adecuadas para su tratamiento.

A. DETECCIÓN DE OBJETOS MEDIANTE EL ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES

El aprendizaje profundo o Deep Learning (DL) es una técnica que, mediante el entrenamiento, busca lograr la toma de decisiones para la identificación de objetos. Las redes neuronales convolucionales facilitan el aprendizaje profundo, ya que extraen y procesan imágenes mediante varias capas y facilitan su clasificación e identificación.

En la revisión exhaustiva de la literatura se encontró que la identificación de imágenes no es algo nuevo, por ejemplo, en la detección de gestos de somnolencia al conducir es una buena medida para evitar accidentes [6]. Para entrenar una red neuronal en tareas de visión por computadora, es necesario disponer de un conjunto de imágenes que represente los casos de uso deseados. A cada imagen se le asigna una o más etiquetas, que indican el contenido de la imagen o las características específicas que la red debe aprender a reconocer (por ejemplo, la clase del objeto, su posición o sus puntos clave). El proceso de etiquetado consiste en anotar, manual o automáticamente, cada imagen con su información correspondiente (clase, coordenadas, etc.), generando un conjunto de datos estructurado que puede utilizarse para entrenar modelos de aprendizaje supervisado. Este proceso es crítico, ya que la calidad y precisión de las etiquetas afectan directamente al rendimiento del modelo entrenado.

B. DETECCIÓN DE OBJETOS MEDIANTE EL ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES

YOLO enfoca la detección de objetos como un problema de regresión de cajas delimitadoras separadas espacialmente y las probabilidades de clase asociadas. Una sola red neuronal predice las cajas y las probabilidades de clase directamente a partir de imágenes completas durante la evaluación. Es una familia de arquitecturas y modelos de detección de objetos entrenados previamente en el conjunto de datos COCO, y representa la investigación sobre métodos de inteligencia artificial en visión futura, que incorpora prácticas desarrolladas durante miles de horas de investigación y desarrollo.

II. METODOLOGÍA

La metodología se determinó para construir un sistema eficiente para la clasificación de residuos orgánicos

mediante visión por computadora. Para ello, se empleó un *dataset* integrado por imágenes de alta resolución descargadas de fuentes abiertas y capturadas durante la elaboración de lombricomposta en el Campus Ciudad Juárez del Tecnológico Nacional de México (Figura 2).



Figura 2. Tomates cultivados usando lombricomposta del Campus Ciudad Juárez del TecNM.

A diferencia de la literatura consultada, que solo consideraba los desechos inorgánicos, se tomaron en cuenta los desechos orgánicos, que se desestiman al momento de separar los residuos [7], [8], [9]. El proceso metodológico incluyó tres etapas principales:

1. Crear el *dataset*. Almacenar un conjunto de imágenes del objeto que se desea detectar, etiquetadas cada una, señalando el objeto a detectar.
2. Entrenamiento. Elegir el marco de aprendizaje para entrenar una red neuronal.
3. La inferencia. Poner en práctica el aprendizaje de la red neuronal en tiempo real.

B. CREACIÓN DEL DATASET

Se dividió el *dataset* en 70 % de entrenamiento, 20 % de validación y 10 % de prueba. En la Figura 3 se muestran las imágenes etiquetadas con la herramienta MakeSense.ai, lo que genera anotaciones compatibles con YOLOv5x.

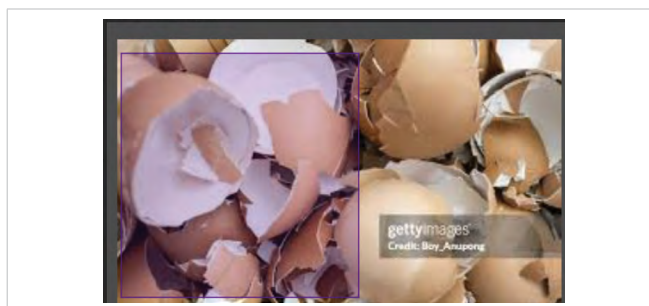


Figura 3. Etiquetado y clasificación de imágenes en MakeSense.ai

B. ENTRENAMIENTO EN GOOGLE COLAB (PYTHON)

Como muestra la [Figura 4](#), se clonó el repositorio oficial de YOLOv5 desde GitHub y se instalaron las dependencias a partir del archivo requirements.txt, que contiene todas las librerías necesarias para ejecutar y entrenar el modelo correctamente.

```
!git clone https://github.com/ultralytics/yolov5 # clone
%cd yolov5
%pip install -qr requirements.txt comet_ml # install

import torch
import utils
display = utils.notebook_init() # checks
```

Figura 4. Instalación de requerimientos en Yolo.

Se generó la ruta de la configuración del *dataset* y se creó el archivo YAML que es el encargado de indicar la dirección del conjunto de datos y de las clases [10]. Para llevar a cabo el entrenamiento de la red neuronal, se utilizó el archivo de configuración coco128.yaml, que es fundamental para definir los parámetros y rutas necesarios para la correcta ejecución del modelo. Para esto se usó el editor PyCharm. El archivo YAML fue modificado de la siguiente manera:

- Definición de clases y número de clases. Se actualizaron las clases a reconocer por el modelo, adaptando el archivo para reflejar las clases específicas del conjunto de datos utilizado. En lugar de las clases estándar del conjunto de datos COCO, se ajustó el número de clases y sus etiquetas correspondientes para adaptarse al problema de clasificación específico. Este cambio asegura que el modelo esté entrenado para detectar únicamente las clases relevantes.
- Especificación de la ruta de los datos. Se modificó la ruta del archivo comprimido data.zip, que contiene tanto las imágenes como las anotaciones del conjunto de datos. Este archivo se descomprime automáticamente al iniciar el proceso de entrenamiento. La especificación correcta de la ubicación de los datos es crucial para que la red neuronal pueda acceder a las imágenes y sus etiquetas durante la fase de entrenamiento.

C. ENTRENAMIENTO

El modelo YOLOv5x se entrenó con imágenes de 640×640 px, *batch size* de 4 y 50 épocas, utilizando el

optimizador SGD con una *learning rate* de 0.01, en Google Colab con un GPU Tesla T4. Las épocas son los ciclos de entrenamiento. Entre mayor número de épocas, mayor entrenamiento y entre mayor entrenamiento más precisa es la red. Las imágenes se agruparon en paquetes. Esto se relacionó directamente a la forma en la que aprende la red agrupando las imágenes orgánicas en un solo lote y comparando los resultados contra los resultados verdaderos mediante el método de minimización descenso del gradiente.

El entrenamiento se configuró con base en la capacidad del hardware. Estos parámetros son cruciales para el rendimiento y la efectividad del entrenamiento, y pueden mejorarse. Para la detección y clasificación de residuos orgánicos, se empleó el modelo YOLO (You Only Look Once) [11] debido a su alta eficiencia en tareas de visión por computadora en tiempo real.

La implementación se realizó en el entorno de Google Colab, aprovechando su soporte para Python y su compatibilidad con la aceleración de GPU, lo que permitió entrenar y ejecutar el modelo de forma eficiente. Se utilizó la versión del modelo YOLOv5x, desarrollada íntegramente en Python con la biblioteca PyTorch. El flujo metodológico incluyó la configuración del entorno, la carga del conjunto de datos anotado en formato YOLO, la definición de hiperparámetros, el entrenamiento del modelo y, finalmente, la evaluación mediante métricas de precisión y visualización de resultados.

El modelo YOLO utiliza el algoritmo de descenso del gradiente para optimizar los parámetros de la red neuronal durante el entrenamiento. Mediante el cálculo del error (función de pérdida) entre las predicciones del modelo y los valores reales del *dataset* anotado, se ajustan los pesos internos de la red para minimizar dicho error. Ortiz [12] refiere que Bobulski y Kubanek utilizan un vector de características basado en el gradiente para clasificar imágenes en categorías de plásticos (PS, PP, PE-HD y PET), logrando alrededor del 84 % de precisión, al separar las imágenes en canales RGB sin requerir análisis espectrales complejos.

La [Figura 5](#) muestra cómo el modelo ajusta sus parámetros iterativamente para minimizar el error, partiendo de un valor aleatorio, hasta encontrar el mejor ajuste posible mediante el algoritmo de descenso del gradiente.

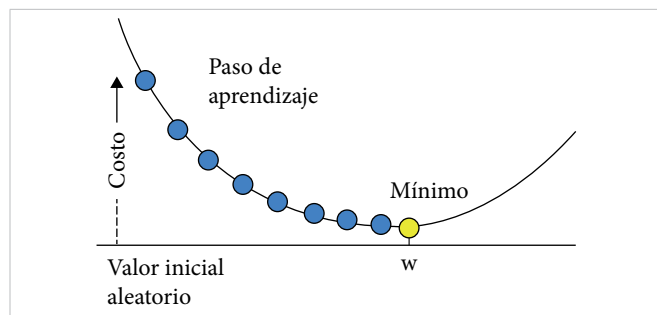


Figura 5. Entrenamiento en Google Colab.

Al concluir el entrenamiento, se evaluó el rendimiento del modelo con un conjunto de datos de prueba. El rendimiento del modelo se evaluó mediante métricas estándar: precisión, *recall* y mAP. Se observó un aumento progresivo de estas métricas durante el entrenamiento, lo que confirma la eficacia del modelo para clasificar residuos orgánicos.

D. EVALUACIÓN DEL ENTRENAMIENTO

Para el monitoreo del entrenamiento del modelo YOLO, se utilizó la herramienta TensorBoard, que se observa en la [Figura 6](#) y visualiza el comportamiento de métricas clave como la función de pérdida, precisión, recuperación y mAP a lo largo de las épocas. Esta herramienta facilitó el análisis del desempeño del modelo y permitió ajustar parámetros y detectar problemas como el sobreajuste. TensorBoard se integró directamente en el entorno de entrenamiento de Google Colab mediante los registros generados por YOLOv5x.

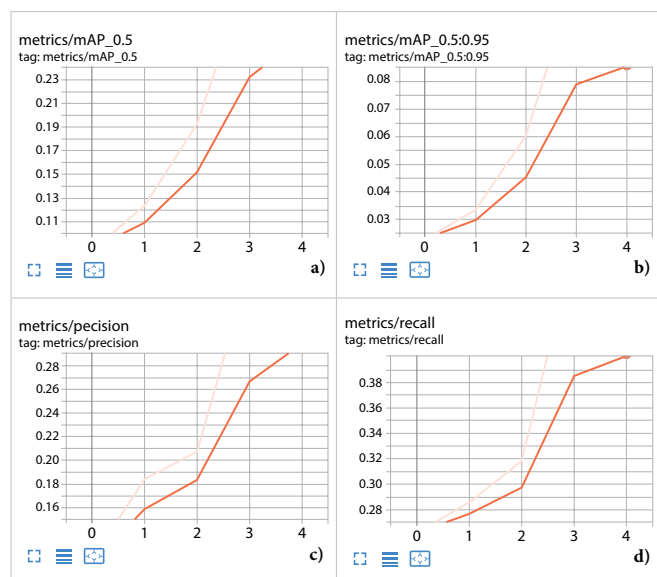


Figura 6. Evaluación del entrenamiento en Tensorboard.

Para evaluar el desempeño del modelo durante el proceso de entrenamiento, se utilizaron varias métricas estándar en tareas de detección de objetos, en particular en la clasificación de residuos orgánicos. Las métricas elegidas fueron el Mean Average Precision (mAP), la precisión (*precision*) y el recuerdo (*recall*).

1. mAP a 0.5 (*metrics/mAP_0.5*)

El mAP es una métrica que mide la precisión promedio del modelo, considerando un umbral de intersección sobre la unión (IoU) de 0.5. Este valor refleja la capacidad del modelo para identificar correctamente los residuos orgánicos, tomando en cuenta que las predicciones se consideran correctas si la superposición entre la predicción y la etiqueta real es de al menos el 50 %. La evolución de esta métrica a lo largo del tiempo se muestra en la gráfica a) de la [Figura 6](#), donde una curva ascendente indica que el modelo mejora su rendimiento en la clasificación a medida que avanza el entrenamiento.

2. mAP a 0.5:0.95 (*metrics/mAP_0.5:0.95*)

A diferencia del mAP a 0.5, esta métrica considera un rango de umbrales de IoU de 0.5 a 0.95, promediando la precisión entre dichos valores. Esta métrica es más estricta, ya que evalúa la precisión del modelo en una variedad de condiciones. En la gráfica b) de la [Figura 6](#), la curva ascendente también indica que el modelo está mejorando su capacidad para detectar residuos orgánicos con mayor precisión en un rango más amplio de umbrales.

3. Precisión (*metrics/precision*)

La precisión mide la proporción de predicciones correctas entre todas las predicciones realizadas por el modelo. En la gráfica c) de la [Figura 6](#), la curva ascendente refleja que el modelo está haciendo un número creciente de predicciones correctas, reduciendo los falsos positivos. Esto indica que el modelo está aprendiendo a identificar mejor los residuos orgánicos sin etiquetar incorrectamente objetos no orgánicos.

4. Recuerdo (*metrics/recall*)

El *recall* mide la capacidad del modelo para identificar todos los residuos orgánicos presentes en los datos. En la gráfica d) de la [Figura 6](#), la evolución de esta métrica

muestra cómo el modelo mejora su capacidad para detectar residuos orgánicos, aumentando su tasa de detección y reduciendo los falsos negativos. Un aumento en esta curva indica que el modelo está identificando con mayor precisión los residuos orgánicos en las imágenes.

E. DESCARGA DE ARCHIVO BEST.PT

Se descargó el archivo `best.pt` generado por YOLOv5x en Google Colab para realizar la inferencia y la evaluación de métricas. Para garantizar la reproducibilidad del entrenamiento y la correcta ejecución de los *scripts*, se configuró un entorno virtual de Python en el que se instalaron las dependencias necesarias indicadas en `requirements.txt`. Esto permitió ejecutar los *scripts* de validación (`val.py`) y de detección (`detect.py`) sin conflictos de librerías.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la fase de prueba en tiempo real, se evaluó la eficiencia del modelo propuesto para la clasificación de residuos orgánicos mediante visión por computadora. El modelo fue entrenado con un conjunto de datos compuesto por 1000 imágenes recolectadas (500 para las etiquetas y 500 para las imágenes) tomadas en entornos reales y otras obtenidas del repositorio de Google, como hogares y escuelas. La evaluación inicial mostró un rendimiento limitado, pero tras mejorar la calidad del *dataset* e incrementar el número de épocas de entrenamiento, se alcanzó una precisión promedio entre el 80 % y el 85 %, lo cual valida la viabilidad del modelo para la detección de residuos orgánicos en condiciones controladas.

Se utilizaron imágenes con baja concentración de residuos, es decir, aquellas en las que aparece un solo objeto (como una cáscara de plátano, de manzana, etc.) sobre un fondo limpio. La [Figura 7](#) ilustra un ejemplo representativo de este tipo de detección. No se incluyeron imágenes con alta concentración de residuos, lo cual constituye una limitación del presente estudio y una oportunidad para futuras investigaciones.

Asimismo, se observó que las condiciones externas, como la iluminación y el nivel de degradación del residuo, influyeron significativamente en el desempeño del modelo, por lo que se realizaron ajustes para reducir el ruido visual en el entorno de prueba.

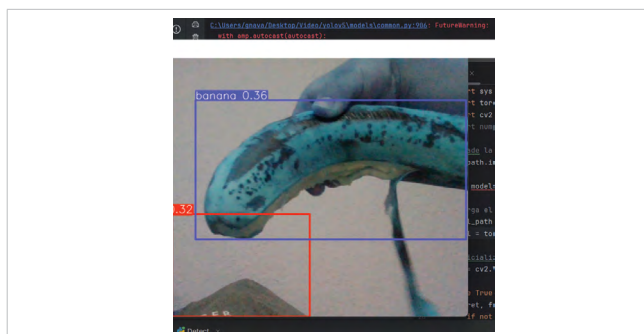


Figura 7. Baja concentración de residuos.

Aunque inicialmente se consideró el uso del modelo YOLOv8 y soluciones más avanzadas, como las ofrecidas por Ultra Analytics, las limitaciones del hardware disponible condujeron a la elección del modelo YOLOv5x, que mostró un equilibrio adecuado entre rendimiento y eficiencia computacional. Si bien este modelo permite la detección de múltiples clases, se optó por trabajar con una sola (residuos orgánicos), decisión basada en un trabajo de campo previo. Asimismo, el presente estudio se aplicó una encuesta y se realizaron observaciones directas, lo que reveló que los residuos orgánicos se desechan comúnmente sin clasificación alguna, lo que los convierte en una categoría crítica para cualquier sistema automatizado de separación de residuos.

Desde la perspectiva del problema de investigación, los resultados obtenidos demuestran que es posible aplicar técnicas de visión por computadora para asistir en la clasificación de residuos orgánicos, lo que aporta una solución tecnológica al manejo inadecuado de los desechos.

Este hallazgo es particularmente relevante en el contexto mexicano, donde el crecimiento poblacional proyectado incrementará la generación de residuos y, por tanto, la necesidad de sistemas inteligentes de gestión.

En comparación con estudios previos, esta investigación destaca por el uso de imágenes capturadas en entornos reales y por abordar una categoría de residuos que usualmente se ignora en proyectos de clasificación automática. Además, el uso de un modelo optimizado para hardware limitado amplía la posibilidad de implementar esta solución en contextos de bajos recursos, como escuelas públicas o zonas rurales.

Finalmente, los resultados abren diversas líneas de investigación futura, como la ampliación del modelo para detectar múltiples tipos de residuos, la integración con

sistemas físicos de separación automática y la mejora del dataset mediante técnicas de aumento de datos o el uso de sensores adicionales. También se sugiere explorar el uso de modelos más avanzados si se cuenta con una infraestructura computacional más robusta.

El desarrollo de un modelo de detección automática de residuos orgánicos mediante visión artificial demostró que las redes neuronales convolucionales, en particular YOLOv5x, son una herramienta viable para apoyar la gestión sustentable de residuos en México. La construcción de un *dataset* propio y la optimización del proceso de entrenamiento evidenciaron que la calidad y diversidad de las imágenes son factores determinantes para alcanzar un rendimiento adecuado.

Si bien el modelo se limitó al reconocimiento de residuos orgánicos, los resultados obtenidos confirman el potencial de ampliar esta tecnología para la clasificación de residuos inorgánicos y de manejo especial, con miras a desarrollar sistemas inteligentes de mayor alcance. De esta forma, la investigación contribuye no solo al fortalecimiento de la cultura ambiental, sino también al diseño de soluciones tecnológicas que promuevan prácticas sostenibles en la universidad y en otros contextos, frente al crecimiento poblacional y a los desafíos ambientales que enfrenta el país.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de un modelo de detección automática de residuos orgánicos, basado en redes neuronales convolucionales, evidenció el potencial de las tecnologías de visión artificial para apoyar la gestión sustentable de residuos en contextos urbanos. El uso de YOLOv5x como arquitectura base demostró ser una alternativa viable, logrando un desempeño eficiente, incluso en condiciones de hardware limitadas y con un conjunto de datos personalizado. Uno de los principales aprendizajes fue la relevancia de la calidad, la diversidad y la representatividad del conjunto de datos para obtener resultados satisfactorios.

El entrenamiento del modelo evidenció que factores como las condiciones de iluminación, el estado físico del residuo y la composición visual del entorno influyen significativamente en el reconocimiento efectivo. El enfoque limitado a residuos orgánicos fue una decisión estratégica basada en observaciones de campo, en las que se identificó una alta presencia de este tipo

de desechos sin una clasificación adecuada. Si bien esta decisión permitió concentrar el esfuerzo técnico, también redujo el alcance general del sistema. Esto abre una línea clara de mejora para investigaciones futuras, en las que se integren nuevas clases de residuos (inorgánicos, reciclables, peligrosos, etc.) y se evalúe la escalabilidad del modelo en escenarios más complejos.

Asimismo, se identifican oportunidades para combinar esta tecnología con sistemas físicos de separación automatizada o plataformas móviles de uso ciudadano, e integrarla en contenedores electrónicos, lo cual permitiría ampliar su impacto en la educación ambiental, el reciclaje comunitario y la gestión inteligente de residuos a nivel local. También resulta pertinente explorar nuevas arquitecturas de aprendizaje profundo y enfoques de entrenamiento que optimicen el rendimiento sin comprometer la eficiencia computacional.

En síntesis, este trabajo demuestra la viabilidad técnica de aplicar la visión artificial a la clasificación de residuos en contextos reales y plantea una base sólida para el desarrollo de soluciones tecnológicas que contribuyan a enfrentar los retos ambientales asociados al crecimiento poblacional, al consumo masivo y a la falta de cultura de separación de residuos en México.

REFERENCIAS

- [1] J. C. Feijoo y K. Cali, “El crecimiento poblacional entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental. Caso China e India”, en *La quinta ola del progreso de la humanidad: la protección del medio ambiente, sociedad y economía*, Atena, 2024, cap. 4.
- [2] C. G. García, M. C. Valles y M. C. Nevárez, “Escenarios en la dinámica demográfica de los municipios de México con base en las nuevas proyecciones de la población del año 2024”, en *Procesos urbanos y dinámica del mercado laboral*, E. R. Morales y C. A. Ken, coords. México: UNAM/AMECIDER, 2024, pp. 273-288.
- [3] Plan Estratégico de Juárez, A.C., *Informe medio ambiente 2022*. Ciudad Juárez, México: Plan Estratégico de Juárez, A.C., 2022, pp. 97-132. [En línea]. Disponible: <https://planjuarez.org/wp-content/uploads/2022/11/Informe-Medio-Ambiente-2022.pdf>
- [4] A. De Anda-Trasviña, E. García-Galindo, A. Peña-Castañón, J. Seminario-Peña y A. Nieto-Garibay,

“Residuos orgánicos: ¿basura o recurso?” *Recursos Naturales y Sociedad*, vol. 7, n.º 3, pp. 19-42, 2021, doi: [10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0004](https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0004).

- [5] Instituto Politécnico Nacional, “Programa Institucional de Economía Circular y Cero Residuos del IPN 2026–2030 PIECC-IPN”, *Gaceta Politécnica Extraordinaria*, año LXII, vol. 22, n.º 1928, mar. 6, 2026. [En línea]. Disponible: <https://www.ipn.mx/assets/files/imageninstitucional/docs/gaceta-extraordinaria/2026/03/g-extra-1928.pdf>
- [6] D. E. Contreras y M. J. Guevara, “Sistema automatizado para separación y de residuos a través de una neurona artificial en la Universidad de Córdoba sede Sahagún”, trabajo de grado, Universidad de Córdoba, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/8f2c1a34-7e59-4063-a5c1-911543bffecl>
- [7] Á. M. Del Carpio y A. E. Nuñez, “Simulación de sistema de clasificación de desechos sólidos basado en reconocimiento de imagen en el campus de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña (UNPHU)”, tesis doctoral, Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, República Dominicana, 2022.
- [8] M. Castro, V. M. Romero, J. Fuentes, S. R. Zagal, A. Bárcenas y D. E. Gutiérrez, “Dataset de clasificación de Residuos Sólidos Urbanos para Redes Neuronales Convolucionales”, *Dilemas contemporáneos*, año XII, n.º 3, may. 2025, doi: [10.46377/dilemas.v12i3.4675](https://doi.org/10.46377/dilemas.v12i3.4675).
- [9] J. R. Lapo y O. M. Cumbicus-Pineda, “Detection of recyclable solid waste using convolutional neural networks and PyTorch”, en *IEEE Latin America Transactions*, vol. 22, n.º 6, pp. 475-483, jun. 2024, doi: [10.1109/TLA.2024.10534304](https://doi.org/10.1109/TLA.2024.10534304).
- [10] R. A. León, K. D. Barreto, K. J. Cabanillas, J. S. Muñoz, S. A. Peña y A. E. Tafur, “Desarrollo de un algoritmo mediante redes neuronales convolucionales para la clasificación de residuos sólidos en universidades”, en *Memorias de la 23.ª Conf. Iberoamericana en Sis., Ciber. e Informática (CISCI 2024)*, 2024, pp. 505-512, doi: [10.54808/CISCI2024.01.505](https://doi.org/10.54808/CISCI2024.01.505).
- [11] B. A. Aguilar, F. C. Covarrubias, A. R. Pérez, J. Gómez, C. A. Toro, J. S. Galindo y D. E. Ortiz, “Análisis de la detección e identificación de residuos mediante ultralytics YOLOv8”, *CienciAcierta*, vol. 21, n.º 83, pp. 117-133, 2025.
- [12] D. M. Ortiz, “Identificación y clasificación de residuos sólidos mediante procesamiento de imágenes e inteligencia artificial”, trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia, 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ufps.edu.co/server/api/core/bitstreams/b4651542-87da-4000-a4e2-96930e32aa05/content>

Solar Panel Stand Alone Microgrid Allocation System

Sistema de asignación de microrred para paneles solares

José Trinidad Reyes Portillo^{1a} , Guadalupe Navarro Enríquez^{1b}, Adrián Francisco Loera Castro^{1ac}

¹ {^a Programa de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial y Logística}, {^b Departamento de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica}, {^c División de Estudios de Posgrado e Investigación}, Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, Chihuahua, México

ABSTRACT

This research developed two methods for selecting optimal electrical components from n suppliers, considering a dual-objective optimization process and a single-objective genetic algorithm. The main objectives of the problem are to minimize overall system costs (operating and maintenance costs) and maximize overall system efficiency. Two methods are proposed to determine the best supplier selection for the initial microgrid configuration: 1) an optimization algorithm that allows for the design of a multi-objective process comparing the main characteristics of the components and thus selecting the best options from different suppliers, and 2) the Genetic Algorithm for the Solar Panel Microgrid Allocation System, which focuses on cost minimization. The genetic algorithm is developed to obtain, through multiple iterations, a result that minimizes the implementation and operating costs of a microgrid. Its purpose is to minimize the total implementation cost prorated according to the component's lifespan and its annual maintenance cost.

KEYWORDS: optimization; microgrid; solar panel.

RESUMEN

En la presente investigación se desarrollaron dos métodos para seleccionar componentes eléctricos óptimos de n-proveedores, considerando un proceso de optimización de doble objetivo y un proceso de algoritmo genético de un solo objetivo. Los principales objetivos considerados en el problema son minimizar los costos generales del sistema (costo de operación, costo de mantenimiento) y maximizar la eficiencia general del sistema. Se proponen dos métodos para determinar la mejor selección del proveedor para la primera configuración de microrred: 1) un algoritmo de optimización que permite diseñar un proceso multiobjetivo que compara las principales características de los componentes y, por lo tanto, selecciona las mejores opciones entre diferentes proveedores, y 2) el Algoritmo Genético del Sistema de Asignación de Microrredes de Paneles Solares, que se centra en la minimización de los costos. El algoritmo genético se desarrolla para obtener a través de múltiples evoluciones un resultado que minimice el coste de implementación y operación de una microrred, cuyo propósito es minimizar el coste total de implementación prorrateado según la vida útil del componente y su coste anual de mantenimiento.

PALABRAS CLAVE: optimización; microrred; paneles solares.

Corresponding author:

NAME: José Trinidad Reyes Portillo

INSTITUTION: Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez

ADDRESS: Av. Tecnológico núm. 1340, frac. El Crucero. C. P. 32500, Ciudad Juárez, Chih., México

E-MAIL: jose.rp@cdjuarez.tecnm.mx

Received: 4 November 2025. Accepted: 19 April 2026.

Published: 30 April 2026.



I. INTRODUCTION

Currently, there's an increasing need for electrical energy, posing a significant challenge to mitigate climate change primarily caused by emissions from fossil fuel consumption [1].

Fifty years ago, the United States was self-sufficient in petroleum for electricity generation. Today, it imports over half of its petroleum and consumes 25% of the world's supply [2]. Oil is a finite resource and will inevitably become less available, especially as a sustainable energy source [2], [3].

The rapid increase in global energy demand is mainly responsible for the quick depletion of fossil fuel reserves and the rise in emissions from conventional power sources [4].

Earth offers a variety of natural alternatives for electricity generation, including photovoltaic, concentrated solar energy, wind energy, fuel cells, and more. Climate change concerns have not only captured the attention of governments worldwide but also prompted in developed nations significant research investment into devising or enhancing green energy strategies.

Statistics reveal a gradual increase in global energy consumption, with a 1.0% rise in 2015 and a 1.1% increase in 2014, while the average over the past decade stands at 1.9%. These figures highlight the collective efforts of governments and citizens towards energy conservation. The power grid consists of three main segments: the generating station, the transmission network, and the distribution network; with special attention given to the distribution network, also referred to as the load center. Load centers are classified as public or private, and as either small or large areas.

This study specifically targets public or private buildings. According to Dan Arvizu, director of the National Renewable Lab, buildings account for 38% of total energy consumption, with 71% of this being electricity. Notably, hotels on average consume more energy than commercial buildings, with annual power consumption ranging from 250 to 350 kWh/m² for hotels and 30–152 kWh/m² for commercial buildings.

Moreover, larger-scale lodging facilities have distinct operational characteristics, requiring greater load ca-

pacities due to increased air-conditioning requirements and broader comfort amenities. Annual energy consumption figures for large hotels typically range between 450 and 700 kWh/m²) [5]. Building energy supply comes from either external electricity supplied by a city's electric company or is self-supplied through a microgrid. A building microgrid is designed to generate enough energy for internal consumption through renewable sources.

The project's objective is to achieve complete self-sufficiency by installing green energy generation components, predominantly solar photovoltaic and/or wind power. Initially, a solar-based microgrid design was developed based on load requirements, geographic solar irradiation data, and general electrical component specifications such as solar panels, regulators, batteries, and inverters.

Subsequently, two methods are proposed to select the best supplier for the initial microgrid configuration. The first method employs an optimization algorithm to design a multi-objective process that evaluates key component characteristics and selects optimal options from various providers. The second approach focuses on cost minimization employing a Solar Panel Microgrid Allocation Genetic Algorithm which iteratively evolve solutions to minimize the implementation and operation costs of the microgrid.

A. LITERATURE REVIEW

Microgrid

A microgrid represents an independent energy system comprising distributed energy sources, including demand management, storage, and generation, alongside loads capable of operating with or separately from the primary power grid. Its fundamental aim is to ensure local, dependable, and cost-effective energy security for both urban and rural communities, while also offering solutions for commercial, industrial, and governmental consumers [4].

A microgrid is also defined as a network of interconnected distributed energy resources, controllable loads, and critical loads, operating at low voltage. These microgrids have the flexibility to function in either grid-connected or island mode, depending on the operational conditions of the main grid. The advantages extend to

utilities and the broader community, encompassing the reduction of greenhouse gas emissions and alleviation of stress on transmission and distribution systems.

In essence, microgrids serve as scaled-down versions of conventional power grids, incorporating power generation, distribution, and control elements such as voltage regulation and switch gears. However, they distinguish themselves from traditional grids by facilitating closer proximity between power generation and consumption, leading to efficiency improvements and decreased transmission losses.

Moreover, microgrids seamlessly integrate with renewable energy sources like solar and wind power. They possess dynamic control capabilities over energy sources, enabling autonomous and self-healing operations. During normal, peak usage, or primary grid failure periods, microgrids can operate autonomously, isolating their generation nodes and power loads from disturbances without compromising the integrity of the main grid.

Microgrids are interoperable with existing power systems, information networks, and infrastructure, capable of supplying power back to the main grid during grid failures or outages. Such a comprehensive definition underscores the significant imperative to establish self-sufficient energy buildings by harnessing renewable energy sources for electricity generation.

Genetic Algorithm

Genetic algorithms (GA) serve as optimization tools adept at exploring optimal solutions for intricate problems characterized by discontinuities, multimodality, and other complexities. These algorithms are utilized for system optimizations across one or more objectives, resulting in a set of solutions where each outperforms another in at least one tested objective [6].

Operating on principles akin to natural genetics, genetic algorithms represent adaptive search and optimization methodologies distinct from traditional engineering design problem-solving approaches. Leveraging fundamental concepts borrowed from biological genetics, these algorithms are engineered to construct robust search algorithms, demanding minimal problem-specific information [7].

A typical constrained, single variable optimization problem can be outlined as follows:

$$\text{Maximize } x: f(x)$$

subject to the constraint: $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$

In tackling such problems with genetic algorithms, the variable x is typically encoded within string structures. Binary-coded or floating-point strings may be employed, with the length of the string determined based on the desired solution accuracy [7].

According to Michalewicz [8], a genetic algorithm employed as an evolutionary procedure for a specific problem must encompass the following components:

- A generic representation for potential solutions, akin to the system modeling described in the preceding section.
- A mechanism for generating an initial population of potential solutions.
- An evaluation function, serving as the environment, to assess solutions based on their fitness.
- Genetic operators, such as crossover and mutation, which modify the composition of offspring.

Genetic Algorithm and Microgrids

The widespread adoption of hybrid energy generation, reliant on renewable sources, is increasingly prevalent. Utilizing renewable energies can alleviate the impact of greenhouse gases, aligning with the requirements outlined in the Kyoto Protocol, particularly in reducing CO₂, NO, NO₂, and other pollutants like particulate matter. Implementing systems with multiple energy sources, termed hybrid systems, to power specific applications can enhance reliability and energy security compared to single-source systems [9].

The demand for more adaptable electrical systems, driven by evolving regulatory and economic landscapes, alongside the imperative for energy efficiency and reduced environmental impact, is propelling the advancement of microgrids. These microgrids are anticipated to assume a greater role in future electric power systems [10].

Koutroulis *et al.* [7] utilized genetic algorithms to optimize component sizes within a standalone hybrid energy system comprising PV panels, wind turbines, and a battery bank. Rajkumar *et al.* [11] proposed an optimization methodology for PV/Wind/battery hybrid systems. Mohamed and Koivo [10] proposed an approach utilizing genetic algorithms to ascertain the optimal operating strategy for a microgrid, incorporating a wind turbine, PV array, diesel generator [12], microturbine, fuel cells, and storage battery, with a focus on residential applications.

The capacity of the energy sources was assumed to remain constant, with the genetic algorithm employed to determine the optimal configuration of these various sources in order to minimize the cost function. Shrestha and Goel [13] proposed a sizing method for standalone PV systems, utilizing energy generation simulation for different combinations of PV panels and batteries, ensuring reliability metrics such as loss of load hours are met.

Kellogg *et al.* [14] introduced a design approach for hybrid PV/wind generator systems, employing an energy balance method utilizing hourly wind speed, solar radiation, and consumer power demand data to calculate the difference between generated and demanded power over a 24-hour period. The number of PV modules and wind generators are iteratively adjusted to achieve an average power difference of zero. Markvart [15] suggested considering seasonal variations in PV and wind generator power generation in the design methodology.

Chedid and Rahman [16] proposed determining the optimal sizes of PV panels, wind generators, and batteries by minimizing the total system cost function using linear programming techniques. Dalton *et al.* [5] conducted an analysis comparing various energy approaches for a large building, including photovoltaic, wind energy, and standalone grid energy, as well as combinations of renewable energy sources such as photovoltaic/wind and photovoltaic/grid. The study identified the most economically viable renewable energy system component for large-scale accommodation, demonstrating that wind energy conversion systems without batteries yielded the optimal net present cost. Delgado and Dominguez [6] presented a case study on renewable energy systems based on energy cost and reliability, with a focus on the methodologies employed.

The Universal Generating Function and Monte Carlo Simulation methods were compared in terms of their efficiency in achieving optimal results within the short-

est timeframe. Ismail *et al.* [9], Mohamed and Koivo [10], Moghaddam *et al.* [17], and Koutroulis *et al.* [7] devised various genetic algorithms aimed at optimizing renewable energy utilization within microgrids. These algorithms encompassed combinations of photovoltaic solar panels, wind turbines, microturbines, and fuel cells, catering to both hybrid and standalone generating systems.

Kumar Basu [18] conducted a comparative analysis on a 14-bus radial microgrid, assessing two groups of Distributed Energy Resources (DERs) with different configurations—one group solely comprised of Diesel Generators (DGS) and the other featuring a mix of DGS and Micro Turbines (MTs). The evaluation aimed to determine the most economically viable technology deployment strategy from an owner's investment perspective, with the objective of minimizing fuel costs and optimizing economic parameters such as Net Present Value (NPV), Pay Back Period (PP), and Internal Rate of Return (IRR).

Abdelkader *et al.* [1] formulated an optimization approach targeting the Total Cost of Electricity (TCE) and the Loss of Power Supply Probability (LPSP) simultaneously. Utilizing a multi-objective Genetic Algorithm, the developed system was sized considering storage dynamics to achieve an optimal configuration, leading to various economic analysis scenarios revealing minimal LPSP alongside low TCE.

Yousefi *et al.* [19] modeled a hybrid Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) microgrid system, determining optimal component sizes through a multi-objective optimization approach. This system comprised fossil fuel-fired Internal Combustion Engines (ICE) and solar photovoltaic/thermal (PV/T) panels, offering two configurations—an entirely fossil fuel-based CCHP system and a hybrid CCHP microgrid incorporating both renewable and non-renewable CHP components. Employing Genetic Algorithm (GA), the optimal sizing problem for the CCHP microgrid was solved, highlighting the effectiveness of this meta-heuristic optimization algorithm based on the principles of natural selection.

II. METHODOLOGY

A. MODEL DEVELOPMENT

The general configuration of the microgrid model based on solar energy stand alone is presented in [Figure 1](#).

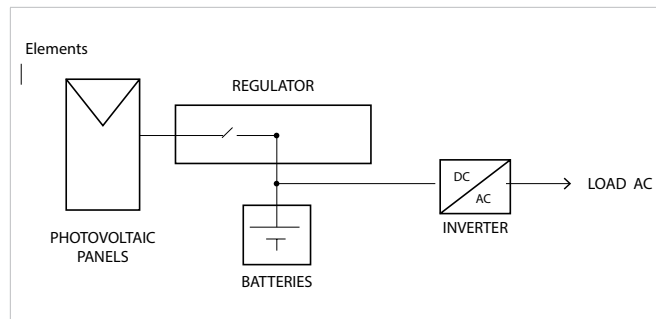


Figure 1. General configuration of a stand-alone microgrid solar panel.

As an initial phase of this investigation, a solar energy-based microgrid was conceptualized using data pertaining to load requirements, geographic solar irradiation information, and general specifications of electrical components including solar panels, regulators, batteries, and inverters. Based on this information, a particular microgrid configuration (refer to Figure 2) was chosen, taking into account the specific quantities of solar panels, batteries, regulators, and inverters.

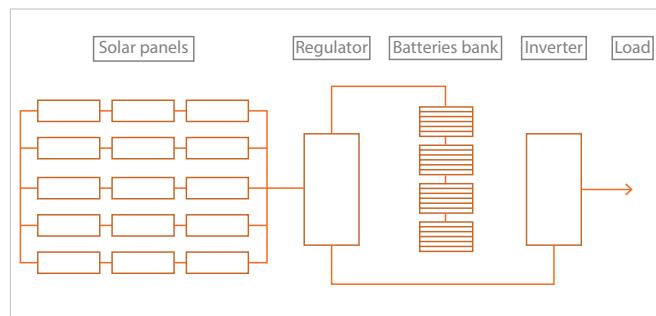


Figure 2. Solar panel stand-alone microgrid.

B. SOLAR PANEL MICROGRID ALLOCATION SYSTEM GENETIC ALGORITHM

Throughout this research, a key aspect involves acquiring a stand-alone solar panel microgrid to develop algorithms for component replacement and supplier selection based on the offerings of current market suppliers. Presently, a genetic algorithm has been formulated with the aim of iteratively evolving solutions to minimize the cost associated with the implementation and operation of the microgrid. The objective is to reduce the total implementation cost over the component's useful life while considering its annual maintenance expenses. This scenario focuses on a stand-alone solar panel microgrid comprising 15 solar panels, one regulator, four batteries, and one inverter.

Although this methodology can be applied to any number of suppliers, the specific example herein pertains to seven suppliers of electrical components. Tables 1 to 4 present the data considered in this instance, encompassing information sourced from various suppliers regarding electrical components such as solar panels, regulators, batteries, and inverters.

TABLE 1
SOLAR PANELS

SOLAR PANEL	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Initial cost (\$)	220	222	280	200	250	300	350
Maintenance cost (\$)	50	80	70	80	85	110	130
Inom (Amps)	4.71	4.89	4.96	4.45	5.02	4	4.18
Vnom (Volts)	18.04	17.4	17.1	19.1	16.93	18	18
Isc (Amps)	5.04	5.32	5.89	5.02	5.32	5	5
Voc (Volts)	21.92	21.7	21.62	21.98	21.7	18.1	19
G (Kw/m ²)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Area (m ²)	0.65	0.7	0.55	0.65	0.7	0.55	0.5
Useful life (years)	20	20	18	15	20	15	13

TABLE 2
REGULATOR

REGULATOR	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Initial cost (\$)	687	750	690	750	810	900	1000
Maintenance cost (\$)	100	105	100	110	120	200	240
Useful life (years)	20	18	20	16	20	15	16
Efficiency (%)	97.5	97	98	96	95	94	93

TABLE 3
BATTERIES

REGULATOR	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Initial cost (\$)	1600	1400	1500	1600	1200	1800	2000
Maintenance cost (\$)	160	140	180	160	180	200	300
Discharge Eff (%)	0.8	0.85	0.8	0.85	0.7	0.6	0.8
Chemical Eff (%)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Useful life (years)	20	8	12	18	16	8	7

TABLE 4
INVERTER

REGULATOR	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Initial cost (\$)	1600	1600	1800	1400	1500	1900	2000
Maintenance cost (\$)	160	160	180	150	200	300	400
Efficiency (%)	95	95	94	92	92	90	92
Useful life (years)	15	16	15	12	10	8	8

III. RESULTS

A. NUMERICAL RESULTS

A multi-objective genetic algorithm (GA) was devised to identify the optimal components from a pool of n suppliers. The study incorporated two main objectives: firstly, maximizing the average solar panel efficiency, and secondly, minimizing the total annualized cost of components. The objectives aimed to maximize the average solar panel efficiency within the constraint of a nominal efficiency threshold (13%), while simultaneously minimizing the overall annualized cost of components.

$$\text{Average Solar Panel Efficiency (Ftss1)} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Eff}_{pi}}{n} \quad (1)$$

$$\text{Annualized Component Cost (Ftss2)} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{UL_i} + Cm_i \quad (2)$$

$$\text{Eff} = \frac{I_{nom} \cdot V_{nom}}{G \cdot A} \quad (3)$$

Subject to:

$$\text{Ftss1} \geq X$$

$$\text{Ftss2} \leq \text{Budget}$$

where Eff = solar panel efficiency; G = irradiance kWh/m²; A = area of solar panel m²; I_{nom} = nominal current, V_{nom} = nominal voltage; C_i = cost of element i ; UL_i = useful life in years of component i ; Cm_i = maintenance cost of element i .

After running 30 iterations the algorithm shows through a Pareto set (Figure 3) different options of supplier combinations. It is evident that higher solar panel efficiency solutions are located in the upper right corner while lower cost solutions are found in the lower left corner.

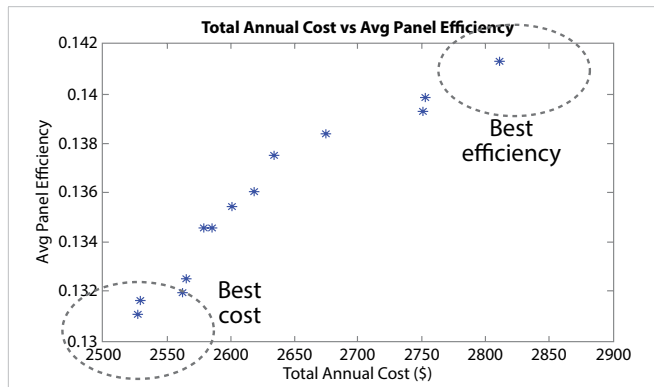


Figure 3. Pareto Optimal Solution for microgrid configuration.

B. SINGLE OBJECTIVE

$$\text{Annualized Component Cost (Ftss2)} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{UL_i} + Cm_i \quad (2)$$

Subject to:

$$\text{Ftss2} \leq \text{Budget}$$

where C_i = cost of element i ; UL_i = useful life in years of component i ; Cm_i = maintenance cost of element i .

After running the genetic algorithm, several evolutionary populations were created and evaluated according to the objective considered in Figure 4.

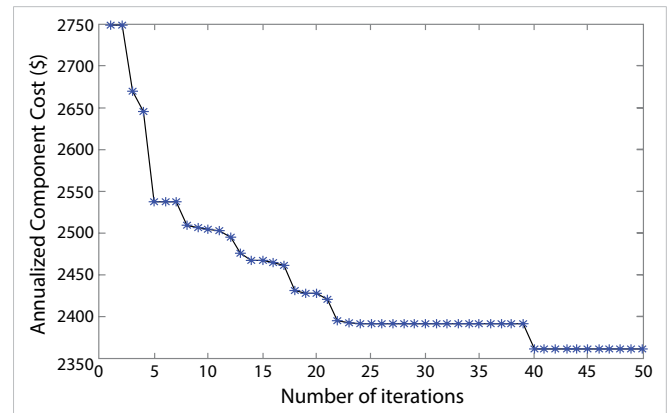


Figure 4. Genetic Algorithm evolutionary Pareto set.

Approximately, 40 evolutions were necessary to obtain a potential best solution in the solar panel stand-alone microgrid based on seven different suppliers to complete the configuration of 15 solar panels, one regulator, four batteries and one inverter.

IV. CONCLUSIONS

This work focuses on microgrid solar panel stand-alone component selection based on two different methodologies. The microgrid configuration is based on customer load needs. The current configuration was defined according to a database considering primarily customer load needs and actual components traits.

On the first hand, we have a two objective optimization process to determine the best first configuration based on solar panel efficiency and total cost of components. After running this process a Pareto Optimal Solution was obtained for microgrid configuration showing different options according to total cost and efficiency. On the other hand, a genetic algorithm was designed to de-

termine the best supplier combination for the first microgrid configuration system. Several generations were evaluated throughout the process. In summary, both methodologies are valuable for identifying the optimal initial microgrid investment configuration, or for other processes that involve new equipment and multiple supplier offers.

REFERENCES

- [1] A. Abdelkader, A. Rabeh, D. M. Ali, and J. Mohamed, "Multi-objective genetic algorithm based sizing optimization of a stand-alone wind/PV power supply system with enhanced battery/supercapacitor hybrid energy storage," *Energy*, vol. 163, pp. 351-363, Nov. 2018, doi: [10.1016/j.energy.2018.08.135](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.135).
- [2] Z. Salameh, *Renewable Energy System Design*. Academic Press, 2014.
- [3] S. M. Dawoud, X. Lin, X., and M. I. Okba, "Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, Part 3, pp. 2039-2052, 2018, doi: [10.1016/j.rser.2017.08.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.007).
- [4] T. Adefarati and R. Bansal, "Reliability and economic assessment of a microgrid power system with the integration of renewable energy resources," *Appl. Energy*, vol. 206, pp. 911-933, Nov. 2017, doi: [10.1016/j.apenergy.2017.08.228](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.228).
- [5] G. J. Dalton, D. A. Lockington, and T. Baldock, "Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 955-964, Apr. 2009, doi: [10.1016/j.renene.2008.08.012](https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.08.012).
- [6] C. Delgado and J. A. Domínguez-Navarro, "Multi-objective design optimization of hybrid renewable systems using UGE," *COMPEL*, vol. 34, no. 6, pp. 1825-1844, 2015, doi: [10.1108/compel-11-2014-0326](https://doi.org/10.1108/compel-11-2014-0326).
- [7] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, and K. Kalaitzakis, "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms," *Solar Energy*, vol. 80, no. 9, pp. 1072-1088, 2006, doi: [10.1016/j.solener.2005.11.002](https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.002).
- [8] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin: Springer, 2011.
- [9] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. Mahlia, "Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 85, pp. 120-130, Sep. 2014, doi: [10.1016/j.enconman.2014.05.064](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.064).
- [10] F. A. Mohamed and H. N. Koivo, "Online management genetic algorithms of microgrid for residential application," *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 562-568, Dec. 2012, doi: [10.1016/j.enconman.2012.06.010](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.010).
- [11] R. Rajkumar, V. Ramachandaramurthy, B. Yong, and D. B. Chia, "Techno-economical optimization of hybrid pv/wind/battery system using Neuro-Fuzzy," *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5148-5153, Aug. 2011, doi: [10.1016/j.energy.2011.06.017](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.017).
- [12] R. Dufo-López and J. L. Bernal-Agustín, "Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 2559-2572, Dec. 2008, doi: [10.1016/j.renene.2008.02.027](https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.027).
- [13] G. Shrestha and L. Goel, "A study on optimal sizing of stand-alone photovoltaic stations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 4, pp. 373-378, Dec. 1998, doi: [10.1109/60.736323](https://doi.org/10.1109/60.736323).
- [14] W. D. Kellogg, M. H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 1, pp. 70-75, March 1998, doi: [10.1109/60.658206](https://doi.org/10.1109/60.658206).
- [15] T. Markvart, "Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems," *Solar Energy*, vol. 57, no. 4, pp. 277-281, Oct. 1996, doi: [10.1016/s0038-092x\(96\)00106-5](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(96)00106-5).
- [16] R. Chedid and S. Rahman, "Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 1, pp. 79-85, March 1997, doi: [10.1109/60.577284](https://doi.org/10.1109/60.577284).
- [17] A. A. Moghaddam, A. Seifi, T. Niknam, and M. R. Pahlavani, "Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6490-6507, 2011, doi: [10.1016/j.energy.2011.09.017](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.017).

- [18] A. K. Basu, “Microgrids: Planning of fuel energy management by strategic Deployment of CHP-based DERs – An evolutionary algorithm approach,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 326-336, Jan. 2013, doi: [10.1016/j.ijepes.2012.07.059](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.07.059).
- [19] H. Yousefi, M. H. Ghoduseinejad, and A. Kasaeian, “Multi-objective optimal component sizing of a hybrid ICE + PV/T driven CCHP microgrid,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 122, pp. 126-138, July 2017, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2017.05.017](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.017).

Modelación de red hidráulica de alcantarillado sanitario. Caso de estudio en Mexicali, Baja California, México

Hydraulic modeling of a sanitary sewer network. Case study in Mexicali, Baja California, Mexico

Irma Lorena Villagrana-García¹, Marco Antonio Montoya Alcaraz¹ , Carlos Salazar-Briones¹ , José Ruiz-Gibert¹ 

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

RESUMEN

A nivel mundial, el acceso a sistemas de alcantarillado adecuados representa un desafío, especialmente en ciudades de países en desarrollo y subdesarrollados. En este contexto, la modelación hidráulica de redes de alcantarillado se considera una herramienta clave para garantizar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de los sistemas hidráulicos. La presente investigación tuvo como objetivo diagnosticar y proponer mejoras a la infraestructura de alcantarillado en un polígono representativo de la ciudad de Mexicali, Baja California, México, a través de simulación hidráulica. Como metodología, se recopiló información técnica sobre materiales, diámetros de tuberías, número y ubicación de pozos de visita, antigüedad de la red y vida útil estimada. Posteriormente, los datos fueron procesados y se utilizó un software especializado para simular el comportamiento del sistema. Los resultados permitieron identificar deficiencias operativas, zonas con riesgo de sobrecarga hidráulica y estimar la capacidad del sistema frente a futuras demandas. Además, se evidenció que la modelación hidráulica contribuye a optimizar recursos, reducir costos y mejorar la toma de decisiones. En conclusión, la simulación hidráulica no solo es útil en el diseño de redes, sino que también actúa como una herramienta estratégica para la gestión pública, el fortalecimiento del saneamiento y el desarrollo urbano sostenible.

PALABRAS CLAVE: alcantarillado sanitario; hidráulica; modelación de redes; infraestructura; optimización.

ABSTRACT

Worldwide, access to adequate sewer systems represents a challenge, especially in cities in developing and underdeveloped countries. In this context, hydraulic modeling of sewer networks is considered a key tool to ensure the efficiency, safety, and sustainability of hydraulic systems. This research aimed to diagnose and propose improvements to the sewer infrastructure in a representative polygon of the city of Mexicali, Baja California, Mexico, through hydraulic simulation. As a methodology, technical information was collected on materials, pipe diameters, number and location of manholes, network age, and estimated service life. The data was subsequently processed, and specialized software was used to simulate system behavior. The results made it possible to identify operational deficiencies, areas at risk of hydraulic overload, and to estimate system capacity for future demands. Furthermore, it is evident that hydraulic modeling contributes to optimizing resources, reducing costs, and improving decision-making. In conclusion, hydraulic simulation is not only useful in network design but also acts as a strategic tool for public management, sanitation strengthening, and sustainable urban development.

KEYWORDS: sanitary sewerage; hydraulics; network modeling; infrastructure; optimization.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Marco Antonio Montoya Alcaraz
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Baja California / Facultad de Ingeniería
DIRECCIÓN: Blvd. Benito Juárez s/n, C. P. 21280, Mexicali, Baja California, México
CORREO ELECTRÓNICO: marco.montoya@uabc.edu.mx

Fecha de recepción: 3 de diciembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 3 de febrero de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

El alcantarillado sanitario constituye una infraestructura esencial en las ciudades modernas, al garantizar la gestión adecuada de las aguas residuales y la protección de la salud pública. Su implementación representa un reto clave para el desarrollo social y la mejora de la calidad de vida, además de contribuir a la preservación del medio ambiente, en concordancia con las metas de desarrollo sostenible de la ONU [1]. Por lo tanto, el alcantarillado sanitario tiene un impacto global al mejorar la salud pública, proteger el medio ambiente y favorecer la sostenibilidad urbana. Su adecuada gestión resulta decisiva para el desarrollo de las ciudades, el fortalecimiento de la economía y la prevención de enfermedades, contribuyendo directamente a la calidad de vida de la población [2].

En México, el sistema de alcantarillado sanitario enfrenta una serie de desafíos relacionados con la cobertura, el mantenimiento, la infraestructura envejecida y los problemas de financiamiento. Aunque el país ha logrado avances en la expansión de sus redes de alcantarillado en las últimas décadas, todavía existen desigualdades en el acceso al saneamiento y problemas ambientales significativos relacionados con la gestión de las aguas residuales [3].

Pese a la expansión de dicha infraestructura, muchos sistemas de alcantarillado sanitario en México presentan problemas de obsolescencia y fallas en el mantenimiento. Adicionalmente, es importante resaltar que dichas redes de alcantarillado fueron construidas hace varias décadas y han sufrido desgaste, lo que provoca frecuentes desbordamientos, contaminación de cuerpos de agua cercanos, así como problemas de salud para la población contigua a cualquier zona afectada, lo cual refleja la necesidad de analizar el problema de raíz. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es analizar el desempeño hidráulico y operativo del sistema de alcantarillado sanitario, utilizando herramientas de modelación hidráulica, con el fin de identificar y diagnosticar sus principales deficiencias en términos de capacidad de conducción, condiciones operativas y necesidades de mantenimiento.

1.1. CASO DE ESTUDIO

El municipio de Mexicali se encuentra situado en el noroeste del estado de Baja California, México, hace

frontera internacional al norte con Estados Unidos, especialmente con el estado de California, y al sureste colinda con el estado de Sonora, México (Figura 1). El territorio de este municipio incluye zonas urbanas amplias, así como áreas rurales y agrícolas en el valle de Mexicali.

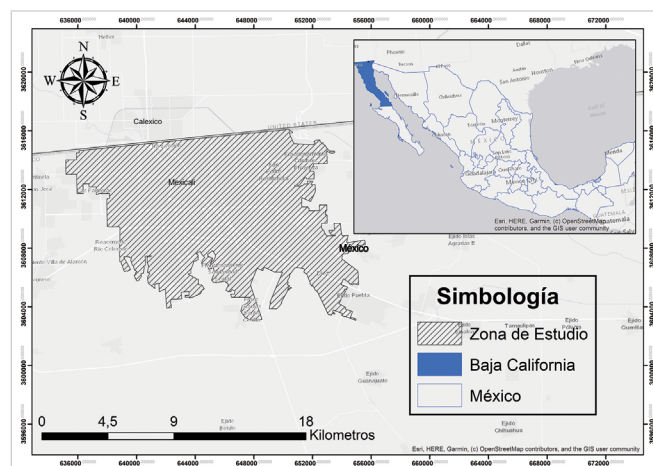


Figura 1. Ubicación de Mexicali, Baja California, México. Fuente: elaboración propia.

1.1.2. Problemática

El sistema de alcantarillado de Mexicali, la capital del estado de Baja California en México, es operado por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM). El total de tubería instalada para el sistema de alcantarillado sanitario en el municipio es de 3 141 993 metros lineales.

Dicho municipio enfrenta desafíos significativos en lo que respecta a la infraestructura de alcantarillado sanitario. A pesar de ser una ciudad importante y de rápido crecimiento, el sistema de alcantarillado sanitario presenta varias problemáticas relacionadas con la cobertura, el mantenimiento, la calidad del servicio y la gestión de aguas residuales [4].

1.1.3. Antecedentes

La Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), como organismo operador de las redes de agua potable y alcantarillado sanitario, ha impulsado en los últimos años campañas de concientización ciudadana sobre el cuidado de la infraestructura. No obstante, la respuesta social no ha sido la esperada, lo que ha derivado en la persistente disposición inadecuada de desechos que generan obstrucciones en la red. Por tanto,

de no implementarse un plan de mantenimiento preventivo, estas prácticas pueden ocasionar afectaciones a la salud pública y acelerar el deterioro de las tuberías.

De acuerdo con el organismo operador, los cinco indicadores que más impactan en los problemas en la red del alcantarillado sanitario en el último año (2024), son los siguientes (Tabla 1):

TABLA 1
INDICADORES ANUALES DE REPORTES DEL
ALCANTARILLADO SANITARIO

ATENCIÓN	REPORTES
Drenaje Tapado	3329
Desazolve línea principal	177
Hundimiento	129
Reposición de tubería	27
Reposición de descargas sanitarias	457

Tal como se presenta en la Tabla 1, se han identificado una serie de indicadores clave que permiten evidenciar de manera objetiva el nivel de vulnerabilidad actual que tiene la red de alcantarillado sanitario en la ciudad. Estos indicadores han sido obtenidos a partir del análisis sistemático de los reportes ciudadanos registrados por el organismo operador mencionado, durante un periodo de evaluación comprendido entre noviembre de 2023 y noviembre de 2024.

La recopilación y procesamiento de estos reportes han permitido establecer patrones de incidencia, frecuencia y localización geográfica de los eventos relacionados con deficiencias en el sistema de alcantarillado, tales como obstrucciones, fugas, colapsos estructurales, brotes de aguas residuales y malos olores, entre otros. Estos problemas representan síntomas de fallas en el funcionamiento hidráulico, estructural o de mantenimiento de la red, y constituyen un insumo relevante para el diagnóstico técnico del estado del sistema.

Como resultado del análisis geoespacial de los datos, se identificaron las zonas urbanas con mayor concentración de reportes, lo cual evidencia una mayor recurrencia de problemáticas asociadas al sistema de alcantarillado en ciertas áreas específicas de la ciudad. En este sentido, se destacan particularmente las siguientes colonias como aquellas que presentan los índices más elevados de reportes ciudadanos (Figura 2), lo cual podría estar relacionado con factores como la antigüedad

de la infraestructura, la sobrecarga hidráulica, el crecimiento urbano no planificado o deficiencias en la operación y mantenimiento del sistema.

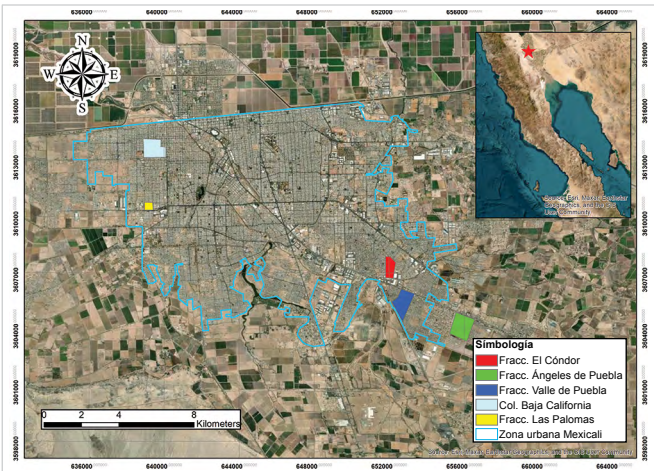


Figura 2. Colonias con mayor índice de reportes, Mexicali, Baja California., México. Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis de la información recopilada mediante los reportes ciudadanos y su sistematización espacial y temporal, se propone la realización de una modelación hidráulica detallada en una de las zonas identificadas con mayor recurrencia de incidencias. Esta modelación tiene como objetivo principal determinar si las problemáticas operativas detectadas en la red de alcantarillado sanitario se derivan de deficiencias inherentes al diseño hidráulico (subdimensionamiento, pendientes inadecuadas o trazado ineficiente) o si obedecen a factores externos, como la carencia de mantenimiento preventivo/correctivo, obstrucciones por sólidos, o deterioro estructural por antigüedad.

Tras realizar una evaluación comparativa entre las cinco colonias con mayor índice de reportes, se seleccionó como caso de estudio el Fraccionamiento Las Palomas (Figura 3), ubicado al poniente de la ciudad de Mexicali. La decisión se fundamentó en criterios logísticos y operativos, principalmente por logística respecto al monitoreo continuo, y la recopilación de información complementaria.

Esta delimitación territorial para el análisis permite desarrollar un modelo representativo de condiciones reales de operación, aplicable también como referencia para otras zonas con características similares dentro del municipio.

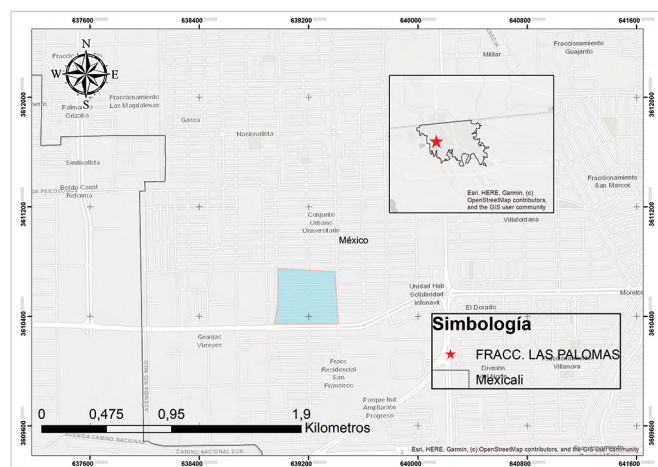


Figura 3. Área de enfoque. Fuente: elaboración propia.

El área de estudio seleccionada, correspondiente al Fraccionamiento Las Palomas, abarca una red de alcantarillado sanitario con una longitud de 5307 metros lineales de tubería, distribuido a lo largo del sistema de recolección y conducción de aguas residuales. Esta infraestructura está compuesta por distintos materiales y dimensiones que reflejan tanto la evolución constructiva del fraccionamiento como las decisiones técnicas adoptadas en diferentes etapas de su desarrollo.

En cuanto a la composición del material de las tuberías, se identifican tres tipos principales:

- PVC (Policloruro de Vinilo). Representa el 82 % del total de la red, lo cual es consistente con las tendencias modernas de urbanización, dado que este material ofrece alta resistencia química, bajo peso y facilidad de instalación.
- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Abarca el 12 % de la red. Este material, aunque menos común actualmente, se ha utilizado en ciertos sectores como alternativa al PVC por su rigidez estructural y buena resistencia a impactos.
- Barro. Corresponde al 6 % del total de la infraestructura. Este material es característico de redes antiguas y, aunque cuenta con buena durabilidad, presenta mayores restricciones operativas en cuanto a juntas, asentamientos diferenciales y dificultad para mantenimiento.

Respecto a los diámetros nominales, la red presenta dos secciones principales:

- Diámetro de 8 pulgadas. Es el predominante en el sistema, con una cobertura del 97 % de la longitud total, lo que indica que la red está diseñada principalmente para servir áreas residenciales con cargas sanitarias moderadas.
- Diámetro de 12 pulgadas. Presente en tan solo el 3 % del sistema, probablemente en tramos con concentración de descargas mayores.

Este perfil técnico sugiere una red con características homogéneas en la mayor parte de su trazado, lo que facilita el modelado hidráulico. Sin embargo, la coexistencia de diferentes materiales y la presencia de tramos antiguos pueden representar puntos críticos en cuanto a comportamiento hidráulico y estructural, especialmente en situaciones de caudal elevado o ante la acumulación de sedimentos.

La caracterización detallada de estos elementos es fundamental para la construcción precisa del modelo hidráulico en el software HTP (Hidráulica Termo Plus), ya que permite asignar correctamente parámetros como la rugosidad de la tubería (coeficiente de Manning), condiciones de borde y variaciones en el comportamiento del flujo a lo largo de la red.

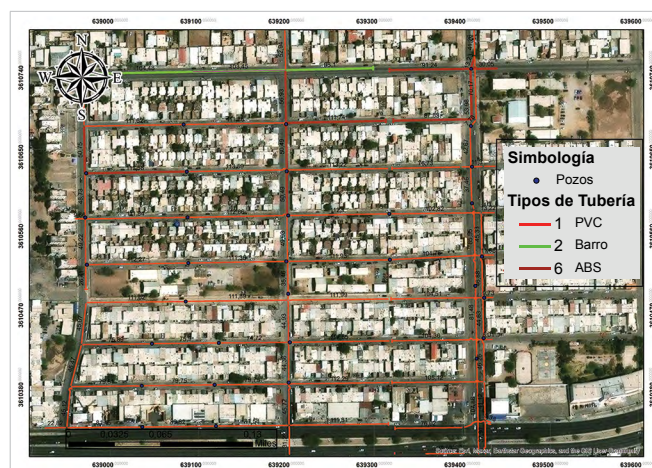


Figura 4. Representación de tubería en el área de enfoque. Fuente: elaboración propia.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Analizar el desempeño hidráulico y operativo del sistema de alcantarillado sanitario en el área de estudio, mediante la aplicación de herramientas de modelación

hidráulica, con el fin de identificar y diagnosticar sus principales deficiencias en términos de capacidad de conducción, condiciones operativas y necesidades de mantenimiento.

- Identificar y evaluar las principales problemáticas y deficiencias del sistema de alcantarillado sanitario en términos de capacidad, operación y mantenimiento.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar zonas con mayores problemas en la ciudad de Mexicali, Baja California, y elegir un área representativa.
- Simular en un software una modelación hidráulica que presente el estado actual de la red de la zona de estudio.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del presente estudio se estructuró integrando una revisión de literatura y, posteriormente, en dos etapas principales, criterios técnicos, operativos y de análisis computacional orientado a evaluar el desempeño del sistema de alcantarillado sanitario en el área de estudio ([Tabla 2](#) y [Figuras 5, 6, 7 y 8](#)).

TABLA 2
REVISIÓN DE LITERATURA

REF.	ENFOQUE	MÉTODO	TIPO DE INDICADORES	LIMITACIÓN
[5]	Optimización del uso de la capacidad de sistemas de alcantarillado sanitario	Modelación hidráulica+ <i>machine learning</i>	Físicos, hidráulicos, del modelo	Escala de estudio, dependencia de datos
[6]	Identificar problemas de capacidad, deterioro y funcionamiento	Recopilación de información, trabajo en campo, caracterización del sistema, modelación hidráulica, análisis de resultados	Físicos de infraestructura, hidráulicos, operativos	Información incompleta o desactualizada, alcance local
[7]	Evaluar el comportamiento del sistema, identificar zonas vulnerables	Cuantitativo y aplicado	Hidrológicos, hidráulicos, estadísticos	Falta de datos históricos
[8]	Identificar tramos críticos y fallas hidráulicas, proponer mejoras en la infraestructura existente	Recopilación de información trabajo en modelación hidráulica	Hidráulicos, físicos, análisis de escenarios	Dependencia de información, limitaciones del modelo hidráulico
[9]	Enfoque aplicado, evaluar el sistema de la red existente, analizar la capacidad hidráulica, detectar problemas operativos, proponer mejoras futuras (25 años)	Método mixto, cuantitativo, técnico y computacional	Hidráulicos y de diseño	Falta de mediciones reales, dependencia de proyecciones teóricas, tiempo insuficiente para estudios más completos
[10]	Aplicado y técnico	Método cuantitativo, recopilación de información, modelación hidráulica, análisis de resultados	Hidráulicos, hidrológicos y de diseño	Dependencia de datos secundarios. Posible falta de validación con mediciones reales
[11]	Metodología para estimar el estado estructural de tuberías no inspeccionadas	Base-de datos, clasificación del estado estructural, validación del modelo	De predicción, físicos de la red	Generalización limitada, variables no consideradas, incertidumbre en predicciones
[12]	Procedimental (guía técnica paso a paso)	Enfoque técnico-operativo y normativo	De condición física, de funcionamiento, de mantenimiento	Ausencia de modelación o análisis predictivo, dependencia de inspección visual, enfoque general
[13]	Cuantitativo, aplicado y simulación hidráulica	Técnico-hidráulico aplicado. La modelación hidráulica de una red drenaje pluvial urbana	Hidrológicos, hidráulicos (del modelo SWMM), de desempeño del sistema	Dependencia de calidad de datos, simplificaciones del modelo
[14]	Integral aplicado, uso de modelos hidráulicos, aplicación en un caso real	Cuantitativo, mixto (hidrológico-hidráulico) y basado en simulación	Hidrológicos, hidráulicos, de riesgo, económicos	Limitaciones del modelo, limitaciones operativas

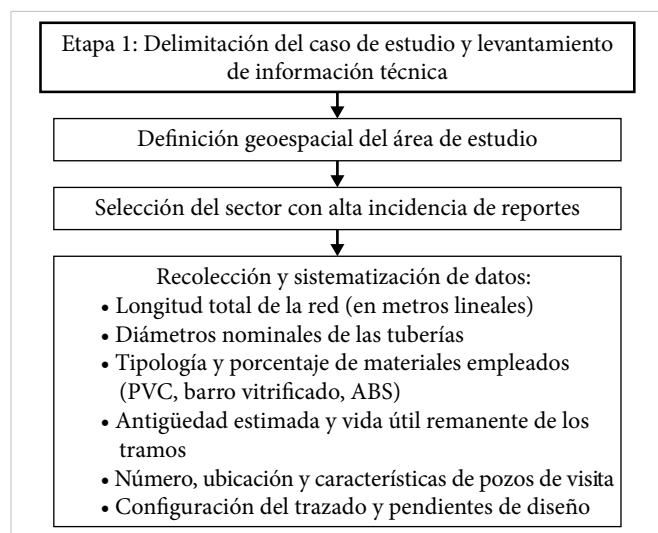


Figura 5. Etapa 1 de la metodología.

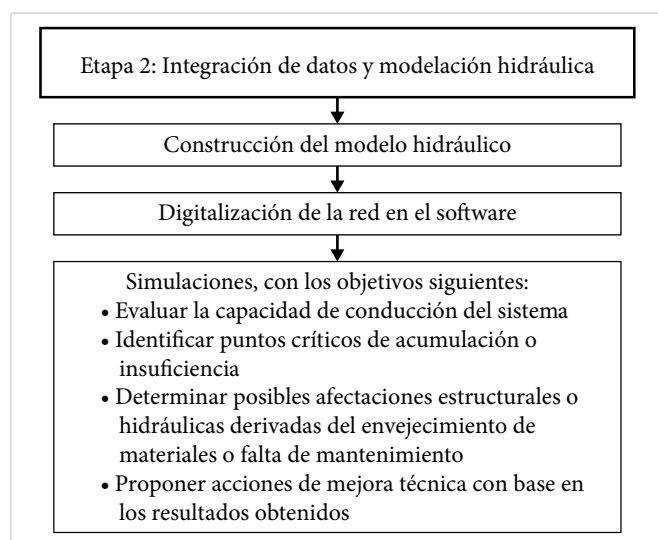


Figura 6. Etapa 2 de la metodología.

La literatura revisada confirma un avance significativo en la comprensión de los sistemas urbanos mediante herramientas analíticas y geoespaciales, sin embargo, una de las principales oportunidades para mejorar radica en la integración de datos, mediciones en campo y enfoques longitudinales, que permitan fortalecer la validez de los modelos actuales. Esta metodología permitió una evaluación integral y fundamentada del estado actual del sistema de alcantarillado sanitario, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones orientadas a su rehabilitación, optimización y gestión sostenible.

De acuerdo Llaguno *et al.* [14], los modelos hidráulicos permiten simular distintos escenarios de operación para analizar el comportamiento del sistema en términos de caudales, velocidades y niveles hidráulicos.

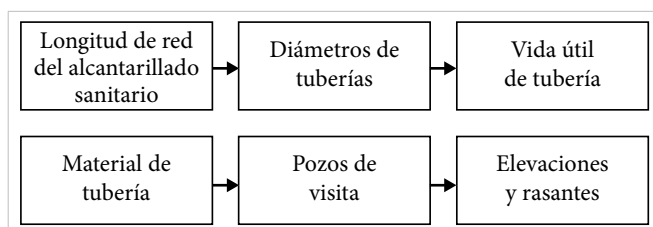


Figura 7. Datos técnicos para la modelación hidráulica.

El software utilizado en este estudio es Hidráulica Termo Plus (HTP), cuyo objetivo es facilitar el diseño, análisis y revisión de proyectos ejecutivos de alcantarillado sanitario, drenaje pluvial y agua potable bajo los criterios del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

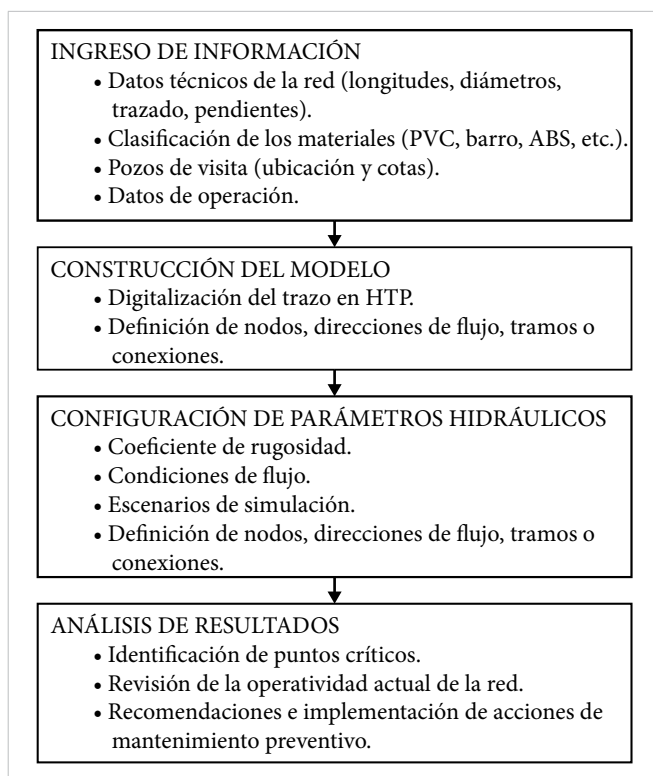


Figura 8. Actividades subsiguientes de la metodología.

Las fórmulas que incorporan a este software, son las siguientes:

Ecuación de Manning. Se utiliza para el flujo en tuberías con superficie libre (Ecuación 1) (y parcialmente lleno) para determinar velocidad, gasto, etc.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

donde V = velocidad (m/s), n = coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional), R = radio hidráulico (área

mojada / perímetro mojado) (m)^o y S = pendiente del conducto (m/m).

Cálculo de diámetro requerido. Respecto al flujo permanente, tubo lleno, etc., se usaron fórmulas derivadas de Manning para encontrar un diámetro que permita conducir un caudal dado con pendiente y rugosidad dadas (Ecuación (2)), Por ejemplo:

$$D = \left(\frac{Qn}{C} \right)^{3/8} S^{-1/2} \quad (2)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la información técnica recopilada —que incluyó datos topográficos, geometría de la red, características físicas de las conducciones, cotas altimétricas, parámetros de diseño sanitario y datos demográficos— se procedió a la carga estructurada de dichos elementos en el módulo de Drenaje Urbano del software HTP (Hidráulica Termo Plus) [15]. Esta integración permitió la digitalización completa de la red de alcantarillado sanitario del área de estudio y la parametrización hidráulica de cada uno de sus componentes.

Durante la simulación, el sistema hidráulico fue evaluado bajo condiciones de flujo a superficie libre, lo que permitió analizar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de operación, en concordancia con lo señalado por Núñez, Ullauri y Barzola-Monteses [9], quienes destacan que la modelación hidráulica facilita identificar deficiencias en la capacidad de conducción y apoya la toma de decisiones para optimizar el sistema. La modelación consideró la geometría individual de los tramos (diámetro, longitud, pendiente y rugosidad) y las condiciones de carga sanitaria definidas por la población servida y las dotaciones unitarias estimadas.

Tras la ejecución de la simulación hidráulica en el módulo de Drenaje Urbano del software HTP, se procedió al análisis detallado de variables críticas de operación, tales como velocidad del flujo, radio hidráulico, porcentaje de llenado, capacidad de conducción por tramo y condiciones de desfogue en el punto de descarga. Estas variables permitieron caracterizar el comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones representativas de carga sanitaria (Tabla 3).

TABLA 3
REVISIÓN DE LITERATURA

TUBO LLENO		RELACIÓN DE GASTOS		RELACIÓN VELOCIDAD		RELACIÓN TIRANTES		VELOCIDAD		TIRANTE		LLENADO DE TUBERÍA (%)
QII (l/s)	VII (m/s)	Qmín/QII	Qmáx/QII	Vmín/VII	Vmáx/VII	ymín/D	ymáx/D	Vmín (m/s)	Vmáx (m/s)	ymín (cm)	ymáx (cm)	
23.70	0.79	0.042	0.042	0.495	0.495	0.140	0.140	0.393	0.393	2.730	2.730	14.0
26.67	0.89	0.037	0.037	0.478	0.478	0.132	0.132	0.426	0.426	2.574	2.574	13.2
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
81.98	2.74	0.012	0.012	0.340	0.340	0.077	0.077	0.932	0.932	1.502	1.502	7.7
81.98	2.74	0.012	0.012	0.340	0.340	0.077	0.077	0.932	0.932	1.502	1.502	7.7
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.104	0.506	0.647	0.145	0.218	0.370	0.473	2.828	4.251	21.8
21.83	0.73	0.046	0.140	0.506	0.704	0.145	0.252	0.370	0.514	2.828	4.914	25.2
21.83	0.73	0.046	0.182	0.506	0.759	0.145	0.288	0.370	0.555	2.828	5.616	28.8
21.83	0.73	0.046	0.217	0.506	0.798	0.145	0.316	0.370	0.584	2.828	6.162	31.6
21.83	0.73	0.046	0.261	0.506	0.840	0.145	0.384	0.370	0.614	2.828	6.786	34.8
21.83	0.73	0.046	0.298	0.506	0.872	0.145	0.374	0.370	0.638	2.828	7.293	37.4
33.35	1.12	0.030	0.030	0.445	0.445	0.118	0.118	0.497	0.497	2.301	2.301	11.8
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
69.27	2.32	0.014	0.014	0.356	0.356	0.083	0.083	0.826	0.826	1.619	1.619	8.3
58.41	1.96	0.017	0.017	0.378	0.378	0.091	0.091	0.739	0.739	1.775	1.775	9.1
23.60	0.79	0.042	0.042	0.495	0.495	0.140	0.140	0.391	0.391	2.730	2.730	14.0
29.32	0.98	0.034	0.034	0.464	0.464	0.126	0.126	0.455	0.455	2.457	2.457	12.6
44.47	1.49	0.022	0.022	0.409	0.409	0.103	0.103	0.609	0.609	2.009	2.009	10.3
37.10	1.24	0.027	0.027	0.431	0.431	0.112	0.112	0.535	0.535	2.184	2.184	11.2

TABLA 3 (CONT.)
REVISIÓN DE LITERATURA

TUBO LLENO		RELACIÓN DE GASTOS		RELACIÓN VELOCIDAD		RELACIÓN TIRANTES		VELOCIDAD		TIRANTE		LLENADO DE TUBERÍA (%)
QII (l/s)	VII (m/s)	Qmín/QII	Qmáx/QII	Vmín/VII	Vmáx/VII	ymín/D	ymáx/D	Vmín (m/s)	Vmáx (m/s)	ymín (cm)	ymáx (cm)	
44.87	1.50	0.022	0.022	0.409	0.409	0.103	0.103	0.614	0.614	2.009	2.009	10.3
46.85	1.57	0.021	0.021	0.404	0.404	0.101	0.101	0.633	0.633	1.970	1.970	10.1
21.83	0.73	0.046	0.069	0.506	0.572	0.145	0.177	0.370	0.418	2.828	3.452	17.7
31.67	1.06	0.032	0.032	0.452	0.452	0.121	0.121	0.480	0.480	2.360	2.360	12.1
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
22.85	0.76	0.044	0.044	0.500	0.500	0.142	0.142	0.382	0.382	2.769	2.769	14.2
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
25.81	0.86	0.039	0.039	0.482	0.482	0.134	0.134	0.417	0.417	2.613	2.613	13.4
24.53	0.82	0.041	0.041	0.489	0.489	0.137	0.137	0.401	0.401	2.672	2.672	13.7
44.63	1.49	0.022	0.022	0.409	0.409	0.103	0.103	0.611	0.611	2.009	2.009	10.3
35.27	1.18	0.028	0.028	0.438	0.438	0.115	0.115	0.517	0.517	2.243	2.243	11.5
48.89	1.64	0.020	0.020	0.399	0.399	0.099	0.099	0.653	0.653	1.931	1.931	9.9
37.55	1.26	0.027	0.027	0.431	0.431	0.112	0.112	0.542	0.542	2.184	2.184	11.2
21.83	0.73	0.046	0.335	0.506	0.900	0.145	0.398	0.370	0.658	2.828	7.761	39.8
65.43	2.19	0.015	0.015	0.364	0.364	0.086	0.086	0.798	0.798	1.677	1.677	8.6
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
25.20	0.84	0.040	0.040	0.484	0.484	0.135	0.135	0.409	0.409	2.633	2.633	13.5
96.63	3.24	0.010	0.010	0.322	0.322	0.071	0.071	1.043	1.043	1.385	1.385	7.1
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
23.34	0.78	0.043	0.043	0.497	0.497	0.141	0.141	0.389	0.389	2.750	2.750	14.1

Proyecto: Simulación Hidráulica Fraccionamiento Las Palomas. Localidad: Mexicali, Baja California. Municipio: Mexicali. Estado: Baja California. Fecha: 19/08/2024.

Los resultados obtenidos indican que, desde una perspectiva hidráulica y de diseño, la red de alcantarillado sanitario evaluada no presenta deficiencias estructurales ni operativas significativas. Los caudales actuales, combinados con las pendientes y características geométricas de los tramos, permiten una operación estable y dentro de los márgenes aceptables definidos por la normativa técnica vigente. En ningún tramo se observó un llenado del 100 % ni condiciones de sobrecarga hidráulica o contrapendiente, lo cual confirma la suficiencia del diseño original en términos de capacidad de conducción.

Este resultado técnico permite descartar fallas asociadas al diseño hidráulico o estructural de la red como causa de las problemáticas reportadas en campo, especialmente en el contexto urbano de Mexicali, Baja California. Por lo tanto, se plantea como hipótesis principal que las afectaciones observadas (taponamientos,

brotos o retornos) derivan de una deficiente gestión de mantenimiento preventivo y correctivo, más que de un error en la concepción del sistema. En este sentido, los hallazgos obtenidos orientan a la necesidad de fortalecer las estrategias de mantenimiento operativo, incluyendo rutinas de limpieza, desazolve programado y rehabilitación de tramos con pérdida de capacidad por incrustaciones o sedimentación.

Las Figuras 9 y 10 ilustran los resultados generados por el modelo hidráulico, mostrando el comportamiento del flujo en distintos tramos de la red simulada. En ambos casos se confirma que el porcentaje de llenado se mantiene por debajo del umbral crítico, validando la hipótesis de que el sistema, desde su configuración hidráulica, cumple con los requerimientos de diseño y permite una operación eficiente bajo las condiciones actuales de carga.

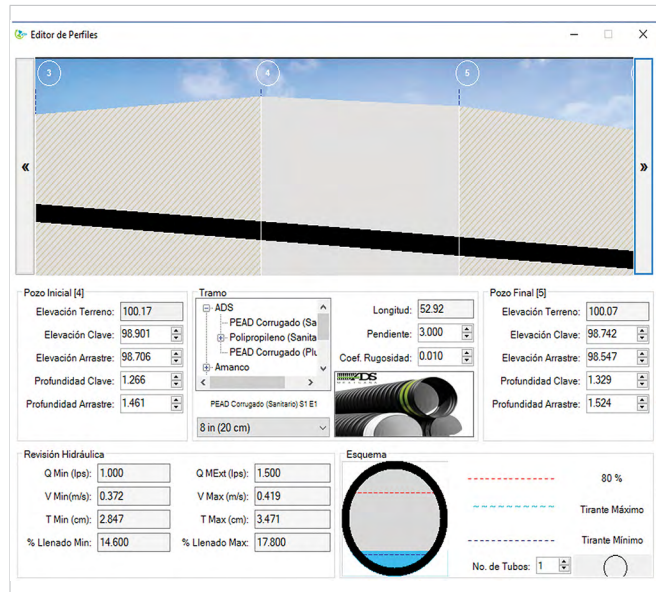


Figura 9. Modelación de red hidráulica en HTP: pozo inicial 4.

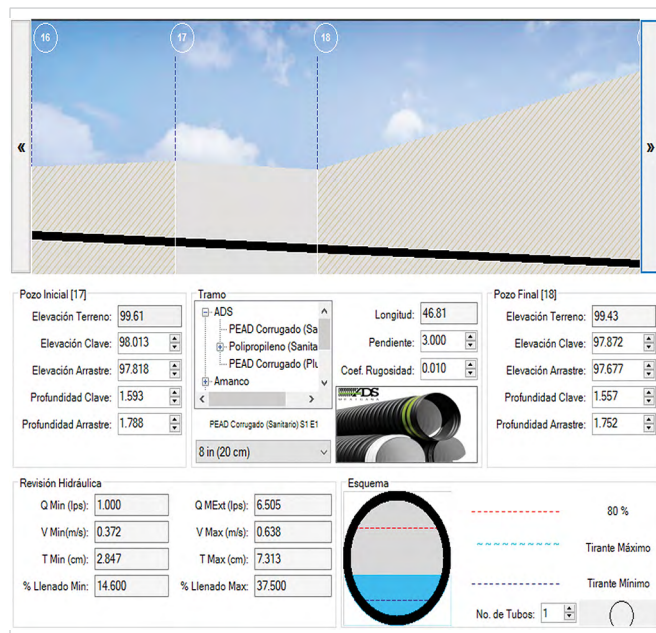


Figura 10. Modelación de red hidráulica en HTP: pozo inicial 17.

IV. CONCLUSIONES

Con base en los resultados arrojados del análisis hidráulico del sistema de alcantarillado sanitario, en la ciudad de Mexicali, Baja California, como caso de estudio, se puede establecer los siguientes puntos:

- La simulación hidráulica muestra que la red actual cumple con los parámetros técnicos establecidos y que, asimismo, no se detectaron fallas estructurales ni errores de diseño en los tramos modelados, lo

que indica que la infraestructura es adecuada para manejar las cargas actuales.

- Las pendientes y condiciones de desfogue permiten una operación buena de la red en condiciones normales.
- Dado que el diseño es adecuado, los problemas sanitarios observados en campo se deben probablemente a factores operativos, como acumulación de sedimentos, obstrucciones o fallas en el mantenimiento.

Se recomienda destinar maquinaria especializada de uso exclusivo para labores de mantenimiento preventivo y desazolve en la red de alcantarillado sanitario. También, es fundamental contar con personal técnico capacitado en operación y mantenimiento de sistemas de drenaje, el cual debe estar asignado de manera permanente a estas actividades específicas.

La implementación de estos recursos permitirá diseñar e implementar un programa sistemático de mantenimiento preventivo, con una planificación estructurada que garantice la atención progresiva de la totalidad del sistema. Bajo este enfoque, es factible que, en un horizonte de corto a mediano plazo, se logre cubrir el mantenimiento preventivo del 100 % de la red, optimizando su funcionamiento, reduciendo el costo en reparaciones o problemas agravados y, asimismo, reduciendo el riesgo de fallas operativas y prolongando la vida útil de la infraestructura sanitaria.

Además, se recomienda hacer el monitoreo continuo para la detección pronta de obstrucciones y otros signos de deterioro en los conductos, así como promover campañas ciudadanas para evitar el vertido de sólidos y grasas en el sistema que podría generar taponamientos.

REFERENCIAS

- J. O. Castillo y A. X. Castillo, "Diseño de un sistema de aguas servidas para la comuna Nueva Vida 1, ubicada en el km 19 vía a la costa", trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2025. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/30877/1/UPS-GT006496.pdf>
- Organización Mundial de la Salud. *Planificación de la seguridad del saneamiento: Manual para el uso y la eli-*

minación seguros de aguas residuales, aguas grises y excretas. (2019). [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549240>

- [3] CONAGUA, *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, edición 2020*. Ciudad de México: SEMARNAT, 2021. [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/680584/DSAPAS_2020.pdf
- [4] Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), “Informe sobre inversiones y proyectos en servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en Mexicali”, Mexicali, 2024.
- [5] D. Zhang, G. Lindholm, N. Martinez y H. Ratnaweera, H. “Exploiting capacity of sewer system using unsupervised learning algorithms combined with dimensionality reduction”, 2018, *arXiv:1811.03883*.
- [6] J. S. Soto y E. R. Polanía, “Modelación hidráulica de la red de alcantarillado del centro poblado El Cedral del municipio de Tello mediante el uso del software libre EPA SWMM, trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia, 2017. [En línea]. Disponible: <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/718dc43e-4bd1-46da-9d83-0020c4a846c3>
- [7] J. F. Sanjuan y K. A. Guillen, “Catastro de redes y modelación hidráulica del sistema de alcantarillado tipo sanitario del área urbana del municipio de San Martín, departamento – Cesar”, trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia, 2018.
- [8] M. Cortés-Zambrano, W. E. Amaya-Tequia y D. S. Gamba-Fernández, “Modelización hidráulica de drenaje urbano. Implementación en sector, nororiental, Tunja-Boyacá”, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n.º 101, pp. 74-83, jul. 2020, doi: [10.17533/udea.redin.20200798](https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200798).
- [9] J. Núñez, J. Barzola y A. Ullauri, “Diagnóstico, Modelación y Determinación de la Capacidad Hidráulica de sistemas de Alcantarillado”, *Revista Ciencia e Investigación*, vol. 3, n.º extra 3, pp. 88-101, 2018.
- [10] L. R. Carbajal y W. Córdova, “Modelación hidráulica de la red de alcantarillado y drenaje pluvial mediante el uso del modelo numérico SWMM”, tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú, 2021.
- [11] N. Hernández, M. A. Cañón y A. Torres, “Methodology for Classifying the Structural State of Uninspected Pipes in Sewer Networks Based on Support Vector Machines”, *Ing. Investig.*, vol. 42, n.º 2, jun. 2022, doi: [10.15446/ing.investig.v42n2.85917](https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n2.85917).
- [12] OPS/CEPIS. *Operación y mantenimiento de sistemas de alcantarillado sanitario en el medio rural*. (2005). [En línea]. Disponible: <https://iris.paho.org/server/api/core/bitstreams/00dd2bf0-829f-441d-9d1e-c7bd1f459ab9/content>
- [13] C. L. Herrera, “Modelación hidráulica mediante la utilización del software SWMM para una red pluvial ubicada en Fila Alta, provincia de Jaén 2021”, tesis de grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.usat.edu.pe/items/b0018a8e-bfbf-40a2-a3d2-a789143b3b5f>
- [14] O. J. Llaguno, J. M. Rodríguez, J. Maldonado, V. H. Alcocer y M. A. Jiménez, “Use of hydraulic models for the solution of sanitary and pluvial problems: Case study Chetumal, Quintana Roo, Mexico”, *North American Water Conference*. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/331634614_Water_for_a_rising_population_in_a_changing_world
- [15] Termo Plus. *Hidráulica Termoplus. Manual de Usuario. Software HTP. Drenaje Urbano*, ver. 2021 (2021). [En línea]. Disponible: https://termoplus.mx/ingenieria/assets/Manual_Drenaje_Urbano.pdf

Selección de proveedores verdes en la cadena de suministro: aplicación del método MEREC en la industria maquiladora

Green Supplier Selection in Supply Chains: Application of the MEREC Method in the Maquiladora Industry

Alejandra Holguín Avila¹ , Luis Asunción Pérez Domínguez¹ , Roberto Romero Lopez¹ , David Luviano Cruz¹ , Erwin Adán Martínez Gómez¹ 

¹ Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

En el contexto actual, donde la sostenibilidad en los negocios se ha convertido en un factor importante para la competitividad empresarial, la selección de proveedores verdes desempeña un papel primordial en la gestión eficiente y responsable de las cadenas de suministro. Esta investigación propone un modelo basado en métodos multicriterio (MCDM), como MEREC, para evaluar y priorizar proveedores en función de criterios ambientales, económicos y sociales, contribuyendo así al fortalecimiento de prácticas sostenibles en la industria maquiladora. El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo de apoyo a la decisión para la selección de proveedores verdes en cadenas de suministro. La metodología incluye una revisión exhaustiva de la literatura y la identificación de criterios ambientales relevantes para priorizar proveedores que demuestren un mayor compromiso ambiental, sin afectar costos ni tiempos de entrega. Los resultados preliminares, obtenidos a partir de un estudio piloto en el sector industrial de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, evidencian que el modelo facilita una clasificación pragmática entre proveedores sostenibles y tradicionales, permitiendo tomar decisiones alineadas con estrategias de responsabilidad social y sustentabilidad empresarial.

PALABRAS CLAVE: proveedores verdes; MCDM; sostenibilidad empresarial; cadena de suministro.

ABSTRACT

In the current context, where corporate sustainability has become a critical factor for business competitiveness, the selection of green suppliers plays a pivotal role in the efficient and responsible management of supply chains. This research proposes a model based on multicriteria methods, such as MEREC, to evaluate and prioritize suppliers according to environmental, economic, and social criteria, thereby contributing to the strengthening of sustainable practices within the maquiladora industry. The primary objective of this study is to develop a decision-support model for green supplier selection in supply chains. The methodology includes an extensive review of the literature and the identification of relevant environmental criteria to prioritize suppliers that demonstrate greater environmental commitment, without compromising costs or delivery times. Preliminary results, obtained from a pilot study in the industrial sector of Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico, show that the model facilitates a pragmatic classification between sustainable and traditional suppliers, allowing for decisions aligned with corporate social responsibility and sustainability strategies.

KEYWORDS: green suppliers; MCDM; corporate sustainability; supply chain.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Luis Asunción Pérez Domínguez
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320,
Ciudad Juárez, Chih., México
CORREO ELECTRÓNICO: luis.dominguez@uacj.mx

Fecha de recepción: 16 de enero de 2026. **Fecha de aceptación:**
19 de marzo de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

A. APLICACIÓN DEL MÉTODO MEREC

En la nueva era digital, los procesos de toma de decisiones se caracterizan por una creciente complejidad y por la presencia de múltiples variables. Ante este escenario, los métodos multicriterio de decisión (MCDM, por sus siglas en inglés) se han consolidado como herramientas fundamentales para evaluar alternativas, considerando varios criterios de manera simultánea [1]. Dentro de este conjunto de métodos, MEREC (Method based on the Removal Effects of Criteria) destaca por su enfoque innovador orientado a la ponderación objetiva de los criterios, reduciendo así la influencia de sesgos subjetivos en el proceso decisorio [2].

A diferencia de otros enfoques de ponderación, MEREC se fundamenta en el análisis del impacto que genera la eliminación de cada criterio sobre el desempeño global de las alternativas. Esta característica le confiere una relevancia especial en problemas donde es fundamental entender la causalidad y la influencia relativa de los criterios para garantizar decisiones sólidas y coherentes. Así, MEREC no solo identifica los criterios más críticos, sino que también permite detectar aquellos con menor relevancia en la decisión final [3].

Diversos estudios han demostrado que MEREC mantiene estabilidad y eficiencia incluso en problemas de gran escala, caracterizados por un elevado número de criterios y alternativas [4]. Más allá de su robustez, el método destaca por su capacidad para identificar la contribución marginal de cada criterio, lo que permite una diferenciación más precisa en comparación con enfoques convencionales. Adicionalmente, las simulaciones con datos distribuidos normalmente corroboran su consistencia, reforzando su idoneidad para escenarios donde se requiere una asignación objetiva y sensible de los pesos [5].

El método ha sido exitosamente ampliado para gestionar la incertidumbre mediante modificaciones difusas, a la vez que mantiene coeficientes de correlación consistentes y robustez frente a valores atípicos [6]. Asimismo, las aplicaciones prácticas demuestran la eficacia de MEREC en escenarios reales, por ejemplo, en la selección de proveedores con MCDM, como CODAS, COPRAS y VIKOR [7]. Finalmente, el método facilita una toma de decisiones sistemática y objetiva al integrar

procesos de evaluación multicriterio, lo cual se evidencia en aplicaciones de selección de proveedores [8].

B. COMPARACIÓN DE MEREC CON OTROS MÉTODOS MULTICRITERIO

La selección de proveedores verdes constituye un desafío clave dentro de la gestión de cadenas de suministro sostenibles, ya que implica equilibrar criterios ambientales, económicos y sociales de forma simultánea. Para este propósito, los métodos de decisión multicriterio (MCDM) se han convertido en herramientas fundamentales al permitir la evaluación estructurada de alternativas en entornos complejos. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) e ITARA (Information Theory and Absolute Ranking Algorithm), las cuales permiten obtener ponderaciones objetivas basadas en correlaciones y medidas de información, respectivamente [9].

Sin embargo, recientes investigaciones han demostrado que estos enfoques pueden presentar limitaciones, como la tendencia a generar pesos demasiado uniformes (ITARA) o la sobrevaloración de criterios correlacionados (CRITIC) [9]. Frente a ello, el método MEREC surge como una alternativa más robusta, al centrarse en el impacto real que la eliminación de cada criterio ejerce sobre el desempeño global de las alternativas. Asimismo, su versión extendida bajo lógica difusa, Fuzzy MEREC-G, incorpora la posibilidad de manejar incertidumbre y juicios lingüísticos, lo cual resulta especialmente pertinente en la evaluación de proveedores sostenibles donde la información suele ser incompleta o ambigua.

La [Tabla 1](#) se presenta un cuadro comparativo que sintetiza las características principales, fortalezas, limitaciones y mejoras que aporta el método MEREC frente a otros enfoques multicriterio, evidenciando su aplicabilidad y ventajas en procesos de selección de proveedores verdes.

Del análisis mostrado en esta tabla, se desprende que el método MEREC puede brindar una ponderación más objetiva, diferencia y estable relacionada con los otros criterios de comparación que pueden ofrecer otros métodos, ya que este puede evaluar directamente el impacto que tiene la eliminación de cada criterio sobre el desempeño global de las alternativas.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MÉTODO MEREC

MÉTODO	CARACTERÍSTICAS	LIMITACIONES	CÓMO MEJORA CON MEREC
CRITIC ¹	Basado en la variación y correlación entre criterios. Asigna mayor peso a criterios con alta varianza y baja correlación.	Sensible a <i>outliers</i> y a la multicolinealidad. Puede sobreponderar criterios muy correlacionados.	Se maneja mejor las correlaciones al evaluar el impacto por la eliminación de cada criterio, evitando sobrepriorización.
ITARA ²	Método basado en la teoría de la información. Usa entropía para distribuir pesos de forma balanceada.	Tiende a generar pesos demasiado uniformes, diluyendo la importancia de criterios críticos.	Refina la entropía y genera pesos diferenciados que reflejan mejor la influencia relativa de cada criterio.
MEREC ³	Evalúa el efecto de remover cada criterio sobre el desempeño total. Ponderación objetiva basada en sensibilidad.	Puede ser computacionalmente más complejo que ITARA. Requiere buena calidad de datos.	Se adapta mejor a contextos de sostenibilidad, al balancear criterios económicos, ambientales y sociales con robustez.
Fuzzy MEREC-G ⁴	Extiende MEREC para trabajar con números difusos triangulares y juicios lingüísticos. Integra criterios objetivos y subjetivos.	Mayor carga computacional. Requiere conocimiento especializado en lógica difusa.	Ofrece la versión más realista de MEREC: combina objetividad con la flexibilidad de la información lingüística, esencial para evaluar sostenibilidad.

¹ Criteria Importance Through Intercriteria Correlation; ² Information Theory and Absolute Ranking Algorithm; ³ Mean Entropy-based Relative Criteria Weighting; ⁴ Geometric mean + lógica difusa.

C. CRITERIOS AMBIENTALES EN LA INDUSTRIA
MANUFACTURERA MEDIANTE MEREC. CASO PRÁCTICO

Dentro de las industrias manufactureras existen gran presión regulatoria y social para reducir su huella ambiental. Sin embargo, algunas empresas pueden carecer de métodos claros para priorizar los criterios ambientales en la selección de proveedores. Un ejemplo que pueden utilizar es el método propuesto en este documento, el cual se puede aplicar de la siguiente manera, de los cuales la base primaria se puede encontrar en el [Anexo 2](#).

Con base en cuatro proveedores de la industria maquiladora en Ciudad Juárez tomados como referencia, se definen los criterios mostrados en la [Tabla 2](#).

Para la justificación del uso de los cuatro proveedores seleccionados, se preseleccionaron los siguientes criterios:

1. Proveedores con certificación ambiental ≥ 75 %.
2. Disponibilidad de datos completos.
3. Proveedores activos en el último año.
4. Cumplimiento logístico.

TABLA 2
CRITERIOS DE LOS PROVEEDORES

CRITERIO	CARACTERÍSTICAS	COSTO / BENEFICIO	VALOR
C1	Precio	Costo	Mín
C2	Emisiones	Costo	Mín
C3	Certificación ambiental	Beneficio	Máx
C4	Energía renovable	Beneficio	Máx
C5	Plazo de entrega	Costo	Mín

Estos criterios se definen bajo el marco ESG (Environmental, Social and Governance), que ayuda a orientar las actividades sostenibles dentro de una empresa, las cuales se definen en la [Tabla 3](#).

TABLA 3
TABLA ESG DE CRITERIOS

CRITERIO	DIMENSIÓN	UNIDAD
Precio	Económica	USD
Emisiones	Ambiental	kg CO ₂
Certificación ambiental	Ambiental	%
Energía renovable	Ambiental	%
Plazo	Operativa	Días

Asignadas las características y los valores correspondientes, se procede a generar la matriz de decisión, $X = X_{ij}$, indicada en la [Tabla 4](#).

TABLA 4
TABLA ESG DE CRITERIOS

PROVEEDOR	C1	C2	C3	C4	C5
A	5.2	180	85	60	7
B	4.8	220	80	70	10
C	5.5	160	90	50	8
D	5.0	200	75	80	9

Bajo la referencia del [Anexo 2](#), la matriz de decisión se genera a partir de registros internos de evaluación. En un principio se consideraron 12 proveedores potenciales de insumos industriales, inicialmente evaluados mediante indicadores económicos, ambientales y operativos, permitiendo garantizar trazabilidad en el origen de los datos y reproducibilidad del ejercicio metodológico.

Posteriormente, al aplicar la fórmula de normalización, la cual será explicada en el siguiente apartado, se obtuvo la [Tabla 5](#).

TABLA 5
NORMALIZACIÓN DE LOS DATOS

PROVEEDOR	C1↓	C2↓	C3↑	C4↑	C5↓
A	0.923	180	85	60	7
B	1.000	220	80	70	10
C	0.873	1	1	0.625	0.875
D	0.960	0.8	0.833	1	0.778

Símbolos: ↑ = beneficio; ↓ = costo.

De esto se genera lo siguiente, como resultado de desempeño global base:

$$\begin{aligned} PA &= 0.8971 \\ PB &= 0.8309 \\ PC &= 0.8625 \\ PD &= 0.8698 \end{aligned}$$

Una vez obtenidos estos valores, se procede a la aplicación del método MEREC, el cual se sustenta en determinar qué tan importante es cada alternativa. Si el desempeño varía en gran medida, este criterio es crítico, y si no existe mayor variación, este es menos favorable, con lo cual se generan los resultados siguientes al aplicar la ecuación:

Paso 1 para el proveedor A:

$$\begin{aligned} PA &= 0.8971 \\ \text{Se elimina C4:} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PA(-4) &= (0.923 \cdot 0.889 \cdot 0.944 \cdot 1.000)^{\frac{1}{4}} = 0.9382 \\ \text{Diferencia:} \\ \Delta A,4 &= 0.8971 - 0.9382 = 0.0411 \end{aligned}$$

Paso 2 para el proveedor B:

$$\begin{aligned} PB &= 0.8309 \\ \text{Se elimina C4:} \\ PB(-4) &= (1.000 \cdot 0.727 \cdot 0.889 \cdot 0.700)^{\frac{1}{4}} = 0.8269 \\ \text{Diferencia:} \\ \Delta B,4 &= 0.8309 - 0.8269 = 0.004 \end{aligned}$$

Paso 3 para el proveedor C:

$$\begin{aligned} PC &= 0.8625 \\ \text{Se elimina C4:} \\ PC(-4) &= (0.873 \cdot 1.000 \cdot 1.000 \cdot 0.875)^{\frac{1}{4}} = 0.9356 \\ \text{Diferencia:} \\ \Delta C,4 &= 0.8625 - 0.9356 = 0.0731 \end{aligned}$$

Paso 4 para el proveedor D:

$$\begin{aligned} PD &= 0.8698 \\ \text{Se elimina C4:} \\ PD(-4) &= (0.960 \cdot 0.800 \cdot 0.833 \cdot 0.778)^{\frac{1}{4}} = 0.8416 \\ \text{Diferencia:} \\ \Delta D,4 &= 0.8698 - 0.8416 = 0.0282 \end{aligned}$$

Paso final 5: suma de todas las diferencias

$$EC4 = 0.0411 + 0.0040 + 0.0731 + 0.0282 = 0.1464$$

A fin de facilitar la comprensión, este artículo ejemplifica el procedimiento tomando únicamente el criterio C4. Para una aplicación completa y reproducible del método, el análisis debe extenderse a todos los criterios del conjunto.

Para obtener el peso final de cada criterio, el procedimiento se aplica de manera sistemática a todas las diferencias Δij , es decir, para cada criterio j se elimina dicho criterio de la evaluación y se recalcula el desempeño global de cada alternativa mediante la fórmula base de MEREC. La diferencia entre el desempeño original y el recalculado representa el efecto de remoción para cada alternativa. Posteriormente, estos efectos se suman para cada criterio, obteniendo así el valor agregado Ej , que refleja la importancia global de dicho criterio. Finalmente, al normalizar estos valores Ej , se derivan los pesos finales de MEREC que permiten identificar qué criterios son más determinantes en el resultado de la selección, dando como resultado los valores siguientes:

EC1 = 0.0677	→	WC1 = 0.1486
EC2 = 0.0799	→	WC2 = 0.1753
EC3 = 0.0660	→	WC3 = 0.1449
EC4 = 0.1539	→	WC4 = 0.3378
EC5 = 0.0881	→	WC5 = 0.1934

El criterio C4, correspondiente a energía renovable, es el más influyente, con un peso de 0.3378, y posteriormente se tiene el C5, relacionado al plazo, y finalmente el C2, de las emisiones, dando como respuesta que el resto de los criterios tienen un efecto marginal agrado menor que los demás.

Por último, se aplica una ecuación 6 para delimitar puntuación final y *ranking* con el método WSM, el cual da por resultado lo siguiente:

VA = 0.8766
VB = 0.8358
VC = 0.8303
VD = 0.8919

Con este resultado, se puede determinar que el peso C4 es más dominante, seguido del C5 y C2.

II. METODOLOGÍA

En este trabajo se aplicó el método MEREC para la determinación objetiva de criterios basado en pesos dentro de un ejemplo práctico de selección de proveedores verdes para analizar la variación en el desempeño de alternativas al eliminar cada criterio de forma independiente, permitiendo identificar qué criterios influyen de manera más significativa en la decisión final. La metodología abarcó las etapas siguientes:

1. Revisión sistemática de literatura bajo el método PRISMA.

1.1 La estrategia de búsqueda se basó en publicaciones comprendidas entre 2019 y 2025.

1.2 Las consultas se realizaron mediante la búsqueda de palabras clave en inglés, tales como: “green supplier selection” OR “sustainable supplier selection” AND (“MCDM” OR “multi-criteria decision making”) AND (“MEREC” OR “objective weighting methods”) AND (“supply chain sustainability”).

1.3 Las bases de datos consultadas son Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Springer, IEEE Xplore.

1.4 Los criterios de inclusión corresponden a artículos publicados en revistas científicas indexadas, relacionadas con la selección de proveedores, sostenibilidad en cadenas de suministro y MCDM.

1.5 Los criterios de exclusión corresponden a artículos duplicados entre bases de datos, documentos que no traten de selección de proveedores o sostenibilidad, estudios que no muestren una metodología acorde a los objetivos de este artículo y documentos no arbitrados.

1.6 La selección de estudios abarcó 137 registros y al eliminar duplicados se obtuvieron 102 artículos, con 46 estudios de alta relevancia, dando un total de 28 estudios que cumplieron con todos los criterios (para más detalles, consulte el [Anexo 1](#)).

2. Planteamiento de alternativas sobre los proveedores a considerar, basado en la información proporcionada por la empresa maquiladora en Ciudad Juárez.

3. Construcción de la matriz de decisión, expresada de la siguiente manera:

$$X = [x_{ij}]$$

Matriz 1. Decisión.

4. Aplicar ecuación de normalización de la matriz para cada criterio j :

Beneficio:

$$e_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}$$

Ecuación 1. Beneficio.

Costo:

$$e_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}}$$

Ecuación 2. Costo.

5. Aplicar la media geométrica para determinar el desempeño global de base, tomando en cuenta i como cada alternativa y n como los 5 criterios.

$$P_i = \left(\prod_{j=1}^n e^{ij} \right)^{1/n}$$

Ecuación 3. Media geométrica.

- Utilizar la remoción por criterio o mejor conocido como aplicación particular del método MEREC.

$$p_i(-j)' = \left(\prod_{k \neq j} e^{ik} \right)^{1/(n-1)}$$

$$\Delta_{ij} = p_i^{1-j} - p_i^{(1-j)}$$

Ecuación 4. Núcleo de MEREC.

- Aplicar la fórmula de agregación para la obtención de pesos.

$$E_j = \sum \Delta_{ij} \rightarrow \omega_j = \frac{E_j}{\sum k E_k}$$

Ecuación 5. Agregación por criterio.

- Generar la puntuación final y el *ranking*

$$V_i = \sum \omega_j e_{ij}$$

Ecuación 6. WSM (Modelo de suma ponderada)

Esta metodología llevada en práctica de manera puntual no solo puede ayudar a obtener los pesos objetivos, sino que también garantiza estabilidad y robustez en la ponderación lo cual ayuda a sustentar mejores decisiones, en este caso en particular, para la selección de proveedores verdes dentro de una institución.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicar el método MEREC al caso práctico, ayudó a calcular los desempeños globales iniciales de los cuatro proveedores. Dichos valores representan la situación base al considerar en conjunto los cinco criterios principales previamente señalados, lo cuales fueron:

- Precio
- Emisiones
- Certificación ambiental
- Energía renovable
- Plazo de entrega

Posterior a ello, una vez que se aplicó el procedimiento de eliminación de criterios, se procedió a calcular las diferencias, la suma por criterio y los pesos ya normaliza-

dos. Resalta que el criterio de más impacto es el C4 (uso de energía renovable), con un peso de 0.3378, siendo el resultado más alto en comparación de los demás. Este criterio representa que la incorporación de energías renovables es un factor de gran importancia al momento de la selección de un proveedor, el mantener su estándar de energía limpia y su compromiso con medio ambiente, resultando ser algo primordial. En segundo término, se tiene el criterio 5 (plazo de entrega), con un peso de 0.1934, y en tercer lugar las emisiones, con un peso de 0.1753. Con este resultado, el *ranking* final indica que el proveedor D es la mejor opción, seguida del proveedor A, dejando los restantes como proveedores con desempeños más bajos.

Mediante el análisis de sensibilidad basado en perturbación de pesos —conocido como Robustness Analysis of Rankings y que se aplica a problemas de decisión multicriterio [10] para evaluar la robustez y verificar la estabilidad del *ranking* obtenido mediante la integración de MEREC y WSM—, se examinó la sensibilidad de los criterios, modificando su peso en rangos de $\pm 10\%$ y 20% y normalizando el vector de pesos para conservar la suma total igual a 1. Los siguientes resultados se muestran en la [Tabla 6](#).

TABLA 6
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

ESCENARIO	RANKING RESULTANTE	CAMBIO RESPECTO A LA BASE
C1 -10 %	D > A > B > C	NO
C1 +10 %	D > A > B > C	NO
C2 -10 %	D > A > B > C	NO
C2 +20 %	D > A > B > C	SÍ
C3 -10 %	D > A > C > B	NO
C3 +10 %	D > A > B > C	NO
C4 -10 %	D > A > B > C	SÍ
C4 -20 %	A > D > C > B	SÍ
C4 +10 %	D > A > B > C	NO
C5 +20 %	D > A > C > B	SÍ

El análisis de sensibilidad mostró que el *ranking* base D > A > B > C permanece estable en la mayoría de los escenarios, lo que propone una robustez aceptable para el modelo.

Del mismo modo, estos resultados representan que el método MEREC ofrece una ponderación más objetiva

y diferenciada que otros enfoques tradicionales, como CRITIC o ITARA señalados en la literatura, los cuales tienden a sobrevalorar criterios correlacionados o generar distribuciones de pesos uniformes.

IV. CONCLUSIONES

Una vez que se aplique, este método proporcionará a las empresas un marco sistemático para clasificar proveedores sostenibles y apoyar decisiones coherentes con sus estrategias de responsabilidad social y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este enfoque no solo puede mejorar la transparencia en la selección de proveedores, sino que también fortalece la capacidad de las organizaciones para integrar criterios ambientales y sociales en su gestión operativa.

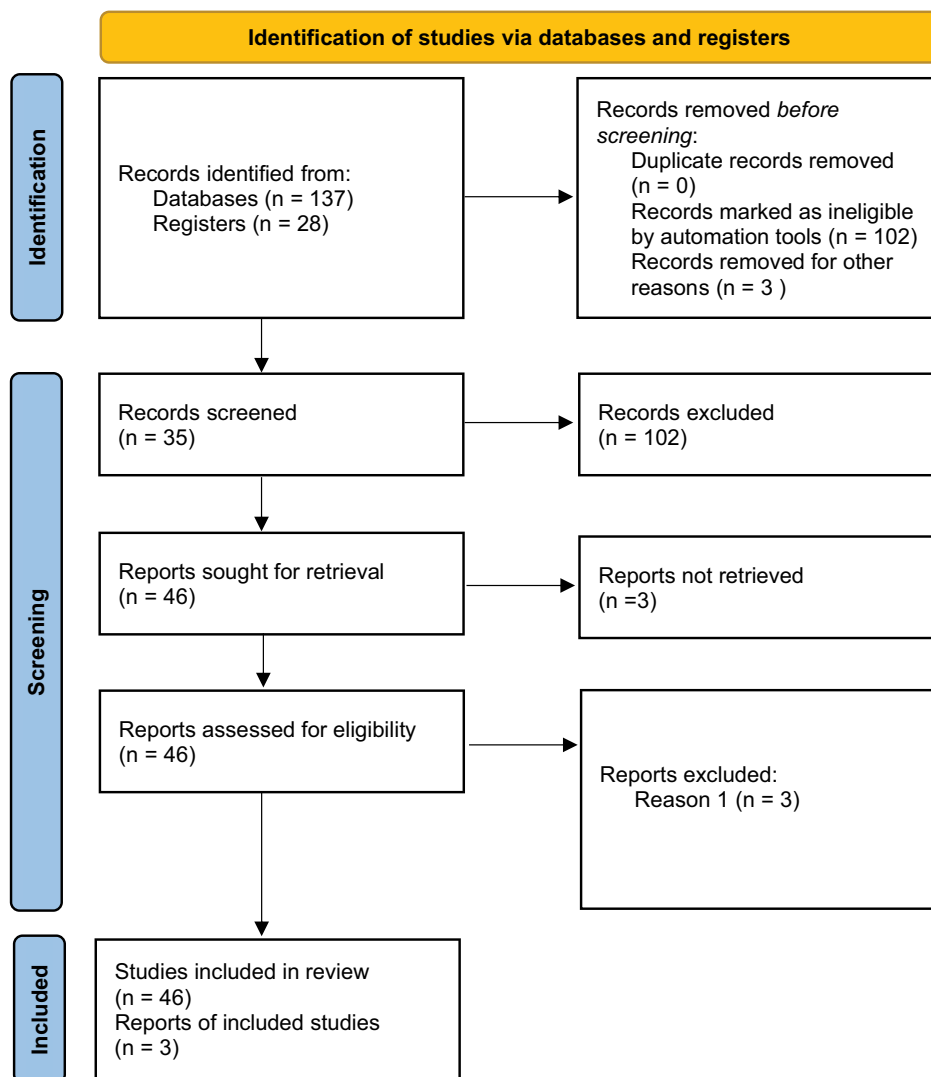
Por último, se sugiere ampliar el estudio hacia modelos híbridos más complejos, como Fuzzy MEREC-G, el cual ayudar a incorporar la lógica difusa para manejar información incierta o subjetiva y para mejorar aún más la aplicabilidad del método en contextos reales relacionadas con el presente tema.

REFERENCIAS

- [1] M. Keshavarz-Ghorabae, M. Amiri, E. K. Zavadskas, Z. Turskis y J. Antucheviciene, "Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC)", *Symmetry*, vol. 13, n.º 4, p. 525, 2021, doi: [10.3390/sym13040525](https://doi.org/10.3390/sym13040525).
- [2] M. S. Saidin, L. S. Lee, S. M. Marjugi, M. Z. Ahmad y H.-V. Seow, "Fuzzy method based on the removal effects of criteria (MEREC) for determining objective weights in multi-criteria decision-making problems", *Mathematics*, vol. 11, n.º 6, p. 1544, 2023, doi: [10.3390/math11061544](https://doi.org/10.3390/math11061544).
- [3] A. Eydi y M. GholamAzad, "Proposing a new integrated MEREC-NDEA algorithm for assessing and selecting the optimal sustainable suppliers: a case study", *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 33, pp. 2411-2440, 2024, doi: [10.1111/itor.13586](https://doi.org/10.1111/itor.13586).
- [4] P. Ghadimi, C. Wang, M. K. Lim y C. Heavey, "Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 127, pp. 588-600, 2019, doi: [10.1016/j.cie.2018.10.050](https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.050).
- [5] N. Thi, N. Hong y D. X. Thao, "Evaluating the Impact of Weighting Methods on the Stability of Scores for Alternatives in Multi-Criteria Decision-Making Problems", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 15, n.º 1, pp. 19998-20004, 2025, doi: [10.48084/etasr.9518](https://doi.org/10.48084/etasr.9518).
- [6] M. S. Saidin, L. S. Lee, S. M. Marjugi, M. Z. Ahmad y H.-V. Seow, "Fuzzy method based on the removal effects of criteria (MEREC) for determining objective weights in multi-criteria decision-making problems", *Mathematics*, vol. 11, n.º 6, p. 1544, 2023, doi: [10.3390/math11061544](https://doi.org/10.3390/math11061544).
- [7] G. Shanmugasundar, G. Sapkota, R. Čep y K. Kalita, "Application of MEREC in multi-criteria selection of optimal spray-painting robot", *Processes*, vol. 10, n.º 6, p. 1172, 2022, doi: [10.3390/pr10061172](https://doi.org/10.3390/pr10061172).
- [8] P. Piedra, D. Galván, F. Y. Villamizar y F. R. Arencibia-Pardo, "Selección de proveedores con multicriterio basado en el método PROMHETEE y MEREC", *Mundo FESC*, vol. 14, n.º 29, pp. 37-52, 2024, doi: [10.61799/2216-0388.1609](https://doi.org/10.61799/2216-0388.1609).
- [9] S. Hashemkhani, "Objective weighting in MCDM: A comparative study of CRITIC, ITARA, MEREC, and beyond", *Decis. Mak. Artif. Intell. Trends*, vol. 1, n.º 1, pp. 105-120, 2024.
- [10] E. K. Zavadskas, Z. Turskis y S. Kildienė, "State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods", *Technol. Econ. Dev. Econ.*, vol. 20, n.º 1, pp. 165-179, 2014, doi: [10.3846/20294913.2014.892037](https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037).

ANEXO 1

PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases and registers only



*Consider, if feasible to do so, reporting the number of records identified from each database or register searched (rather than the total number across all databases/registers).

**If automation tools were used, indicate how many records were excluded by a human and how many were excluded by automation tools.

Source: Page MJ, et al. BMJ 2021;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71.

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ANEXO 2

Proveedor	Precio (USD)	Emisiones CO ₂ (kg)	Certificación ambiental (%)	Energía Renovable (%)	Plazo entrega días
P1	5.1	175	80	55	8
P2	4.9	210	75	60	9
P3	5.4	190	82	50	10
P4	5	205	78	70	9
P5	5.3	165	88	65	7
P6	4.7	230	70	60	11
P7	5.2	180	85	60	7
P8	5.6	150	92	55	8
P9	4.8	220	80	70	10
P10	5.4	170	87	75	9
P11	5.1	195	83	65	8
P12	5	200	75	80	9

Residuos voluminosos en Latinoamérica: caso de estudio para los colchones en desuso

Bulky waste in Latin America: A case study for unused mattresses

Ana María Jiménez Leal¹ , Rodrigo Barraza Alonso¹  , Leonardo Rodríguez-Cordova¹ 

¹ Ingeniería Civil Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Chile

RESUMEN

Este trabajo de investigación aplicada presenta el diseño de un modelo de gestión para la recolección, reciclaje y valorización de colchones en desuso para nueve comunas de la Región Metropolitana en Chile, integrando criterios de economía circular, trazabilidad y sustentabilidad. Se aplicó una metodología mixta con uso de fuentes primarias y secundarias, además de técnicas cualitativas y cuantitativas, que incluyó el levantamiento de información técnica, diagnósticos territoriales, encuestas a municipios, revisión de casos internacionales y modelación de proyecciones demográficas y de generación de residuos. El diagnóstico evidencia una alta generación de colchones en desuso en la ciudad de Santiago de Chile, escasa infraestructura específica para su reciclaje y una respuesta municipal fragmentada. El caso de estudio se basó en la instalación de contenedores comunales para el acopio inicial, centralizar el almacenamiento en una bodega y derivar los colchones a plantas de valorización mediante rutas logísticas optimizadas. Se desarrolló un modelo que considera una etapa inicial de desarme manual de colchones y una segunda etapa con tecnologías para el desarme mecanizado. Los resultados permiten cuantificar la recuperación de materiales como espuma, acero y textiles, evitando su disposición final en rellenos sanitarios. También, se identifican oportunidades de mejora y se proponen normativas mediante alianzas público-privadas con impacto social positivo para incorporar la responsabilidad extendida del productor y aprendizajes de modelos internacionales.

PALABRAS CLAVE: sustentabilidad industrial; residuos voluminosos; valoración de residuos; colchones en desuso; economía circular.

ABSTRACT

This applied research presents the design of a management model for the collection, recycling, and recovery of used mattresses in nine municipalities of the Metropolitan Region of Chile, integrating criteria of circular economy, traceability, and sustainability. A mixed methodology was applied, using primary and secondary sources, as well as qualitative and quantitative techniques. This included gathering technical information, conducting territorial assessments, surveying municipalities, reviewing international case studies, and modeling demographic and waste generation projections. The assessment reveals a high volume of used mattresses generated in the city of Santiago, Chile, limited specific infrastructure for their recycling, and a fragmented municipal response. The case study was based on the installation of municipal containers for initial collection, centralized storage in a warehouse, and the distribution of mattresses to recovery plants via optimized logistics routes. A model was developed that includes an initial stage of manual mattress dismantling and a second stage using technologies for mechanized dismantling. The results allow for the quantification of material recovery, such as foam, steel, and textiles, preventing their disposal in landfills. They also identify opportunities for improvement and propose regulations through public-private partnerships with a positive social impact, incorporating extended producer responsibility and lessons learned from international models.

KEYWORDS: industrial sustainability; bulky waste; waste recovery; end-of-life mattresses; circular economy.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Rodrigo Barraza Alonso
INSTITUCIÓN: Universidad Santo Tomás / Facultad de Ingeniería
DIRECCIÓN: Av. Ejército Libertador 146, 8370003, Santiago, Región Metropolitana, Chile
CORREO ELECTRÓNICO: rodrigobarrazaal@santotomas.cl

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 3 de febrero de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos voluminosos, en particular los colchones en desuso, representa un desafío creciente para las ciudades en el mundo [1], [2], [3], [4], [5]. Se estima que globalmente se desechan más de 20 millones de colchones cada año y en Chile la cifra asciende a más de 700 000 colchones anualmente [6], [7]. Estos objetos, debido a su gran tamaño, peso y compleja composición heterogénea, ocupan un volumen considerable en los rellenos sanitarios y su disposición inadecuada genera impactos ambientales negativos, incluyendo la proliferación de microbasurales ilegales, focos de infección y desorden en el entorno urbano [8], [9]. De hecho, hasta el 90 % de los colchones en Chile terminan en rellenos o microbasurales ilegales [10].

La situación actual en Chile se caracteriza por la escasa infraestructura especializada para el reciclaje y valorización de colchones, así como por una respuesta municipal fragmentada y reactiva [7]. A diferencia de los residuos domiciliarios tradicionales, los colchones carecen de una ruta formal de recolección y no cuentan con infraestructura adecuada para su valorización o disposición final. Esta carencia provoca un aumento en los costos municipales asociados a su retiro informal, riesgos para la salud pública y una oportunidad desaprovechada para recuperar materiales reciclables como espumas, textiles y estructuras metálicas [11].

Materiales como la espuma de poliuretano, los resortes metálicos y los polímeros sintéticos presentes en los colchones tienen una baja o nula biodegradabilidad y su descomposición puede liberar sustancias tóxicas si no se gestionan adecuadamente. Frente a este escenario, se vuelve urgente avanzar hacia un modelo de gestión integral y sustentable de colchones en desuso, que no solo permita reducir la presión sobre los rellenos sanitarios, sino que también promueva la valorización y el reciclaje de sus componentes.

Este estudio propone el diseño de un modelo logístico y operativo para el reciclaje de colchones, que contemple la valorización del transporte desde los puntos de recolección hasta centros de tratamiento y la materia prima del producto. La iniciativa se alinea con la creciente preocupación por la gestión de residuos voluminosos en zonas urbanas y rurales y con la Ley N.º 20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP) [12], que, aunque actualmente no incluye los colchones

como productos prioritarios, sienta el marco normativo para su futura incorporación.

REVISIÓN DE LOS CASOS DE ÉXITO

Este estudio se apoyó en la revisión de modelos internacionales exitosos para la gestión de colchones, destacando la viabilidad de la economía circular [13], [14], [15], [16] en este ámbito:

- Francia (Eco-Mobilier). Es un sistema nacional de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) obligatorio para fabricantes e importadores, financiado por un eco-impuesto en el precio de venta y con retiro gratuito de colchones viejos en grandes tiendas. Recicla aproximadamente 8 millones de colchones al año, recuperando espuma, textiles y acero [17].
- Estados Unidos (Mattress Recycling Council - MRC). Ha reciclado más de 15 millones de colchones desde 2015, financiado por una eco-tasa y utilizando desarme manual y logística REP [18].
- Canadá (Vancouver). Implementó la prohibición de enviar colchones a rellenos sanitarios, lo que impulsó un sistema de reciclaje obligatorio con centros de acopio y procesos manuales, logrando una tasa de recuperación superior al 85 %.
- Suecia (IKEA y municipios). Un modelo avanzado que combina normativa ambiental estricta, centros de reciclaje municipales y un enfoque proactivo de IKEA en diseño circular y recolección en tienda. Se logra una tasa de reciclaje superior al 90 % en materiales recuperables [19].
- Chile (ReCICla Descanso). Iniciativa piloto de la empresa CIC en colaboración con municipalidades como Maipú, Las Condes y Melipilla, que ha reciclado 280 toneladas de colchones (2020-2024), evitando 9.5 toneladas de CO₂ [20].

II. METODOLOGÍA

La presente investigación adoptó una metodología mixta, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos, y utilizando tanto fuentes primarias como secundarias para el levantamiento de información. Este enfoque permitió un diagnóstico exhaustivo de la situación actual y la formulación de una solución integral.

En cuanto a fuentes primarias, se realizaron encuestas a nueve municipalidades de la Región Metropolitana en Chile: Pirque (P01), San Miguel (P02), Estación Central (P03), Providencia (P04), Lo Espejo (P05), Cerrillos (P06), San Bernardo (P07), Recoleta (P08) y La Cisterna (P09). Estas encuestas, dirigidas a encargados de medio ambiente, residuos sólidos y áreas técnicas, recopilaron datos sobre la existencia de programas de gestión de residuos voluminosos, incluyendo los colchones en desuso, personal involucrado, identificación de zonas sin cobertura, costos asociados y campañas de participación ciudadana.

Sobre fuentes secundarias, se complementó con el levantamiento de información técnica [21], diagnósticos territoriales y una revisión de casos internacionales exitosos en la gestión de colchones en desuso.

Respecto a proyecciones demográficas, se modelaron estas para 35 comunas asociadas a MSUR del área Metropolitana de Santiago hasta el año 2030, como se muestra en la [Figura 1](#), utilizando datos censales de 2017 y 2024 y tasas de crecimiento poblacional anuales. Para comunas con crecimiento negativo, se aplicó una tasa de crecimiento estándar del 0.57 % anual.

Y en lo que respecta a la proyección de la generación de residuos, con base en las proyecciones demográficas se estimó la cantidad de colchones en desuso generados anualmente. El criterio técnico utilizado fue que, en promedio, existe 1 colchón en uso por cada 2 habitantes y que estos tienen una vida útil estimada de 10 años, lo que se simplifica a 1 colchón desechado por cada 20 personas al año.

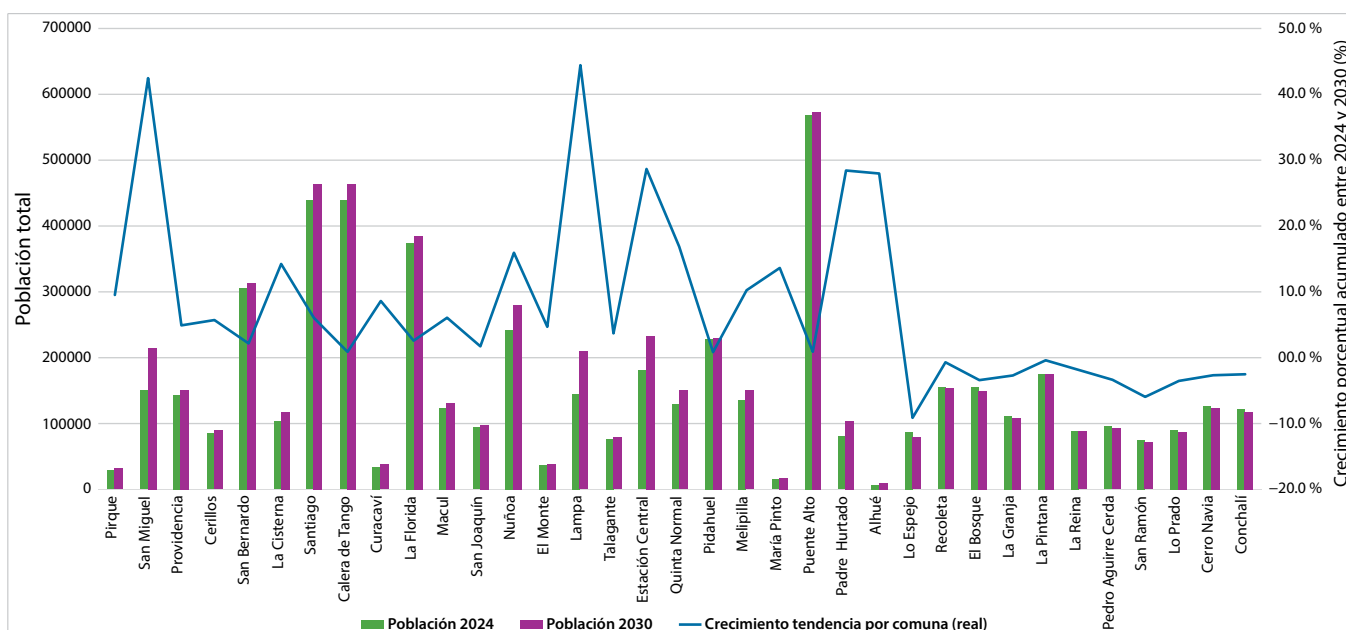


Figura 1. Proyección de la población y crecimiento porcentual por comunas asociadas a MSUR en la Región Metropolitana en Chile 2024-2030.

DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Modelo operativo. Se diseñó un modelo que considera la instalación de contenedores comunales para el acopio inicial, centralización del almacenamiento en una bodega y derivación a plantas de valorización mediante rutas logísticas optimizadas de acuerdo a la georreferencia en el mapa que muestra la [Figura 2](#). Se propuso una primera etapa de desarme manual de colchones y una segunda etapa para evaluar tecnologías de desarme mecanizado.

Análisis de separabilidad: La evaluación se centró exclusivamente en los colchones, permitiendo atribuir los beneficios directos a las intervenciones específicas del estudio.

Análisis Costo-Beneficio (ACB). Se aplicó un enfoque de ACB para cuantificar y comparar los costos de implementación y operación del sistema con los beneficios económicos, ambientales y sociales generados. Los costos incluyeron una inversión inicial para puntos de acopio, bodegas, equipamiento y camiones, en tanto que los costos operacionales abarcan la mano de obra,

el mantenimiento, la gestión, transporte y disposición final. Los beneficios considerados fueron ingresos por valorización de materiales, ahorro en disposición final, impacto ambiental evitado con un indicador para la reducción de GEI y externalidades positivas como el empleo verde, la mejora urbana y la concientización de la comunidad.

Indicadores Clave de Desempeño (KPI). Se definieron KPI para monitorear el progreso, incluyendo toneladas de colchones valorizadas (t/año), tasa de valorización (%) y costo unitario logístico (USD/ton o USD/colchón).

Análisis de sensibilidad. Se evaluaron escenarios base, optimista y pesimista, variando supuestos clave como precios de materiales reciclados, tasas de recolección y costos logísticos, para observar su efecto en la viabilidad financiera (VAN y TIR).

Criterios de escalabilidad. Se evaluó la escalabilidad horizontal para la replicabilidad del modelo en otras comunas o regiones y vertical para su expansión a otros residuos voluminosos, diversificación de mercados.

$$ton = \frac{(Nx * Px * tasa\ valor)}{100(1)} \quad (1)$$

donde *ton* = toneladas de colchones valorizadas por año; *Nx* = número estimado de colchones recolectados por año; *Px* = peso promedio de un colchón; *tasa valor* = tasa de valorización del peso que se estima puede ser reciclado del colchón.

Para estimar los costos logísticos asociados al modelo, se consideraron tres tramos principales de transporte: 1) desde la municipalidad a la bodega, donde se almacenan y desarmen los colchones; 2) desde la bodega a la fábrica, en caso de materiales valorizables, y 3) desde la bodega al relleno sanitario, para los materiales no reutilizables.

En cada uno los tramos se consideraron variables como la distancia recorrida, el costo por kilómetro, la frecuencia de viajes y la capacidad del camión. La siguiente fórmula fue utilizada para la estimación, utilizando la herramienta complemento Solver de MS-Excel.

$$CTotal = \sum \left(\frac{Dr * Ck * Fr}{Cc} \right) \quad (2)$$

donde *CTotal* = costo total por colchón; *Dr* = distancia promedio en km por tramo *r*; *Ck* = costo por km del

transporte (clp/km); *Fr*: frecuencia de viajes por tramo *r*; *Cc*: capacidad del camión en colchones por viaje.

Esta fórmula se aplicó a cada comuna, permitiendo ajustar los costos según las características de cada una, como número de habitantes, ubicación geográfica y distancia hasta los centros logísticos propuestos. Esta estructura permite realizar simulaciones y análisis de sensibilidad, variando parámetros como el costo de combustible, número de camiones y bodegas, lo que aporta valor al modelo y flexibilidad para su futura aplicación en otras ubicaciones.

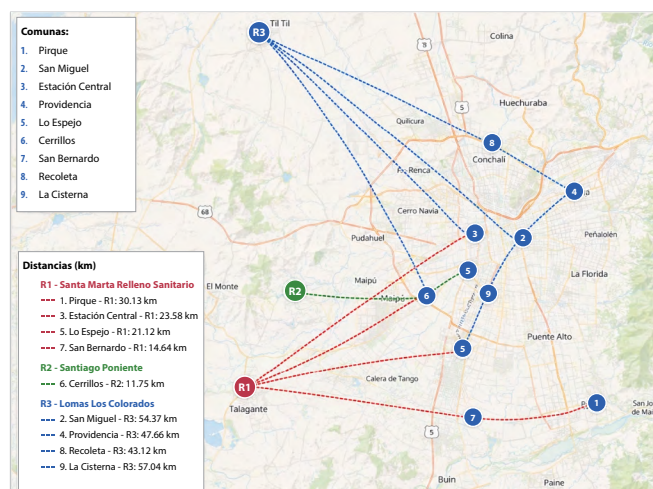


Figura 2. Mapa optimización de distancias entre los rellenos sanitarios y nueve comunas de la Región Metropolitana.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DIAGNÓSTICO ACTUAL DE LA GESTIÓN DE COLCHONES EN LA REGIÓN METROPOLITANA

El diagnóstico territorial y las encuestas municipales revelaron una situación crítica respecto a la gestión de colchones en desuso en las comunas de Santiago de Chile:

Falta de programas y registros. De las nueve comunas encuestadas, solo Recoleta, Providencia y Santiago indicaron contar con un programa de gestión de residuos voluminosos que incluye específicamente colchones. La mayoría de las comunas no lleva un registro sistematizado de la cantidad de colchones desechados anualmente. Providencia estimó entre 501 y 1000 unidades/año, mientras que Santiago reportó 1494 unidades en 2024, aunque aclaró que esta cifra solo incluye los colchones formalmente recolectados.

Microbasurales y puntos críticos. La falta de infraestructura y sistemas formales de recolección lleva a que muchos colchones terminen en microbasurales informales. Santiago reportó la existencia de 10 puntos críticos de acumulación, y junto a Estación Central y La Cisterna, identificaron entre 4 y más de 6 puntos críticos, evidenciando una urgente necesidad de atención diferenciada en estas zonas.

Composición y dificultad de manejo. Los colchones chilenos están compuestos principalmente por espuma de poliuretano, estructuras metálicas (resortes), madera, fibras sintéticas, pegamentos y retardantes de llama, algunos de los cuales pueden ser peligrosos. Esta composición heterogénea dificulta su compactación y reciclaje, agravando el problema en los rellenos sanitarios, donde ocupan un espacio considerable y tardan décadas en degradarse.

PROYECCIÓN DE COLCHONES EN DESUSO (2025-2030)

Con base en las proyecciones demográficas, se puede observar en la [Figura 3](#) una tendencia creciente en la generación de colchones en desuso. Se estima que la cantidad de colchones desechados en la Región Metropolitana aumentará de 370 036 unidades en 2024 a 386 763 en 2030, con una generación anual promedio superior a las 375 000 unidades. El total estimado de colchones desechados por las comunas que participan en el estudio alcanzaría las 260.340 unidades en 2025, llegando a 276 682 unidades en 2030.

Las comunas que proyectan los mayores volúmenes absolutos son Puente Alto, San Bernardo, El Bosque, Recoleta, La Pintana y Lo Espejo. Este crecimiento continuo subraya la necesidad de una estrategia coordinada intermunicipal.

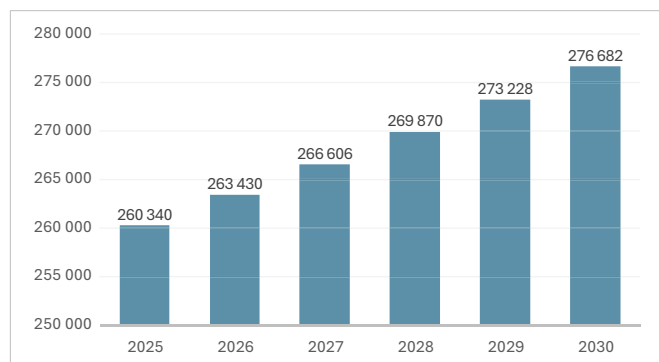


Figura 3. Evolución del número total de colchones desechados en comunas MSUR (2025-2030).

MODELO PROPUESTO DE GESTIÓN Y VALORIZACIÓN

El modelo de gestión propuesto para las comunas establece una cadena circular de valorización de acuerdo a lo que presenta la [Figura 4](#).

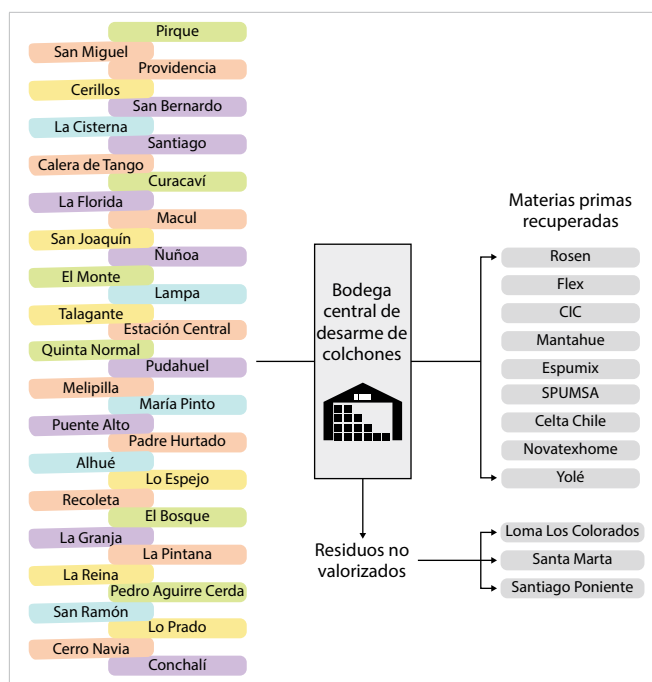


Figura 4. Esquema Operacional del Modelo para el Manejo Integral de Colchones.

Se plantea una estructura centralizada que incluye puntos de recolección diferenciada:

- Instalación de contenedores específicos (tipo “punto limpio del colchón”) distribuidos estratégicamente en el territorio de las comunas. La georreferenciación de las municipalidades sirve como punto de origen para optimizar las rutas.
- Bodega intermedia centralizada. Un único centro de almacenamiento especializado recibirá los colchones recolectados. Aquí se realizará el proceso de desarme, separación y clasificación de materiales. Los cálculos para una bodega consideraron 400 m² de superficie útil, 4 m de altura, y un 70 % de ocupación, con una capacidad de almacenar 1867 colchones y desarmar 3200 al mes.
- Logística optimizada. Rutas de recolección y transporte optimizadas, utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Se compararon las distancias de envío directo a rellenos con las que incluyen

una bodega intermedia. Para comunas como San Miguel y La Cisterna, el uso de bodegas reduce significativamente las distancias, mientras que para otras comunas como San Bernardo o Lo Espejo, las distancias aumentan, aunque esto se justifica por la consolidación de cargas y la valorización de materiales. La [Tabla 1](#) muestra las ubicaciones de los puntos de acopio de colchones en desuso para cada comuna.

TABLA 1
LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE ACOPIO

PUNTO DE ACOPIO	LATITUD	LONGITUD
Pirque (P01)	-33.6352	-70.5729
San Miguel (P02)	-33.4860	-70.6499
Estación Central (P03)	-33.4519	-70.6789
Providencia (P04)	-33.4333	-70.6167
Lo Espejo (P05)	-33.5333	-70.7167
Cerrillos (P06)	-33.4833	-70.7000
San Bernardo (P07)	-33.6000	-70.7167
Recoleta (P08)	-33.4167	-70.6500
La Cisterna (P09)	-33.5350	-70.6642

- Plantas de valorización. Las materias primas recuperadas: espuma, acero y textiles, serían enviadas a fábricas que participan en la cadena de valor o a potenciales clientes como Produpac (fábrica de espumas) o Recutex (reciclaje de textiles).
- Disposición final. Los residuos no valorizables serían derivados a rellenos sanitarios autorizados, minimizando su volumen. En cuanto a las tecnologías de reciclaje, el modelo contempla inicialmente un desarme manual, que permite una separación precisa de materiales. Sin embargo, se evaluará la incorporación de desarme mecanizado y otras tecnologías como la trituración mecánica y la compactación, para aumentar la eficiencia y productividad. La [Figura 5](#) muestra la simulación realizada para el modelo en el software Arena Sim considerando los siguientes supuestos: turnos de trabajo de 8 horas en 30 días; 23 colchones por camión; estimación mensual de colchones; recolección en los puntos de acopio; velocidad promedio de 25 km/h; viaje promedio de 1 hora.

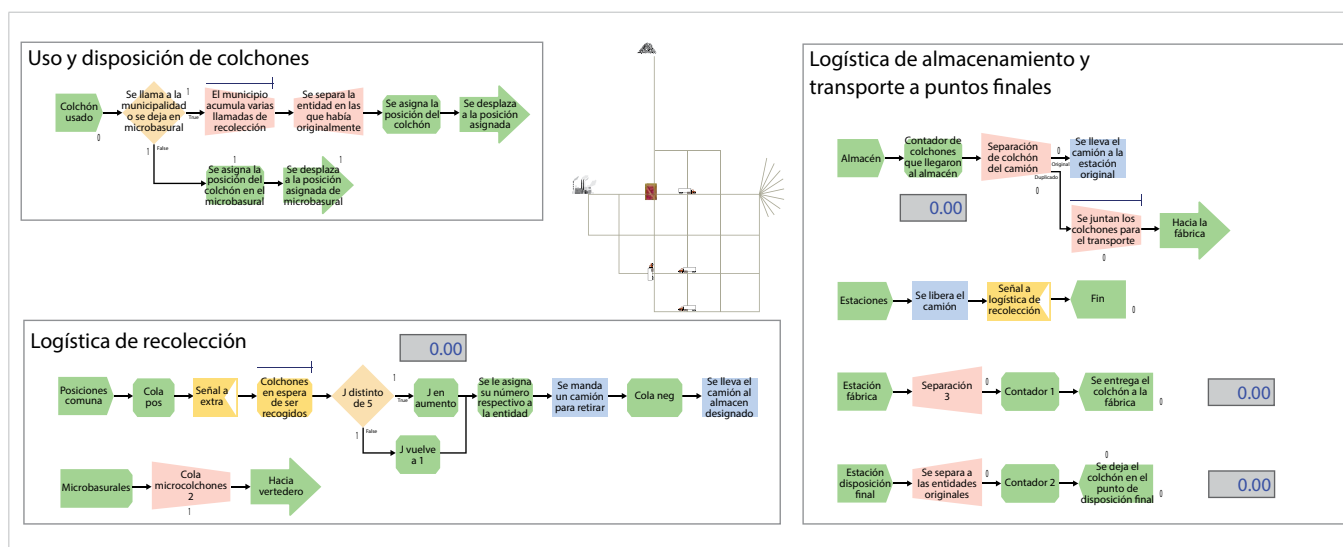


Figura 5. Simulación del modelo en la aplicación Arena Sim versión 16.20.03.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación ha formulado un modelo de gestión y valorización para colchones en desuso en nueve comunas de la ciudad de Santiago, abordando una problemática real y creciente en la Región Metropolitana de Chile.

El diagnóstico evidenció la urgente necesidad de implementar un sistema integral debido al alto volumen de generación de colchones con más de 375 000 unidades anuales proyectadas para 2030, los impactos ambientales derivados de su disposición inadecuada y la fragmentación en la respuesta municipal y la infraestructura especializada.

El modelo propuesto, basado en los principios de economía circular, logística inversa y valorización de materiales, se caracteriza por su viabilidad técnica, replicabilidad y sustentabilidad. A través de la recolección diferenciada, el almacenamiento intermedio en una bodega centralizada para desarme y clasificación, y el transporte optimizado hacia plantas de valorización, el sistema busca desviar un volumen significativo de colchones de los rellenos sanitarios.

La estimación de más de 560 toneladas de materiales valorizadas anualmente y la reducción de hasta 2100 toneladas de CO₂ equivalente y 400 viajes de camión al vertedero, demuestran un impacto ambiental positivo considerable. Desde una perspectiva social, el modelo promueve la reducción de microbasurales, la mejora del entorno urbano y la potencial generación de empleos verdes, contribuyendo a una mejor calidad de vida para los ciudadanos y a una transición justa hacia la sostenibilidad.

La evaluación económica revela que el modelo es viable, especialmente bajo escenarios optimizados de ingresos o reducción de costos, alcanzando un punto de equilibrio operativo con un precio de venta por colchón valorizado de 6.5 USD. Sin embargo, la alta sensibilidad a los precios de valorización subraya la importancia de asegurar mecanismos de financiamiento complementarios y de explorar alianzas público-privadas que garanticen la sostenibilidad a largo plazo. El modelo propuesto se alinea perfectamente con los principios de la Ley REP (N.º 20.920. Gobierno de Chile) y con las metas nacionales de reducción de residuos y descarbonización, sentando las bases para la futura inclusión de los colchones como producto prioritario y ofreciendo una solución escalable a nivel nacional.

REFERENCIAS

- [1] P. Ghisellini, C. Cialani y S. Ulgiati, "A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems", *J. Clean. Prod.*, vol. 114, pp. 11-32, feb. 2016, doi: [10.1016/j.jclepro.2015.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007).
- [2] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken y E. J. Hultink, "The Circular Economy - A new sustainability paradigm?", *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 757-768, feb. 2017, doi: [10.1016/j.jclepro.2016.12.048](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048).
- [3] A. U. Zaman y S. Lehmann, "The zero waste index: A performance measurement tool for waste management systems in a 'zero waste city'", *J. Clean. Prod.*, vol. 50, pp. 123-132, jul. 2013, doi: [10.1016/j.jclepro.2012.11.041](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.041).
- [4] M. Goorhuis, P. Reus, E. Nieuwenhuis N. Spanbroek, M. Sol y J. van Rijn, "New developments in waste management in the Netherlands", *Waste Manag. Res.*, vol. 30, n.º 9, pp. 67-77, sept. 2012, doi: [10.1177/0734242X12455089](https://doi.org/10.1177/0734242X12455089).
- [5] M. Gharfalkar, R. Court, C. Campbell, Z. Ali y G. Hillier, "Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC", *Waste Manag.*, vol. 39, pp. 305-313, may. 2015, doi: [10.1016/j.wasman.2015.02.007](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.007).
- [6] *Muebles y enseres: cuenta atrás para su recogida y reciclado obligatorios*. España: Llorente y Cuenca, jul. 2022. [En línea]. Disponible: https://www.blogdeasuntospublicos.com/wp-content/uploads/sites/10/2022/09/2207-NT-RAP_Muebles_enseres_voluminosos.pdf
- [7] Ministerio del Medio Ambiente. "Ley marco 20.920 para la gestión de residuos". Economía Circular. [En línea]. Disponible: <https://economiacircular.mma.gob.cl/ley-rep/>
- [8] G. Sandin y G. M. Peters, "Environmental impact of textile reuse and recycling - A review", *J. Clean. Prod.*, vol. 184, pp. 353-365, may. 2018, doi: [10.1016/j.jclepro.2018.02.266](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266).
- [9] Soft Landing. "Let us collect and recycle your old mattress". SoftLanding.com.au. [En línea]. Disponible: <https://www.softlanding.com.au>
- [10] BCN. "Decreto 189 aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios". Biblioteca del Congreso Nacional. [En línea]. Disponible: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=268137>
- [11] K. Ragaert, L. Delva y K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste", *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 24-58, nov. 2017, doi: [10.1016/j.wasman.2017.07.044](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044).
- [12] BCN. "Ley 20.920: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje". Biblioteca del Congreso Nacional.

- [En línea]. Disponible: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>
- [13] M. Lieder y A. Rashid, “Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry”, *J. Clean. Prod.*, vol. 115, pp. 36-51, mar. 2016, doi: [10.1016/j.jclepro.2015.12.042](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042).
- [14] W. R. Stahel, “The circular economy”, *Nature*, vol. 531, n.º 7595, pp. 435-438, 2016, doi: [10.1038/531435a](https://doi.org/10.1038/531435a).
- [15] J. Kirchherr, D. Reike y H. Hekkert, “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 127, pp. 221-232, dic. 2017, doi: [10.1016/j.resconrec.2017.09.005](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005).
- [16] J. Korhonen, A. Honkasalo y J. Seppälä, “Circular economy: The concept and its limitations”, *Ecol. Econ.*, vol. 143, pp. 37-46, en. 2018, doi: [10.1016/j.ecolecon.2017.06.041](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041).
- [17] Eco-Mobilier. “Annual Sustainability Report: Circular Economy Initiatives in France”. Eco-Mobilier.fr. Accedido: jul. 7, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.eco-mobilier.fr>
- [18] “MRC 2025 CT Annual Report”. Mattress Recycling Council. [En línea]. Disponible: <https://mattressrecyclingcouncil.org/mrc-2025-ct-annual-report/>
- [19] “Best Practices in Mattress Recycling: UK Case Study”. TFR Group. [En línea]. Disponible: <https://www.tfrgroup.co.uk/case-studies/>
- [20] “ReCICla Descanso llega a Las Condes: el programa de CIC que promueve el reciclaje de colchones y bases de camas”, *Corresponsables*, oct. 16, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.corresponsables.com/chl/actualidad/recicla-descanso-llega-a-las-condes-el-programa-de-cic-que-promueve-el-reciclaje-de-colchones-y-bases-de-camas/>
- [21] *Memoria Censo 2017*. Chile: Instituto Nacional de Estadísticas (INE). [En línea]. Disponible: https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/censo-de-poblacion-y-vivienda/publicaciones-y-anuarios/2017/memoria-del-censo-2017/libro_memoria_censal_2017_final.pdf

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santo Tomás de Chile y del equipo de Desarrollo de Proyecto de la Asociación Metropolitana de Municipalidades de Santiago Sur (MSUR) en Chile. Convenio de vinculación con el medio UST-MSUR de 18 de marzo de 2025.

Función socioambiental de las empresas turísticas: enfoques locales para desafíos globales

Socioenvironmental function of tourism enterprises: local approaches to global challenges

María José Rueda¹ , Salomé Raquel Vega¹, María Agustina Bres¹, Luz María Kasperski¹

¹ Función Socioambiental de las Empresas, Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales - Extensión Áulica Tandil, Universidad Fasta, Argentina

RESUMEN

El presente trabajo analiza la función socioambiental de las empresas turísticas, examinando cómo las actividades que desempeñan pueden minimizar impactos negativos mediante estrategias de desarrollo sostenible que beneficien a los ecosistemas y a las comunidades anfitrionas. La metodología empleada consistió en la revisión documental y análisis normativo de la legislación argentina e internacional, análisis conceptual-histórico de la evolución del turismo hacia paradigmas de sostenibilidad y estudios comparativos de tres destinos turísticos argentinos: San Carlos de Bariloche, Mar del Plata y Tandil, Argentina. Se realizó una entrevista semiestructurada con actores clave y se enviaron consultas escritas a responsables municipales de las áreas de turismo de Mar del Plata y Tandil. Los resultados evidencian una transición desde el turismo de masas hacia modelos sostenibles, respaldada por el marco legal vigente en Argentina. Se advierten distintas estrategias para equilibrar el desarrollo económico de la actividad turística y la protección de los ecosistemas, dependiendo de las características y trayectorias históricas de cada destino. Las conclusiones destacan la necesidad de equilibrar el desarrollo económico del turismo con la preservación ambiental mediante la aplicación efectiva de principios de prevención y equidad intergeneracional, requiriendo de compromisos coordinados entre el Estado, Universidades, ONG, la sociedad y las empresas turísticas.

PALABRAS CLAVE: turismo sostenible; responsabilidad socioambiental empresarial; equidad intergeneracional.

ABSTRACT

This study analyzes the socio-environmental role of tourism enterprises, examining how their activities can minimize negative impacts through sustainable development strategies that benefit both ecosystems and host communities. The methodology employed consisted of document review and regulatory analysis of Argentine and international legislation, a conceptual-historical examination of the evolution of tourism toward sustainability paradigms, and comparative studies of three Argentine tourist destinations: San Carlos de Bariloche, Mar del Plata, and Tandil, Argentina. A semi-structured interview was conducted with key stakeholders, and written inquiries were submitted to municipal authorities responsible for tourism in Mar del Plata and Tandil. The results show an ongoing transition from mass tourism to sustainable models, supported by the current legal framework in Argentina. Various strategies were identified to balance the economic development of tourism with the protection of ecosystems, depending on the characteristics and historical trajectories of each destination. The conclusions highlight the need to reconcile tourism's economic development with environmental preservation through the effective application of the principles of prevention and intergenerational equity, requiring coordinated commitments among the State, universities, NGOs, society, and tourism enterprises.

KEYWORDS: sustainable tourism; socio-environmental responsibility of enterprises; intergenerational equity.

Correspondencia:

DESTINATARIO: María José Rueda
INSTITUCIÓN: Universidad Fasta / Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales - Extensión Áulica Tandil
DIRECCIÓN: Av. Estrada n.º 50, CP 1700, Ciudad de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina
CORREO ELECTRÓNICO: mjrueda@ufasta.edu.ar

Fecha de recepción: 4 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 26 de enero de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

El objeto del presente trabajo consiste en identificar cómo las acciones que se realizan en el marco de la actividad turística tienen el potencial de minimizar los impactos negativos en el ambiente mediante la implementación de estrategias de desarrollo sostenible. Para ello, se indaga sobre la evolución de la concepción de la actividad turística y cómo la misma se vio influida por los distintos consensos alcanzados, tanto a nivel internacional como nacional, sobre la necesidad de proteger el ambiente y a las comunidades anfitrionas.

La investigación se estructuró en torno a los siguientes interrogantes: ¿en qué medida es posible llevar a cabo actividades turísticas sin impactar en el ambiente en el cual estas se desarrollan?, ¿cuál es el marco jurídico aplicable en Argentina?, ¿qué estrategias han articulado las distintas comunidades para compatibilizar la actividad turística y la preservación —e incluso conservación— de los ecosistemas? y ¿qué mecanismos existen para que las empresas turísticas internalicen los costos ambientales?

Para responder estas preguntas se realizó un análisis conceptual-histórico de la actividad turística hacia paradigmas de sostenibilidad y se llevó a cabo una revisión documental y normativa y un estudio comparativo de tres destinos turísticos que presentan características geográficas, evoluciones históricas y desafíos ambientales muy diferentes: San Carlos de Bariloche, Mar del Plata y Tandil.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se llevó a cabo mediante una estrategia metodológica de carácter cualitativo y diseño flexible [1]. Por un lado, se realizó una revisión de bibliografía especializada y de normativa nacional e internacional, lo que permitió analizar la evolución histórica de la actividad turística y su marco regulatorio. Por otro lado, se desarrolló un estudio de caso comparado de tres ciudades turísticas argentinas: San Carlos de Bariloche, Tandil y Mar del Plata. La selección respondió a criterios de máxima variación, con el fin de representar diferentes tipologías de destinos —de montaña, serrano y costero— con trayectorias turísticas heterogéneas y desafíos socioambientales específicos. Esta decisión metodológica permitió que la investigación cualitativa pueda enriquecerse del análisis comparado

de casos contrastados, lo que hizo posible identificar regularidades y diferencias.

Con el fin de enriquecer el análisis, se incorporaron las voces de actores/as clave seleccionados mediante muestreo intencional o basado en criterios [1], priorizando informantes con conocimiento especializado y participación directa en la gestión turística y ambiental de cada destino.

En el caso de San Carlos de Bariloche, se realizó una entrevista virtual con integrantes de las Áreas de Turismo Sustentable y de Ciencia, Investigación y Tecnología de la Fundación Anthena Arcturus. En los casos de Tandil y Mar del Plata, se aplicó una entrevista autoadministrada, consistente en un cuestionario abierto enviado por escrito para ser completado por los responsables de las áreas municipales de turismo. Se identificaron coincidencias y divergencias entre las respuestas y se sistematizaron y contrastaron las percepciones de los actores con la información normativa y bibliográfica recolectada, incorporando triangulación de fuentes para reforzar la credibilidad del análisis [1].

Se reconocen como limitaciones del trabajo de campo las dificultades para realizar entrevistas presenciales en todos los casos, debiendo recurrir a consultas escritas en dos de las tres ciudades analizadas. Asimismo, el estudio no incorpora las voces de empresarios/as turísticos/as, lo cual constituye una vacancia significativa que representa una línea prioritaria de profundización para futuras investigaciones.

III. RESULTADOS

III.1. EL SURGIMIENTO DEL TURISMO. SU EVOLUCIÓN HACIA LA SOSTENIBILIDAD

El concepto de turismo ha estado históricamente vinculado al desplazamiento de personas a distintos puntos geográficos. Puede encontrarse el origen de la palabra en los vocablos *tornus* y *tornare* del latín, que significan, respectivamente, torno y regresar, denotando “la idea de vuelta, pues en el primer caso es un sustantivo que es asignado a una herramienta de forma cilíndrica que gira sobre sí misma, y, en el segundo, constituye un verbo que significa volver al lugar de donde se partió” [2].

Sin embargo, este concepto trasciende a la simple movilidad e involucra la búsqueda de placer, disfrute, ocio

o recreación. De hecho, la Real Academia Española (RAE) define el turismo como la “actividad o hecho de viajar por placer” [3].

De acuerdo con la Organización Mundial del Turismo (OMT), organismo de las Naciones Unidas encargado de la promoción de un turismo responsable, sostenible y accesible, el turismo “ha experimentado un continuo crecimiento y una profunda diversificación, hasta convertirse en uno de los sectores económicos que crecen con mayor rapidez en el mundo” e incluso se ha convertido en “uno de los principales actores del comercio internacional y una de las principales fuentes de ingresos de numerosos países en desarrollo” [4].

Este crecimiento propició la transformación de espacios naturales o de escasa actividad económica en destinos turísticos, promoviendo el desarrollo de infraestructuras destinadas a satisfacer las necesidades básicas y recreativas de los visitantes.

III.1.1. El turismo de masas y sus consecuencias

Un hito dentro de la evolución de la actividad turística puede encontrarse en la organización del primer viaje planificado por Thomas Cook en 1841, quien gestionó el traslado de más de 500 personas en tren entre Leicester y Loughborough, en el Reino Unido. Lo particular de esta experiencia, además de su masividad, fue que “Cook ofreció a los viajeros la facilidad de comprar con un solo pago una gira que incluía todos los gastos de transporte, alojamiento y comida. Los guías de Cook se encargaron del itinerario y los detalles del transporte, lo cual dejaba a los turistas disfrutar la experiencia del viaje” [4]. De esta manera, sentó las bases del concepto de paquete turístico. Posteriormente, en 1872, fundó la primera agencia de viajes del mundo, Thomas Cook & Son, promoviendo una nueva forma de acceder al turismo.

A partir de la década de los años cincuenta y hasta los noventa, el turismo experimentó un crecimiento exponencial con la aparición del turismo de masas, impulsado por la proliferación de vuelos comerciales asequibles y la expansión de grandes complejos hoteleros en diversas regiones del mundo. En este contexto, se afirma que “Entre 1950 y 1973 se comienza a hablar del boom turístico. El turismo internacional crece a un ritmo superior al de toda la historia (...) Por otra parte, la nueva legislación laboral, adoptando las vacaciones pagadas, la semana inglesa de 5 días laborales, la reducción de la jornada

de 40 horas semanales y la ampliación de las coberturas sociales (...), potencian en gran medida el desarrollo del ocio y el turismo” [5].

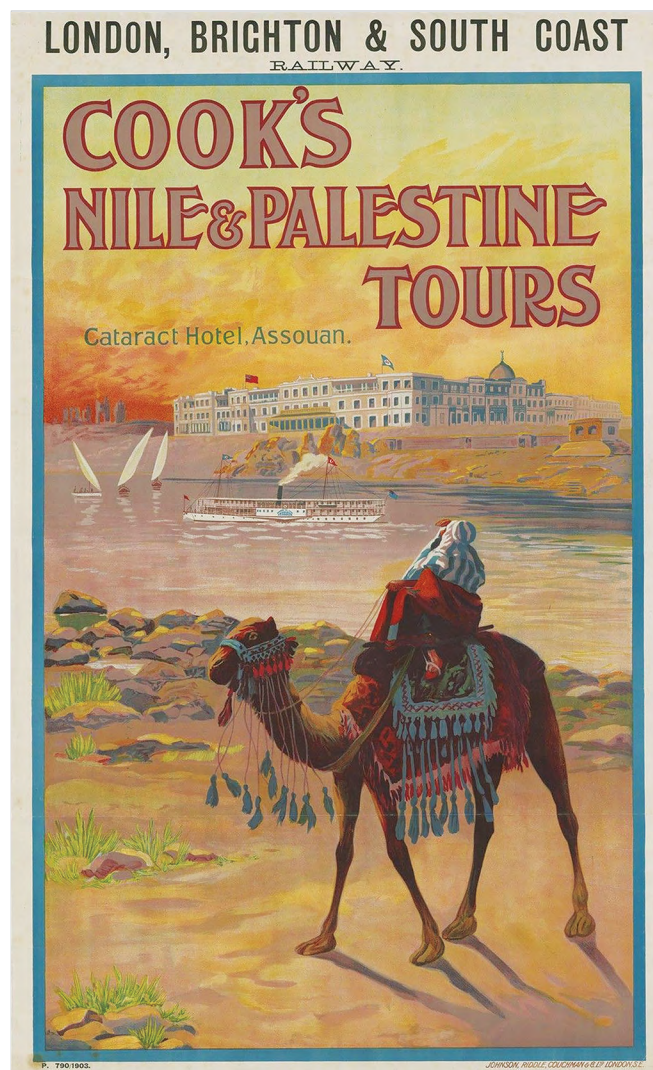


Figura 1. Póster para los viajes de Cook por el Nilo y Palestina. Reproducida de [6].

Este proceso se dio también en Argentina, siendo la ciudad de Mar del Plata uno de los ejemplos paradigmáticos de esta expansión y ampliación de sectores sociales que empezaron a trasladarse para disfrutar de sus vacaciones en un destino turístico. Este acelerado crecimiento, aunque benéfico para la economía, generó contaminación y alteraciones en los ecosistemas. La masificación del turismo comenzó entonces a tener consecuencias negativas en el ambiente y en las dinámicas propias de las comunidades locales, lo que derivó en una creciente preocupación sobre la necesidad de adoptar medidas preventivas y correctivas.

III.1.2. El surgimiento y consolidación del turismo sostenible. Hitos internacionales en la transición hacia un nuevo paradigma

La preocupación por los impactos ambientales del turismo comenzó a incorporarse en la agenda internacional en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo, Suecia, en 1972. Durante este evento, se abordó la relación entre crecimiento económico y degradación ambiental, estableciendo la necesidad de integrar ambas dimensiones en el desarrollo global. Esta declaración [7], en su Principio 2, introdujo un concepto fundamental para entender el turismo sostenible: la responsabilidad intergeneracional en la gestión de los ecosistemas y la necesidad de contar con una planificación adecuada para su preservación.

En 1976, la OMT se integró formalmente como un organismo especializado dentro del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y en 1980, en la Declaración de Manila [8], se reconoció la importancia del turismo como un motor de desarrollo económico, pero también como una actividad con riesgos ambientales y socioculturales. En el párrafo 18 de esta declaración se especifica que “La satisfacción de las necesidades turísticas no debe ir en detrimento de los intereses sociales y económicos de la población de las zonas turísticas, del medio ambiente y, sobre todo, de los recursos naturales, que son el atractivo fundamental del turismo, y de los sitios históricos y culturales” (traducción de las autoras).

La publicación del Informe Brundtland “Nuestro Futuro Común” en 1987 constituyó otro importante hito al introducir el concepto de desarrollo sostenible, definiéndolo como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras.

Posteriormente, en 1992, se celebró la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), también conocida como la Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro, Brasil, con motivo del 20 aniversario de la primera Conferencia sobre el Medio Ambiente Humano en Estocolmo, Suecia, en 1972. En esta cumbre, desde la ONU se reconoció que “(...) la integración y el equilibrio de las preocupaciones económicas, sociales y medioambientales requería nuevas percepciones de la forma en que producimos y consumimos, la forma en que vivimos y trabajamos, y la forma en que tomamos decisiones” [9]. De esta cumbre

surgieron la Declaración de Río y sus 27 principios universales, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el Convenio sobre la Diversidad Biológica y la declaración sobre los principios de la ordenación, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo.

Específicamente, en el Programa 21 de esta conferencia se menciona la necesidad de “promover la formulación de programas de turismo ecológicamente racionales y culturalmente sensibles como estrategia del desarrollo sostenible de los asentamientos urbanos y rurales como forma de descentralizar el desarrollo urbano y reducir las discrepancias entre las regiones” [10] y se propone que los países apoyen “actividades de recreación y turismo ecológicamente racionales (...) utilizando racionalmente museos, lugares históricos, jardines zoológicos, jardines botánicos, parques nacionales y otras zonas protegidas” [10].

Finalmente, cabe mencionar que el 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una Nueva Agenda de Desarrollo Sostenible [11]. Si bien el turismo sostenible puede encontrarse dentro de estos 17 objetivos (y sus 169 metas asociadas) expresamente se contempla en el Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico;¹ Objetivo 12: Producción y Consumo Responsable² y 14: Vida Submarina.³ Esta última inclusión resulta especialmente relevante considerando que aproximadamente el 80 % del turismo mundial se concentra en zonas costeras, configurando tanto riesgos significativos como oportunidades para la gestión sostenible de estos ecosistemas.

Esta evolución histórico-normativa ha conformado progresivamente un marco conceptual que promueve la transformación del sector turístico hacia paradigmas de sostenibilidad, sentando las bases para las iniciati-

¹ Meta 8.9: De aquí a 2030, elaborar y poner en práctica políticas encaminadas a promover un turismo sostenible que cree puestos de trabajo y promueva la cultura y los productos locales.

² Meta 12.b: Elaborar y aplicar instrumentos para vigilar los efectos en el desarrollo sostenible, a fin de lograr un turismo sostenible que cree puestos de trabajo y promueva la cultura y los productos locales.

³ Meta 14. 7: De aquí a 2030, aumentar los beneficios económicos que los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países menos adelantados obtienen del uso sostenible de los recursos marinos, en particular mediante la gestión sostenible de la pesca, la acuicultura y el turismo.

vas contemporáneas de turismo responsable que busca equilibrar desarrollo económico, la inclusión social y preservación ambiental [12].

III.1.3. El turismo sostenible en la actualidad

La OMT define el turismo sostenible como “El turismo que tiene plenamente en cuenta las repercusiones actuales y futuras, económicas, sociales y medioambientales para satisfacer las necesidades de los visitantes, de la industria, del entorno y de las comunidades anfitrionas” [13].

En la Resolución 74/211, de fecha del 19 de diciembre de 2019, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció que: “el turismo sostenible puede contribuir directamente a la conservación de áreas y hábitats naturales ambientalmente vulnerables a través de una variedad de actividades y creando conciencia de la importancia de la diversidad biológica, destacando la necesidad urgente de hacer frente al declive sin precedentes de la diversidad biológica en todo el mundo (...)” [14].

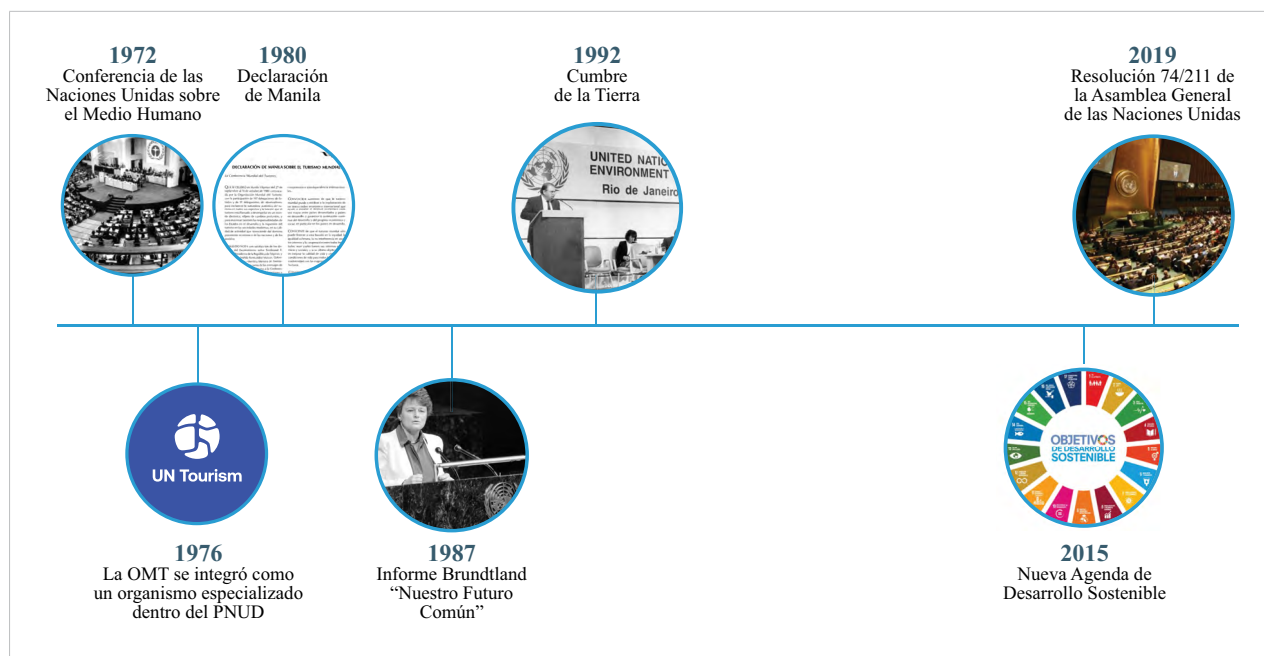


Figura 2. Línea de tiempo. Imágenes reproducidas de [15].

En la actualidad, el turismo sostenible continúa evolucionando a través de nuevas tendencias que buscan mitigar los impactos negativos del sector. Se describirán algunas de estas nuevas categorizaciones, que pretenden elevar el piso de protección ambiental en el desarrollo de la actividad turística.

Ecoturismo

Conforme a la definición de ONU Turismo, el término ecoturismo se aplica a toda forma de turismo que reúne las siguientes características:

1. Gira en torno a la naturaleza y la principal motivación de los turistas es la observación y la apreciación del entorno natural, así como de las culturas tradicionales prevalecientes en las zonas naturales.

2. Incluye aspectos pedagógicos y de interpretación de la naturaleza.

3. Por lo general, aunque no siempre, la organización está a cargo de operadores turísticos especializados y se orienta a grupos reducidos. En los destinos, los proveedores de servicios asociados suelen ser empresas pequeñas de propiedad local.

4. Minimiza los impactos negativos sobre el entorno natural y sociocultural.

5. Contribuye al mantenimiento de las zonas naturales que constituyen el atractivo ecoturístico, ya que:

- genera beneficios económicos para las comunidades receptoras, las organizaciones y las auto-

- ridades que gestionan las zonas naturales con fines de conservación;
- ofrece a las comunidades locales oportunidades alternativas de empleo e ingresos y
- potencia la sensibilización de las poblaciones locales y de los turistas respecto a la importancia de la conservación de los bienes naturales y culturales” [16].

Turismo regenerativo

Si bien no hay un único modo de definirlo, Alexa Pauls, directora del área académica de Turismo Sostenible de la Universidad de Medio Ambiente (UMA) de México, plantea que “Un proyecto de turismo regenerativo parte de una lectura del lugar con visión sistémica, promueve las relaciones entre los seres que cohabitan y visitan un destino, crea condiciones a favor de todas las formas de vida del lugar e incluye acciones de prevención, mitigación, compensación y conservación y genera beneficios para la comunidad anfitriona, las personas viajeras y el destino” [17].

Martín Araneda, cofundador de la iniciativa global Turismo Regenerativo, aclara que “el impacto que se genera desde esta nueva perspectiva es positivo, es decir, que el sistema devuelve más de lo que toma y se ocupa de mejorar las capacidades que sostienen la vida del sitio” [17].

Esta concepción busca “prevenir, restablecer y fortalecer los factores que inciden en el equilibrio medioambiental, de manera que haya un intercambio positivo entre todos los participantes que llevan a cabo la experiencia turística” [18]. Su objetivo es que las/los visitantes dejen un lugar en mejores condiciones de las que lo encontraron.

Estas nuevas concepciones representan un cambio paradigmático: el ecoturismo se fundamenta en una perspectiva de mitigación, enfocándose en reducir y minimizar los impactos negativos de la actividad turística, y el turismo regenerativo propone una evolución incluso más ambiciosa, buscando generar efectos positivos y transformadores tanto para las comunidades locales como para los ecosistemas naturales.

Turismo de carbono neutral y resiliente al cambio climático

Esta concepción se centra en iniciativas destinadas a reducir y compensar la huella de carbono generada por la

actividad turística, con el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono o emisiones netas cero.

Las estrategias para lograr un turismo de carbono neutral y resiliente incluyen:

- Mitigación: reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la eficiencia energética, el uso de energías renovables y el transporte sostenible.
- Adaptación: aumento de la resiliencia del sector turístico a los desafíos climáticos, lo que puede incluir la diversificación de la oferta turística y la mejora de la infraestructura.
- Integración: la combinación de estrategias de mitigación y adaptación para reducir las emisiones de CO₂ y, al mismo tiempo, aumentar la resiliencia del sector turístico.

Estas iniciativas buscan alinear al sector turístico con los objetivos climáticos globales y nacionales (en el caso de Argentina, con los establecidos en la Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental N.º 27.520), asegurando su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

Turismo humanitario o turismo de voluntariado

Este movimiento se tornó más conocido en la década de los años noventa, cuando las personas comenzaron a tomar conciencia sobre cuestiones de responsabilidad social y, al mismo tiempo, los llamados años sabáticos comenzaron a ser más populares [19]. Esta propuesta invita a viajar para colaborar o participar en causas solidarias de diversa índole [20]. Los y las turistas voluntarios/as participan de manera organizada en proyectos que pueden incluir la conservación del medio ambiente, la investigación científica, el desarrollo comunitario, la asistencia médica o la restauración cultural [20].

En el turismo de voluntariado, se propone “hacer un uso alternativo de su tiempo vacacional, desarrollando acciones solidarias y no preocupándose solamente por conocer un lugar o una cultura diferente” [21]. Este tipo de turismo busca impactar social y ambientalmente de forma positiva en los espacios de intervención, enriqueciendo la experiencia del viajero a través del intercambio cultural [22]. Las motivaciones de los participantes suelen ser la práctica del altruismo y desarrollo personal, buscando contribuir al bienestar de la comunidad

anfitriona. Aunque ha sido objeto de críticas, cuando se gestiona de forma responsable, el turismo de voluntariado puede fomentar un entendimiento intercultural más profundo y aumentar el interés por los asuntos internacionales [22].

Al tener en cuenta el impacto y la magnitud propia de la actividad turística, estas formas de entender y practicar el turismo se presentan como innovadoras estrategias que contribuyen a que esta actividad tenga un impacto positivo en economías locales sin comprometer el bienestar de los ecosistemas y de las generaciones futuras.

TABLA 1
COMPARACIÓN DE LOS TIPOS DE TURISMO

VARIABLES	TURISMO DE MASAS	TURISMO SOSTENIBLE	ECOTURISMO	TURISMO REGENERATIVO	TURISMO CARBONO NEUTRAL	TURISMO DE VOLUNTARIADO
Enfoque	Económico, recreativo	Equilibrio entre dimensiones económica, social y ambiental	Contemplación y preservación de la naturaleza	Restauración socioecológica	Mitigación climática	Solidaridad y servicio comunitario
Objetivo central	Maximizar visitantes y rentabilidad	Satisfacer necesidades presentes sin comprometer las futuras	Observación y apreciación del entorno natural y culturas tradicionales	Dejar el destino en mejores condiciones que las encontradas	Alcanzar neutralidad de emisiones	Contribución activa al desarrollo social y ambiental
Relación con el ambiente	Intensivo, potencialmente degradante	Mitigación de impactos negativos	Conservación, educativo	Regeneración activa de ecosistemas	Reducción y compensación de huella de carbono	Variable según el proyecto.
Rol del/de la turista	Consumidor/a pasivo/a	Visitante consciente y responsable	Observador/a y aprendiz	Agente de cambio y transformación	Viajero/a con responsabilidad climática	Voluntario/a activo/a; participante comprometido/a
Periodo de emergencia	1950-1990 (<i>boom</i> turístico posguerra)	Post-1987 (Informe Brundtland) Consolidación en años 2000	Década de 1980-1990	Década de 2010-presente	Post Acuerdo de París (2015)	Década de 1990
Principales estrategias	Infraestructura masiva, estandarización de servicios, economías de escala	Planificación integrada, certificaciones ambientales, educación, participación comunitaria	Pequeños grupos, apoyo a comunidades locales y conservación	Relaciones colaborativas, fortalecimiento de vínculos comunidad-visitante-naturaleza	Eficiencia energética, uso de energías renovables, transporte sostenible, compensación de emisiones	Participación directa en proyectos, intercambio cultural, capacitación local
Beneficiarios/as	Grandes empresas turísticas	Comunidades locales, ecosistemas, visitantes, generaciones futuras	Áreas protegidas, comunidades locales, especies en conservación	Ecosistemas, comunidades anfitrionas, visitantes	Clima global, destinos vulnerables al cambio climático	Comunidades receptoras, organizaciones locales, voluntarios/as
Impacto ambiental	Negativo - Sobreexplotación, contaminación, congestión, alteración negativa	Moderado - Equilibrio entre el desarrollo y la preservación	Moderado - Grupos reducidos, control de capacidad de carga	Positivo - restauración y mejora activa de condiciones ambientales	Positivo - Reducción de emisiones	Positivo o moderado , dependiendo del diseño y gestión del proyecto

III.2. MARCO NORMATIVO ARGENTINO

III.2.1. Normativa ambiental

En el año 1994, la Constitución Nacional [23] incorporó en su artículo 41 la expresa protección del ambiente. El mismo consagra el derecho de todos los habitantes a gozar de un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras. Como contracara de este derecho, menciona el deber que rige sobre todos los habitantes de preservarlo.

Asimismo, plantea que el daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer y que las autoridades proveerán a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambientales.

Finalmente, plantea una nueva mecánica de protección: la de las Leyes de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental (LPPMA), las cuales son dictadas por el Congreso de la Nación y que las provincias pueden ampliar en su protección, pero nunca disminuir. Es decir que “concede una tutela ambiental uniforme o común

para todo el territorio nacional, y tiene por objeto imponer condiciones necesarias para asegurar la protección ambiental” [24].

Por otra parte, se cuenta con la Ley de Presupuestos Mínimos de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático Global, Ley 27520, la cual establece presupuestos mínimos de protección ambiental para garantizar acciones, instrumentos y estrategias adecuadas de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático en todo el territorio nacional [25]. En su artículo 2, esta ley especifica tres grandes objetivos: a) Establecer las estrategias, medidas, políticas e instrumentos relativos al estudio del impacto, la vulnerabilidad y las actividades de adaptación al Cambio Climático que puedan garantizar el desarrollo humano y de los ecosistemas; b) Asistir y promover el desarrollo de estrategias de mitigación y reducción de gases de efecto invernadero en el país y c) Reducir la vulnerabilidad humana y de los sistemas naturales ante el Cambio Climático, protegerlos de sus efectos adversos y aprovechar sus beneficios [25].

Asimismo, otras leyes relevantes son la LPMPA N.º 26.331 de “Bosques Nativos” [26], que promueve el ecoturismo en las zonas de alto valor ambiental; la LPMPA N.º 26.639 de “Protección de Glaciares”⁴ [27] que, por su parte, preserva los ecosistemas allí protegidos y la Ley 27.621 de “Educación ambiental integral” [28], que incluye al sector turístico para el fomento de acciones de sensibilización ambiental.

En esta misma línea, el Código Civil y Comercial incluyó de manera expresa una perspectiva ambiental en el artículo 240, el cual establece que “El ejercicio de los derechos individuales sobre los bienes (...) debe ser compatible con los derechos de incidencia colectiva (...) y no debe afectar el funcionamiento ni la sustentabilidad de los ecosistemas de la flora, la fauna, la biodiversidad, el agua, los valores culturales, el paisaje, entre otros, según los criterios previstos en la ley especial” [29].

Sumado a ello, en el artículo 14 se especifica que “En este Código se reconocen: a) derechos individuales; b) dere-

chos de incidencia colectiva. La ley no ampara el ejercicio abusivo de los derechos individuales cuando pueda afectar al ambiente y a los derechos de incidencia colectiva en general” [29].

III.2.2. Regulación del turismo en Argentina

Con relación a la regulación del turismo, a nivel nacional se cuenta con la Ley Nacional de Turismo (Ley 25.997, sancionada el 16 de diciembre de 2004 y promulgada el 5 de enero de 2005), la cual declara “de interés nacional al turismo como actividad socioeconómica, estratégica y esencial para el desarrollo del país” y establece que “la actividad turística resulta prioritaria dentro de las políticas de Estado” [30].

En su primer artículo se declara la voluntad de contemplar la protección ambiental y la participación ciudadana en la actividad al definir como objeto de la Ley: “El fomento, el desarrollo, la promoción y la regulación de la actividad turística y del recurso turismo mediante la determinación de los mecanismos necesarios para la creación, conservación, protección y aprovechamiento de los recursos y atractivos turísticos nacionales, **resguardando el desarrollo sostenible y sustentable** y la optimización de la calidad, estableciendo los mecanismos de participación y concertación de los sectores público y privado en la actividad” [30] (texto resaltado por las autoras).

Sumado a ello, al enumerar los principios rectores de la ley, se mencionan, entre otros:

1. El desarrollo social, económico y cultural, especificando que el turismo es un derecho social y económico de las personas dada su contribución al desarrollo integral en el aprovechamiento del tiempo libre y en la revalorización de la identidad cultural de las comunidades.
2. El desarrollo sustentable, ordenando que el turismo debe desarrollarse en armonía con los recursos naturales y culturales a fin de garantizar sus beneficios a las futuras generaciones y la accesibilidad.
3. La accesibilidad, disponiendo que se debe propender a la eliminación de las barreras que impidan el uso y disfrute de la actividad turística por todos los sectores de la sociedad, incentivando la equiparación de oportunidades. En este punto, cabe

⁴ Esta Ley fue modificada de modo regresivo mediante la sanción de la Ley N.º 27.804 el 8/4/2026, restando la importancia de la inclusión e identificación de los glaciares y el ambiente periglacial realizada por parte de Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) y otorgando amplias facultades a las autoridades provinciales para apartarse de lo identificado por este instituto.

mencionar que contamos con regulación específica sobre Turismo Accesible, como la Ley 25.643⁵ [31] y el Programa de Gestión de Turismo Accesible en Áreas Protegidas [32], además de la normativa general que es necesario contemplar en estos casos: Ley N.º 24.314 [33] y su Decreto Reglamentario 914/97 [34] y Ley 26.378 [35], entre otras.

La Ley Nacional de Turismo, asimismo, identifica como “iniciativas prioritarias” la creación genuina de empleo y aquellas que tiendan al cumplimiento de algunos de los siguientes objetivos: a) La utilización de materias primas y/o insumos nacionales; b) El incremento de la demanda turística; c) El desarrollo equilibrado de la oferta turística nacional; d) El fomento de la sustentabilidad; e) La investigación y especialización en áreas relacionadas al turismo [30].

Esta ley sufrió importantes modificaciones regresivas mediante la sanción del Decreto N.º 216/2025 [36] el 20 de marzo de 2025. Entre ellas, cabe destacar la reducción de las competencias y atribuciones asignadas a la Secretaría de Turismo de la Presidencia de la Nación, relacionadas al diseño de políticas nacionales de la actividad turística e inversiones de infraestructura y obra pública y facilitación de créditos. Por ejemplo, se eliminó el deber de fijar las políticas nacionales de la actividad turística que tengan por fin: “planificar, programar, promover, capacitar, preservar y proteger” [36]; elaborar el plan de inversiones y obras públicas turísticas [36]; la obligación de elaborar el Plan de Turismo Social y promover la prestación de servicios accesibles a la población privilegiando a los sectores vulnerables [36], entre otras. Asimismo, se suprimieron las funciones vinculadas al deber de capacitación y sensibilización que promovían una conciencia turística en la población [36].

Por otro lado, en nuestra legislación contamos con la Ley Nacional 27.324 “Régimen de promoción de pueblos rurales turísticos” [37] sancionada en el año 2016, la cual busca promover el desarrollo sostenible de las

actividades turísticas en espacios rurales, a través de la implementación de acciones que mejoren el aprovechamiento de su potencial turístico. Entre otras medidas, se destaca el apoyo estatal en la gestión e inversión pública, el ordenamiento territorial, programas de capacitación turística y el “asesoramiento en temas de promoción turística y de desarrollo de la producción local en consideración de las medidas de protección del patrimonio natural existente” [37].

III.3. ANÁLISIS DE CASOS Y DESAFÍOS DE SOSTENIBILIDAD EN LA ACTIVIDAD TURÍSTICA

Establecido el marco teórico y normativo, se analizan, en esta oportunidad, tres destinos turísticos argentinos: Mar del Plata, San Carlos de Bariloche y Tandil, que poseen características, historias y evoluciones propias y distintivas. Con el objetivo de conocer distintas políticas, estrategias y acciones implementadas en estos destinos, se realizó una entrevista semiestructurada a la Fundación Athena Arcturus, organización sin fines de lucro con sede principal en San Carlos de Bariloche, Argentina (también en Puerto Varas Chile y Milano, Italia) y se enviaron preguntas escritas los responsables de las áreas de Turismo de Mar del Plata y Tandil.

A partir de los aportes enviados y compartidos en la entrevista, que enriquecieron significativamente la investigación bibliográfica y documental realizada, se elaboró una “Guía de buenas prácticas ambientales para el turismo sostenible”,⁶ en la cual se sistematizan 16 estrategias para la adopción de Buenas Prácticas para un Turismo Sostenible, que pueden agruparse en los siguientes ejes temáticos: sensibilización y educación ambiental; gestión responsable de materiales y productos; embalaje y presentación de productos y servicios; gestión eficiente del agua; eficiencia energética; accesibilidad; control de la contaminación acústica; utilización de productos de limpieza ecológicos; gestión integral de residuos; economía circular; infraestructura sostenible; servicios gastronómicos y de *catering*; movilidad sostenible; vinculación con la comunidad local; biodiversidad y espacios verdes; monitoreo, certificación y mejora continuas.

Estas estrategias se traducen en acciones concretas que los/as distintos/as operadores/as turísticos/as pueden aplicar de manera progresiva para internalizar los cos-

⁵ La Ley 25.643 define al Turismo Accesible como “el complejo de actividades originadas durante el tiempo libre, orientado al turismo y la recreación, que posibilitan la plena integración —desde la óptica funcional y psicológica— de las personas con movilidad y/o comunicación reducidas, obteniendo durante las mismas la satisfacción individual y social del visitante y una mejor calidad de vida” (art. 1). Se contemplan también, a las personas que “(...) padezcan alteraciones funcionales por circunstancias transitorias, cronológicas y/o antropométricas” (art. 2).

⁶ <https://dspace.ufasta.edu.ar/items/f4545c5a-a60a-4ac7-8245-fa4279296b8e>

tos ambientales, prevenir el daño y adoptar hábitos productivos compatibles con los principios del desarrollo sostenible, reduciendo así su impacto negativo en el ambiente y potenciando los beneficios para las comunidades locales.

De este modo, la guía constituye una herramienta operativa fundamental para la materialización de la función socioambiental empresarial, a partir de la cual se pueden —de manera gradual y atendiendo a la escala de cada iniciativa— adaptar los distintos proyectos turísticos hacia esquemas de gestión más sostenibles.

III.3.1. Mar del Plata: desafíos en la gestión sostenible de un destino costero masivo

La ciudad de Mar del Plata, fundada en noviembre de 1873 por Patricio Peralta Ramos, es una de las ciudades balnearias más reconocidas de Argentina. Ubicada a orillas del océano Atlántico, esta localidad ofrece diversos atractivos turísticos como sierras, arboledas, lagunas y arroyos. Sin embargo, desde sus inicios, el principal atractivo que ha distinguido a este destino han sido sus playas.

Con base en Mantero [38] se puede graficar el impacto del turismo en la ciudad de Mar del Plata en los siguientes periodos:

1. Preliminar (1857-1885): previo a la instalación de la ciudad, en donde las actividades desarrolladas eran la pesca artesanal, la producción agrícola y ganadera.
2. Ciudad en formación (1885-1915): signado por un turismo de élite instituido por la burguesía. Tanto la llegada del ferrocarril en 1886 como la construcción del Hotel Bristol en 1888 fueron dos hitos claves en esta primera etapa. El flujo turístico anual pasó de 2 900 turistas en 1889 a 32 573 en 1913.
3. Ciudad en transición (1915-1945): la actividad turística se incrementa al ampliarse la redistribución de los beneficios de la economía. Se produce así la convivencia del precursor turismo de élite con el turismo de sectores medios que canaliza su ahorro en el disfrute familiar de sus vacaciones anuales de playa. El flujo turístico pasó de 32 573 turistas en 1913 a 275 000 en 1945.
4. Ciudad en expansión - turismo en apogeo (1945-1975): se produjo la sustitución del turismo de élite

y la apertura al turismo de masas. En el año 1945 sobresalieron dos medidas: “una extendió el derecho a las vacaciones remuneradas y obligatorias al conjunto de los trabajadores y empleados en relación de dependencia (...) y la otra medida fue el sueldo anual complementario que a la vez, fijó un descuento del 5 % sobre esa remuneración —compuesto por un 2 % de aporte del asalariado y un 3 % de aporte patronal— con destino al fomento del turismo social” [39]. Se multiplicaron los hoteles sindicales y el Estado promovió activamente el turismo social. En este periodo comenzó a evidenciarse la necesidad de implementar medidas para contener los impactos ambientales del turismo masivo, como por ejemplo, el tratamiento adecuado de las aguas residuales [40]. Para 1975 la cantidad de turistas anuales llegó a los 3 249 950.

Actualmente, la ciudad constituye un centro urbano con marcada estacionalidad y con una población permanente significativa, siendo el sexto centro urbano más poblado del país con 667 082 habitantes [41]. Si se toman en cuenta los datos aportados por la municipalidad, entre los años 2007/2024 (exceptuando los años de pandemia), en enero y febrero arriban por mes más de un millón de personas, siendo el récord más alto del mes de enero del año 2013 (con 1 494 586 personas) y el de febrero del año 2012, con 1 252 839 personas [42].

Estas cifras dan cuenta del enorme impacto que la actividad turística genera en la localidad durante los meses de temporada alta y la compleja infraestructura que la ciudad debe contemplar para satisfacer las necesidades no solo de alojamiento, sino también de servicios básicos e instalaciones adecuadas para albergar a este inmenso caudal de visitantes de manera sostenible.

Los avances normativos ambientales y la toma de conciencia por parte de la sociedad respecto a esta problemática se pueden evidenciar en el marco normativo local, destacándose la Ordenanza N.º 24952 que declaró al turismo “actividad socioeconómica de interés municipal y prioritaria, asegurando su fomento, desarrollo sostenible, su promoción y protección, la preservación del patrimonio cultural, histórico, arqueológico y del medio ambiente” [43].

Esta ordenanza, menciona entre sus objetivos fundamentales: “La valorización de los recursos turísticos existentes y la búsqueda de otros nuevos que contri-

buyan al enriquecimiento del patrimonio y la diversificación de la oferta turística de forma sostenible, entre ellos el (...) Turismo Educativo, Turismo Idiomático, (...) Turismo Gastronómico, reconversión de la industria del turismo hacia la energía limpia y preservación de la no renovable, innovación en inversión e infraestructura en Hotelería (...) Turismo accesible para todas las personas con diferentes posibilidades, planificación estratégica y control de la contaminación generada por el turismo de masas, teniendo en cuenta la movilidad sostenible, Ecoturismo, Parques y Reservas, Turismo Científico, Turismo Rural, Turismo Comunitario, Pesca Deportiva, Turismo Cultural (...)” [43].

Por otro lado, de la respuesta brindada por el Ente Municipal de Turismo y Cultura (en adelante, el EMTURyC) acerca de las estrategias de sustentabilidad implementadas en Mar del Plata, se advierte el gran desafío que implica compatibilizar la protección de los bienes naturales con la alta y concentrada demanda de este histórico destino turístico de los argentinos. Específicamente, han informado que “Mar del Plata se encuentra en una posición incipiente respecto a otros destinos por la masividad y marcada estacionalidad que la caracteriza”.

Desde el EMTURyC han tomado diversas estrategias, tales como el Programa de Directrices de Gestión Ambiental, que permitió que Prestadores de Servicios Turísticos cuenten con certificaciones ambientales de carácter internacional, nacional, provincial y municipal; la iniciativa “Visit Mar del Plata” que tiene entre sus objetivos hacer una gestión sustentable en términos de impacto turístico y convertirse en un Destino Turístico Inteligente (DTI) mediante una gestión basada en la accesibilidad, la innovación, la sustentabilidad y la gobernanza; campañas de comunicación ambiental para promover el Turismo de Naturaleza; capacitaciones de profesionales del sector turístico y de las y los residentes de la ciudad, y la colaboración en jornadas de limpieza en playas. Sumando a ello, el municipio integra la Red Argentina de Municipios Frente al Cambio Climático, cuenta con un Plan Local de Acción Climática y con un Plan Integrado de Turismo Sostenible para Mar del Plata - PITS 2050.

III.3.2. San Carlos de Bariloche y el contexto del Parque Nacional Nahuel Huapi

San Carlos de Bariloche es una ciudad ubicada en el Parque Nacional Nahuel Huapi, que se encuentra al

oeste de la provincia de Río Negro y se destaca, entre otras cosas, por ser la localidad turística más antigua de la Patagonia Argentina, en un entorno natural de gran riqueza ecológica y paisajística marcada por la presencia de montañas, lagos y bosques andino-patagónicos.

Esta ciudad fue fundada el 3 de mayo de 1902, aunque previamente a su fundación vivían en este territorio pueblos originarios andinos y colonos provenientes de distintas regiones, quienes transitaban libremente la Cordillera de los Andes entre Chile y Argentina para comerciar productos agrícolas y ganaderos. En ese contexto, los desplazamientos tenían fines de subsistencia, ya que el concepto moderno de turismo aún no existía.

Uno de los hitos más importantes de su historia fue en 1903, cuando el perito Francisco Pascasio Moreno donó al Estado nacional argentino una superficie de tres leguas “con la condición de que fueran preservadas intactas y para el beneficio de las futuras generaciones. Estas tierras se convertirían en 1922 en el Parque Nacional del Sud, primer parque nacional de Latinoamérica” [44]. Al año siguiente, en este mismo lugar, se creó el Parque Nacional Nahuel Huapi [45]. Esta área protegida de 717 261 ha, que se encuentra emplazada al oeste de la provincia de Río Negro y en el suroeste de la provincia de Neuquén “resguarda una muestra representativa de los ecosistemas andinos del norte de Patagonia, importantes cuencas hídricas y un variado patrimonio cultural” [44], constituyendo, además, una importantísima reserva de diversas especies de flora⁷ y fauna.⁸

Teniendo en cuenta las particulares características que presentan estos ecosistemas de altísimo valor ecológico y científico, cabe preguntarse si el crecimiento de la ciudad, fuertemente influenciada por la actividad turística, se ha desarrollado en consonancia con los principios de preservación ambiental establecidos por la Ley General del Ambiente N.º 25.675.

⁷ En la ficha del Parque se detalla que: “Los ambientes altoandinos incluyen plantas de bajo porte, (...) en el bosque andino crecen especies como, la lenga, el ñire y el corpulento coihue (...) En zonas más húmedas aparecen bosques de alerce, ciprés de las guaitecas y mañiú.

⁸ En la ficha citada, se especifica: “(...) habitan animales como el huillín, huemul, cormorán imperial, monito de monte, pato de torrente, cóndor, puma, pudú, gato huiña, guanaco y zorro gris chico. Algunas especies sólo viven aquí, como es el caso del tuco tuco colonial, la ranita del Challhuaco y el senecio del cerro Carbón”.

Según los datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC), la población de San Carlos de Bariloche creció de 112 887 habitantes en el Censo 2010 a 135 755 habitantes en el Censo 2022 [46], lo que representa un incremento del 20.3 % en 12 años. Este crecimiento sostenido tiene su correlato en una expansión urbana significativa, que intensifican la demanda de servicios, infraestructura y afectan los sistemas ecológicos, en una ciudad cuyo principal atractivo es su entorno natural.

Sumado a lo anterior, la presión de inversiones privadas ha generado tensiones entre el crecimiento económico y la protección de los ecosistemas, comprometiendo así la sostenibilidad ambiental de una región. Un ejemplo de esta problemática, puede encontrarse en accidentes ocurridos a raíz de desprendimientos de tierra en hoteles de alta categoría construidos sobre terrenos montañosos sin una evaluación ambiental previa.⁹ Por otro lado, la ciudad recibe turistas de manera masiva todos los años: según datos oficiales¹⁰ más de 1 000 000 de personas por año.

Integrantes de la Fundación Anthena Arcturus informaron en la entrevista mencionada que en el trabajo desarrollado desde la fundación se plantea un abordaje de las problemáticas ambientales desde una mirada integral, incluyendo la sensibilización y la concientización como parte fundamental en la acción de educar. La metodología utilizada por esta institución, basada en los principios del Método Anthena Arcturus® desarrollado por su fundadora, promueve experiencias y encuentros que propician la conexión del ser humano con la naturaleza desde una perspectiva holística pero al mismo tiempo concreta.

Los miembros de la institución han compartido para la presente investigación que la máxima de todas sus acciones lleva el mismo nombre que uno de sus programas de voluntariado: “Seamos Ejemplo”, algo que consideran debería promoverse en la gestión ambiental de la ciudad y del Parque Nacional Nahuel Huapi.

También, han detallado que desarrollan amplios proyectos para promover nuevas formas de turismo desde su Área de Turismo Sustentable, en conjunto con las

otras 11 áreas de la institución enfocados en el fortalecimiento del vínculo entre los visitantes, la comunidad anfitriona y el entorno natural.

Ejemplos de estos proyectos son turismo de voluntariado, jornadas de educación ambiental abiertas a la comunidad, programas de voluntariado en la vía pública, charlas educativas en escuelas, acciones de concientización en el Parque Nacional (acerca de cómo visitarlo logrando un mínimo impacto); muestras y exposiciones vinculadas al patrimonio natural y cultural de la zona, jornadas de reciclaje en puntos turísticos y un programa que incluye a las empresas en prácticas sostenibles, obteniendo una certificación y/o apoyo y capacitación por parte de los profesionales de la fundación para mejorar sus procesos y gestión en torno a la preservación y conservación del entorno natural de la ciudad.

Además, los integrantes de la fundación mencionan que la adhesión del sector privado demuestra que este puede ser aliado en la construcción de un turismo más consciente y regenerativo. Asimismo, brindan asistencia técnica a organismos gubernamentales y otras ONG con la finalidad de apoyar proyectos vinculados con la sostenibilidad.

Iniciativas como las desarrolladas por esta fundación brindan claves esenciales para llevar a cabo las políticas enunciadas en la Ley General del Ambiente: trabajo articulado, educación sensible y una visión que lleva al ser humano a conectar con valores profundos fortaleciendo su vínculo con la naturaleza como espacio de pertenencia.

III.3.3. Tandil: estrategias y acciones para un destino turístico sostenible

La ciudad de Tandil, situada en el sistema serrano de Tandilia, al sudeste de la Provincia de Buenos Aires, fue fundada en 1823. El entonces gobernador de la provincia de Buenos Aires, el Brigadier General Martín Rodríguez, decidió construir el Fuerte de la Independencia en los terrenos que hoy rodean a la Iglesia Matriz [47].

Los cerros, que históricamente constituyeron una fuente de desarrollo productivo minero, se convirtieron en un atractivo turístico y son parte fundamental de la identidad territorial. Según el censo del año 2022, “el número de habitantes del partido de Tandil asciende a

⁹ [https://www.rionegro.com.ar/sociedad/se-podria-haber-
evitado-la-tragedia-del-hotel-de-bariloche-2340790/](https://www.rionegro.com.ar/sociedad/se-podria-haber-evitado-la-tragedia-del-hotel-de-bariloche-2340790/)

¹⁰ [https://www.bariloche.gov.ar/estadisticas_grafico.
php?grafico=2](https://www.bariloche.gov.ar/estadisticas_grafico.php?grafico=2)

150 162 personas, lo que representa un crecimiento intercensal del 21.22 % (...), frente al promedio provincial de 12.44 %” [48].

La ciudad desarrolla actividades agropecuarias (agricultura y ganadería), actividades vinculadas a la metal-mecánica y se fue incrementando también el desarrollo de la actividad turística. En un principio, se destacaba la actividad turística religiosa, siendo uno de los eventos más importantes el “Vía Crucis” que se realiza todos los años en Semana Santa, convocando a peregrinos y turistas. Asimismo, la ciudad contó históricamente con un particular atractivo: la legendaria Piedra Movediza, una gran roca de unas 300 toneladas, que oscilaba levemente en un pequeño punto en contacto con un vértice redondeado [49].

Durante la primera década del siglo XXI, Tandil se fue posicionando como un destino turístico estratégico por su cercanía a importantes ciudades y gran conectividad ofreciendo tranquilidad y contacto con la naturaleza. Actualmente sus principales atractivos turísticos pueden encontrarse en sus sierras, reservas naturales, el Lago del Fuerte y distintos senderos para hacer *trekking*, *mountain bike*, cabalgatas e incluso un paseo en aerosillas. A la organización de actividades de aventura y distintos eventos deportivos y culturales, se suma la intensificación de la instalación de un polo informático conformado por más de cincuenta empresas vinculadas a la tecnología de la información [47].

Este incremento de la actividad turística trajo consigo una importante ampliación en la oferta en alojamientos y gastronómica, siendo un lugar reconocido en el país por los embutidos y quesos, contando incluso desde el año 2011 con una certificación de la Denominación de Origen (D.O.) del “Salame de Tandil”.¹¹

Consultada la Dirección de Turismo de Tandil sobre las distintas políticas, estrategias y acciones implementadas por esta en materia de sostenibilidad turística, nos han informado que desde el año 2001 han buscado consolidarse como un destino turístico sostenible, inclusivo y de calidad. Los ejes de esta visión incluyen: la sostenibilidad ambiental, cuidando y poniendo en valor áreas naturales y paseos, reduciendo la huella ecológica y promoviendo prácticas ecoamigables en el sector hotelero y

gastronómico; el desarrollo local, impulsando a emprendimientos turísticos locales, integrando el turismo rural y comunitario; la inclusión y accesibilidad, incorporando infraestructura y experiencias accesibles para personas con discapacidad y personas mayores; la desestacionalización, fomentando el turismo durante todo el año, más allá de feriados y temporadas altas y la innovación y digitalización, incorporando tecnologías para mejorar la experiencia del visitante y la gestión del destino.

Asimismo, informan que la sostenibilidad es un eje transversal del Plan Estratégico de Turismo de Tandil, que se integra en políticas públicas, ordenanzas municipales y programas de desarrollo turístico, con líneas de acción concretas, como las siguientes:

- Planificación urbana con criterios ambientales.
- Fomento del transporte y la movilidad sostenible en zonas turísticas.
- Apoyo a prácticas de turismo responsable y educación ambiental.
- Certificaciones y reconocimientos para prestadores que aplican criterios de sostenibilidad.

Asimismo, refieren que Tandil fue pionera en la creación de un ente mixto público-privado facilitando el diálogo entre el municipio, empresarios/as, universidades y comunidad promoviendo la planificación participativa del turismo, con una mirada inclusiva y sostenible. Un ejemplo de ello fue el Programa “Huella Joven” y la realización de capacitaciones sobre el uso racional del agua, prevención de incendios, entre otros.

Finalmente mencionan el Programa de “Turismo Accesible”, mediante el cual se incorporaron rampas, cartelería Braille, audioguías y baños adaptados en algunos circuitos turísticos. Sumado a ello, se han capacitado a prestadores para la atención a personas con discapacidad, en línea con principios de diseño universal, y se ha articulado con la escuela de idiomas para garantizar que en cada dependencia en donde se brinde atención al público, haya al menos un/una agente capacitado/a en el lenguaje de señas [50].

¹¹ Certificación otorgada mediante Res. 986/2011 del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, *cfr.* Ley N.º 25.380.

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS DEL TURISMO EN LOS TRES DESTINOS

VARIABLE / DESTINO	MAR DEL PLATA	BARILOCHE	TANDIL
Tipo de turismo	Playa, urbano, cultural, gastronómico.	Montaña, lagos, nieve, aventura.	Rural, sierras, gastronómico.
Actividades	Surf, vida nocturna, eventos culturales.	Ski, trekking, kayak, pesca, disfrute de paisajes.	Trekking suave, paseos al aire libre.
Infraestructura turística	Hoteles, servicios públicos, transporte.	Resorts, hoteles, centros de ski.	Cabañas, hosterías.
Vulnerabilidad ambiental por impacto turístico	ALTA - Ecosistema predominante: costero marino.	MUY ALTA - Ecosistema predominante: Bosque andino patagónico (bosques, lagos, glaciares).	MEDIA - Sistema predominante: serranía pampeana.
Turismo sostenible	Fase incipiente - en transición: Reversión de modelo masivo consolidado hacia prácticas sostenibles; alta inercia estructural.	Fase intermedia: Implementación activa de programas educativos y de conservación. Búsqueda de balance entre desarrollo turístico y conservación de ecosistemas frágiles	Planificado y en ejecución: sostenibilidad como eje; modelo participativo e inclusivo en consolidación
Desafíos	Altísima estacionalidad: Más de 1 millón de visitantes sobre 667 000 hab. Ambientales: Contaminación costera, residuos, efluentes, erosión. Estructurales: Revertir 80 años modelo masivo, cambio cultural. Infraestructura: Colapso de servicios temporada alta.	Conservación: Proteger ecosistemas altamente sensibles. Urbanización: Expansión poco controlada, construcciones irregulares en zonas de riesgo. Presión inmobiliaria. Demográficos: Más de 20 % del crecimiento intercensal.	Demográficos: Más de 21 % intercensal. Ambientales: Preservación de sierras. Diversificación: Alta estacionalidad, integración turismo rural-gastronómico.

IV. CONCLUSIONES

De la investigación y el análisis de los casos realizado, se desprende que la transición del turismo de masas hacia modelos más sostenibles (tales como el ecoturismo, el turismo regenerativo, el turismo carbono neutral y el turismo de voluntariado) requiere de un actuar coordinado entre el Estado, las distintas asociaciones civiles, instituciones educativas y las empresas que desarrollan actividades turísticas. Este nuevo enfoque requiere de un mayor compromiso de los distintos actores, quienes deben contemplar —e internalizar— los impactos que sus actividades generan en los ecosistemas y en las comunidades en donde desarrollan sus actividades.

Argentina cuenta con un sólido marco normativo ambiental que fija importantes lineamientos a considerar al momento de diseñar y desarrollar actividades turísticas, empezando por la premisa general según la cual, en el ámbito del derecho ambiental, la prevención del daño constituye un principio fundamental, ya que una vez producido un daño en el ambiente, su recomposición resulta extremadamente compleja y, en muchos casos, imposible de lograr completamente.

Al analizar los casos de Mar del Plata, San Carlos de Bariloche y Tandil se puede advertir que, a pesar de que los destinos presentan en su devenir histórico particularidades e identidades diferentes, comparten algunos desafíos en torno a la transición a modelos turísticos sostenibles.

Mar del Plata puede ser identificado como un paradigma de turismo masivo que se encuentra tomando de manera paulatina medidas en pos de lograr una reconversión sostenible, San Carlos de Bariloche representa un enorme desafío si se tiene en cuenta la necesidad de equilibrar el desarrollo de la actividad turística y la preservación ambiental, dada la importancia ecológica que reviste el lugar, y la especial protección que se le otorgó mediante ley desde el año 1934, y Tandil puede identificarse como un destino turístico que, sobre todo partir la primera década del siglo XXI, tiene un fuerte componente de planificación contemplando de manera progresiva medidas que pueden ser calificadas como sostenibles.

Más allá de estas particularidades, comparten los desafíos propios del turismo argentino, entre los cuales se destacan la presión demográfica y territorial (Mar del

Plata con más de un millón de visitantes mensuales en temporada alta, Bariloche con más de un millón de visitantes anuales y Tandil con un crecimiento intercensal del 21.22 %) y la estacionalidad, que implica una intensa concentración temporal de flujos turístico.

Como se pudo observar en el presente trabajo, existen importantes y diversas iniciativas que aportan herramientas concretas para adaptar el turismo a los nuevos desafíos que nos impone la crisis climática y la degradación de los ecosistemas. Los distintos sectores consultados han compartido sus experiencias que incorporan al ámbito local los lineamientos establecidos a nivel internacional y nacional. Más allá de sus particularidades específicas de cada uno de los tres destinos relevados, se advierten puntos de convergencia en iniciativas orientadas a:

1. Promover una planificación participativa, mediante la articulación efectiva entre múltiples actores, lo cual no solo mejora la calidad de las decisiones sino que también fortalece la legitimidad y viabilidad de las políticas implementadas.
2. La implementación de educación ambiental integral, que trasciende a la mera transmisión de información técnica sino que promueve una transformación en la relación entre el ser humano y el ambiente.
3. Diversificación temporal y espacial: aplicando diversas estrategias para lograr la desestacionalización y descompresión territorial, reduciendo la presión en momentos y lugares críticos y mejorando la calidad de la experiencia turística.

Estas propuestas buscan equilibrar el desarrollo de la actividad turística con la preservación ambiental y el bienestar de las comunidades anfitrionas e evidencian una tendencia progresiva hacia el cuidado de los bienes comunes, aplicando los principios de prevención y de equidad intergeneracional, respetando las particularidades y complejidades de cada uno de los destinos turísticos.

Lo anterior implica un cambio de paradigma que requiere, sobre todo, de una transformación en la concepción de la relación entre el ser humano y su casa común. Para ello, la ciencia y el plexo normativo ambiental nos brindan importantísimas herramientas, pero que resultan insuficientes si no se refuerzan las acciones educativas y se promueven y acompañan los cambios culturales.

Este nuevo enfoque requiere que todos/as los/as actores/as involucrados/as en el desarrollo de actividades turísticas, se reconozcan como sujetos que forman parte de un sistema complejo e interdependiente que hay que preservar para las generaciones presentes y futuras.

REFERENCIAS

- [1] I. Vasilachis de Gialdino, *Estrategias de investigación cualitativa*. Barcelona: Gedisa, 2006.
- [2] R. Quesada, *Elementos del Turismo*, 4.ª reimpr. de la 1.ª ed. San José de Costa Rica: EUNED, 2007.
- [3] Real Academia Española, “Turismo”, en *Diccionario de la Lengua Española*, 23.ª ed. [En línea]. Disponible: <https://dle.rae.es/turismo> [Accedido: sept. 16, 2025].
- [4] ONU Turismo. “¿Por qué el Turismo?”. UNtourism.int. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.unwto.org/es/turismo>
- [5] M. Rice, “Viajes anteriores y destinos futuros en el estudio del turismo,” *Apuntes*, vol. 46, n.º 85, pp. 5-22, jul. 2019, doi: [10.21678/apuntes.85.1043](https://doi.org/10.21678/apuntes.85.1043).
- [6] Shapell Manuscript Foundation. “Travel Poster: Egypt and Palestine Tours – Thomas Cook”. Shapell.org. Accedido: dic. 5. 2025 [En línea]. Disponible: <https://www.shapell.org/manuscript/travel-poster-egypt-and-palestine-tours-thomas-cook/#transcripts>
- [7] Universitat de Girona. “El origen del turismo, nos ponemos históricos”. Mediterrani.com. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://mediterrani.com/el-origen-del-turismo-nos-ponemos-historicos/>
- [8] Naciones Unidas. *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano*. Estocolmo, 1972. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://docs.un.org/es/A/CONF.48/14/Rev.1>
- [9] World Tourism Organization, *Declaración de Manila sobre el turismo mundial*, vol. 1, n.º 1, Madrid, España: UNWTO, 1980, doi: <https://doi.org/10.18111/unwtodeclarations.1980.01.01>.
- [10] Organización de las Naciones Unidas. “Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil, 3 a 14 de junio de 1992”. UN.org.

- Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.un.org/es/conferences/environment/rio1992>
- [11] Naciones Unidas. *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Río de Janeiro: Naciones Unidas, 1993. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: [https://docs.un.org/es/A/CONF.151/26/Rev.1\(vol.I\)](https://docs.un.org/es/A/CONF.151/26/Rev.1(vol.I))
- [12] Naciones Unidas. “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, resolución A/RES/70/1, 2015. [En línea]. Accedido: sept. 16, 2025. Disponible: <https://docs.un.org/es/A/RES/70/1>
- [13] UN Turismo. “Desarrollo Sostenible”. UNTourism.int. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.untourism.int/es/desarrollo-sostenible>
- [14] Naciones Unidas. “Turismo sostenible y desarrollo sostenible en Centroamérica”, resolución A/RES/74/211, 2019. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://docs.un.org/es/A/RES/74/211>
- [15] Naciones Unidas. “Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano”. UN.org. Accedido: dic. 7, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.un.org/>
- [16] UN Turismo. “Ecoturismo y áreas protegidas”. UNTourism.int. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.untourism.int/es/desarrollo-sostenible/ecoturismo-areas-protegidas>
- [17] National Geographic. “Qué es el turismo regenerativo y cuáles son sus beneficios”. NationalGeographicla.com. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.nationalgeographicla.com/viajes/2022/09/que-es-el-turismo-regenerativo-y-cuales-son-sus-beneficios>
- [18] M. F. Lavigne, “Nuevas tendencias en turismo: análisis del enfoque regenerativo”, trabajo final de práctica profesional, Universidad Nacional de San Martín, Argentina, 2023. [En línea]. Disponible: <https://ri.unsam.edu.ar/handle/123456789/2442>
- [19] A. L. García, “Turismo voluntario: Una aproximación a su estudio”, tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2015. [En línea]. Disponible: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/51830>
- [20] K. Tomazos, “Volunteer tourism: an ambiguous marketing phenomenon”, *Innovative Marketing*, vol. 6, n.º 4, pp. 42-47, 2010. [En línea]. Disponible: <https://strathprints.strath.ac.uk/27878/>
- [21] A. M. Heran, “Turismo Voluntario: su implicancia en el desarrollo local sustentable de los destinos receptores”, trabajo final de la práctica profesional, Universidad Nacional de San Martín, Argentina, 2020. [En línea]. Disponible: https://ri.unsam.edu.ar/bits-tream/123456789/1402/1/TFPP_EEYN_2020_HAM.pdf
- [22] K. D. Lyons y S. Wearing, “Volunteer tourism as alternative tourism: journeys beyond otherness”, en *Journeys of Discovery in Volunteer Tourism*. CABI Publishing, 2008, pp. 3-11.
- [23] Congreso de la Nación Argentina. (1995, en. 10). *Ley N.º 24.430. Constitución de la Nación Argentina*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-24430-804/texto>
- [24] Congreso de la Nación Argentina. (2002, nov. 28). *Ley N.º 25.675, Ley General del Ambiente*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-25675-79980>
- [25] Congreso de la Nación Argentina. (2019, dic. 20). *Ley N.º 27520, Ley de Presupuestos Mínimos de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático Global*. (), Boletín Oficial de la República Argentina. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gov.ar/normativa/nacional/ley-27520-333515>
- [26] Congreso de la Nación Argentina. (2007, dic. 26). *Ley N.º 26331, Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26331-136125>
- [27] Congreso de la Nación Argentina. (2010, oct. 28). *Ley N.º 26639, Ley de Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26639-174117>
- [28] Congreso de la Nación Argentina. (2021, jun. 3). *Ley N.º 27621, Ley para la Implementación de la Educación Ambiental Integral en la República Argentina*. [En línea].

Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27621-350594/texto>

- [29] Congreso de la Nación Argentina. (2014, oct. 8). *Ley N.º 26994, Código Civil y Comercial de la Nación Argentina*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26994-235975>
- [30] Congreso de la Nación Argentina. (2025, en. 7). *Ley N.º 25997, Ley Nacional de Turismo*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-25997-102724>
- [31] Congreso de la Nación Argentina. (2002, sept. 12). *Ley N.º 25643, Ley de Turismo Accesible*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-25643-77719>
- [32] República Argentina. Administración de Parques Nacionales. (2020, dic. 18). *Resolución N.º 421/2020, Programa de Turismo Accesible en las Áreas Protegidas Nacionales*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-421-2020-345389>
- [33] Congreso de la Nación Argentina. (1994, abr. 12). *Ley N.º 24314, Accesibilidad de personas con movilidad reducida. Modificación de la ley N.º 22.431*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-24314-713>
- [34] República Argentina. Poder Ejecutivo Nacional. (1997, sept. 18). *Decreto Reglamentario 914/97, Reglamentación arts. 20, 21 y 22 de la Ley 22431*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-914-1997-45816>
- [35] Congreso de la Nación Argentina. (2008, jun. 9). *Ley N.º 26.378. Apruébase la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad y su protocolo facultativo, aprobados mediante resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas del 13 de diciembre de 2006*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26378-141317/texto>
- [36] República Argentina. Poder Ejecutivo Nacional. (2025, mar. 20). *Decreto 216/2025, Modificación Ley 25997 - Turismo*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-216-2025-410771/texto>
- [37] Congreso de la Nación Argentina. (2016, dic. 15). *Ley N.º 27324, Régimen de Promoción de Pueblos Rurales Turísticos*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27324-269020/texto>
- [38] J. C. Mantero, “Mar del Plata: Devenir urbano y Desarrollo Turístico”, *FACES*, vol. 3, n.º 4, pp. 135-152, 1997. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <http://nulan.mdp.edu.ar/id/eprint/48>
- [39] E. Pastoriza y J. Torre, *Mar del Plata: un sueño de los argentinos*, 1.ª ed. Buenos Aires: Edhasa, 2019.
- [40] E. A. Vallarino y M. S. Urrutia, *Playas sostenibles en Mar del Plata*, 1.ª ed. Mar del Plata: EUDEM, 2021. [En línea]. Disponible: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/174172>
- [41] Presidencia de la Nación Argentina. “Centros urbanos”. *Argentina.gob.ar*. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/pais/poblacion/centros>
- [42] Gobierno Abierto Mar del Plata. “Arribos de turistas 2007-2024”. *Mardelplata.gob.ar*. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://datos.mardelplata.gob.ar/?q=dataset/arribos-de-turistas/resource/115c4723-282d-4971-abf8-e0f6378c0497>
- [43] Municipalidad de General Pueyrredón. (2020, dic. 3). *Decreto 1987-20, Ordenanza N.º 24952*. [En línea]. Disponible: <https://www.concejomdp.gov.ar/biblioteca/docs/o24952.html>
- [44] Administración de Parques Nacionales. “Parque Nacional Nahuel Huapi”. *Argentina.gob.ar*. 2025. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/parquesnacionales/nahuelhuapi>
- [45] Congreso de la Nación Argentina. (1934, oct. 29). *Ley 12103, Creación de la Dirección de Parques Nacionales. Creación de los Parques Nacionales de Nahuel Huapi e Iguazú*. [En línea]. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-12103-196777/texto>
- [46] Municipio Bariloche. “Estadísticas Sociodemográficas”. *bariloche.gov.ar*. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.bariloche.gov.ar/>

[intro-circuito-historico-ordenador/estadisticas-sociodemograficas/](#)

- [47] M. V. Capristo, “Turismo y transformaciones socio-territoriales recientes en el destino turístico Tandil, Argentina. Cambios en la oferta, la demanda y la política sectorial (2000-2015)”, tesis de maestría, Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Argentina, 2018. [En línea] Disponible: <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/2056>
- [48] Dirección de Estadística Local del Municipio de Tandil, *Boletín Estadístico*, ed. 49, en. 2023. Accedido: sept. 16, 2025. [En línea] Disponible: <http://indicadores.tandil.gov.ar/indicadoresmt/web/index.php/index>
- [49] Turismo Tandil, “Cerro La Movediza”. Tandil.tur.ar. Accedido: may. 16, 2026. [En línea]. Disponible: <https://www.tandil.tur.ar/attractivo-cerro-la-movediza-30>
- [50] Concejo Deliberante de Tandil. (2021, may. 27). *Ordenanza 175/2021, Capacitación obligatoria en la temática integral de Derechos Humanos y discapacidad, para todas las personas que se desempeñen en el ámbito público municipal*. [En línea]. Disponible: <https://www.hcdtandil.gob.ar/legislacion/Ordenanza-17203.html>

Factores críticos de desempeño y seguridad en SI mediante TOPSIS: determinantes para la sustentabilidad empresarial

Critical Performance and Security Factors in SI using TOPSIS: Determinants of Business Sustainability

Montserrat Reséndiz Leos^{1a}, Patricia Parroquin-Amaya^{1ab} , Iván Juan Carlos Pérez-Olguín² , Karla Miroslava Olmos-Sánchez^{1ac} 

¹ {^a Programa de Ingeniería en Sistemas Computacionales}, {^b Maestría en Tecnología}, {^c Maestría en Ciberseguridad}, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, Chihuahua, México

² Programa de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Doctorado en Tecnología, Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo identificar y jerarquizar los factores críticos que inciden en el desempeño y seguridad de los Sistemas de Información (SI) para apoyar la toma de decisiones estratégicas y fortalecer la sustentabilidad empresarial. La investigación se desarrolló bajo un diseño transversal con enfoque mixto, integrando la revisión sistemática de literatura mediante la metodología PRISMA y un análisis cuantitativo para construir y validar un instrumento de evaluación. Se identificaron 68 factores críticos y, tras la validación de contenido, se retuvieron 56. Estos fueron jerarquizados mediante el método multicriterio TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [1]-[3]. Los hallazgos muestran que la transformación digital y la gobernanza de los SI son determinantes clave de la resiliencia y la sustentabilidad organizacional [4]-[5], ya que impulsan la eficiencia, la transparencia y la toma de decisiones basada en datos [6]-[7]. La originalidad del estudio radica en la integración de PRISMA y TOPSIS para priorizar factores estratégicos de desempeño y seguridad en SI. En conclusión, los resultados contribuyen al diseño de un modelo de toma de decisiones multicriterio que apoye la evaluación de inversiones, políticas de seguridad y monitoreo de SI, reforzando la sustentabilidad organizacional [8].

PALABRAS CLAVE: desempeño y seguridad de SI; TOPSIS; PRISMA; sustentabilidad.

ABSTRACT

This study aimed to identify and rank the critical factors that affect the performance and security of Information Systems (IS) to support strategic decision-making and strengthen business sustainability. The research was conducted using a cross-sectional design with a mixed approach, integrating a systematic literature review using the PRISMA methodology and a quantitative analysis to construct and validate an assessment tool. Sixty-eight critical factors were identified, and after content validation, 56 were retained. These were ranked using the TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) multicriteria method [1]-[3]. The findings show that digital transformation and IS governance are key determinants of organizational resilience and sustainability [4]-[5], as they drive efficiency, transparency, and data-driven decision-making [6]-[7]. The originality of the study lies in the integration of PRISMA and TOPSIS to prioritize strategic performance and security factors in IS. In conclusion, the results contribute to the design of a multi-criteria decision-making model that supports the evaluation of investments, security policies, and IS monitoring, reinforcing organizational sustainability [8].

KEYWORDS: IS performance and security; TOPSIS; PRISMA, sustainability.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Patricia Parroquin-Amaya
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chih., México
CORREO ELECTRÓNICO: pparroqu@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de octubre de 2025. **Fecha de aceptación:** 19 de marzo de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

La era digital y cognitiva se refiere a la creación de cantidades muy significativas de datos que deben estructurarse, analizarse y presentarse con precisión para obtener beneficios a partir de la información y conocimiento derivado de los mismos [9]. Esta era ha llevado a diversas organizaciones a incorporar o mejorar sus Sistemas de Información (SI), así como su infraestructura tecnológica, para gestionar de manera eficiente sus procesos.

Una gestión adecuada de los SI permite una administración más eficiente de recursos con el fin de mejorar la calidad de sus procesos y hacer un uso más eficaz de los recursos financieros [6]-[7]. La incorporación de los SI en las organizaciones abre una serie de oportunidades, sin embargo, también es necesario garantizar el rendimiento y proteger la información contenida en estos sistemas. En México, la mayoría de las organizaciones siguen normativas y estándares para garantizar el rendimiento y la seguridad de los SI. A continuación se describen algunos de estos estándares y su contextualización en México:

- ISO/IEC 27001: Gestión de la seguridad de la información [10]. Este es un estándar ampliamente utilizado por instituciones financieras, organismos gubernamentales y proveedores de servicios de Tecnologías de Información (TI) para gestionar y proteger la información confidencial. Aunque no es obligatoria, esta certificación suele ser exigida en las licitaciones públicas y por los clientes internacionales, además es compatible con la ley de protección de datos de México lo que la hace relevante en un marco normativo nacional.
- NIST SP 800: Marcos de ciberseguridad [11]. Este marco se utiliza como referencia de buenas prácticas y, aunque no es una política oficial de México, las directrices del NIST (como la SP 800-53) se integran a menudo en las políticas de seguridad interna y las estrategias de gestión de riesgos.
- PCI DSS: Norma de seguridad de datos de la industria de tarjetas de pago [12]. En México, la norma PCI DSS es obligatoria para empresas que manejan datos de tarjetas de crédito o débito, incluidas las empresas minoristas, *fintech* y de comercio electrónico. Es exigida por los bancos y los procesadores de pagos; su cumplimiento evita sanciones y garantiza la confianza en las transacciones en línea.

- RGPD: Reglamento General de Protección de Datos [13]. A pesar de que el RGPD no aplica en México, complementa la legislación local y las empresas adoptan en sus prácticas el RGPD para garantizar el cumplimiento internacional.
- HIPAA: Ley de privacidad de los datos sanitarios de EE.UU. [14]. Aunque no es obligatoria en México, se espera su cumplimiento cuando se trata de servicios sanitarios transfronterizos, especialmente en telemedicina o externalización médica.

Aunque el cumplimiento de las normas de seguridad y calidad es un componente fundamental de la gobernanza de los SI, las organizaciones comprometidas con la mejora continua deberían ir más allá de los marcos de cumplimiento estáticos. En este contexto, la adopción de un modelo que permita el seguimiento y la medición continuos, tanto del rendimiento como de la seguridad de la información, se vuelve esencial.

En concreto, mantenerse dentro de un ciclo de mejora continua, como el modelo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar, requiere mecanismos dinámicos que garanticen la adaptabilidad y la resiliencia. El modelo PDCA, que es un método de gestión iterativo creado por Walter Shewhart y modificado por Edward Deming, se utiliza para lograr la mejora continua mediante la planificación sistemática de acciones, su implementación, la verificación de los resultados y la realización de ajustes necesarios [10].

Desde la perspectiva de los profesionales de la seguridad de la información, este enfoque es crucial porque permite a las organizaciones responder de manera proactiva a las amenazas emergentes, evaluar la eficacia de los controles implementados y mantener la alineación con los objetivos estratégicos en un entorno digital en constante evolución [3].

Para cumplir los objetivos de la fase de verificación del modelo PDCA [7], es esencial implementar un modelo de evaluación desarrollado desde la perspectiva de expertos en la materia, con el fin de evaluar los factores críticos que influyen en la gestión eficaz de los sistemas de información. Un modelo de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de los SI constituye una herramienta estratégica para las organizaciones, ya que facilita la supervisión continua del rendimiento de los sistemas, permite identificar las áreas críticas de mejora y respalda la toma de

decisiones fundamentales en evidencia. En un entorno tecnológico dinámico y altamente competitivo, disponer de un modelo de evaluación robusto no solo contribuye a optimizar la gestión de los SI, sino que también fortalece la resiliencia organizacional y la alineación con los objetivos de sustentabilidad empresariales [4].

Este estudio contribuye a la construcción del modelo de toma de decisiones, identificando los criterios clave en el desempeño y seguridad de los sistemas de información y, asimismo, se identifican los factores críticos que intervienen para la evaluación y mejora de los SI, presentando una jerarquía de los mismos realizada mediante el Método de Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) TOPSIS. En la siguiente sección de metodología se describen de manera detallada los pasos que se llevaron a cabo para identificar y jerarquizar los factores críticos para el desempeño y seguridad de los SI.

II. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo a través de tres fases que se describen a continuación:

Análisis sistémico. La metodología empleada fue un enfoque sistémico suave, basado en el conocimiento y diseñado para proporcionar una perspectiva completa y estructurada del dominio denominado Estrategia de Gestión del Conocimiento con Análisis de Sistemas Suaves (KMoS-SSA). Este enfoque incorporó la construcción de un léxico del lenguaje empleado, el desarrollo de un modelo conceptual global, un modelo sistémico y la aplicación del marco CATWOE.

Revisión sistémica de literatura. Se usó la metodología PRISMA para la revisión de la literatura que llevó a identificar los factores críticos de los SI y las áreas clave que fueron consideradas como criterios de selección en el método TOPSIS.

MCDM. Se utilizó el método TOPSIS para jerarquizar los factores críticos para la mejora del desempeño y seguridad de los SI identificados, considerando los criterios de selección.

A. ESTRATEGIA METODOLÓGICA KMoS-SSA

KMoS-SSA [5], [9] está diseñada para abordar problemas complejos en contextos en los que no existe una solu-

ción única y clara. Este enfoque da prioridad a la comprensión de las percepciones y necesidades de las partes involucradas mediante el uso de modelos conceptuales flexibles para explorar diversas perspectivas y formular soluciones social y políticamente viables. Su proceso incluye la identificación del problema, el análisis de múltiples puntos de vista, el desarrollo de un modelo conceptual holístico, la exploración de posibles soluciones y la selección, por consenso entre los actores del dominio, de la opción más aceptable y viable. KMoS-SSA se basa en los tres principios clave de la metodología de sistemas blandos:

1. Rechazar la noción de que los sistemas del mundo real solo necesitan ser reparados y, en su lugar, aceptar la complejidad y el dinamismo del entorno.
2. Reconocer y construir múltiples modelos de actividad sistémica desde diferentes puntos de vista, lo que favorece la resolución de problemas complejos y mejora la toma de decisiones estratégicas.
3. Enmarcar los problemas complejos como situaciones que requieren modelos conceptuales para mejorar la comprensión y fomentar el aprendizaje, en lugar de reducir los componentes del mundo real a partes excesivamente simplificadas. La selección de soluciones adecuadas tiene en cuenta no solo las perspectivas actuales, sino también la historia, la cultura y las aspiraciones de las partes interesadas.

KMoS-SSA [9] proporciona métodos e instrumentos para modelar comportamientos dinámicos, fomentar la reflexión crítica y apoyar las decisiones estratégicas.

B. METODOLOGÍA PRISMA

La revisión bibliográfica se llevó a cabo utilizando la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [15], un marco metodológico diseñado para mejorar la transparencia y la calidad de las revisiones sistemáticas y los meta-análisis. Esta metodología proporciona un enfoque estructurado para identificar, seleccionar, evaluar y sintetizar las pruebas de investigación. A continuación, se describe la aplicación de la metodología:

1. Definición de la pregunta de investigación. En este estudio se formularon dos preguntas de investigación (RQ) basadas en las necesidades del tema

elegido, que guiaron la investigación hacia la búsqueda de respuestas.

- RQ1: ¿cómo contribuyen el rendimiento y la seguridad de los sistemas de información a la mejora de los proyectos de TI?
 - RQ2: ¿cuáles son los factores críticos del rendimiento y la seguridad de los sistemas de información que contribuyen positivamente a la productividad de los proyectos de TI?
2. Desarrollo del protocolo. En este paso se definieron el objetivo y los criterios de inclusión y exclusión.
- Objetivo: identificar los factores críticos de éxito relacionados con el rendimiento y la seguridad de los sistemas de información (SI).
 - Términos de inclusión: “Factores críticos de éxito en el rendimiento y la seguridad de los SI”, “seguridad de los SI”, “evaluación del rendimiento de los SI”, “rendimiento y seguridad de los SI en las organizaciones”.
 - Criterios de inclusión:
 - Criterio 1: artículos publicados en la última década que contengan los términos de inclusión.
 - Criterio 2: artículos que incluyan los términos de inclusión especificados.
 - Criterio 3: estudios que cumplen el criterio 2 y son resultado de una investigación empírica.
 - Criterio 4: estudios que cumplen el criterio 2 y son resultado de una revisión bibliográfica sistemática.
3. Búsqueda bibliográfica sistemática. La búsqueda se llevó a cabo en las siguientes bases de datos: ScienceDirect, Google Scholar, ResearchGate e IEEE Xplore.
4. Selección de estudios. En este paso, los estudios identificados se seleccionan en dos etapas: en la primera etapa (4a) se revisan los títulos y los resúmenes, y en la segunda etapa (4b) se evalúa el texto completo según los criterios de inclusión y exclusión.
5. Extracción de datos. Se recopiló la información esencial de cada estudio seleccionado, centrándose

en identificar los factores críticos de éxito relacionados con el rendimiento y la seguridad de los sistemas de información.

C. VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN

Se diseñó un instrumento de evaluación y la validez de contenido se hizo un juicio de expertos para analizar su opinión, los expertos analizaron cuáles de los 68 factores (ítems) identificados en la revisión de literatura, debieran considerarse por su impacto en el desempeño y seguridad de los SI. Con el fin de medir el grado de acuerdo entre los evaluadores, se calculó el coeficiente kappa de Fleiss.

Kappa de Fleiss [16]-[17] es usado para medir el nivel de acuerdo general entre múltiples evaluadores. Se define como:

$$\text{kappa } (\kappa) = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \quad (1)$$

donde Po es el acuerdo observado promedio y Pe es el acuerdo esperado. Po se calcula con la siguiente fórmula:

$$Po = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pi \quad (2)$$

donde Pi es la proporción de acuerdo observada para el elemento i , la cual se define como sigue:

$$Pi = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^k n_{ij}(n_{ij} - 1) \quad (3)$$

donde n es la cantidad total de sujetos o elementos evaluados, k es el número de categorías posibles, n_{ij} es el número de evaluadores que asignaron el sujeto i a la categoría j y Pe es el acuerdo esperado, el cual se calcula como sigue:

$$Pe = \sum_{j=1}^k p_j^2 \quad (4)$$

donde P_j se obtiene con la fórmula siguiente:

$$P_j = \frac{1}{N \cdot m} \sum_{i=1}^N n_{ij} \quad (5)$$

donde N son los números de ítems, m el número de jueces y n_{ij} representa el número de jueces que clasificaron el ítem i en la categoría j .

El nivel de concordancia obtenido [16] en las dos aplicaciones del instrumento para la evaluación de expertos fue aceptable y los coeficientes obtenidos y la categoría conseguida para cada caso se observan en la [Tabla 1](#). Después de atender las observaciones de los expertos en la primera evaluación se actualizaron los ítems, quedando 56.

TABLA 1
NIVEL DE CONCORDANCIA OBTENIDO

NÚM.	ÍTEMS	KAPPA DE FLEISS	CONCORDANCIA
1	68	0.3846	Aceptable
2	56	0.4011	Aceptable

Para la priorización de los 56 ítems correspondientes a los factores críticos de desempeño y seguridad de los SI, se empleó el MCDM TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Este método permite comparar la distancia relativa de cada alternativa respecto a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa, lo que permite establecer un orden de preferencia entre las alternativas evaluadas [3]. En la siguiente sección se presentan los resultados derivados de la aplicación de este método, así como las prioridades obtenidas.

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los modelos derivados de la aplicación del marco metodológico KMoS- SSA, los factores críticos identificados y los resultados obtenidos de aplicar el método TOPSIS.

A. ANÁLISIS SISTÉMICO

Léxico Extendido del Lenguaje

El Léxico Extendido del Lenguaje (LEL) es una recopilación estructurada de términos clasificados en sujetos, objetos, verbos y estados que son contextualmente relevantes para un dominio de aplicación específico [18]. A diferencia de un glosario estándar, que proporciona definiciones simples, un LEL tiene como objetivo capturar los matices, los supuestos implícitos y los patrones de uso de los términos tal y como los entienden y comunican los expertos en la materia y las partes in-

teresadas. En el contexto de ámbitos complejos, en los que prevalecen la ambigüedad, la incertidumbre y las perspectivas de múltiples partes interesadas, el LEL facilita el entendimiento común, favorece la alineación semántica y permite una comunicación más precisa entre disciplinas y fronteras culturales u organizativas. Además, mejora el proceso de modelización conceptual al aclarar significados y descubrir supuestos ocultos que pueden influir en la toma de decisiones, el diseño de sistemas o implementación de políticas. Se obtuvo un léxico comprendido de 4 sujetos, 25 objetos, 14 verbos y 13 estados.

Visión Enriquecida

Como parte del proceso de comprensión del dominio, se desarrolló el modelo de visión general basándose en la información extraída del léxico de lenguaje ampliado. Este modelo proporciona una representación sistémica de alto nivel de los componentes clave y las interacciones dentro del dominio, lo que facilita una visión holística de su estructura y dinámica. Al mapear visualmente las relaciones entre los actores, los objetos, las acciones y los estados, el modelo de visión general ayuda a identificar los elementos críticos y las áreas potenciales de mejora, como se ilustra en la [Figura 1](#).

Modelo Sistémico

Un enfoque sistémico requiere no solo el análisis de un sistema de forma aislada, sino también sus relaciones con otros sistemas interconectados. En esta investigación se examinaron los enfoques de varias organizaciones internacionales para comprender perspectivas más amplias sobre los sistemas de información.

Las [Tablas 2, 3, 4 y 5](#) presentan cómo diferentes organizaciones internacionales, como la OCDE, la UNESCO, el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [19]-[20], abordan los sistemas de información desde diversas perspectivas, entre ellas la gobernanza de las TI, la innovación y el desarrollo, la formación y la educación, y la interoperabilidad y el acceso. Estos aspectos son esenciales para establecer normas para el intercambio de datos, la conectividad inclusiva y la integración tecnológica. Aunque cada organización adapta su enfoque a su contexto específico, todas comparten un objetivo común: mejorar la eficiencia de los procesos y garantizar el acceso a la información.

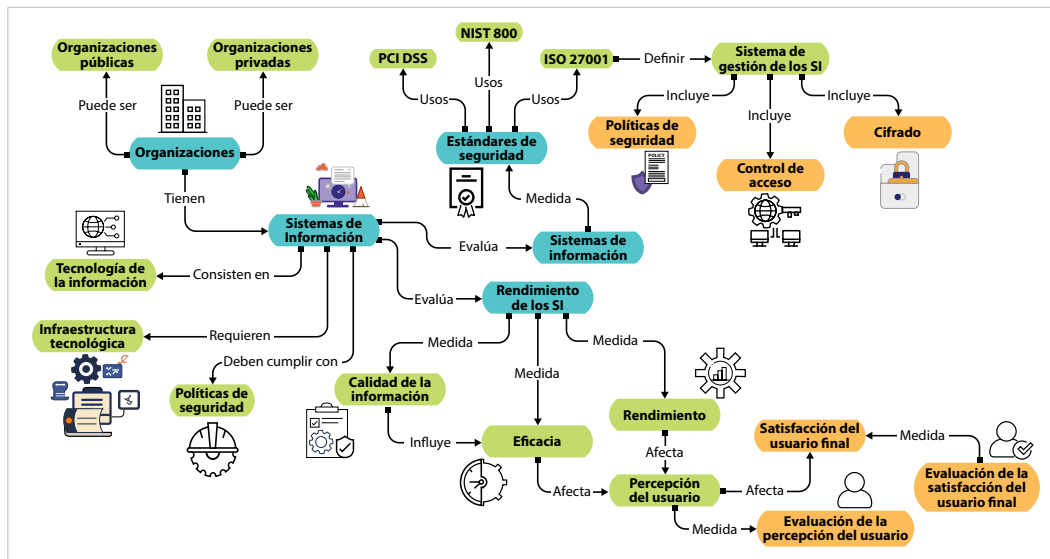


Figura 1. Modelo de representación sistémica.

TABLA 2
ÁMBITO DE GOBERNANZA DE TI

INSTITUCIÓN	PILARES DE LOS SI	PILARES DE LA SEGURIDAD
OCDE	• Eficiencia de los procesos y acceso a la información	• Cumplimiento y auditoría de la seguridad de la información • Auditoría de seguridad
UNESCO	• Promoción de datos abiertos • Datos y acceso equitativo	• Privacidad • Normas de personal • Protección de datos
Banco Mundial	• Transparencia y mejora de la infraestructura	• Gestión y marco regulatorio
IDB	• Integración de sistemas y digitalización	• Control

TABLA 4
ÁMBITO: FORMACIÓN Y EDUCACIÓN

INSTITUCIÓN	PILARES DE LOS SI	PILARES DE LA SEGURIDAD
OCDE	• Formación y alfabetización digital • Programas de alfabetización	• Concientización sobre la seguridad
UNESCO	• Educación continua • Accesibilidad para todos	• Privacidad y protección • Normas de uso
Banco Mundial	• Habilidades: desarrollo y formación técnica	• Resiliencia ante ciberataques • Política de seguridad
IDB	• Formación en tecnologías de la información • Innovación educativa	• Evaluación de riesgos • Estrategias de recuperación

TABLA 3
ÁMBITO: INNOVACIÓN Y DESARROLLO

INSTITUCIÓN	PILARES DE LOS SI	PILARES DE LA SEGURIDAD
OCDE	• Eficiencia de los procesos y acceso a la información	• Monitorización continua y mitigación de vulnerabilidades
UNESCO	• Inclusión digital y educación en TIC	• Formación de seguridad • Mejores prácticas
Banco Mundial	• Tecnologías de la información • Infraestructura • Estrategias de innovación	• Evaluación de amenazas • Respuesta a incidentes
IDB	• Conocimiento y redes colaborativas	• Desarrollo de capacidades • Análisis de amenazas cibernéticas

TABLA 5
ÁMBITO: INTEROPERABILIDAD Y ACCESO

INSTITUCIÓN	PILARES DE LOS SI	PILARES DE LA SEGURIDAD
OCDE	• Interoperabilidad y norma de intercambio de datos	• Seguridad de la transmisión de datos • Protección de redes
UNESCO	• Acceso e interoperabilidad entre instituciones	• Protección de datos sensibles • Cifrado de la información
Banco Mundial	• Conectividad y acceso inclusivo	• Control de acceso • Seguridad de la información
IDB	• Integración tecnológica • Cooperación regional	• Evaluación continua • Respuesta ante amenaza

CATWOE

CATWOE es una herramienta de diagnóstico dentro del Enfoque de Sistemas Suaves que apoya el análisis de situaciones problemáticas complejas mediante la identificación de seis elementos clave: Clientes (C), Actores (A), Proceso de transformación (T), Cosmovisión o *Weltanschauung* (W), Propietarios (O) y Restricciones ambientales.

El objetivo principal de CATWOE es estructurar diferentes perspectivas y permitir la formulación de modelos de actividad con un propósito definido en ámbitos socialmente complejos [21].

En esta investigación se aplicó el marco CATWOE para conceptualizar el desarrollo de un modelo de evaluación del rendimiento y la seguridad de los sistemas de información en las instituciones de educación superior. Los elementos se definieron de la siguiente manera:

- Cliente (C): área de Gestión de la Función de Ciberseguridad, como principal beneficiaria de las mejoras en las prácticas de evaluación.
- Actores (A): directores de Tecnologías de la Información, desarrolladores, usuarios finales y administradores de seguridad, que participan en la transformación o influyen en ella.
- Transformación (T): identificación de los factores prioritarios para evaluar la seguridad de los SI, basándose en las perspectivas de los expertos.
- Visión del mundo (W): esta transformación se justifica por su contribución a la mejora de la asignación de recursos financieros, los procesos de toma de decisiones y la satisfacción de los usuarios finales.
- Propietario (O): equipo de investigación
- Entorno (E): planes de desarrollo institucional, normas y políticas de seguridad, planes de calidad del software y modelos de toma de decisiones.

Tras el análisis CATWOE, se formula una definición raíz utilizando la estructura PQR, que articula lo que hará el sistema (P), cómo se hará (Q) y por qué es nece-

sario (R). Esta estructura mejora la claridad y la coherencia en el modelado de la actividad intencionada. El PQR se definió de la siguiente manera:

- P (qué hacer): jerarquizar los factores críticos para la evaluación del rendimiento y la seguridad de los SI que sirvan para modelos de toma de decisiones.
- Q (cómo hacerlo): identificar los factores críticos desde la perspectiva de expertos mediante una revisión de la literatura y la evaluación de la opinión de expertos.
- R (por qué hacerlo): permitir a los directores de TI evaluar y mejorar el rendimiento y la seguridad de los sistemas de información, mejorar la experiencia del usuario, garantizar la protección de la información, reducir los costes operativos, validar las inversiones en TI y promover la innovación y la competitividad.

B. FACTORES EXTRAÍDOS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La [Tabla 6](#) presenta la clasificación y codificación de los 68 factores críticos del rendimiento y la seguridad de los SI generados de la revisión de literatura.

La identificación y clasificación precisas de estos factores son esenciales para utilizarse en la toma de decisiones estratégicas y la mejora continua de los SI dentro de las organizaciones.

Cada factor se codificó utilizando un sistema de identificación que facilita su análisis y referencia. Los factores relacionados con el rendimiento de los SI se etiquetan con el prefijo IS, seguido de un número secuencial (por ejemplo, IS1, IS2, ...), mientras que los factores específicamente asociados a la seguridad se codifican con el prefijo SEC (por ejemplo, SEC1, SEC2, ...).

La [Tabla 6](#) organiza la información de manera estructurada, incluyendo códigos de identificación, las variables correspondientes y sus respectivas referencias bibliográficas. Esta disposición no solo mejora la comprensión de la relación entre cada factor y su influencia en el rendimiento y la seguridad de los SI, sino que también facilita su aplicación en el proceso de toma de decisiones estratégicas.

TABLA 6
FACTORES EXTRAÍDOS

CÓDIGO	FACTOR	REFERENCIAS
IS1	Educación, formación y sensibilización	[22]-[27], [34]
IS2	Política, social y ética	[28]-[30]
IS3	Concientización y formación	[22], [24]-[25], [30]-[32], [34]
IS4	Ética en las comunicaciones	[22], [24], [27], [30]
IS5	Intercambio de información entre miembros	[22]-[26], [30], [32]
IS6	Normas y reglamentos gubernamentales	[23]-[24], [26]-[28], [31]-[32], [34]-[36]
IS7	Cumplimiento de las disposiciones reglamentarias	[22]-[23], [25]-[26], [28], [30]-[32], [34], [35]
IS8	Confianza	[25]-[27], [32], [35]-[36]
IS9	Satisfacción del usuario final	[27], [28]-[30], [31]-[32], [36]
IS10	Impacto individual de la seguridad	[23]-[24], [27]-[28], [30], [32],[35]
IS11	Impacto colectivo de la seguridad	[22], [24], [31]
IS12	Servicio eficiente y empático que atiende a las necesidades del usuario final	[23], [25], [28], [32], [35]
IS13	Política de seguridad definida	[24], [26]-[27], [30],[34]
IS14	Implementación de políticas de seguridad	[25],[28], [31]-[32],[34]
IS15	Implementación de planes de gestión del sistema	[25], [27]-[28], [32]
IS16	Aprobación y apoyo de la alta dirección a las políticas, procedimientos y controles	[24], [26], [30], [34]
IS17	Apoyo a la gestión de personas mayores	[22]-[23], [30]
IS18	Gestión de recursos organizacionales para la gestión de sistema	[22], [24], [27], [31]
IS19	Disponibilidad de recursos	[32], [35]
IS20	Recursos humanos	[22], [25]-[27], [35]
IS21	Garantizar los recursos financieros y tecnológicos	[23], [28]-[29], [31], [35]
IS22	Compromiso de financiación	[24], [26]
IS23	Estructura empresarial	[25], [27], [32], [35]
IS24	Gestión de proyectos	[22], [24], [26], [28], [32]
IS25	Desarrollar, mantener, documentar y mejorar el sistema	[23]-[25], [27]
IS26	Evaluación del sistema	[25], [28], [30]-[31]
IS27	Implementación de controles de seguridad	[24], [27]-[28]
IS28	Implementación de controles de seguridad eficaces	[26]-[27], [35]
IS29	Procedimiento para la implementación y gestión continua de IS	[22], [28], [32]
IS30	Infraestructura tecnológica	[25]-[26], [31], [35]
IS31	Mantenimiento de hardware y software	[24], [26]-[27], [30], [35]
IS32	Tecnologías de la información	[28], [32]
IS33	Uso de medios para operar y gestionar los negocios	[23], [26]-[28]
IS34	Utilización de tecnología para operar y gestionar sus negocios	[22], [30], [33], [35]
IS35	Calidad de la información	[18], [26], [31]
IS36	Calidad de los datos	[24], [28], [32], [35]
IS37	Disponibilidad y precisión de la información	[22], [24]-[25], [27], [31], [36]
IS38	Calidad del sistema	[27], [32], [35]
IS39	Calidad del servicio	[23], [25]-[26], [31]
IS40	Calidad del soporte	[22], [24], [27], [30]
IS41	Velocidad en la captura, procesamiento y entrega de información	[25]-[28], [35]
IS42	Eficacia del sistema	[24], [27], [32]
IS43	Utilidad de uso	[28], [30]-[32], [35]
IS44	Aplicación de los sistemas	[23]-[24]
SEC45	Seguridad en contextos específicos	[25], [27], [32], [35]
SEC46	Resultados organizacionales	[22], [24], [28], [31]
SEC47	Protección de la información y activos	[26], [30], [33], [35]
SEC48	Preservar la confidencialidad e integridad	[24], [26]-[28], [32]

TABLA 6 (CONT.)
FACTORES EXTRAÍDOS

CÓDIGO	FACTOR	REFERENCIAS
SEC49	Cultura organizacional inseguridad de la información	[25], [27], [34]-[35]
SEC50	Comunicación eficaz con las principales partes interesadas en la seguridad	[22]-[23], [26], [27], [34]
SEC51	Mejora continua	[24], [30], [32], [35]
SEC52	Auditorías y certificaciones	[22], [25]
SEC53	Identificación y planificación de riesgo	[23]-[24], [32]
SEC54	Gestión	[26], [28], [35]
SEC55	Caracterización y ponderación de activos, amenazas y medidas de seguridad	[23]-[24], [27], [31]-[32]
SEC56	Sistemas de gestión de la seguridad	[22], [32], [35]
SEC57	Verificación de la eficacia de los controles de seguridad	[25]-[27], [30]
SEC58	Optimización de la gestión de servicios	[24], [28], [31]-[32]
SEC59	Estrategias y gestión de alto rendimiento	[23], [26], [30], [35]
SEC60	Diseño estratégico para una gestión eficiente	[26]-[27], [32]
SEC61	Uso estratégico de herramientas informáticas	[22]-[24], [27]
SEC62	Apoyo a la toma de decisiones	[28], [30]
SEC63	Apoyo técnico interno y externo	[25]-[27], [35]
SEC64	Flexibilidad y adaptación al entorno económico	[24], [26], [28], [32]
SEC65	Auditoría externa	[22]-[23], [35]
SEC66	Normas de seguridad para la gestión de la seguridad de la información	[26], [32]
SEC67	Alineación de objetivos	[23]-[25], [27]
SEC68	Seguridad de los sistemas de información	[22], [26], [35]

C. FACTORES CRÍTICOS DETERMINADOS

Para validar los factores críticos de éxito identificados y mostrados en la [Tabla 6](#), se realizó el juicio de expertos, recabando opiniones a través de un instrumento de evaluación, con el fin de evaluar la relevancia y la importancia de cada factor. El juicio de expertos, comúnmente utilizado para respaldar decisiones sobre variables cualitativas o validar constructos de la literatura, se aplicó aquí para medir el consenso sobre la aceptación o el rechazo de cada factor en función de su impacto en el rendimiento y la seguridad de los SI.

Para garantizar la objetividad, se utilizó un formulario estructurado para las evaluaciones individuales con los 68 ítems y se calculó el coeficiente Kappa de Fleiss para evaluar la concordancia entre los evaluadores más allá del azar. Una vez analizada la concordancia y atendidas las sugerencias, se determinaron 56 ítems que representaban los 56 factores críticos.

Los resultados de coeficiente kappa de Fleiss pueden ser consultados en la [Tabla 1](#), donde se observa una mejora en la concordancia de las respuestas de los evaluadores en la segunda aplicación del instrumento, el cual contenía los 56 ítems. La [Tabla 7](#) muestra los ítems que se

descartaron después de analizar las observaciones de los expertos en la aplicación de la primera evaluación.

TABLA 7
FACTORES DESCARTADOS

CÓDIGO	FACTOR
IS25	Desarrollar, mantener, documentar y mejorar el sistema
IS27	Implementación de controles de seguridad
IS30	Infraestructura tecnológica
IS34	Uso de medios tecnológicos para operar y gestionar sus negocios
IS36	Calidad de los datos
IS39	Calidad del servicio
IS40	Calidad del soporte
IS41	Rapidez en la captura como el procesamiento y entrega de información
IS42	Eficacia del sistema
IS43	Utilidad
IS44	Aplicación utilidad sostenida de los sistemas
SEC65	Auditoría externa

Para priorizar los 56 ítems correspondientes a los factores críticos de desempeño y seguridad de los SI, se empleó el método para toma de decisiones multicriterio TOPSIS. Este recurso permite comparar la distancia relativa de cada alternativa respecto a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa, lo que posibilita establecer un orden de preferencia entre las alternativas evaluadas [3], tal como se aprecia en la [Tabla 8](#).

TABLA 8
DISTANCIA EUCLIDIANA (V_j^+ y V_j^-), SCORE DE DESEMPEÑO (P_i) Y JERARQUÍA (RANK)

CÓDIGO	V_j^+	V_j^-	P_i	RANK
SI01	0.0490	0.0535	0.5220	32
SI02	0.0421	0.0536	0.5600	22
SI03	0.0391	0.0558	0.5879	15
SI04	0.0533	0.0475	0.4716	46
SI05	0.0578	0.0359	0.3833	54
SI06	0.0472	0.0493	0.5108	39
SI07	0.0441	0.0477	0.5193	33
SI08	0.0223	0.0729	0.7660	1
SI09	0.0575	0.0348	0.3767	55
SI10	0.0532	0.0359	0.4027	51
SI11	0.0568	0.0360	0.3879	53
SI12	0.0500	0.0392	0.4393	48
SI13	0.0484	0.0398	0.4516	47
SI14	0.0390	0.0491	0.5573	23
SI15	0.0467	0.0426	0.4766	45
SI16	0.0418	0.0477	0.5331	28
SI17	0.0323	0.0570	0.6384	10
SI18	0.0405	0.0469	0.5368	26
SI19	0.0380	0.0506	0.5716	18
SI20	0.0403	0.0522	0.5643	21
SI21	0.0390	0.0540	0.5803	17
SI22	0.0420	0.0471	0.5287	29
SI23	0.0433	0.0454	0.5121	36
SI24	0.0479	0.0459	0.4895	42
SI25	0.0407	0.0506	0.5543	25
SI26	0.0399	0.0529	0.5697	19
SI27	0.0584	0.0432	0.4254	49
SI28	0.0510	0.0376	0.4243	50
SI29	0.0440	0.0470	0.5168	35
SI30	0.0468	0.0434	0.4808	43
SI31	0.0424	0.0473	0.5272	31
SI32	0.0435	0.0467	0.5177	34
SEG33	0.0374	0.0565	0.6020	11
SEG34	0.0454	0.0450	0.4978	41
SEG35	0.0450	0.0472	0.5118	38
SEG36	0.0384	0.0483	0.5572	24
SEG37	0.0531	0.0346	0.3946	52
SEG38	0.0424	0.0474	0.5279	30
SEG39	0.0426	0.0447	0.5121	37
SEG40	0.0302	0.0573	0.6552	7
SEG41	0.0310	0.0586	0.6543	8
SEG42	0.0327	0.0577	0.6384	9
SEG43	0.0319	0.0629	0.6636	6
SEG44	0.0357	0.0537	0.6007	12
SEG45	0.0445	0.0450	0.5028	40
SEG46	0.0362	0.0536	0.5972	13
SEG47	0.0371	0.0531	0.5888	14
SEG48	0.0405	0.0468	0.5363	27
SEG49	0.0382	0.0496	0.5645	20
SEG50	0.0276	0.0606	0.6871	5
SEG51	0.0274	0.0627	0.6962	4
SEG52	0.0678	0.0259	0.2767	56
SEG53	0.0489	0.0447	0.4778	44
SEG54	0.0266	0.0619	0.6998	3
SEG55	0.0262	0.0629	0.7060	2
SEG56	0.0368	0.0515	0.5834	16

Una vez aplicado el método TOPSIS, los resultados obtenidos están directamente relacionados con la pregunta de investigación: ¿cuáles son los factores críticos en el

desempeño y seguridad de los sistemas de información y cuál es su orden de importancia? La respuesta a dichos cuestionamientos y los resultados de la investigación se ilustran en las [Tablas 9 y 10](#).

En la [Tabla 8](#) se muestra cómo el cálculo de los valores ideales con V_j^+ para el mejor y V_j^- para el peor, considerando cada uno de los criterios de desempeño y seguridad de los sistemas de información. Se calculó la distancia euclidiana de cada alternativa usando los valores previos y con respecto a los valores V_j^+ y V_j^- obtenidos previamente. Enseguida, usando los valores obtenidos en el cálculo de la distancia euclidiana, se procedió a obtener el *score* de desempeño y la jerarquía de cada factor (*rank*) [37].

En la [Tabla 9](#) se muestra la jerarquía de los factores que impactan en el desempeño de los SI y en la [Tabla 10](#), a su vez, los factores que impactan en la seguridad de los SI obtenidos mediante la aplicación del método TOPSIS. Dichas tablas presentan los códigos, nombres y jerarquías (*rank*) de cada factor, siendo el *rank* 1 el de mayor prioridad.

TABLA 9
JERARQUÍA DE FACTORES PARA EL DESEMPEÑO DE LOS SI

CÓDIGO	FACTORES	RANK
SI08	Satisfacción del usuario final	1
SI17	Recursos organizacionales de gestión del sistema	2
SI03	Sensibilización y formación	3
SI21	Compromiso de financiamiento	4
SI19	Recursos humanos	5
SI26	Procedimiento para la aplicación y gestión continua de SI	6
SI20	Garantizar los recursos financieros informáticos	7
SI02	Político, social y ético	8
SI14	Implementación de planes para la gestión del sistema	9
SI25	Implementación de controles eficientes para la seguridad	10
SI18	Disponibilidad de recursos	11
SI16	Apoyo a la alta dirección	12
SI22	Estructura empresarial	13
SI31	Disponibilidad y exactitud de la información	14
SI01	Educación, formación y concienciación	15
SI07	Cumplimiento de normas	16
SI32	Calidad del sistema	17
SI29	Utilización de medios tecnológicos para operar y administrar sus negocios	18
SI23	Gestión de proyectos	19
SI06	Normas y reglamentos gubernamentales	20
SI24	Evaluación del sistema	21
SI30	Calidad de la información	22
SI15	Aprobación y apoyo de la alta gerencia para políticas, procedimientos y controles	23
SI04	Ética en las comunicaciones	24
SI13	Implementación de políticas de seguridad	25
SI12	Política de seguridad definida	26
SI27	Mantenimiento de hardware y software	27
SI28	Tecnologías de la información	28

TABLA 9 (CONT.)

JERARQUÍA DE FACTORES PARA EL DESEMPEÑO DE LOS SI

CÓDIGO	FACTORES	RANK
SI10	Impacto grupal de la seguridad	29
SI11	Servicio eficiente y empático con las necesidades del usuario final	30
SI05	Intercambio de información entre los miembros	31
SI09	Impacto individual de la seguridad	32

TABLA 10

JERARQUÍA DE FACTORES PARA EL DESEMPEÑO DE LOS SI

CÓDIGO	FACTORES	RANK
SEG55	Alineación de objetivos	1
SEG54	Gestión de estándares de seguridad	2
SEG51	Soporte técnico interno y externo	3
SEG50	Apoyo a la toma de decisiones	4
SEG43	Caracterización y ponderación de activos, amenazas y salvaguardas	5
SEG40	Auditorías y certificaciones	6
SEG41	Identificación y planificación del riesgo	7
SEG42	Gestión de riesgos	8
SEG33	Seguridad en contextos específicos	9
SEG44	Sistema de gestión de seguridad	10
SEG46	Gestión de servicios optimizado	11
SEG47	Estrategias y administración de alto rendimiento	12
SEG56	Seguridad de los SI	13
SEG49	Uso estratégico de las herramientas informáticas	14
SEG36	Preservar la confidencialidad e integridad	15
SEG48	Diseño estratégico de gestión eficiente	16
SEG38	Comunicación efectiva con actores clave en seguridad	17
SEG39	Mejora continua	18
SEG35	Protección de activos de información	19
SEG45	Verificación de la eficacia de los controles de seguridad	20
SEG34	Resultados organizacionales	21
SEG53	Auditoría externa	22
SEG37	Cultura organizacional en seguridad de la información	23
SEG52	Flexibilidad y adaptación al entorno económico	24

IV. CONCLUSIONES

El estudio permitió identificar, a partir de la literatura y del juicio de expertos, un conjunto de 56 factores críticos relacionados con desempeño y la seguridad de los sistemas de información, integrando también dimensiones clave de la gobernanza de las tecnologías de la información.

La jerarquización de estos factores mediante el método multicriterio TOPSIS ofrece a las organizaciones una base objetiva para priorizar acciones de mejora, orientar la inversión y optimizar la gestión de recursos. Estos resultados contribuyen a la toma de decisiones estratégicas alineadas con la sustentabilidad empresarial, al favorecer el uso eficiente de los recursos y fortalecer la resiliencia de los sistemas de información frente a los desafíos actuales. Asimismo los hallazgos del estudio permitirán elaborar, en el futuro, un modelo de toma

de decisiones sobre el desempeño y seguridad de los sistemas de información, sustentado en la priorización de factores críticos. Dicho modelo aportará beneficios, como una mejor asignación de recursos, el fortalecimiento de la seguridad y la resiliencia, el apoyo en la toma de decisiones estratégicas y la consolidación de la sustentabilidad organizacional.

REFERENCIAS

- [1] A. Paul, N. Shukla, S. K. Paul y A. Trianni, "Sustainable supply chain management and multi-criteria decision-making methods: A systematic review", *Sustainability*, vol. 13, n.º 13, p. 7104, 2021, doi: [10.3390/su13137104](https://doi.org/10.3390/su13137104).
- [2] A. J. Villa-Silva et al., "Una revisión de literatura de 1980 a 2018 de los métodos Multi-criterio", *Mundo Fesc*, vol. 9, n.º 18, pp. 89-102, 2019.
- [3] D.-D. Ramírez-Ochoa, L. A. Pérez-Domínguez, E.-A. Martínez-Gómez y D. Luviano-Cruz, "PSO, a Swarm Intelligence-Based Evolutionary Algorithm as a Decision-Making Strategy: A Review", *Symmetry*, vol. 14, n.º 3, p. 455, 2022, [10.3390/sym14030455](https://doi.org/10.3390/sym14030455).
- [4] I. Guandalini, "Sustainability through digital transformation: A systematic literature review for research guidance", *J. Bus. Res.*, vol. 148, pp. 456-471, 2022, doi: [10.1016/j.jbusres.2022.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.05.003).
- [5] K. Olmos-Sánchez y J. Rodas-Osollo, "KMoS-RE: Knowledge management on a strategy to requirements engineering", *Requirements Engineering*, vol. 19, n.º 4, pp. 421-440, dic. 2014, doi: [10.1007/s00766-013-0178-3](https://doi.org/10.1007/s00766-013-0178-3).
- [6] J. Su y Y. Sun, "An improved TOPSIS model based on cumulative prospect theory: Application to ESG performance evaluation of state-owned mining enterprises", *Sustainability*, vol. 15, n.º 13, p. 10046, 2023, [10.3390/su151310046](https://doi.org/10.3390/su151310046).
- [7] L. Viera, W. Leal y E. Á. Pedrozo, "Transformative organisational learning for sustainability in higher education: A literature review and an international multi-case study", *J. Clean. Prod.*, vol. 447, p. 141634, 2024, [10.1016/j.jclepro.2024.141634](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141634).
- [8] M. Madanchian y H. Taherdoost, "Applications of Multi-Criteria Decision Making in Information Systems for

- Strategic and Operational Decisions”, *Computers*, vol. 14, n.º 6, p. 208, 2025, doi: [10.3390/computers14060208](https://doi.org/10.3390/computers14060208).
- [9] K. M. Olmos-Sánchez, J. Rodas-Osollo, A. A. Maldonado-Macías y A. Jiménez-Galina, “Harmonization of knowledge representation: Integrating systems thinking ideas with appropriate domain representation strategies”, *Computación y Sistemas*, vol. 28, n.º 3, p. 1557-1575, 2024, doi: [10.13053/cys-28-3-5174](https://doi.org/10.13053/cys-28-3-5174).
- [10] International Organization for Standardization, *ISO/IEC 27001:2013 Information technology—Security techniques—Information security management systems—Requirements*, 2013.
- [11] G. Culot, G. Nassimbeni, M. Podrecca y M. Sartor, “The ISO/IEC 27001 information security management standard: literature review and theory-based research agenda”, *The TQM Journal*, vol. 33, n.º 7, pp. 76-105, 2021, doi: [10.1108/TQM-09-2020-0202](https://doi.org/10.1108/TQM-09-2020-0202).
- [12] M. N. M. Bhutta et al., “Towards Secure IoT-Based Payments by Extension of Payment Card Industry Data Security Standard (PCI DSS)”, *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2022, n.º 1, p. 9942270, 2022, doi: [10.1155/2022/9942270](https://doi.org/10.1155/2022/9942270).
- [13] I. Tikkinen-Piri, A. Rohunen y J. Markkula, “EU General Data Protection Regulation: Changes and implications for personal data collecting companies”, *Comput. Law Secur. Rev.*, vol. 37, 2021, doi: [10.1016/j.clsr.2017.05.015](https://doi.org/10.1016/j.clsr.2017.05.015).
- [14] M. Mehrtak et al., “Security challenges and solutions using healthcare cloud computing”, *J Med Life*, vol. 14, n.º 4, pp. 448-461, 2021, doi: [10.25122/jml-2021-0100](https://doi.org/10.25122/jml-2021-0100).
- [15] M. J. Page et al., “PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews”, *BMJ*, vol. 372, n.º 160, pp. 160, 2021.
- [16] J. R. Landis y G. G. Koch, “The measurement of observer agreement for categorical data”, *Biometrics*, vol. 33, n.º 1, pp. 159-174, 1997.
- [17] J. L. Fleiss, B. Levin y M. C. Paik, *Statistical methods for rates and proportions*, 2.ª ed. Wiley, pp. 212-236, 1981.
- [18] J. C. S. d. P. Leite y A. P. M. Franco, “A strategy for conceptual model acquisition”, [1993] *Proceedings of the IEEE International Symposium on Requirements Engineering*, San Diego, CA, EUA, 1993, pp. 243-246, doi: [10.1109/ISRE.1993.324851](https://doi.org/10.1109/ISRE.1993.324851).
- [19] X. Liu, “A comparative study on the roles of the World Bank, the OECD and UNESCO in global education policy making”, en *Proc. 2022 Int. Conf. on Creative Industry and Knowledge Economy (CIKE)*, Atlantis Press, 2022.
- [20] M. A. Juárez-Merino, “Digital governance in Latin America: A comprehensive analysis and future perspectives”, *Digit. Gov.: Res. Pract.*, vol. 4, n.º 4, 2025, doi: [10.1177/27723577251388360](https://doi.org/10.1177/27723577251388360).
- [21] P. Checkland y J. Poulter, “Soft systems methodology”, en *Systems approaches to making change: A practical guide*, M. S. Reynolds y Holwell, eds. Londres: Springer, pp. 201-253, 2020, doi: [10.1007/978-1-4471-7472-1_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7472-1_5).
- [22] J. J. Pérez y R. S. Delgadillo, “Modelo de evaluación de éxito de los sistemas de información, con énfasis en los factores políticos, social y ético en instituciones públicas del Perú”, *Industrial Data*, vol. 22, n.º 1, pp. 181-200, 2019.
- [23] J. R. Altamirano, A. Yupanqui y S. Bayona, “Políticas de Seguridad de la Información: Revisión Sistemática de las Teorías que Explican su Cumplimiento”, *RISTI*, vol. 25, pp. 112-134, 2017, doi: [10.17013/risti.25.112--134](https://doi.org/10.17013/risti.25.112--134).
- [24] M. R. Olmedo, “Riesgos relacionados al usuario final”, *ScientiAmericana*, vol. 3, n.º 1, pp. 1-10, 2017.
- [25] J. A. Ruíz-Tapia, C. E. Estrada-Gutiérrez y M. L. Sánchez-Paz, “Propuesta de un modelo de un sistema de gestión de calidad en seguridad de la información basado en la norma ISO 27001 para Instituciones Educativas”, *RILCO*, vol. 2, n.º 5, p. 10, 2020.
- [26] J. Mora, R. Díaz, E. Zhuma e I. E. Díaz, “The information security management system under NTE ISO/IEC 27001 in higher education institutions (Ecuador)”, *ROCA*, vol. 16, pp. 549-559, 2020.
- [27] P. A. Briones, S. G. Molina y M. A. Avilés, “Modelo de evaluación de los sistemas de información aplicado a la calidad de la gestión administrativa universitaria”, *Pro Sciences*, vol. 4, n.º 35, pp. 69-89, 2020, doi: [10.29018/issn.2588-1000vol4iss35.2020pp69-89](https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol4iss35.2020pp69-89).

- [28] R. Moreno-Cevallos y B. L. Dueñas-Holguín, “Sistemas de información empresarial: la información como recurso estratégico”, *DC*, vol. 4, n.º 1, pp. 141-154, 2018, doi: [10.23857/dc.v4i1.728](https://doi.org/10.23857/dc.v4i1.728).
- [29] E. A. Rosales, R. J. Martelo y D. A. Franco, “Design of an information security management system for the administrative process of technological infrastructure in academic institutions based on Magerit”, *Aglala*, vol. 11, n.º 1, pp. 227-245, 2020.
- [30] E. M. D. Guevara, J. R. Delgado y A. C. Mendoza, “Importancia de la gestión de seguridad de la información en instituciones educativas con ITIL e ISO 27001”, *Rev. Investig. Sist. Inform.*, vol. 15, n.º 1, pp. 113-123, 2022, doi: [10.15381/risi.v15i1.23362](https://doi.org/10.15381/risi.v15i1.23362).
- [31] G. I. Cruz, L. E. Delgado, B. R. Ponce y M. J. Marcillo, “Riesgos de seguridad de los datos en la web”, *JTI*, vol. 1, n.º 2, pp. 43-49, 2022, doi: [10.47230/Journal.TechInnovation.v1.n2.2022.43-49](https://doi.org/10.47230/Journal.TechInnovation.v1.n2.2022.43-49).
- [32] K. Arbanas y N. Žajdela, “Key success factors of information systems security”, *J. Inf. Organ. Sci.*, vol. 43, n.º 2, pp. 131-144, 2019, doi: [10.31341/jios.43.2.1](https://doi.org/10.31341/jios.43.2.1).
- [33] J. L. Fleiss y J. Cohen, “The equivalence of weighted kappa and the intraclass correlation coefficient as measures of reliability”, *Educ. Psychol. Meas.*, vol. 33, n.º 3, pp. 613-619, 1973.
- [34] A. Da Veiga y J. H. P. Eloff, “A framework and assessment instrument for information security culture”, *Computers & Security*, vol. 29, n.º 2, pp. 196-207, 2010, doi: [10.1016/j.cose.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.cose.2009.09.002).
- [35] S. AlGhamdi, K. T. Win y E. Vlahu-Gjorgievska, “Information security governance challenges and critical success factors: Systematic review”, *Computers & Security*, vol. 99, p. 102030, dic. 2020, doi: [10.1016/j.cose.2020.102030](https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.102030).
- [36] W. H. DeLone y E. R. McLean, “The DeLone and McLean model of information systems success: A ten-year update”, *J. Manag. Inf. Syst.*, vol. 19, n.º 4, pp. 9-30, 2003, doi: [10.1080/07421222.2003.11045748](https://doi.org/10.1080/07421222.2003.11045748).
- [37] S. H. Almotiri, “Improving network resilience against DDoS attacks: A fuzzy TOPSIS-based quantitative assessment approach”, *Heliyon*, vol. 10, n.º 22, p. e40413, nov. 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e40413](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40413).