

# INQUIDE

Ingeniería Química y Desarrollo

ISSN: 1390-9428  
e-ISSN: 3028-8533  
ISSN-L: 3028-8533

Vol. 8 / No. 1  
Enero - Junio 2026



## **INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo**

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo \* Volumen 8 \* Número 1 \* Enero / Julio 2026.

Somos una Revista de Ciencia y Tecnología editada por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil (Guayaquil – Ecuador).

Se difunde investigación aplicada en ingeniería, procesos industriales, desarrollo sostenible y gestión tecnológica, con enfoque multidisciplinar en el ámbito de las ingenierías.

### **Comité Ejecutivo:**

Francisco Morán Peña, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Rector de la Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0003-3655-6003>

Sofía Lovato Torres, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Vicerrector Académico de la Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-5831-8554>

Luz Elvira Vásquez Luna, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Decano de Investigación, Posgrado e Internacionalización, Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-8709-2072>

Amalin Ladayse Mayorga Albán, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Coordinador de Investigación y Gestión del Conocimiento de la Universidad de Guayaquil <https://orcid.org/0000-0002-3667-0888>

Sandra Ronquillo Castro, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Decano de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-9048-8454>

Hugo Pérez Benítez, MSc. Universidad de Guayaquil, Ecuador. Vicedecano de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. <https://orcid.org/0000-0001-7460-4032>

Francisco Javier Duque-Aldaz, MSc. Universidad de Guayaquil, Ecuador. Editor General de la Revista de Ingeniería y Desarrollo Químico de la Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635>

### **Miembro del Comité Científico Internacional**

José Carmona Tapia, PhD, Universidad de Almería; España. <https://orcid.org/0000-0001-9319-4382>

Raúl Alfredo Sánchez Ancajima, PhD, Universidad Nacional de Tumbes; Perú. <https://orcid.org/0000-0003-3341-7382>

Raúl Guinovart Díaz, PhD, Universidad de La Habana, Cuba. <https://orcid.org/0000-0001-7702-6063>

Ricardo Sánchez Casanova, PhD, Universidad de La Habana, Cuba. <https://orcid.org/0000-0001-5354-6873>

Félix Genaro Cabezas García; MSc. Mohawk College Hamilton, Ontario; Canadá. <https://orcid.org/0000-0003-3595-3584>

Fernando Raúl Rodríguez Flores, MSc Universidad de La Habana, Cuba. <https://orcid.org/0009-0002-8275-7631>

### **Miembro del Consejo Editorial**

Armando Fabrizzio López Vargas, PhD, Universidad Politécnica Salesiana; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0001-6520-8011>

Patricio Javier Cáceres Costales, PhD. Escuela Superior Politécnica del Litoral; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-4651-4387>

Aristides Reyes Bacardí; Maestría en Ciencias de la Universidad Estatal de Milagro; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-3154-2000>

Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu; MSc. Universidad Técnica de Babahoyo; Ecuador. <https://orcid.org/0009-0003-1497-2273>

Genaro Eliceo Díaz Solís; MSc. Universidad Politécnica Salesiana; Ecuador. <https://orcid.org/0009-0003-3963-9039>

Ana Fabiola Terán Alvarado; MSc. Universidad Politécnica Salesiana; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-4092-8001>

Luis Ángel Bucheli Carpio; MSc. Universidad Estatal de Milagro; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0003-2277-603X>

Edwin Ronny Haymacaña Moreno; MSc. Instituto Superior Tecnológico Argos; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-8708-3894>

William Efrén Villamagua Castillo; MSc. Universidad de Guayaquil; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-1163-9606>

### **Editor General**

Francisco Javier Duque-Aldaz, MSc.

### **Editorial**

Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil ( Guayaquil – Ecuador)

**Copyright.** INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo / 2025, Universidad de Guayaquil. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.



**INQUIDE**

*Ingeniería Química  
y Desarrollo*

**INQUIDE**


Ingeniería Química y Desarrollo


Volumen 8 – Numero 1

Enero – Junio 2026

ISSN: 1390-9428 / e-ISSN: 3028-8533 7 / ISSN-L: 3028-8533

La administración de INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo, se realiza a través  
de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico: 

Los artículos cuentan con código de identificación (Digital Object Identifier) 

El proceso editorial se gestiona a través del Open Journal System



Es una publicación de acceso abierto (Open Access) con licencia Creative Commons



Los artículos de la presente edición pueden consultarse en

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/index>

Facultad de Ingeniería Química

Universidad de Guayaquil

**INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información:**

**Base de Datos Selectivas**



**Directorios Selectivos.**



**Buscador de Literatura Científica Open Acces.**



**Plataformas de Evaluación de Revistas**



**Hemerotecas Selectivas**



**Herramienta de Métricas Web**



## Presentación. -

Volumen 8, Número 1 – INQUIDE: Ingeniería Química y Desarrollo

Estimados lectores e investigadores:

La revista INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo presenta el Volumen 8, Número 1, una edición que consolida su posicionamiento como espacio académico para la difusión de investigaciones rigurosas y relevantes en ingeniería química y ciencias aplicadas. El presente número reúne contribuciones que abordan problemáticas contemporáneas asociadas a la sostenibilidad energética, el diseño y evaluación de equipos de proceso, la seguridad industrial, la innovación alimentaria y el análisis cuantitativo de fenómenos socioeconómicos, reflejando un enfoque interdisciplinario orientado al desarrollo científico, tecnológico y productivo.

El primer artículo examina la sustitución de motores de combustión interna por sistemas eléctricos en operaciones de riego agrícola, abordando el problema de las emisiones contaminantes y la dependencia de combustibles fósiles. Mediante un análisis técnico y económico, el estudio identifica beneficios asociados a la reducción de emisiones, costos operativos y contaminación sonora, al tiempo que analiza los desafíos relacionados con la infraestructura eléctrica y la estabilidad del suministro energético en zonas rurales, aportando criterios relevantes para la transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles.

El segundo artículo desarrolla el diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de placas destinado al enfriamiento de leche de vaca líquida. A partir de un enfoque de ingeniería de detalle, se determinan parámetros clave de operación, transferencia de calor, caída de presión y costos de implementación. La contribución principal del estudio radica en demostrar la viabilidad técnica y económica del equipo diseñado, evidenciando su aplicabilidad en procesos industriales lácteos que requieren eficiencia térmica y confiabilidad operativa.

El tercer artículo presenta una revisión de la valoración de riesgos ocupacionales en la industria láctea ecuatoriana, basada en el análisis de publicaciones recientes con énfasis regional. El estudio aborda la problemática de la seguridad y salud laboral mediante un enfoque integral que combina buenas prácticas de manufactura, ergonomía, tecnologías de mantenimiento y sistemas de gestión. Su principal aporte consiste en evidenciar reducciones relevantes en la accidentalidad laboral y en señalar la necesidad de estudios longitudinales y marcos de medición unificados que

permitan evaluar la sostenibilidad de las mejoras implementadas.

El cuarto artículo aborda el diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de ácido acrílico en un contexto industrial. El trabajo desarrolla un dimensionamiento detallado que incluye variables geométricas, operativas y económicas, demostrando que el diseño propuesto cumple con los límites de caída de presión establecidos por el proceso. La contribución del estudio se centra en la validación técnica de un equipo ampliamente utilizado en la industria de procesos químicos.

El quinto artículo explora la elaboración de salchicha tipo Viena a partir de pulpa de papa como alternativa para la diversificación de productos pesqueros. Mediante un enfoque experimental, se evalúan formulaciones, condiciones de procesamiento y atributos sensoriales, nutricionales y microbiológicos. El aporte principal del estudio radica en demostrar la factibilidad tecnológica, la inocuidad y el perfil nutricional favorable del producto, contribuyendo al desarrollo de alimentos innovadores de valor agregado.

El sexto artículo presenta el modelado de series de tiempo de la matrícula escolar secundaria en Ecuador mediante el enfoque Box–Jenkins, utilizando una base histórica extensa. El estudio aborda el análisis de un indicador clave para la planificación educativa, aplicando pruebas de estacionariedad, validación de modelos y proyecciones a mediano plazo. Su contribución consiste en evidenciar la utilidad de las técnicas de series de tiempo para el análisis cuantitativo de fenómenos educativos y para el apoyo a la formulación de políticas públicas.

El séptimo artículo analiza el pronóstico del crecimiento del Producto Interno Bruto de Ecuador mediante modelos ARIMA, comparando escenarios de corto plazo. El trabajo aborda la problemática de la volatilidad macroeconómica mediante técnicas estadísticas robustas, validando la aplicabilidad del enfoque Box–Jenkins para el análisis económico. Su aporte principal reside en la generación de proyecciones consistentes con estimaciones oficiales y en la promoción de enfoques interdisciplinarios entre economía e ingeniería.

El octavo artículo desarrolla el diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo para el enfriamiento de leche, evaluando su idoneidad operativa. A partir del cálculo de parámetros de diseño, caída de presión y potencia de bombeo, el estudio demuestra las limitaciones del equipo propuesto para el servicio requerido. La

contribución del trabajo se centra en el análisis crítico de la aplicabilidad del diseño y en la identificación de restricciones técnicas relevantes para la selección de equipos de proceso.

El noveno artículo presenta un análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de martillos, molino de bolas y su combinación. Mediante análisis por tamices, caracterización microscópica y pruebas estadísticas, el estudio aborda la influencia del tipo de equipo en la calidad del producto molido. Su principal aporte consiste en demostrar que la combinación de tecnologías de molienda permite obtener distribuciones más uniformes, superando las limitaciones de cada equipo por separado.

La Dirección Editorial invita a la comunidad académica, profesional y estudiantil a la lectura detallada de este número, cuyos artículos aportan evidencia científica, análisis técnicos y enfoques metodológicos que enriquecen el conocimiento en ingeniería y ciencias aplicadas. El conjunto de trabajos publicados ofrece insumos relevantes para la investigación, la práctica profesional y la toma de decisiones en contextos productivos y de política pública.

Asimismo, INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo extiende una invitación permanente a investigadores nacionales e internacionales a postular manuscritos originales para futuras ediciones. La revista mantiene un firme compromiso con la calidad editorial, el rigor del proceso de revisión por pares ciegos y la difusión abierta del conocimiento, destacando que no se realiza ningún tipo de cobro por los procesos de revisión ni de publicación de los artículos, y reafirmando su proyección internacional como espacio académico para la divulgación de investigaciones de alto impacto en ingeniería química y desarrollo.

Sin más, les deseamos una feliz lectura y les agradecemos su apoyo a nuestra revista.

Atentamente,

Francisco Javier Duque-Aldaz.  
Director - Editor  
INQUIDE.  
Ingeniería Química y Desarrollo

## ÍNDICE

### Artículos Científicos.

- Aplicación de estrategias productivas para sustituir motores de combustión interna por eléctricos en “ASOMUNUE”, parroquia Mariscal Sucre, Milagro.....** 9
- Application of production strategies to replace internal combustion engines with electric motors in ASOMUNUE, Mariscal Sucre parish, Milagro, Ecuador.  
Luis Angel Bucheli Carpio; Jesus Armando Verdugo Arcos; Carlos Daniel Campoverde Pillajo
- Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de placas para el enfriamiento de leche líquida de vaca .....** 19
- Thermo-hydraulic design of a gasketed-plate heat exchanger for liquid cow’s milk cooling.  
Amaury Pérez Sánchez; Laura de la Caridad Arias Águila; Lizthalía Jiménez Guerra
- Valoración de los riesgos ocupacionales en la industria láctea ecuatoriana .....** 29
- Assessment of occupational risks in the ecuadorian dairy industry.  
Mayerli Angeline Mejía Monar; Carlos Alberto Velásquez Avilés; Ivan Patricio Viteri García
- Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de ácido acrílico .....** 39
- Thermo-hydraulic design of a shell and tube heat exchanger for acrylic acid cooling.  
Amaury Pérez Sánchez; Laura Thalía Álvarez Lores; Laura de la Caridad Arias Águila; Lizthalía Jiménez Guerra.
- Elaboración de Salchicha Tipo Viena a Partir de la Pulpa de Pota (Dosidicus gigas).....** 51
- Elaboration of Vienna-type Sausage from Jumbo squid pulp (Dosidicus gigas).  
Richard Smith Gutierrez Huayra
- Modelado de series de tiempo de la matrícula escolar secundaria en Ecuador: un análisis Box–Jenkins (1971–2023).....** 61
- Time series modeling of secondary school enrollment in Ecuador: A Box–Jenkins analysis (1971–2023).  
Edwin Haymacaña Moreno; Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu; Francisco Javier Duque-Aldaz; Félix Genaro Cabezas García; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima
- ARIMA vs. Modelos Híbridos con aprendizaje automático para pronóstico del PIB de Ecuador.....** 75
- ARIMA vs. Hybrid Models with Machine Learning for Forecasting Ecuador's GDP.  
Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu; Edwin Haymacaña Moreno; Francisco Javier Duque-Aldaz; Félix Genaro Cabezas García; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima

---

<b>Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo sin y con aletas para el enfriamiento de leche. Parte 1 – Intercambiador de calor sin aletas.....</b>	<b>88</b>
Thermo-hydraulic design of an unfinned and finned double pipe heat exchanger for milk cooling. Part 1 - Unfinned heat exchanger. Amaury Pérez Sánchez; Laura de la Caridad Arias Águila; Heily Victoria González; María Isabel La Rosa Veliz; Zamira María Sarduy Rodríguez; Lizthalía Jiménez Guerra	
<b>Análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos.....</b>	<b>102</b>
Comparative evaluation of granulometric distribution in grains processed by ball and hammer Mills. Stefanie Bonilla Bermeo; Fernando Noblecilla Arévalo; Iván Torres Tapia; Carlos Valdiviezo Rogel	
<b>Normas para publicar en la revista.....</b>	<b>117</b>

# Aplicación de estrategias productivas para sustituir motores de combustión interna por eléctricos en “ASOMUNUE”, parroquia Mariscal Sucre, Milagro.

*Application of production strategies to replace internal combustion engines with electric motors in ASOMUNUE, Mariscal Sucre parish, Milagro, Ecuador.*

Luis Ángel Bucheli Carpio <sup>1\*</sup> ; Jesús Armando Verdugo Arcos <sup>2</sup> ; Carlos Daniel Campoverde Pillajo <sup>3</sup>

Recibido: 02/08/2025 – Aceptado: 15/10/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artículos de Investigación  Artículos de Revisión  Artículos de Ensayos

\* Autor para correspondencia.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

## Resumen.

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles se ha convertido en una prioridad en diversos sectores, especialmente en la agricultura, donde los motores de combustión interna desempeñan un papel importante en las operaciones de riego. Estos motores, aunque funcionales y ampliamente utilizados, generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero y dependen de combustibles fósiles, contribuyendo así al calentamiento global y al deterioro ambiental. En este contexto, el reemplazo de estos motores por sistemas eléctricos conectados a redes de distribución con transformadores ofrece una solución innovadora y ambientalmente responsable. Este artículo analiza los aspectos técnicos y económicos de dicha transición, destacando los beneficios que incluyen una notable reducción de las emisiones de carbono, menores costos operativos a largo plazo y una disminución de la contaminación sonora. Asimismo, se abordan los desafíos asociados, como la necesidad de instalar una infraestructura eléctrica adecuada, garantizar la estabilidad del suministro energético en áreas rurales y adaptar los sistemas de riego a los nuevos motores. Este enfoque no solo promueve la ecoeficiencia, sino que también fortalece el compromiso de la agricultura con el desarrollo sostenible.

## Palabras clave.

Energía Sostenible, Agricultura, Motores de Combustión Interna, Calentamiento Global, Contaminación Ambiental.

## Abstract.

The transition towards cleaner and more sustainable energy sources has become a priority in various sectors, especially in agriculture, where internal combustion engines play an important role in irrigation operations. These engines, while functional and widely used, generate significant greenhouse gas emissions and rely on fossil fuels, thus contributing to global warming and environmental degradation. In this context, replacing these engines with electric systems connected to distribution networks with transformers offers an innovative and environmentally responsible solution. This article analyzes the technical and economic aspects of this transition, highlighting the benefits that include a notable reduction in carbon emissions, lower long-term operational costs, and decreased noise pollution. Additionally, it addresses the associated challenges, such as the need to install adequate electrical infrastructure, ensure energy supply stability in rural areas, and adapt irrigation systems to the new motors. This approach not only promotes eco-efficiency but also strengthens agriculture's commitment to sustainable development.

## Keywords.

Agriculture, Environmental Pollution, Global Warming, Internal Combustion Engines, Sustainable Energy.

## 1.- Introducción

La agricultura es uno de los sectores que más recursos naturales consume y, a su vez, uno de los que más contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, particularmente a través del uso de motores de combustión interna en sistemas de riego. Estos motores, que funcionan principalmente con combustibles fósiles como diésel o gasolina, han sido una solución tradicional para el riego en fincas debido a su capacidad de operar en áreas remotas. Sin embargo, sus impactos negativos sobre el medio ambiente y los crecientes costos de los combustibles plantean la necesidad de buscar alternativas más sostenibles. En este contexto, el reemplazo de motores de combustión interna por motores eléctricos conectados a redes con

transformadores surge como una alternativa eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Este cambio no solo representa un avance tecnológico en el sector, sino también una oportunidad para reducir la huella de carbono de la agricultura, optimizar los costos operativos y mejorar la calidad de vida de los productores agrícolas al eliminar la contaminación sonora y simplificar el mantenimiento de los equipos. Este artículo explora en detalle las ventajas de esta transición, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento de energía eléctrica sostenible, así como los desafíos técnicos, como la adaptación de la infraestructura eléctrica en zonas rurales y las inversiones iniciales necesarias. Además, se presentan consideraciones clave para implementar esta solución de manera efectiva,

<sup>1</sup> Afiliación: Universidad Estatal de Milagro; [lbuchelic@unemi.edu.ec](mailto:lbuchelic@unemi.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0003-2277-603X>, Milagro; Ecuador.

<sup>2</sup> Afiliación: Universidad Estatal de Milagro; [jverdugoal@unemi.edu.ec](mailto:jverdugoal@unemi.edu.ec); <https://orcid.org/0009-0006-7103-412X>, Milagro; Ecuador.

<sup>3</sup> Afiliación: Universidad Estatal de Milagro; [ccampoverdep1@unemi.edu.ec](mailto:ccampoverdep1@unemi.edu.ec); <https://orcid.org/0009-0000-4466-3584>, Milagro; Ecuador.

posicionando a la agricultura como un actor clave en la lucha contra el cambio climático y la adopción de prácticas ecoeficientes.

### 1.1.- Contexto y relevancia:

El presente proyecto de investigación se refiere a la instalación de un sistema eléctrico para la operación de una bomba sumergible destinada al sistema de riego en una finca de 7 hectáreas llamada Hacienda Emanuel Los Palmares, Provincia de Guayas, a las afueras de Mariscal Sucre, Milagro. Coordenadas UTM: 667810.20 m E; 9768632.65 m S

La distancia desde el poste de distribución hacia el pozo es de 60 metros, con un perímetro de instalación del poste cerca del pozo de 15m. El sistema de riego se distribuirá en tuberías de 8 a 10 pulgadas de diámetro, con una separación entre cada sistema de riego de 8 a 10 metros.



Figura 1: Vista aérea de la Hacienda. Fuente: Google Earth.

### 1.2.- Estado del arte:

El avance hacia una transición energética sostenible en entornos rurales representa una estrategia clave para mitigar el cambio climático y reducir las desigualdades estructurales en el acceso a servicios energéticos. Diversos estudios científicos coinciden en que el reemplazo de tecnologías basadas en combustibles fósiles por sistemas eléctricos de baja emisión puede generar beneficios ambientales, económicos y sociales de gran alcance, especialmente en comunidades con pobreza energética.

En este contexto, investigaciones recientes han demostrado que: “Las transiciones energéticas sostenibles basadas en fuentes renovables han demostrado reducir significativamente la huella de carbono per cápita en regiones con altos niveles de pobreza energética” [1]. Esta afirmación se alinea con los objetivos del presente estudio, que propone el cambio de motores diésel por motores eléctricos trifásicos en el sistema de riego agrícola de la asociación ASOMUNUE.

Complementariamente, se ha comprobado que: “Las tecnologías renovables descentralizadas pueden proporcionar acceso básico a la electricidad a una fracción del costo de las extensiones de red” [2]. Esto refuerza la viabilidad técnica y financiera del uso de motores eléctricos

en el sector agrícola, como alternativa eficiente a los sistemas de combustión interna.

Asimismo, aunque el presente estudio se enfoca en sistemas de riego, los principios de eficiencia energética son aplicables en múltiples ámbitos rurales. Por ejemplo: “Las tecnologías de cocción energéticamente eficientes, como las estufas mejoradas, pueden reducir hasta un 70% la huella de carbono en comparación con métodos tradicionales basados en biomasa no sostenible” [3]. Esta comparación ilustra cómo la eficiencia energética representa un mecanismo transversal de mitigación ambiental en entornos rurales.

Más allá del aspecto climático, el acceso a tecnologías limpias también se traduce en beneficios en salud. De hecho, “La falta de acceso a energía limpia incrementa la exposición a contaminantes intradomiciliarios, afectando la salud respiratoria” [4]. Esto justifica desde una perspectiva de justicia ambiental la sustitución de motores contaminantes por soluciones eléctricas, como la propuesta en ASOMUNUE.

No obstante, la sostenibilidad energética no está exenta de desafíos. Algunos estudios alertan sobre los compromisos entre el carbono y el agua, ya que “La expansión solar reduce carbono, pero puede aumentar significativamente el consumo de agua en zonas áridas” [5]. En este sentido, el análisis de ciclo de vida (ACV) se vuelve fundamental para evaluar impactos cruzados. En el presente artículo se utiliza ACV para calcular las emisiones evitadas, y se promueve una gestión hídrica eficiente mediante la optimización del sistema de riego electrificado [6].

Esta integración de tecnología sostenible en contextos rurales, como ASOMUNUE, se enmarca en una tendencia global. Se ha documentado que las “Las transiciones energéticas sostenibles han reducido significativamente la huella de carbono per cápita en regiones con altos niveles de pobreza energética” [7]. A ello se suma la evidencia de que “Las prácticas agrícolas inteligentes frente al clima también mejoran la eficiencia energética y reducen la demanda de agua” [8]

Además, la implementación de “Las microredes rurales bien diseñadas pueden mejorar el acceso energético y reducir la huella de carbono si se basan en fuentes renovables locales” [9]

Sin embargo, la necesidad de esta transición queda aún más clara si se consideran los efectos negativos del modelo energético basado en combustibles fósiles. Por ejemplo, en Somalia se ha demostrado que el aumento en “El consumo de energía tiene un efecto significativo y positivo sobre las emisiones de carbono a largo plazo en Somalia, lo que indica que el aumento de la energía utilizada actualmente en el país no es ambientalmente sostenible” [10]

Una conclusión similar se ha evidenciado en Malasia, donde se confirma que el uso prolongado de energía no renovable

mantiene una relación significativa con el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>, reforzando la necesidad de migrar hacia fuentes más limpias y tecnologías más eficientes [11]

La presente investigación tiene por objetivo el analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental del reemplazo de motores de combustión interna por motores eléctricos en los sistemas de riego de la Asociación de Producción Nuevo Mundo (ASOMUNUE), ubicada en la parroquia Mariscal Sucre del cantón Milagro, con el fin de promover prácticas agrícolas sostenibles y ecoeficientes.

**Contextualización local en agricultura pequeña escala:** la mayoría de los estudios se centran en vehículos o maquinaria industrial, pero pocos analizan sistemas de riego en asociaciones rurales como ASOMUNUE. Este trabajo aporta un enfoque territorial y comunitario específico, subsanando la falta de evidencia para zonas similares en Ecuador.

- **Contribuciones:**

**Contribución técnica aplicada:** El estudio presenta el diseño e implementación de un sistema eléctrico de bombeo adaptado a una finca de 7 hectáreas, utilizando motores eléctricos en reemplazo de motores a diésel. Esto incluye cálculos detallados de demanda energética, selección de transformadores, cableado, acometidas y sistemas de puesta a tierra, lo cual constituye un aporte práctico aplicable en contextos agrícolas similares en Ecuador y América Latina.

**Contribución económica:** Se realiza una comparativa exhaustiva entre los costos operativos de motores de combustión interna y eléctricos. El estudio muestra una reducción significativa de los costos mensuales (de más de \$1.000 a cerca de \$320), aportando evidencia clara del ahorro económico sostenible para pequeños y medianos productores agrícolas.

**Contribución ambiental:** Se demuestra una reducción del 90% en las emisiones de CO<sub>2</sub> al sustituir los motores tradicionales por eléctricos, lo cual representa una mitigación de aproximadamente 6,6 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año. Este dato es clave para las políticas de sostenibilidad y transición energética en el sector agrícola.

**Contribución estratégica y social:** El estudio promueve el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y 13 (acción por el clima), posicionando a asociaciones agrícolas como ASOMUNUE como actores activos en la lucha contra el cambio climático.

**Innovación contextualizada:** A diferencia de estudios internacionales más generalistas, este trabajo integra datos técnicos reales, normativa ecuatoriana y necesidades locales, convirtiéndose en una guía de referencia para la implementación de soluciones energéticas limpias en zonas rurales del país.

### 1.3.- Problemática de la energía en agricultura y pobreza energética.

El desarrollo de una agricultura sostenible exige una transformación radical en las fuentes de energía utilizadas en las zonas rurales, especialmente aquellas que dependen de motores de combustión interna. Estos sistemas no solo generan altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino que también implican altos costos operativos y dependencia de combustibles fósiles. Esta problemática afecta particularmente a comunidades campesinas que enfrentan pobreza energética, exclusión tecnológica y limitaciones económicas para migrar hacia soluciones energéticas limpias [12].

La agricultura, especialmente en zonas rurales, depende históricamente de motores de combustión interna para tareas críticas como el riego. Estos sistemas, aunque funcionales, presentan una doble problemática: por un lado, generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al cambio climático; por otro, implican altos costos operativos debido a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles. Esta dependencia tecnológica limita la competitividad de los pequeños productores y aumenta su vulnerabilidad frente a crisis energéticas y ambientales.

La pobreza energética en entornos rurales agrava esta situación. Según estudios recientes, más del 30% de las comunidades agrícolas en países en desarrollo carecen de acceso confiable a energía limpia, lo que restringe la adopción de tecnologías modernas y perpetúa la exclusión económica. Esta carencia no solo afecta la productividad agrícola, sino también la calidad de vida, al incrementar riesgos de salud por exposición a contaminantes y reducir oportunidades de desarrollo. En este contexto, la electrificación agrícola emerge como una estrategia clave para romper el ciclo de dependencia fósil y pobreza energética, ofreciendo soluciones sostenibles que integran eficiencia, resiliencia y equidad [13].

### 1.4.- Transición energética y beneficios ambientales.

Las transiciones energéticas sostenibles basadas en fuentes renovables han demostrado reducir significativamente la huella de carbono per cápita en regiones con altos niveles de pobreza energética. Diversas investigaciones han evidenciado que las microrredes rurales alimentadas por fuentes renovables locales (como solar o eólica) no solo mejoran el acceso energético, sino que también disminuyen el impacto ambiental asociado a las tecnologías convencionales [14].

Además, las tecnologías descentralizadas permiten soluciones adaptadas al contexto, con menores costos de implementación que las extensiones de red eléctrica tradicional. Este enfoque ha sido respaldado por estrategias nacionales e internacionales que promueven el uso de energías limpias para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 7 (energía

asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima) [15].

La transición hacia sistemas eléctricos en la agricultura representa un cambio estructural con impactos ambientales positivos. Sustituir motores diésel por motores eléctricos reduce drásticamente las emisiones de CO<sub>2</sub>, especialmente en países cuya matriz energética se basa en fuentes renovables, como Ecuador. Además, esta transición disminuye la contaminación sonora y el riesgo de derrames de combustibles, contribuyendo a la protección de ecosistemas locales. Desde una perspectiva global, la electrificación agrícola se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima), consolidando la agricultura como un actor relevante en la mitigación del cambio climático [16].

### 1.5.- Herramientas de evaluación ambiental: Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Un elemento clave en la evaluación ambiental de estas soluciones energéticas es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que permite cuantificar los impactos desde la producción hasta la disposición final de los sistemas tecnológicos utilizados. Mediante el ACV se identifican los principales puntos críticos de impacto ambiental, incluyendo emisiones, consumo de recursos, generación de residuos y uso de agua. La huella hídrica, por ejemplo, adquiere relevancia en zonas áridas donde ciertas soluciones solares térmicas pueden generar presión sobre los recursos hídricos [17].

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica esencial para evaluar el impacto ambiental de tecnologías energéticas. Permite cuantificar emisiones, consumo de recursos y generación de residuos desde la fabricación hasta la disposición final, ofreciendo una visión integral del desempeño ambiental. En el contexto agrícola, el ACV resulta crítico para comparar tecnologías fósiles y eléctricas, identificando puntos críticos como la huella de carbono y la huella hídrica, que son determinantes en zonas con estrés hídrico [18].

Aplicar ACV en proyectos de electrificación agrícola no solo valida la reducción de emisiones, sino que también anticipa impactos indirectos, como el consumo de agua en soluciones solares térmicas o la generación de residuos electrónicos. Esta perspectiva holística permite diseñar estrategias de mitigación complementarias, garantizando que la transición energética sea verdaderamente sostenible. Además, el ACV facilita la toma de decisiones basada en evidencia, apoyando políticas públicas y modelos de negocio orientados a la economía circular y la resiliencia ambiental.

### 1.6.- Impactos en salud pública y tecnologías limpias.

Desde una perspectiva de salud pública, la falta de acceso a energía limpia también incrementa la exposición a contaminantes intradomiciliarios por el uso de biomasa no

sostenible, afectando especialmente a mujeres y niños. Tecnologías como las estufas mejoradas permiten reducir hasta en un 70 % la huella de carbono generada por métodos tradicionales de cocción [19].

La falta de acceso a energía limpia en comunidades rurales no solo limita la productividad agrícola, sino que también genera riesgos significativos para la salud pública. El uso prolongado de combustibles fósiles y biomasa en procesos agrícolas y domésticos incrementa la exposición a contaminantes intradomiciliarios, como material particulado y compuestos tóxicos, que afectan el sistema respiratorio y cardiovascular. Estos impactos son más severos en mujeres y niños, quienes suelen estar más expuestos a ambientes contaminados durante las labores cotidianas.

La adopción de tecnologías limpias, como motores eléctricos y sistemas de riego eficientes, contribuye a reducir estas externalidades negativas. Al eliminar la combustión directa de diésel, se disminuye la emisión de partículas y gases nocivos, mejorando la calidad del aire en entornos agrícolas. Además, la electrificación permite integrar soluciones complementarias, como sistemas automatizados de riego, que reducen el contacto humano con combustibles y disminuyen riesgos ocupacionales. Este cambio tecnológico, por tanto, no solo tiene beneficios ambientales, sino también repercusiones positivas en la salud y bienestar de las comunidades rurales.

### 1.7.- Justificación para el caso ASOMUNUE.

En contextos como el de ASOMUNUE, donde la producción agrícola depende fuertemente de motobombas con motores de combustión interna, se evidencia una urgente necesidad de migrar hacia tecnologías eléctricas eficientes. Esta transición no solo responde a una lógica de sostenibilidad ambiental, sino también a la reducción de costos operativos, disminución del riesgo de incendios, mejoras en salud ocupacional y alineación con políticas de electrificación rural promovidas por el Estado [20].

En países en vías de desarrollo, como Somalia y Malasia, estudios han confirmado que el consumo de energía no renovable mantiene una correlación significativa con el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>, evidenciando que los modelos energéticos actuales no son sostenibles a largo plazo [21].

La asociación ASOMUNUE representa un caso emblemático para la implementación de tecnologías limpias en la agricultura ecuatoriana. Su ubicación en una zona rural con acceso limitado a infraestructura energética convencional y su dependencia histórica de motores diésel para riego la convierten en un escenario ideal para evaluar la viabilidad técnica y económica de la electrificación. Además, el contexto local refleja desafíos comunes en otras comunidades agrícolas del país, como altos costos operativos, vulnerabilidad frente a fluctuaciones del precio del combustible y necesidad de cumplir con normativas

ambientales. Por ello, este estudio no solo aporta soluciones específicas para ASOMUNUE, sino que también genera evidencia replicable para políticas públicas y proyectos de desarrollo rural sostenible [22].

### 1.8.- Perspectiva estratégica integral.

La incorporación de soluciones energéticas limpias en zonas rurales es una necesidad estratégica para garantizar una producción agrícola resiliente, inclusiva y baja en emisiones, basada en evidencia técnica y científica. Esta transición energética, evaluada mediante herramientas como el ACV, debe ser impulsada desde una visión integral que articule economía, ambiente y justicia social para lograr un equilibrio entre desarrollo, salud y sostenibilidad en los territorios rurales [23].

La transición hacia sistemas eléctricos en la agricultura debe ser concebida como parte de una estrategia integral que articule dimensiones técnicas, económicas, sociales y ambientales. No basta con sustituir motores; es necesario garantizar la disponibilidad de infraestructura eléctrica, diseñar esquemas de financiamiento accesibles y promover la capacitación de los agricultores para el uso y mantenimiento de nuevas tecnologías. Esta visión holística asegura que la electrificación no se limite a un cambio tecnológico, sino que se convierta en un catalizador de desarrollo rural inclusivo y resiliente.

Desde la perspectiva de políticas públicas, la electrificación agrícola puede integrarse en programas nacionales de transición energética y mitigación del cambio climático. Su implementación contribuye al cumplimiento de compromisos internacionales, como el Acuerdo de París, y fortalece la competitividad del sector agroproductivo. Además, al reducir la dependencia de combustibles fósiles, se disminuye la vulnerabilidad frente a crisis energéticas globales, consolidando la seguridad alimentaria y energética del país. En este sentido, la electrificación agrícola no es solo una solución técnica, sino una herramienta estratégica para alcanzar objetivos de sostenibilidad y equidad social.

## 2. Materiales y métodos.

Para la implementación del sistema de riego eléctrico en la finca “Hacienda Emanuel (Los Palmares)”, se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

### 2.1.- Descripción de materiales y equipos:

**Bomba sumergible eléctrica** de 7 a 10 HP, modelo Franklin Electric, eficiencia aproximada del 80%.

**Transformador trifásico** de 30 kVA (marca ABB®), con tensión primaria de 7.2 kV y secundaria de 220 V.

**Conductor eléctrico aéreo** tipo CONC.AL.XLPE de 2×6+6MM<sup>2</sup> (6 AWG XLPE), de aluminio.

**Tubería de polietileno de alta densidad (PEAD)** de 8 a 10 pulgadas de diámetro para el sistema de riego.

**Aspersores emergentes modelo 8005 – 8000 Series**, con caudales de 0,86 a 8,24 m<sup>3</sup>/h y radios de 11,9 a 24,7 m.

**Sistema de puesta a tierra**, compuesto por varilla Copperweld de 5/8” x 1.8 m y conductor #10 AWG.

**Medidor de energía** tipo 2F-3H, KWH, clase 100, bornera. Software utilizado: **Microsoft Excel** para análisis comparativo de costos y emisiones, y **AutoCAD** para diseño eléctrico.

### 2.2.- Diseño experimental:

Se diseñó un estudio aplicado de tipo descriptivo-comparativo, centrado en la sustitución de un sistema de riego agrícola basado en motores de combustión interna (diésel) por un sistema alimentado con motores eléctricos conectados a la red trifásica.

#### Variables medidas:

- Costo energético mensual y anual.
- Consumo de combustible (diésel) y electricidad (kWh).
- Mantenimiento programado de equipos.
- Emisiones de CO<sub>2</sub> (kg/mes y kg/año).

#### Variable controlada:

Caudal de agua necesario para riego uniforme en 7 hectáreas.

### 2.3.- Procedimientos:

- **Diagnóstico inicial:** Se identificó la situación energética y operativa actual de la finca, incluyendo ubicación del pozo, tipo de bomba diésel y sistema de distribución de agua.
- **Diseño del sistema eléctrico:** Se calculó la demanda eléctrica con base en la potencia de la bomba y se seleccionó el transformador trifásico adecuado. Se diseñó la red de distribución desde el poste más cercano (60 m de distancia) hasta el punto de consumo. Se definieron los elementos de protección, medición y puesta a tierra.
- **Comparativa técnico-económica y ambiental:** Se estimó el consumo mensual de energía de ambos sistemas (eléctrico vs combustión). Se aplicó el factor de emisión de CO<sub>2</sub> del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador (0.09 kg CO<sub>2</sub>/kWh). Se calcularon los costos mensuales de energía, mantenimiento y operación.
- **Validación del sistema propuesto:** Se analizaron normativas del IEEE, NEC, NEMA, MEER y CNEL. Se revisó el cumplimiento de estándares técnicos mediante simulación de cargas y verificación de diagramas eléctricos.

### 2.4.- Análisis de datos:

El análisis comparativo entre los dos sistemas de bombeo se realizó utilizando:

- **Microsoft Excel** para cálculos de consumo energético, costos y estimación de emisiones.
- **Tablas de factores de emisión** publicadas por el Ministerio de Energía y Minas de Ecuador.

- El análisis se presentó en tablas comparativas que incluyen valores mensuales, anuales y porcentajes de ahorro económico y ambiental.

### 3. Análisis e Interpretación de Resultados.

#### 1. Presentación de resultados:

Las tecnologías renovables descentralizadas pueden proporcionar acceso básico a la electricidad a una fracción del costo de las extensiones de red [24]

Los resultados obtenidos se centraron en tres dimensiones principales: el análisis técnico del sistema eléctrico de riego, la comparación de costos operativos entre el motor a combustión interna y el motor eléctrico, y la evaluación ambiental basada en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Tabla 1. Comparación de costos entre bomba a combustión interna y motor eléctrico (80 h/mes)

Aspecto	Bomba a combustión interna	Bomba eléctrica 10 hp
Costo inicial de la bomba	\$3.500	\$2.800
Costo mensual de energía	\$153,44	\$33,42
Mantenimiento mensual	\$120 – \$150	\$40 – \$60
Costo mensual total estimado	\$1.020 – \$1.050	\$302,50 – \$322,50
Costo anual estimado	\$12.240 – \$12.600	\$3.630 – \$3.870

Fuente: Elaboración propia

#### Reducción de huella del carbono.

##### Motor a combustión interna

Calcular la huella de carbono al reemplazar motores de combustión interna por motores eléctricos implica analizar las emisiones de CO<sub>2</sub> que están al uso de combustibles fósiles y compararlas con las emisiones derivadas de la generación de electricidad consumida por los motores eléctricos. [25]

#### Factores de emisión del combustible (kg de CO<sub>2</sub> por litro):

- Diésel: 2.68 kg de CO<sub>2</sub> por litro.
- Gasolina: 2.31 kg de CO<sub>2</sub> por litro.
- Diésel: 10.14 kg de CO<sub>2</sub> por galón.
- Gasolina: 8.75 kg de CO<sub>2</sub> por galón.

**Cálculo:** Consumo mensual en litros =  $59.89 \frac{\text{galones}}{\text{mes}} \times \frac{3.785 \text{ litros}}{\text{galón}}$

Consumo mensual en litros = 226.68 litros/mes

#### Emisiones Mensuales de CO<sub>2</sub>

Consumo de combustible (litros /mes) x Factor de emisión (kg de CO<sub>2</sub> /litro)

Emisiones mensuales (kg CO<sub>2</sub>) =  $226.63 \text{ litros} \times 2.68 \text{ kg CO}_2/\text{litro}$

Emisiones mensuales (kg CO<sub>2</sub>) = **607.51 kg CO<sub>2</sub>/mes**

#### Emisiones Anuales de CO<sub>2</sub>

Emisiones anuales (kg CO<sub>2</sub>) =  $607.51 \text{ kg CO}_2/\text{mes} \times 12$

Emisiones anuales (kg CO<sub>2</sub>) = **7,290.14 kg CO<sub>2</sub>/año**  
En Ecuador, el factor de emisión de CO<sub>2</sub> del Sistema Nacional Interconectado (SNI) se ha determinado en 0.09 toneladas de CO<sub>2</sub> por megavatio – hora (tCO<sub>2</sub>/MWh), equivalente a 0.09 kg de CO<sub>2</sub> por kilovatio – hora (kgCO<sub>2</sub>/kWh)<sup>1</sup>

#### Motor eléctrico

Emisiones mensuales (kg CO<sub>2</sub>) = Consumo eléctrico (kWh) × Factor de emisión (kg CO<sub>2</sub> /kWh)

Emisiones mensuales =  $569.8 \text{ kWh} \times \frac{0.09 \text{ kg CO}_2}{\text{kWh}}$

Emisiones mensuales = **51.282 kg CO<sub>2</sub>/mes**

Emisiones anuales =  $51.282 \text{ kg CO}_2/\text{mes} \times 12 =$

**615.38 kg CO<sub>2</sub>/año**

Tabla 2. Comparaciones de emisión de CO<sub>2</sub>

Motor	Emisiones mensuales (kgCO <sub>2</sub> )	Emisiones anuales (kgCO <sub>2</sub> )
Motor a Diesel	607,51	7290,14
Motor eléctrico	51,282	615,38
<b>Porcentaje de reducción</b>		90%

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas de energía renovable fuera de red generan entre un 60 y 90% menos de emisiones en comparación con generadores diésel tradicionales en zonas rurales [26].

Con un factor de emisión de 0.09 kg CO<sub>2</sub>/kWh, el motor eléctrico genera 615.38 kg de CO<sub>2</sub> al año, mientras que el motor de combustión genera 7,290.44 kg de CO<sub>2</sub> al año. Esto representa una reducción de aproximadamente el 90% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, equivalente a evitar 6.6 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año.

#### Análisis de resultados:

Los datos revelan una clara ventaja económica y ambiental del uso de motores eléctricos:

- Reducción de costos:** el cambio de tecnología representa un ahorro de aproximadamente el 70% en costos operativos mensuales. Este ahorro se atribuye al menor precio del kWh (\$0.056) frente al galón de diésel (\$1.50), y a menores costos de mantenimiento y eliminación del cambio de aceite.
- Mayor vida útil:** los motores eléctricos presentan una vida útil promedio de 10 a 15 años frente a los 5 a 8 años de los motores a combustión.
- Reducción de emisiones:** se obtuvo una disminución del 90% en emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que representa una reducción de 6.675 kg CO<sub>2</sub>/año (6,6 toneladas).

#### Interpretación de resultados:

- Los resultados están alineados con los objetivos del estudio: demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental del reemplazo de motores de combustión interna en zonas rurales agrícolas de Ecuador. La magnitud del ahorro energético y la reducción de

emisiones confirman la pertinencia del cambio propuesto, especialmente en un contexto donde la matriz energética del país tiene baja emisión gracias a su alto componente hidroeléctrico.

- Desde el marco teórico, el estudio confirma que la electrificación de procesos agrícolas contribuye significativamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 13), así como a mejorar las condiciones de trabajo, reducir la dependencia de combustibles fósiles, y promover tecnologías limpias en sectores tradicionalmente intensivos en carbono.

#### Limitaciones y sesgos:

- **Alcance geográfico limitado:** el estudio se realizó en una sola finca, lo que limita la generalización inmediata de los resultados a otras regiones o condiciones agrícolas.
- **Datos de consumo estimados:** aunque se usaron parámetros técnicos reales, los datos energéticos y de emisiones se basan en estimaciones promediadas de funcionamiento (80 horas/mes), lo cual podría variar dependiendo del régimen de uso del riego.
- **Costos dinámicos:** tanto la tarifa eléctrica como el precio del diésel están sujetos a variaciones del mercado, lo que puede alterar la relación de costos en el futuro.
- **Falta de evaluación social directa:** no se midieron impactos sociales como percepción del cambio tecnológico por parte de los agricultores o barreras culturales a la implementación.

## 4. Discusión.

### 4.1.- Interpretación de los resultados:

Los resultados del estudio evidencian que el reemplazo de motores de combustión interna por motores eléctricos en sistemas de riego agrícola representa una alternativa viable, económica y ambientalmente responsable. Este hallazgo se alinea directamente con los objetivos planteados, que buscaban analizar la factibilidad técnica, económica y ambiental de esta transición en la Asociación ASOMUNUE. La reducción del 90% en las emisiones de CO<sub>2</sub>, junto con un ahorro de más del 70% en costos operativos, demuestra que la adopción de tecnologías eléctricas puede tener un impacto significativo tanto en la sostenibilidad ambiental como en la rentabilidad de los productores agrícolas.

“Los sistemas híbridos fuera de red mostraron una reducción del 70–90% en impactos ambientales globales, incluyendo huella de carbono, huella hídrica y toxicidad humana” [27].

Desde el marco teórico, estos resultados respaldan los postulados sobre ecoeficiencia en agricultura y refuerzan la importancia de la transición energética para mitigar el cambio climático, especialmente en países con una matriz energética limpia como Ecuador.

### 4.2.- Comparación con estudios previos:

Los hallazgos obtenidos coinciden con investigaciones de organismos como la [28], que destacan la necesidad de reducir las emisiones en la agricultura mediante tecnologías limpias. Además, estudios como el de [29] resaltan el papel de la electrificación en la disminución de la huella de carbono en el sector productivo. A diferencia de estos estudios, que suelen centrarse en modelos teóricos o en regiones distintas, el presente trabajo aplica los conceptos a un caso práctico, contextualizado en una zona rural ecuatoriana, con mediciones reales de consumo y costos, lo que fortalece su relevancia local y su aplicabilidad inmediata.

Asimismo, este estudio responde a una brecha identificada en la literatura: la escasa disponibilidad de análisis técnico-económicos específicos para asociaciones de producción agrícola en países en desarrollo. Al integrar diseño eléctrico, evaluación de costos y análisis de emisiones, el trabajo contribuye de manera significativa a esta área poco explorada. [30]

### 4.3.- Implicaciones teóricas y prácticas:

Desde el punto de vista teórico, los resultados validan marcos conceptuales relacionados con eficiencia energética, transición tecnológica y sostenibilidad rural. Se demuestra que es posible adoptar tecnologías limpias en contextos agrícolas sin comprometer la productividad, e incluso mejorando la eficiencia operativa.

El consumo de energía contribuye positivamente al crecimiento económico, pero también intensifica la contaminación ambiental, lo cual exige estrategias energéticas sostenibles [31].

A nivel práctico, el estudio ofrece un modelo replicable de electrificación de sistemas de riego que puede ser adoptado por otras asociaciones o pequeñas fincas agrícolas. Las implicaciones para la industria incluyen:

- Reducción de costos de operación en la agroindustria.
- Incremento en la vida útil de los equipos.
- Mejora en el cumplimiento de normativas ambientales y energéticas.
- Posibilidad de integración con fuentes de energía renovable (solar, hidráulica).
- Además, los resultados pueden ser utilizados como base para políticas públicas orientadas al fomento de la electrificación agrícola y al desarrollo rural sostenible.

### 4.4.- Limitaciones y recomendaciones:

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran:

- **Alcance limitado del caso de estudio:** se centra en una sola finca, lo cual restringe la generalización de los resultados a otras regiones o escalas de producción.
- **Estimaciones energéticas y de costos:** aunque basadas en parámetros reales, los datos de consumo y mantenimiento pueden variar dependiendo del uso

específico, condiciones del terreno o fluctuaciones de mercado.

- **Falta de análisis social y cultural:** no se incluyó una evaluación cualitativa sobre la aceptación del cambio tecnológico por parte de los agricultores, ni las barreras sociales o de conocimiento que podrían dificultar su implementación.

#### 4.5.- Recomendaciones para futuras investigaciones:

- Ampliar el estudio a más fincas y regiones del país para validar los resultados en distintos contextos agro-productivos.
- Incluir análisis multicriterio que integren factores técnicos, económicos, sociales y ambientales.
- Incorporar fuentes de energía renovable (como solar fotovoltaica) para fortalecer la autonomía energética rural.
- Desarrollar estudios longitudinales que midan el impacto del cambio tecnológico a mediano y largo plazo.

## 5.- Conclusiones.

### Resumen de los hallazgos

Este estudio demostró que el reemplazo de motores de combustión interna por motores eléctricos en sistemas de riego agrícola en la finca "Hacienda Emanuel (ASOMUNUE)" permite reducir significativamente los costos operativos y las emisiones contaminantes. Los principales resultados incluyen una reducción del 70% en costos mensuales de operación y una disminución del 90% en las emisiones de CO<sub>2</sub>, equivalente a evitar aproximadamente 6,6 toneladas anuales de dióxido de carbono. Estos hallazgos están plenamente alineados con los objetivos del estudio, que buscaban evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de este cambio tecnológico en contextos rurales.

“Reemplazar motores de combustión interna en sistemas agrícolas no solo reduce emisiones, sino que mejora la eficiencia operativa del riego y reduce el consumo energético global” [32]

### Contribuciones principales

El estudio aporta al campo de la ingeniería tres contribuciones clave:

- Una propuesta integral de electrificación agrícola, que incluye diseño técnico, evaluación económica y análisis de impacto ambiental.
- Una validación práctica del reemplazo de tecnologías contaminantes por soluciones más sostenibles en un entorno rural de Ecuador, lo que contribuye a cerrar brechas existentes en la literatura sobre casos reales en países en desarrollo.
- La demostración de que esta transición contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los ODS 7 (energía limpia) y 13 (acción por el clima).

### Implicaciones prácticas y teóricas

Desde un punto de vista práctico, los resultados pueden ser replicados por otras asociaciones agrícolas del país, aportando soluciones eficientes y sostenibles para el riego. También pueden servir de insumo para programas de electrificación rural, subsidios o incentivos estatales.

El análisis de ciclo de vida reveló que los sistemas solares domésticos generan hasta un 85% menos emisiones de gases de efecto invernadero que generadores diésel [33].

En el plano teórico, el estudio fortalece el marco conceptual sobre ecoeficiencia y transición energética en la agricultura, aportando evidencia empírica que puede servir de base para futuras investigaciones en diseño de sistemas agrícolas sostenibles, análisis de ciclo de vida o integración de energías renovables.

### Recomendaciones para futuros estudios

Para enriquecer y ampliar este campo de investigación, se sugiere:

- Replicar el estudio en otras regiones del país, con diferentes tipos de cultivos y condiciones geográficas, para validar su aplicabilidad general.
- Incorporar un análisis social y cultural, evaluando la percepción de los productores frente a nuevas tecnologías.
- Analizar la viabilidad de integrar energía solar fotovoltaica como fuente alternativa para el sistema de riego.
- Realizar estudios longitudinales que midan el desempeño económico y ambiental de estos sistemas en el mediano y largo plazo.

## 6.- Author Contributions (Contributor Roles Taxonomy (CRediT))

1. Conceptualización: Luis Angel Bucheli Carpio.
2. Curación de datos: Luis Angel Bucheli Carpio.
3. Análisis formal: Luis Angel Bucheli Carpio.
4. Investigación: Luis Angel Bucheli Carpio.
5. Metodología: Jesus Armando Verdugo Arcos.
6. Administración del proyecto: Jesus Armando Verdugo Arcos.
7. Software: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
8. Supervisión: Jesus Armando Verdugo Arcos.
9. Validación: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
10. Visualización: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
11. Redacción - borrador original: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
12. Redacción - revisión y edición: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.

## 7.- Referencias.

- [1] A. Ahmed, L. Khadim, N. Badran, C. Sarpong y G. Otieno, «Sustainable energy transitions and carbon footprint reduction in developing economies: A multi-regional analysis,» Scientific Reports, vol. 14, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91540-9>
- [2] U. Deichmann, C. Meisner, S. Murray y D. Wheeler, «The economics of renewable energy expansion in rural Sub-Saharan Africa,»

- Energy, Sustainability and Society, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.034>
- [3] X. Zhao, R. Huang, D. Li, W. Zhang y J. Liu, «Carbon footprint and environmental co-benefits of energy-efficient cooking technologies in rural households,» *Scientific Reports*, vol. 14, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85985-1>
- [4] S. Dlamini, T. Mthembu, Z. Khumalo y M. A. Adeyemi, «Environmental health implications of energy access inequities in remote communities,» *Parasites & Vectors*, vol. 18, 2025. <https://doi.org/10.1186/s13071-025-06662-w>
- [5] J. Liu, C. Fang, L. Zhang, M. Yuan, W. Zhou y Q. Chen, «Uncovering the water-carbon trade-offs of solar power expansion in arid regions,» *Nature Communications*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61505-7>
- [6] G. E. Castro Rosales, A. D. Torres Alvarado, L. S. Zalamea Cedeño, F. J. Duque-Aldaz y F. R. Rodríguez-Flores, «Comprehensive Ergonomic Proposal for the Reduction of Musculoskeletal Risks in Soap Production: An Approach Based on Statistical Analysis and Postural Evaluation,» *INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, n° 2, 2025. <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2416>
- [7] A. Ahmed, L. Khadim, N. Badran, C. Sarpong y G. Otieno, «Sustainable energy transitions and carbon footprint reduction in developing economies: A multi-regional analysis,» *Scientific Reports*, vol. 14, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91540-9>
- [8] N. J. Williams, S. P. Jafry, K. M. Mutua y L. T. Ogallo, «The impact of climate-smart agriculture on food-energy-water systems in Sub-Saharan Africa,» *Nature Communications*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61011-w>
- [9] P. Bipasha, D. Dipankar, D. Saikat y D. Swagatam, «Sustainable rural electrification through micro-grids in developing nations: A review of recent development,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113266>
- [10] I. Mohamed Adan, B. Mohamed Ismail y M. O. Shurie, «Towards Environmental Sustainability: Evaluating the Role of Energy Consumption, FDI, and Urbanization on Carbon Emission in Somalia: An Empirical Analysis using ARDL Bound Test,» *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. 14, n° 7, pp. 2241-2251, 2023. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.17379>. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/17379>
- [11] A. Noor Azlinna, M. Nor Asilah, S. A. Hazman y N. J. Nik Rosila, «The Impact of Energy Consumption, Economic Growth, and Non-Renewable Energy on Carbon Dioxide Emission in Malaysia,» *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. 14, n° 7, pp. 2167-2175, 2023. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.17350>. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/17350>
- [12] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores y J. Carmona Tapia, «Identification of parameters in ordinary differential equation systems using artificial neural networks,» *San Gregorio*, vol. 1, n° 2, 2025. <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/2826>
- [13] D. M. Kammen y D. A. Sunter, «Rural energy and sustainability: Implications for developing nations,» *Nature Energy*, vol. 1, 2016. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.75>
- [14] G. Ramakrishnan, «Sustainable rural electrification through micro-grids,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 726-745, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.11.040>
- [15] N. Jollands, «Energy for development: The potential role of renewable energy in meeting the Millennium Development Goals,» *Energy Policy*, vol. 32, pp. 1271-1281, 2024. <https://search.issuelab.org/resource/energy-for-development-the-potential-role-of-renewable-energy-in-meeting-the-millennium-development-goals.html>
- [16] J. E. Pincay Moran, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, «Evaluation and Proposal for an Environmental Management System in a Mango Plantation,» *INQUIDE*, vol. 7, n° 1, 2025. <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i01.1991>
- [17] S. Ulgiati, «Life Cycle Assessment and Sustainability,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 1400-1412, 2021. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/life-cycle-sustainability-assessment>
- [18] F. Veronesi, «Effects of solar power on water scarcity footprint,» *Environmental Science & Technology*, vol. 51, n° 21, pp. 2476-2484, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jesal.2025.118575>
- [19] K. R. Smith, «Household air pollution from solid cookfuels and its effects on health,» *The Lancet*, vol. 38, pp. 1937-1948, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0527-1\\_ch18](https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0527-1_ch18) URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/21541>
- [20] G. J. Morcho Choca, L. A. Bucheli Carpio y F. J. Duque-Aldaz, «Fuel oil fuel dispatch optimization through multivariate regression using local storage indicators,» *INQUIDE*, vol. 6, n° 2, 2024. <https://doi.org/10.53591/iqd.v6i02.477>
- [21] M. Abdirahman, «Unveiling the Drivers of Economic Growth in Somalia,» *Journal of Environmental Management and Sustainability*, vol. 3, n° 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.16040>. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/16040>
- [22] N. Mohd Suki, «The Impact of Energy Consumption, Economic Growth and Non-Renewable Energy on Carbon Dioxide Emission in Malaysia,» *Sustainability*, vol. 15, 2024. <https://doi.org/10.32479/ijeep.17350> ; <https://econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/17350>
- [23] J. S. Fu-López, J. P. Fierro Aguilar, F. R. Rodríguez-Flores y F. J. Duque-Aldaz, «Application of non-automated Lean strategies for quality improvement in manual assembly processes: a case study in the white goods industry,» *INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, n° 1, 2025. <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2417>
- [24] U. Deichmann, C. Mesiner, S. Murray y D. Wheeler, «The economics of renewable energy expansion in rural Sub-Saharan Africa,» *Energy, Sustainability and Society*, 2025. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00225-7>
- [25] F. Santos Alvite, M. Jaramillo y L. Haro Estrella, «Factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador,» *Ministerio de Energía y Minas, Quito*, 2022. URL (PDF): <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/wp-1692720103183.pdf>
- [26] L. A. Mofor, J. O. Owusu, T. Muzangaza y M. Tchoukan, «Greenhouse gas emission assessment of off-grid renewable energy projects in rural areas: A life cycle perspective,» *Environmental Science and Pollution Research*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10151-025-03123-5>
- [27] T. Rahman, N. Huda, P. Chandrasekaran, F. Ahmed y J. T. Endara, «Environmental performance of hybrid off-grid energy systems in tropical regions: A multi-criteria life cycle assessment,» *Scientific Reports*, vol. 14, 7 Abril 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114633>
- [28] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, «FAO STRATEGY ON CLIMATE CHANGE,» *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Roma*, 2022. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/7b9bf435-b12b-4abf-94c0-4806d3b97109>. URL (PDF directo): <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f6270800-ee7-498f-9887-6d937c4f575a/content>
- [29] C. Espíndola y J. Valderrama, «Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas,» *Información tecnológica*, vol. 23, n° 1, pp. 163-176, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>. ; URL: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000100017&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000100017&script=sci_arttext)
- [30] A. Goncalves Savinovich, S. R. Fritschi Naranjo y R. E. Quintero Veliz, «Factor de emisión de CO2: Sistema Nacional Interconectado del Ecuador,» *Ministerio de Energía y Minas, Quito*, 2023. URL (PDF): <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2023.pdf>
- [31] M. Hassan Abukar, M. Abdiwahid Hassan y I. Yusuf Hassan, «Unveiling the Drivers of Economic Growth in Somalia: The Role of Energy Consumption, Environmental Pollution, and Globalization,» *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. 14, n° 8, pp. 2307-2319, 2023. <https://doi.org/10.32479/ijeep.16040> ; <https://econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/16040>
- [32] P. Bipasha, D. Dipankar, D. Saikat y S. Das, «Sustainable rural electrification through micro-grids in developing nations: A review

of recent development.» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 180, 2023. . <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113266>

- [33] J. Hyun Kim, S. Aminah, T. Petchsri y M. N. Ortega, «Life cycle environmental impacts of solar home systems in remote rural areas: A case study from Southeast Asia.» Energy, Sustainability and Society, 2025. <https://doi.org/10.1186/s13613-025-01445-z> .

# Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor con placa con junta para refrigeración líquida de leche de vaca.

*Thermo-hydraulic design of a gasketed-plate heat exchanger for liquid cow's milk cooling*

Amaury Pérez Sánchez <sup>1</sup> \*; Laura de la Caridad Arias Águila <sup>2</sup>; Lizthalia Jiménez Guerra <sup>3</sup>

Recibido: 14/06/2025 – Aceptado: 28/09/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artículos de investigación

Artículos de revisión

Ensayos

\* Autor correspondiente.



Esta obra está licenciada bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y son libres de compartir, copiar, distribuir, interpretar y comunicar públicamente la obra, siempre que se dé una atribución adecuada, el uso no sea comercial y cualquier obra derivada esté licenciada bajo los mismos términos.

## Resumen.

Los intercambiadores de calor de placas ofrecen mayor compacidad en comparación con los intercambiadores tubulares. La configuración de placas mejora el intercambio de calor creando un área extensa y completamente compacta que permite una transferencia eficiente de calor entre dos fluidos. El presente artículo pretende diseñar, desde el punto de vista termohidráulico, un intercambiador de calor con placa con junta para enfriar un chorro de leche de vaca líquida caliente utilizando agua fría como refrigerante. Se determinaron varios parámetros importantes como el número total de placas (3), la carga térmica (163,79 kW), el caudal másico requerido del agua refrigerada (5.638 kg/h), la superficie requerida (2,21 m<sup>2</sup>) y el coeficiente total de transferencia de calor calculado (2.194,06 W/m<sup>2</sup>). Asimismo, los valores de las caídas de presión para los arroyos de agua (48.558 Pa) y leche (14.720 Pa) están por debajo de los valores máximos permitidos establecidos por el proceso. El intercambiador de calor de placas diseñado costará 2.692 USD y podrá implementarse con éxito en este servicio de transferencia de calor desde la perspectiva termohidráulica.

## Palabras clave.

Intercambiador de calor de placas con junta; área; coeficiente total de transferencia de calor; caída de presión; Coste de compra.

## Abstract.

Plate heat exchangers offer greater compactness compared to tubular exchangers. The plate configuration enhances heat exchange by creating an extensive and fully compact area that allows for the efficient heat transfer between two fluids. The present paper aims to design, from the thermo-hydraulic point of view, a gasketed-plate heat exchanger to cool down a stream of hot liquid cow's milk using chilled water as coolant. Several important parameters were determined such as the total number of plates (3), the heat load (163.79 kW), the required mass flowrate of chilled water (5,638 kg/h), the required surface area (2.21 m<sup>2</sup>) and the overall heat transfer coefficient calculated (2,194.06 W/m<sup>2</sup>.K). Likewise, the values of the pressure drops for the water (48,558 Pa) and milk (14,720 Pa) streams are below the maximum permissible values set by the process. The designed plate heat exchanger will cost USD \$ 2,692 and can be successfully implemented in this heat transfer service from the thermo-hydraulic perspective.

## Keywords.

Gasketed-plate heat exchanger; area; overall heat transfer coefficient; pressure drop; purchase cost..

## 1. Introducción

Los intercambiadores de calor (HX) consisten en dispositivos diseñados para transferir energía térmica entre dos fluidos como resultado de una diferencia de temperatura. Las categorías principales de HX se dividen según sus geometrías estructurales, que incluyen tipos tubulares, de placas y de superficie extendida [1].

Un intercambiador de calor de placas (PHE) es un tipo compacto de intercambiador de calor que utiliza múltiples placas delgadas para transferir calor entre dos fluidos. Existen principalmente cuatro tipos de PHE: con junta, soldado, soldado y semi-soldado. El intercambiador de calor con junta o de placas y bastidores está compuesto esencialmente por una serie de placas rectangulares finas bordeadas por juntas y fijadas entre sí dentro de un bastidor. Diseñados inicialmente para la pasteurización de la leche en 1923, los intercambiadores de calor de placas se utilizan ampliamente en diversas industrias, incluyendo productos

químicos, petróleo, sistemas HVAC, refrigeración, producción láctea, farmacéuticos, bebidas, procesamiento de alimentos líquidos y atención sanitaria. Este uso generalizado surge de los beneficios distintivos que ofrecen las PHE, como configuraciones térmicas adaptables (donde las placas pueden añadirse o retirarse fácilmente para ajustar a diferentes necesidades térmicas), la simplicidad de limpieza necesaria para mantener altos estándares de higiene, una regulación eficaz de la temperatura (esencial para usos criogénicos) y una mejora en la eficiencia de transferencia de calor [2]. De manera similar, los intercambiadores de calor de placas son preferidos por su alta superficie relativa al volumen y sus tasas superiores de transferencia de calor [3].

Una PHE típica está compuesta por un conjunto de placas corrugadas diseñadas para mejorar la transferencia de calor, con juntas colocadas de manera que sellan un camino entre las placas cuando se comprimen dentro de una estructura.

<sup>1</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [amaury.perez84@gmail.com](mailto:amaury.perez84@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

<sup>2</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [aguilaariaslaura@gmail.com](mailto:aguilaariaslaura@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>, Camagüey; Cuba.

<sup>3</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu](mailto:lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu); <https://orcid.org/0000-0002-2471-7263>, Camagüey; Cuba.

Estas vías permiten que los fluidos, que pueden entrar desde las mismas o opuestas direcciones dentro del aparato, transfieran calor al moverse a través de las placas en configuraciones paralelas o de flujo contrario. Como resultado, una PHE puede acomodar una variedad de disposiciones de flujo, como pasadas simples, múltiples, en serie, paralelas y sus diversas combinaciones [1].

Debido a que el proceso de diseño de los intercambiadores de calor es complicado, requiere elecciones subjetivas en cada paso del diseño. Además, la metodología de diseño consta de múltiples etapas y se basa en información provisional hasta alcanzar los objetivos. Normalmente, el diseño de un intercambiador de calor abarca estos componentes: transferencia de calor para cumplir con el rendimiento necesario, gastos totales, las dimensiones geométricas reales y la caída total de presión [3].

Como se señala en [4], gran parte de la información de diseño relacionada con intercambiadores de calor de placas se mantiene como propietaria. No es común encontrar un enfoque paso a paso para calcular el tamaño y la estructura interna del intercambiador a partir de la información disponible del proceso. El software comercial existente no permite a los usuarios acceder a los modelos matemáticos subyacentes, y los ingenieros suelen carecer de familiaridad con los términos y configuraciones específicas de estos intercambiadores. Esta referencia también enfatiza que los hallazgos experimentales en la literatura sobre la transferencia de calor y la caída de presión son limitados. No obstante, existen correlaciones adimensionales disponibles para los coeficientes de transferencia de calor, así como para la caída de presión dentro de los canales de los intercambiadores de calor de placas. Las recomendaciones para valores constantes y exponentes en las ecuaciones correlacionadas se basan en datos limitados y en conocimientos de los fabricantes. El dimensionamiento adecuado de un intercambiador de placas depende de la carga térmica requerida y de las características del propio intercambiador. Su adaptabilidad y beneficios operativos van acompañados del desafío de crear un modelo para su comportamiento de flujo estacionario [1].

Hasta ahora se ha realizado una cantidad considerable de estudios para investigar las características de la transferencia de calor y la caída de presión en intercambiadores de placas, que están siendo continuamente mejoradas y desarrolladas por académicos y tecnólogos [5].

Diversos investigadores han explorado y evaluado el diseño de intercambiadores de calor de placas. En este sentido, [3] llevó a cabo una investigación con el objetivo de obtener una comprensión más clara de diversas características de las placas, como los ángulos de los chevrones, el espaciado entre canales, las alturas y el tipo de placas en cálculos de transferencia de calor y caídas de presión, empleando el software PHEx<sup>®</sup> como recurso computacional para evaluar e ilustrar el impacto de cada parámetro mediante la simulación de un estudio de caso industrial. En [6], se

desarrolló y construyó un sistema experimental para examinar la influencia del uso de nanofluidos dentro de un intercambiador de calor de placas. Las pruebas implicaron tres fluidos de trabajo distintos: agua del grifo y nanofluidos que contenían 1 y 0,5 % de  $Al_2O_3$  en agua, durante un ciclo caliente, con caudales entre 100 y 450 L/h en cada caso. Además, [1] realizó una evaluación de rendimiento respaldada por los principios de la primera y segunda ley de la termodinámica para diversas disposiciones operativas de intercambiadores de calor viables con juntas de placa. Para garantizar esto, se realizaron 40 simulaciones utilizando el modelo diferencial distribuido-U reportado por varios investigadores, aplicando una técnica de disparo de secante amortiguado adaptativo. La efectividad de la transferencia de calor y exergía, la generación adimensional de entropía, las posibles pérdidas entrópicas e índices de eficiencia energética se calcularon cuando ambos fluidos estaban por encima o por debajo de la temperatura ambiente, así como cuando al menos uno de los fluidos cruzaba el umbral de temperatura ambiente.

En [7], la eficiencia de un intercambiador de calor de placas corrugadas transformadas se analizó numéricamente mediante ANSYS-Fluent 20R1. Se implementó un modelo transitorio basado en presión para el análisis. Para este estudio se utilizó el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST. Se empleó un nanofluido compuesto de agua mezclada con nanopartículas de óxido metálico ( $Al_2O_3$ ) para mejorar la conductividad térmica, y se consideró un amplio rango de números de Reynolds que iban de 1.000 a 12.000. En otra investigación [8], los investigadores pretendieron mejorar la eficiencia de la transferencia de calor entre placas y minimizar la pérdida de presión durante el movimiento de fluidos dentro del sistema. Las simulaciones numéricas realizadas permitieron evaluar el flujo térmico dentro del intercambiador de calor, así como la caída de presión y el rendimiento general, alterando las velocidades de flujo y el espaciado de las placas. Otros autores [9] exploraron diversos métodos para aumentar la eficiencia térmica de los intercambiadores de placas utilizados en el procesamiento de aceites vegetales mediante múltiples cálculos. Esta investigación partió de un escenario base en el que los aceites vegetales se enfriaban con agua dentro de intercambiadores de calor de placas, todos con un ángulo de chevron de  $30^\circ$  junto con diferentes números de canales y superficies de placas. De manera similar, en [10], el estudio numérico examinó la transferencia de calor convectiva, la eficiencia energética y la caída de presión de  $\gamma-Al_2O_3$ /nanofluido de agua en un intercambiador de calor de placas con junta a lo largo de un rango variado de concentración de partículas (0% a 6%), mientras que las características termofísicas de  $\gamma-Al_2O_3$ /nanofluido de agua se obtuvieron a partir de relaciones empíricas establecidas.

De manera similar, [5] llevó a cabo el diseño inicial de intercambiadores de calor de placas con junta para flujo monofásico utilizando MATLAB como plataforma computacional. Posteriormente, se creó una aplicación de software para realizar cálculos térmicos e hidráulicos de

intercambiadores de calor con juntas de placa, basándose en correlaciones establecidas encontradas en investigaciones existentes. El programa de diseño desarrollado fue evaluado posteriormente en cuanto a precisión y fiabilidad en comparación con varios diseños aprobados de intercambiadores de calor de placas con junta. En [4], se introdujo un enfoque de diseño sencillo para intercambiadores de calor de placas, que enfatizaba el uso de placas uniformes descuidando varios factores como la conducción del calor a lo largo de las placas y en los conductos de flujo, junto con propiedades de fluidos que cambian con la temperatura. En [11], se exploró una optimización de diseño para intercambiadores de calor de placas y marcos de paso múltiple utilizando una disposición mixta de placas, donde el enfoque se estructuraba como un problema matemático para determinar el valor mínimo de una función objetivo discreta/continua implícita no lineal limitada por desigualdades. Los parámetros de optimización evaluados en esta investigación incluyeron el número de pasadas para ambos flujos de fluido, el número de placas con diferentes tipos de corrugación en cada pasada, y el tipo y tamaño de las placas.

En [12], se examinaron avances en los principios de diseño de los intercambiadores de placas, centrándose en cómo pueden mejorar la recuperación de calor y la eficiencia energética, evaluando al tiempo la disposición ideal de un intercambiador de calor de placa y marco de múltiples pasadas con configuraciones mixtas de placas. Las variables consideradas para optimización en este análisis incluyeron el número de pasadas para cada flujo de fluido, la cantidad de placas con diferentes diseños de corrugación en cada pasada, así como el tipo y dimensiones de las placas. Se creó un modelo matemático para estimar el valor de la función objetivo dentro del espacio de variables de optimización para el intercambiador de calor de placas. En [13], se desarrolló un sistema de placas y bastidores para reducir la temperatura de un flujo de suspensión en suspensión, para el cual se calcularon múltiples parámetros como la tasa de transferencia de calor y el número necesario de placas para el PHE, y también se examinaron optimizaciones de costes para el PHE diseñado. Otros investigadores [14] introdujeron un enfoque CAE sencillo para diseñar y optimizar rápidamente las dimensiones de los intercambiadores de placas orientado a la recuperación de calor. En esta investigación, se analizaron la dinámica del flujo y los procesos de transferencia de calor en un intercambiador de placa de calor de recuperación aire-aire con placa de contraflujo mediante métodos numéricos, mientras que la caída de presión y la efectividad se evaluaron en función de la velocidad de entrada para tres tamaños diferentes de intercambiadores reales de calor.

Finalmente, [15] introdujo una metodología innovadora y completa para el diseño ideal de intercambiadores de calor con juntas y placas soldadas, adaptándose a diversas formas

de placas y patrones de flujo. Este método combina una nueva estrategia de diseño con un sistema de optimización orientado a lograr la mejor solución que minimice el área total de transferencia creando una serie de relaciones entre las temperaturas en cada bloque de paso único utilizando las temperaturas conocidas de entrada y salida de los flujos de proceso. En consecuencia, se estableció un modelo matemático MINLP en esta investigación para determinar la combinación óptima de configuraciones de paso de flujo y formas de placas disponibles comercialmente, cumpliendo con las limitaciones viables del diseño. A continuación, se enfatizaron las diferencias en las estrategias de diseño para las PHE con juntas y soldaduras.

En una determinada fábrica láctea cubana se desea enfriar 2.500 kg/h de un chorro líquido de leche de vaca de 85 °C a 25 °C utilizando agua fría como refrigerante disponible a 5 °C. Por ello, se propuso un intercambiador de calor de placas con juntas para realizar este servicio de transferencia de calor. En este contexto, el objetivo de este estudio es diseñar un intercambiador de calor de placas con juntas desde el punto de vista termohidráulico utilizando la metodología de diseño reportada por [16], donde se calcularon varios parámetros importantes de diseño como el número total de placas, la carga térmica, el coeficiente total de transferencia de calor, la superficie y las caídas de presión de ambos fluidos. Además, se estimó y actualizó el coste de compra del intercambiador de calor de placas con junta diseñado para el año 2025.

## 2. Materiales y métodos.

### 2.1. Enunciado del problema.

Se requiere para enfriar 2.500 kg/h de un chorro de leche de vaca líquida caliente de 85 °C a 25 °C usando agua fría a 5 °C. Los valores de la placa efectiva, longitud efectiva y anchura efectiva son 0,75 m<sup>2</sup>, 1,5 m y 0,5 m, respectivamente, mientras que el espaciado de la placa, el grosor de la placa y el material de la placa son 0,003 m, 0,0006 m y acero inoxidable, respectivamente. Se establece una caída máxima de presión permitida de 50.000 Pa y 20.000 Pa para los arroyos de agua y leche, respectivamente. Diseñar, desde el punto de vista termohidráulico, un intercambiador de calor con juntas de placa adecuado para este servicio de transferencia de calor, con un sistema de flujo 1:1 y utilizando la metodología reportada por [16].

### 2.2 Metodología de diseño.

#### Diseño preliminar

Paso 1. Definición de los datos iniciales disponibles para los dos fluidos:

La Tabla 1 presenta los datos iniciales que deben definirse para los dos fluidos.

Tabla 1. Datos iniciales a definir para los dos fluidos.

Parámetro	Unidades	Fluido frío	Fluido caliente
Caudal máxico	kg/h	$m_c$	$m_h$

Temperatura de entrada	°C	$t_1$	$T_1$
Temperatura de salida	°C	$t_2$	$T_2$
Caída máxima de presión permitida	Pa	$\Delta P_{c(p)}$	$\Delta P_{h(p)}$
Factor de incrustación	W/m <sup>2</sup> ·K	$R_c$	$R_h$

Fuente: Explicación propia.

Paso 2. Temperatura media de ambos arroyos:

- Fluido frío ( $\bar{t}$ ):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1)$$

- Fluido caliente ( $\bar{T}$ ):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2)$$

Paso 3. Propiedades físicas de ambos fluidos a la temperatura media:

La Tabla 2 presenta las propiedades físicas que deben definirse para ambos fluidos a la temperatura media calculada en el paso anterior.

Tabla 2. Propiedades físicas que se definen para ambos fluidos.

Propiedad	Unidades	Fluido frío	Fluido caliente
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_c$	$\rho_h$
Viscosidad	Pa.s	$\mu_c$	$\mu_h$
Capacidad calorífica	kJ/kg.°C	$Cp_c$	$Cp_h$
Conductividad térmica	W/m.K	$k_c$	$k_h$

Fuente: Explicación propia.

Paso 4. Carga térmica ( $Q$ ):

- Para el fluido caliente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Donde la unidad de  $Q$  es kW.

Paso 5. Caudal másico requerido del fluido frío (agua de refrigeración) ( $m_c$ ):

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4)$$

Donde se da en kW y se da en kJ/kg.K.  $Q$  y  $Cp_c$

Paso 6. Asunción del coeficiente global de transferencia de calor ( $U_0$ ):

El coeficiente total de transferencia de calor se asumirá en función de los valores reportados por [16] para intercambiadores de placas.

Paso 7. Diferencia de temperatura media logarítmica ( $\Delta T_{lm}$ ):

- Para una disposición contracorriente:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (5)$$

Paso 8. Número de unidades de transferencia ( $NTU$ ):

$$NTU = (T_1 - T_2) / \Delta T_{lm} \quad (6)$$

Paso 9. Factor de corrección de temperatura medio logarítmico ( $F_t$ ):

El factor de corrección de temperatura media logarítmica se seleccionará en función de una cifra reportada por [16] basada en el valor de NTU y la disposición del flujo.

Paso 10. Diferencia media de temperatura corregida ( $\Delta T_m$ ):

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \cdot F_t \quad (7)$$

Paso 11. Área superficial requerida ( $A_0$ ):

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta T_m} \quad (8)$$

Donde se da en kW y se da en W/m<sup>2</sup>·K.

Paso 12. Selección de los varios parámetros para las placas:

- Área efectiva de la placa ( $A_p$ )
- Longitud efectiva ( $L_p$ )
- Anchura efectiva ( $W_p$ )

Paso 13. Número de matrículas requeridas ( $N_0$ ):

$$N_0 = \frac{A_0}{A_p} \quad (9)$$

Paso 14. Disposición del flujo y número de pasadas ( $N_p$ ):

Paso 15. Número de canales por pasada ( $N_T$ ):

$$N_T = \frac{N_0 - 1}{2} \quad (10)$$

Paso 16. Asunción del espaciado de placas ( $b$ ):

Paso 17. Área de sección transversal ( $A_f$ ):

$$A_f = b \cdot W_p \quad (11)$$

Paso 18. Diámetro medio equivalente (hidráulico) ( $d_e$ ):

$$d_e = 2 \cdot b \quad (12)$$

- Fluido caliente:

Paso 19. Velocidad del canal para el fluido caliente ( $v_{ph}$ ):

$$v_{ph} = \frac{m_h}{N_T \cdot \rho_h \cdot A_f} \quad (13)$$

Donde se da en kg/s.  $m_h$

Paso 20. Número de Reynolds para el fluido caliente ( $Re_h$ ):

$$Re_h = \frac{\rho_h \cdot v_{ph} \cdot d_e}{\mu_h} \quad (14)$$

Paso 21. Número de Prandtl para el fluido caliente ( $Pr_h$ ):

$$Pr_h = \frac{(Cp_h \cdot 1,000) \cdot \mu_h}{k_h} \quad (15)$$

Paso 22. Número de Nusselt para el fluido caliente ( $Nu_h$ ):

$$Nu_h = 0.26 \cdot (Re_h)^{0.65} \cdot (Pr_h)^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_h}{\mu_{hw}}\right)^{0.14} \quad (16)$$

Donde el factor de corrección de viscosidad = 1 según  $\left(\frac{\mu_h}{\mu_{hw}}\right)^{0.14}$  [16].

Paso 23. Coeficiente de transferencia de calor para el fluido caliente ( $h_h$ ):

$$h_h = \frac{Nu_h \cdot k_h}{d_e} \quad (17)$$

- Líquido frío:

Paso 24. Velocidad del canal para el fluido frío ( $v_{pc}$ ):

$$v_{pc} = \frac{m_c}{N_T \cdot \rho_c \cdot A_f} \quad (18)$$

Donde se da en kg/s. $m_c$

Paso 25. Número de Reynolds para el fluido frío ( $Re_c$ ):

$$Re_c = \frac{\rho_c \cdot v_{pc} \cdot d_e}{\mu_c} \quad (19)$$

Paso 26. Número de Prandtl para el fluido frío ( $Pr_c$ ):

$$Pr_c = \frac{(Cp_c \cdot 1,000) \cdot \mu_c}{k_c} \quad (20)$$

Paso 27. Número de Nusselt para el fluido frío ( $Nu_c$ ):

$$Nu_c = 0.26 \cdot (Re_c)^{0.65} \cdot (Pr_c)^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_c}{\mu_{cw}}\right)^{0.14} \quad (21)$$

Donde el factor de corrección de viscosidad = 1 según [16].  $\left(\frac{\mu_c}{\mu_{cw}}\right)^{0.14}$

Paso 28. Coeficiente de transferencia de calor para el fluido frío ( $h_c$ ):

$$h_c = \frac{Nu_c \cdot k_c}{d_e} \quad (22)$$

Paso 29. Selecciona el grosor de la placa ( $X_p$ )

Paso 30. Seleccione el material de la placa y, por tanto, su conductividad térmica ( $k_p$ )

Paso 31. Coeficiente global de transferencia de calor calculado ( $U_C$ ):

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{1}{R_h} + \frac{1}{R_c} + \frac{X_p}{k_p}} \quad (23)$$

El valor calculado del coeficiente global de transferencia de calor debe compararse con el coeficiente global de transferencia de calor asumido del Paso 6. Si el error porcentual calculado mediante la ecuación (24) está entre -0% y +10%, el diseño es satisfactorio, y entonces el diseñador debe proceder a calcular la caída de presión de ambos fluidos.

$$\%Error = \frac{U_c - U_0}{U_c} \cdot 100 \quad (24)$$

*Caída de presión:*

Paso 32. Defina el diámetro del puerto ( $d_{pt}$ )

Paso 33. Área del puerto ( $A_{pt}$ ):

$$A_{pt} = \frac{\pi \cdot d_{pt}^2}{4} \quad (25)$$

- Fluido caliente:

Paso 34. Factor de fricción para el fluido caliente ( $j_{fh}$ ):

$$j_{fh} = 0.6 \cdot (Re_h)^{-0.3} \quad (26)$$

Paso 35. Caída de presión en la placa para el fluido caliente ( $\Delta P_{ph}$ ):

$$\Delta P_{ph} = 8 \cdot j_{fh} \cdot \left(\frac{L_p}{d_e}\right) \cdot \frac{\rho_h \cdot v_{ph}^2}{2} \quad (27)$$

Paso 36. Velocidad a través del puerto para el fluido caliente ( $u_{pth}$ ):

$$u_{pth} = \frac{m_h}{\rho_h \cdot A_{pt}} \quad (28)$$

Paso 37. Caída de presión en el puerto para el fluido caliente ( $\Delta P_{pth}$ ):

$$\Delta P_{pth} = 1.3 \cdot \frac{(\rho_h \cdot u_{pth}^2)}{2} N_p \quad (29)$$

Paso 38. Caída total de presión para el fluido caliente ( $\Delta P_{Th}$ ):

$$\Delta P_{Th} = \Delta P_{ph} + \Delta P_{pth} \quad (30)$$

- Líquido frío:

Paso 39. Factor de fricción para el fluido frío ( $j_{fc}$ ):

$$j_{fc} = 0.6 \cdot (Re_c)^{-0.3} \quad (31)$$

Paso 40. Caída de presión en la placa para el fluido frío ( $\Delta P_{pc}$ ):

$$\Delta P_{pc} = 8 \cdot j_{fc} \cdot \left(\frac{L_p}{d_e}\right) \cdot \frac{\rho_c \cdot v_{pc}^2}{2} \quad (32)$$

Paso 41. Velocidad a través del puerto para el fluido frío ( $u_{ptc}$ ):

$$u_{ptc} = \frac{m_c}{\rho_c \cdot A_{pt}} \quad (33)$$

Paso 42. Caída de presión del puerto para el fluido frío ( $\Delta P_{ptc}$ ):

$$\Delta P_{ptc} = 1.3 \cdot \frac{(\rho_c \cdot u_{ptc}^2)}{2} N_p \quad (34)$$

Paso 43. Caída total de presión para el fluido frío ( $\Delta P_{Tc}$ ):

$$\Delta P_{Tc} = \Delta P_{pc} + \Delta P_{ptc} \quad (35)$$

### 2.3. Coste adquirido del intercambiador de calor diseñado con juntas

Según [16], el coste de compra de un intercambiador de calor con placa y chasis de acero inoxidable puede calcularse usando la siguiente correlación [16]:

$$C_{(2007)} = 1,350 + 180 \cdot A^{0.95} \quad (36)$$

Dónde:

- $C_{(2007)}$  - Coste del equipo adquirido referido a enero de 2007.
- $A$  - Área del intercambiador de calor de placas [m<sup>2</sup>].

Una vez calculado el coste de compra del intercambiador de placas para enero de 2007 usando la ecuación (36), se actualizó a marzo de 2025 usando la siguiente ecuación:

$$C_{(2025)} = C_{(2007)} \cdot \frac{CE\ Index_{(2025)}}{CE\ Index_{(2007)}} \quad (37)$$

Dónde:

- $C_{(2025)}$  - Coste del equipo adquirido mencionado a marzo de 2025.
- $CE\ Index_{(2025)}$  - Índice de Costes de Ingeniería Química en marzo de 2025 = 791,6 [17].
- $CE\ Index_{(2007)}$  - Índice de Costes de Ingeniería Química en enero de 2007 = 509,7 [16].

## 3. Análisis e interpretación de resultados.

### 3.1. Diseño preliminar.

Paso 1. Definición de los datos iniciales disponibles para los dos fluidos:

La tabla 3 muestra los valores de los datos iniciales para los dos fluidos.

Tabla 3. Valores de los datos iniciales para los dos fluidos.

Parámetro	Unidades	Agua	Leche
Caudal másico	kg/h	-	2,500
Temperatura de entrada	°C	5	85
Temperatura de salida	°C	30	25
Caída máxima de presión permitida	Pa	50,000	20,000
Factor de incrustación	W/m <sup>2</sup> °C	8,000	1,000

Fuente: Explicación propia.

Paso 2. Temperatura media de ambos arroyos:

- Fluido frío ( $\bar{t}$ ):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{5 + 30}{2} = 17.5\ ^\circ\text{C} \quad (1)$$

- Fluido caliente ( $\bar{T}$ ):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{85 + 25}{2} = 55\ ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Paso 3. Propiedades físicas de ambos fluidos a la temperatura media:

La Tabla 4 muestra los valores de las propiedades físicas de ambos fluidos a la temperatura media calculada en el Paso 2, que se tomaron de los datos reportados por [18] para la leche y de [19] para el agua.

Tabla 4. Valores de las propiedades físicas de ambos fluidos.

Propiedad	Unidades	Agua	Leche
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	998.7	1,015.4
Viscosidad	Pa.s	0.00107	0.002127
Capacidad calorífica	kJ/kg.°C	4.184	3.931
Conductividad térmica	W/m.K	0.599	0.559

Fuente: Explicación propia.

Paso 4. Carga térmica ( $Q$ ):

- Para el fluido caliente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$= \frac{2,500}{3,600} \cdot 3.931 \cdot (85 - 25)$$

$$= 163.79\ \text{kW}$$

Paso 5. Caudal másico requerido del fluido frío (agua fría) ( $m_c$ ):

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{163.79}{4.184 \cdot (30 - 5)} \quad (4)$$

$$= 1.5659\ \text{kg/s}$$

Paso 6. Asunción del coeficiente global de transferencia de calor ( $U_0$ )

Teniendo en cuenta los valores reportados por [16] entre el rango de 2.000 y 4.500 W/m<sup>2</sup>. K, se asumió un valor preliminar de 2.200 W/m<sup>2</sup>. K de  $U_0$ .

La Tabla 5 presenta los valores de los parámetros incluidos en los pasos 7-18.

Tabla 5. Valores de los parámetros incluidos en los pasos 7-11.

Escalón	Parámetro	Valor	Unidades
7	Diferencia de temperatura media logarítmica	34.60	°C
8	Número de unidades de transferencia	1.73	-
9	Factor de corrección de temperatura medio <sup>logarítmico 1</sup>	0.975	-
10	Diferencia de temperatura media corregida	33.73	°C
11	Área superficial requerida	2.21	M2

<sup>1</sup> Según informó [16].

Fuente: Explicación propia.

Paso 12. Selección de varios parámetros para las planchas: Basándose en las sugerencias reportadas por [16] para las dimensiones típicas de las placas, se seleccionaron los siguientes valores para varios parámetros de las placas:

- Superficie efectiva de la placa = 0,75 m<sup>2</sup> ( $A_p$ ).
- Longitud efectiva = 1,5 m. ( $L_p$ )
- Anchura efectiva = 0,5 m. ( $W_p$ )

Paso 13. Número de matrículas requeridas: ( $N_0$ )

$$N_0 = \frac{A_0}{A_p} = \frac{2.21}{0.75} = 2.95 \sim 3 \quad (9)$$

Paso 14. Disposición del flujo y número de pasadas ( $N_p$ ):  
La disposición del flujo será 1:1, con un número de pasadas ( $N_p$ ) de 1.  $N_p$

Paso 15. Número de canales por pasada ( $N_T$ ):

$$N_T = \frac{N_0 - 1}{2} = \frac{3 - 1}{2} = 1 \quad (10)$$

Paso 16. Asunción del espaciado de las placas ( $b$ ):  
Se asumió un espaciado de placas de 3 mm = 0,003 m, un valor típico según [16].

Paso 17. Área de sección transversal ( $A_f$ ):

$$A_f = b \cdot W_p = 0.003 \cdot 0.5 = 0.0015 \text{ m}^2 \quad (11)$$

Paso 18. Diámetro medio equivalente (hidráulico) ( $d_e$ ):

$$d_e = 2 \cdot b = 2 \cdot 0.003 = 0.006 \text{ m} \quad (12)$$

La Tabla 6 muestra los resultados de los parámetros incluidos en los pasos 19-28, donde se calculan los coeficientes de transferencia de calor para cada fluido.

Tabla 6. Resultados de los parámetros incluidos en los pasos 19-28.

Parámetro	Leche	Agua	Unidades
Velocidad del canal	0.456	1.045	m/s
Número de Reynolds	1,306	5,852	-
Número de Prandtl para el fluido caliente	14.96	7.47	-
Número de Nusselt	81.34	163.36	-
Coefficiente de transferencia de calor	7,578	16,309	L/m <sup>2</sup> . K

Fuente: Explicación propia.

Paso 29. Selecciona el grosor de la placa ( $X_p$ ):  
Se seleccionó un valor de 0,0006 m para el grosor de la placa.

Paso 30. Seleccione el material de la placa y, por tanto, su conductividad térmica ( $k_p$ ):  
Se eligió acero inoxidable para el material de la placa, por lo que = 16 W/m.K  $k_p$ [16].

Paso 31. Coeficiente global de transferencia de calor calculado ( $U_c$ ):

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{1}{R_h} + \frac{1}{R_c} + \frac{X_p}{k_p}} \quad (23)$$

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{16,309} + \frac{1}{7,578} + \frac{1}{1,000} + \frac{1}{8,000} + \frac{0.0006}{16}}$$

$$U_c = 2,194.06 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Error porcentual

$$\%Error = \frac{U_c - U_0}{U_c} \cdot 100 \quad (24)$$

$$\%Error = \frac{2,194.06 - 2,200}{2,194.06} \cdot 100$$

$$\%Error = -0.27\% \sim 0\%$$

### 3.2. Caída de presión.

Paso 32. Defina el diámetro del puerto ( $d_{pt}$ ):  
El valor de selección para el diámetro del puerto (era de 0,1 m.  $d_{pt}$ )

Paso 33. Área del puerto ( $A_{pt}$ ):

$$A_{pt} = \frac{\pi \cdot d_{pt}^2}{4} = \frac{3.14 \cdot (0.1)^2}{4} = 0.00785 \text{ m}^2 \quad (25)$$

La Tabla 7 muestra los resultados de los parámetros incluidos en los pasos 34-43 para cada fluido:

Tabla 7. Resultados de los parámetros incluidos en los pasos 34-43.

Parámetro	Leche	Agua	Unidades
Factor de fricción	0.0697	0.0445	-
Caída de presión en placa	14,716.33	48,532	Pa
Velocidad a través del puerto	0.087	0.1997	m/s
Caída de presión en los puertos	4.996	25.888	Pa
Caída total de presión	14,720	48,558	Pa

Fuente: Explicación propia.

### 3.3. Coste de compra del intercambiador de calor diseñado con placa con junta.

Utilizando la ecuación (36), donde  $A$  – área superficial requerida = 2,21 m<sup>2</sup>, el coste de compra del intercambiador de placas, referido a enero de 2007, es:

$$C_{(2007)} = 1,350 + 180 \cdot A^{0.95} \quad (36)$$

$$C_{(2007)} = 1,350 + 180 \cdot 2.21^{0.95}$$

$$C_{(2007)} = \text{USD } \$ 1,733$$

Luego, para actualizar este coste de compra a marzo de 2025, se utilizó la ecuación (37):

$$C_{(2025)} = C_{(2007)} \cdot \frac{CE \text{ Index}_{(2025)}}{CE \text{ Index}_{(2007)}} \quad (37)$$

$$C_{(2025)} = 1,733 \cdot \frac{791.6}{509.7}$$

$$C_{(2025)} = \text{USD } \$ 2,692$$

## 4. Discusión

Según los resultados, la carga térmica ( $Q$ ) tenía un valor de 163,79 kW, lo que requiere un caudal másico para el agua de refrigeración ( $m_c$ ) de 1,5659 kg/s (5.637,24 kg/h). Además, la superficie requerida era de 2,21 m<sup>2</sup>, con una diferencia de temperatura media corregida de 33,73 °C y un número requerido de placas de 3. Esta baja cantidad de placas se debe al valor relativamente bajo de la carga térmica y al alto valor del coeficiente global de transferencia de calor asumido (2.200 W/m<sup>2</sup>. K), que influye entonces en el valor bajo de la superficie calculada y, por tanto, en el

número requerido de placas. En el intercambiador de calor de placas 1:1 diseñado en [16] para enfriar 27,8 kg/s de un flujo de metanol de 95 °C a 40 °C usando agua salobre a 25 °C, la capacidad térmica es de 4.340 kW, el caudal másico requerido de agua salobre es de 68,9 kg/s y la superficie requerida es de 72,92m<sup>2</sup>, por lo tanto, necesitaban 97 matrículas.

El coeficiente de transferencia de calor para el agua de refrigeración (16.309 W/m<sup>2</sup>. K) era 2,15 veces superior al valor de este parámetro para la leche (7.578 W/m<sup>2</sup>. K), lo que se debe a que el caudal másico del agua de refrigeración (5.637,24 kg/h) es 2,25 veces mayor que el caudal másico de la leche (2.500 kg/h). Esto influye entonces en que la velocidad del canal para el agua (1,045 m/s) es mayor que la velocidad del canal para la leche (0,456 m/s), obteniendo así que el número de Reynolds para el agua (5,852) es 4,48 veces mayor que el número de Reynolds para la leche (1,306), lo que influye en esta diferencia. Esto coincide con lo reportado por [16], donde el coeficiente de transferencia de calor para el agua salobre (16.439 W/m<sup>2</sup>. K) es 3,37 veces mayor que el coeficiente de transferencia de calor del metanol (4.870 W/m<sup>2</sup>. K). Los valores del número de Reynolds obtenidos en el presente estudio coinciden con los reportados por (Mehrabian, 2009), donde se indica que el flujo de fluido en los canales de intercambiadores de placas suele estar en números de Reynolds bajos, y al mismo tiempo en régimen turbulento.

Un valor para el coeficiente global de transferencia de calor calculado de 2.194,06 W/m<sup>2</sup>. Se obtuvo K, lo que coincide muy cerca con el coeficiente global de transferencia de calor asumido (2.200 W/m<sup>2</sup>. K), aunque se obtuvo un error porcentual calculado de -0,27% que corresponde al rango propuesto por [16] para este parámetro, indicando así que el diseño es satisfactorio, no es necesario realizar iteraciones adicionales y que debemos proceder a calcular las caídas de presión para ambos fluidos. En el intercambiador de placas diseñado en [16], el valor inicial asumido para el coeficiente total de transferencia de calor era de 2.000 W/m<sup>2</sup>.K.

En cuanto a las caídas de presión, el valor del factor de fricción para la leche (0,0697) fue 1,57 veces mayor que el factor de fricción para el agua (0,0445), lo que se debe al valor menor obtenido para el número de Reynolds de la leche en comparación con el número de Reynolds del agua. La caída de presión en placa para el agua (48.532 Pa) fue 3,29 veces mayor que el valor de este parámetro para la leche, lo que se debe en gran parte al mayor valor obtenido para la velocidad del canal del agua (1,045 m/s) en comparación con la velocidad del canal de la leche (0,456 m/s). Del mismo modo, la velocidad a través del puerto es mayor para el agua (0,1997 m/s) en comparación con el valor de este parámetro para la leche (0,087 m/s) porque el agua tiene un caudal másico mayor, mientras que la caída de presión en el puerto para el agua (25,888 Pa) es 5,18 veces mayor que la caída de presión en el puerto para la leche (4,996 Pa) principalmente porque el agua tiene un valor mayor de la velocidad a través del puerto. La caída

total de presión para el agua (48.558 Pa) es 3,29 veces mayor que la caída total de presión para la leche (14.720), porque tanto la caída de presión en placa como la caída de presión en el puerto son mayores para el agua en comparación con los valores de estos parámetros para la leche.

Lo anterior coincide con los resultados del intercambiador de calor de placa con junta diseñado en [16], donde la caída de presión en la placa (26.547 Pa), la caída de presión en el puerto (50.999 Pa) y la caída total de presión (77.546 Pa) son mayores para el fluido frío (agua) en comparación con el valor de la caída de presión en placa (5.799 Pa), la caída de presión en el puerto (10.860 Pa) y la caída total de presión (16.659 Pa) para el fluido caliente (metanol). Por último, en el servicio de intercambio de calor estudiado en este artículo, los valores calculados de las caídas totales de presión para ambos fluidos están por debajo de las caídas de presión máximas establecidas por el proceso, que son 50.000 Pa para agua y 20.000 Pa para la leche. Por tanto, se concluye que el intercambiador de calor de placas diseñado en este estudio es adecuado y apropiado desde el punto de vista termohidráulico, y puede implementarse con éxito en la aplicación solicitada de transferencia de calor para refrigeración de leche de vaca.

En [13] se diseñó un intercambiador de calor de placas para enfriar 231.000 kg/h de un flujo de suspensión de 86,6 °C a 66 °C usando agua de refrigeración a 34 °C. En este estudio, el número total de placas fue de 108, el área del intercambiador de calor de placas fue de 110,377m<sup>2</sup>, la carga térmica fue de 1.132.500 kcal/h y el coeficiente total de transferencia de calor fue de 327,17 kcal/h.m<sup>2</sup>.°C.

El coste de compra del intercambiador de calor de placas con junta, referido a enero de 2007, fue de 1.733 USD \$, mientras que el coste de compra del mismo intercambiador de placa con junta actualizado a marzo de 2025 fue de USD \$ 2.692.

## 5. Conclusiones.

Se diseñó un intercambiador de calor con placa con junta para enfriar un chorro de leche caliente utilizando agua fría como refrigerante. Se calcularon varios parámetros importantes de diseño, siendo los más importantes la carga térmica, el caudal másico requerido del agua refrigerada, la superficie y el número de placas. De manera similar, los coeficientes de transferencia de calor para ambos fluidos se estimaron basándose en correlaciones bien establecidas, así como en el coeficiente global de transferencia de calor. Finalmente, también se calcularon las caídas de presión de ambos flujos de fluido y se compararon con los valores máximos establecidos por el proceso del intercambiador de calor. El intercambiador de calor diseñado presentará tres placas, una disposición de flujo de 1:1, una superficie de 2,21 m<sup>2</sup>, una carga térmica de 163,79 kW, un caudal másico requerido de agua fría de 1,5659 kg/s (5.638 kg/h) y un coeficiente global calculado de transferencia de calor de

2.194,06 W/m<sup>2</sup>K. Tanto la caída total de presión del agua fría (48.558 Pa) como de la leche (14.720 Pa) están por debajo de los valores máximos permitidos por el proceso, es decir, 50.000 Pa para el agua y 20.000 Pa para la leche. Se concluye que el PHE diseñado costará 2.692 USD y podría implementarse satisfactoriamente, desde el punto de vista termohidráulico, en el servicio de transferencia de calor.

## 6.- Contribuciones de los autores (Taxonomía de Roles de los Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualización: (Nombre y apellido del autor)
2. Conservación de datos: (Nombre y apellido del autor)
3. Conceptualización formal: Amaury Pérez Sánchez.
4. Curación de datos: Laura de la Caridad Arias Aguila.
5. Análisis formal: Amaury Pérez Sánchez Lizthalía Jiménez Guerra.
6. Adquisición de fondos: No aplicable.
7. Research: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.
8. Metodología: Amaury Pérez Sánchez, Lizthalía Jiménez Guerra.
9. Gestión de proyectos: No aplicable.
10. Recursos: No aplicable.
11. Software: No aplicable.
12. Supervisión: Amaury Pérez Sánchez.
13. Validation: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.
14. Pantalla: No aplicable.
15. Redacción - borrador original: Lizthalía Jiménez Guerra, Laura de la Caridad Arias Aguila.
16. Escritura - revisión y edición: Amaury Pérez Sánchez.

## 7.- Apéndice

### Nomenclatura.

$A_0$	Área superficial requerida	M <sup>2</sup>
$A_f$	Área de sección transversal	M <sup>2</sup>
$A_p$	Área efectiva de la placa	M <sup>2</sup>
$A_{pt}$	Área portuaria	M <sup>2</sup>
$b$	Espaciado de placas	-
$C_p$	Capacidad calorífica	kJ/kg.°C
$d_e$	Diámetro medio equivalente (hidráulico)	m
$d_{pt}$	Diámetro del puerto	m
$k$	Conductividad térmica	W/m.K
$F_t$	Factor de corrección de temperatura media logarítmica	-
$h$	Coefficiente de transferencia de calor	L/m <sup>2</sup> . K
$j_f$	Factor de fricción	-
$k_p$	Conductividad térmica de placas	W/m.K
$L_p$	Longitud efectiva	m
$m$	Caudal másico	kg/h

$N_0$	Número de matrículas requeridas	-
$N_p$	Número de pasadas	-
$N_T$	Número de canales por pasada	-
$NTU$	Número de unidades de transferencia	-
$Nu$	Número de Nusselt	-
$Pr$	Número de Prandtl	-
$\Delta P_p$	Caída de presión en placa	Pa
$\Delta P_{pt}$	Caída de presión en los puertos	Pa
$\Delta P_T$	Caída total de presión	Pa
$Q$	Carga térmica	kW
$R$	Factor de incrustación	W/m <sup>2</sup> .°C
$Re$	Número de Reynolds	-
$t$	Fluido frío de temperatura	°C
$\bar{t}$	Fluido frío a temperatura media	°C
$T$	Fluido caliente de temperatura	°C
$T$	Fluido caliente a temperatura media	°C
$\Delta T_{lm}$	Diferencia de temperatura media logarítmica	°C
$\Delta T_m$	Diferencia de temperatura media corregida	°C
$u_{pt}$	Velocidad a través del puerto	m/s
$U_C$	Coefficiente global de transferencia de calor calculado	L/m <sup>2</sup> . K
$U_0$	Coefficiente global de transferencia de calor asumido	L/m <sup>2</sup> . K
$v_p$	Velocidad del canal	m/s
$W_p$	Anchura efectiva	m
$X_p$	Grosor de la placa	m

### Símbolos griegos

$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	Viscosidad	Pa.s
$\mu_h$	Viscosidad del fluido a la temperatura de la pared	Pa.s

### Subíndices

1	Entrada
2	Salida
$c$	Fluido frío
$h$	Fluido caliente

## 8.- Referencias.

- [1] J. S. R. Tabares, L. Perdomo-Hurtado y J. L. Aragón, "Estudio del rendimiento de intercambiadores de calor con junta basada en índices de eficiencia energética," *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, p. 113902, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113902>
- [2] F. A. S. Mota, E. P. Carvalho y M. A. S. S. Ravagnani, "Capítulo 7. Modelado y diseño de intercambiadores de calor de placas", en *Heat Transfer Studies and Applications*, M. S. N. Kazi, Ed. Londres, Reino Unido: InTech, 2015. <http://dx.doi.org/10.5772/60885>
- [3] M. M. Abu-Khader, "Perspectivas sobre parámetros de diseño para mejorar el rendimiento de intercambiadores de calor con placas con junta," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 115, pp. 13-18, 2025. <https://doi.org/10.3303/CET25115003>
- [4] M. A. Mehrabian, "Construcción, rendimiento y diseño térmico de intercambiadores de calor de placas," *Proc. IMechE: Parte E: J. Process Mechanical Engineering*, vol. 223, pp. 123-131, 2009. <https://doi.org/10.1243/09544089JPME270>
- [5] M. S. S. Misbah y A. R. Ballil, "Diseño preliminar asistido por ordenador de intercambiadores prácticos de placa de calor con junta," *LJEST*, vol. 4, n° 2, 2024. [https://www.researchgate.net/publication/384291441\\_Computer-Aided\\_Preliminary\\_Design\\_of\\_Practical\\_Gasket\\_Plate\\_Heat\\_Exchange](https://www.researchgate.net/publication/384291441_Computer-Aided_Preliminary_Design_of_Practical_Gasket_Plate_Heat_Exchange)
- [6] U. Kayabaşı, S. Kakaç, S. Aradag y A. Pramuanjareonkij, "Investigación experimental del rendimiento térmico e hidráulico de un intercambiador de calor de placas usando nanofluidos," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 92, n° 3, pp. 783-796, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01987-7>
- [7] S. Biswas, M. I. Inam y P. C. Roy, "Transferencia de calor y análisis de flujo de fluidos en un intercambiador de calor de placas corrugadas", presentados en la Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica, Industrial y Energética, Khulna, Bangladés, 2022. [https://www.researchgate.net/publication/367219221\\_Heat\\_Transfer\\_and\\_Fluid\\_Flow\\_Analysis\\_in\\_a\\_Corrugated\\_Plate\\_Heat\\_Exchange](https://www.researchgate.net/publication/367219221_Heat_Transfer_and_Fluid_Flow_Analysis_in_a_Corrugated_Plate_Heat_Exchange)
- [8] K. Boukhadia y H. Ameer, "Estudio numérico del flujo sobre placas y intercambiador de calor con juntas," *J. Sc. & Tech*, vol. 02, n° 01, pp. 120-127, 2020. <https://jst.univ-tam.dz/wp-content/uploads/2020/07/ID-20-2-01-18.pdf>
- [9] A.-A. Neagu y C. I. Kocsag, "Mejorando la eficiencia térmica de los intercambiadores de calor con placas de junta utilizados en el procesamiento de aceites vegetales," *Inventions*, vol. 10, p. 10, 2025. <https://doi.org/10.3390/inventions10010010>
- [10] N. Bozorgan y M. Shafahi, "Análisis del rendimiento de intercambiadores de calor con placas con junta usando nanofluido," *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, vol. 4, pp. 65-72, 2017. <https://doi.org/10.22075/jhmtr.2017.1089.1077>
- [11] O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko y G. Khavin, "Modelado matemático y diseño óptimo de intercambiadores de calor de placas y bastidores," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 18, pp. 1-6, 2009. <https://doi.org/10.3303/CET0918129>
- [12] O. P. Arsenyeva, L. L. Tovazhnyansky, P. O. Kapustenko y G. L. Khavin, "Diseño óptimo de intercambiadores de calor de placas y bastidores para una recuperación eficiente de calor en industrias de proceso," *Energy*, vol. 36, pp. 4588-4598, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.022>
- [13] K. Sreejith, B. Varghese, D. Das, D. Devassy, Harikrishnan y G. K. Sharath, "Diseño y optimización de costes de intercambiadores de calor de placas," *Research Inventy: International Journal of Engineering and Science*, vol. 4, n° 10, pp. 43-48, 2014. <https://www.researchinventy.com/papers/v4i10/F0410043048.pdf>
- [14] V. Dvořák y T. Vít, "Métodos CAE para el diseño de intercambiadores de calor de placas," *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 234-243, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.613>
- [15] K. Xu, K. Qin, H. Wu y R. Smith, "Un nuevo método basado en optimización asistida por ordenador para el diseño de intercambiadores de calor de placa de paso múltiple único," *Processes*, vol. 10, p. 767, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10040767>
- [16] R. Sinnott y G. Towler, *Diseño de Ingeniería Química*, 6ª ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020.
- [17] S. Jenkins, "Indicadores económicos," *Chemical Engineering*, vol. 132, n° 6, p. 48, 2025.
- [18] P. F. Fox, T. Uniacke-Lowe, P. L. H. McSweeney y J. A. O'Mahony, *Química láctea y bioquímica*, 2ª ed. Londres, Reino Unido: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2>
- [19] ChemicalLogic, "Propiedades termodinámicas y de transporte del agua y el vapor," 2.0 ed. Burlington, EE. UU.: ChemicalLogic Corporation, 2003.

## Valoración de los riesgos ocupacionales en la industria láctea ecuatoriana.

*Assessment of occupational risks in the Ecuadorian dairy industry.*

Mayerli Angeline Mejía Monar<sup>1</sup> ; Carlos Alberto Velásquez Avilés<sup>2</sup> & Ivan Patricio Viteri García<sup>3</sup>

Recibido: 26/06/2025 – Aceptado: 19/08/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artículos de Investigación

Artículos de Revisión

Artículos de Ensayos

\* Autor para correspondencia.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

### Resumen.

Esta revisión examina sesenta publicaciones (2013-2025) para valorar cómo se previenen los riesgos laborales dentro de las plantas lácteas, con énfasis en experiencias latinoamericanas y, en particular, ecuatorianas. El análisis se articula en torno a cinco líneas de actuación: (i) Buenas Prácticas de Manufactura combinadas con la metodología 5S; (ii) ergonomía participativa orientada a rediseñar tareas; (iii) bloqueo-etiquetado digital vinculada a mantenimiento predictivo; (iv) controles químicos basados en gabinetes ventilados y sensores de amoníaco, y (v) sistemas integrados de gestión ISO 45001–ISO 22000. En promedio, dichas medidas recortan la accidentalidad entre un 22 % y un 36 %, lo que respalda la idea de que la superposición de barreras técnicas y organizativas incrementa la protección. No obstante, la mayoría de los estudios ofrece seguimientos breves y utiliza métricas diversas, por lo que se aconsejan trabajos longitudinales y marcos de medición unificados para confirmar la sostenibilidad de los beneficios.

### Palabras clave.

seguridad ocupacional láctea; BPM; 5S; ergonomía participativa; bloqueo-etiquetado digital; mantenimiento predictivo; gestión química; ISO 45001; ISO 22000.

### Abstract.

This review draws on sixty sources published between 2013 and 2025 to assess how dairy plants manage occupational hazards, paying special attention to Latin American—and especially Ecuadorian—settings. Five intervention strands are discussed: (i) Good Manufacturing Practices coupled with the 5S method; (ii) participatory ergonomics aimed at task redesign; (iii) digital lockout-tagout paired with predictive maintenance; (iv) chemical controls through ventilated cabinets and ammonia sensors; and (v) integrated ISO 45001–ISO 22000 management systems. On average, these strategies cut accident rates by 22 % to 36 %, lending weight to the notion that layered technical and organisational barriers enhance safety. Yet most studies track outcomes for only short periods and rely on non-standard metrics, highlighting the need for longer follow-ups and harmonised measurement frameworks to judge long-term effectiveness.

### Keywords.

Dairy occupational safety; Good Manufacturing Practices; 5S; participatory ergonomics; digital lockout-tagout; predictive maintenance; chemical management; ISO 45001; ISO 22000.

## 1. Introducción

### 1.1.- Riesgos ocupacionales en la industria láctea

La industria láctea juega un rol estratégico en las economías de muchas regiones, incluida Ecuador, a través de la transformación de leche cruda en derivados (quesos, yogures, leche en polvo) y la generación de empleo directo en plantas de procesamiento y en el sector primario. Sin embargo, esa cadena productiva involucra riesgos mecánicos (equipos rotativos, líneas de envasado), ergonómicos (manejo manual de cargas, posturas forzadas), químicos (soluciones alcalinas/ácidas en CIP, amoníaco en refrigeración), físicos (ruido, vibraciones, estrés térmico) y biológicos (exposición a zoonosis en ordeño). Numerosos estudios señalan que la siniestralidad en plantas lácteas es relativamente alta comparada con otros subsectores alimentarios [1, 3, 4].

A pesar de intervenciones documentadas en contextos europeos y norteamericanos, existe una brecha de evidencia sobre la implementación y eficacia en pymes y en escenarios latinoamericanos, particularmente en Ecuador. Además, la heterogeneidad de métricas empleadas (accidentes por millón de horas-hombre, puntuaciones RULA/REBA, MTBF, niveles de ppm de amoníaco, puntuaciones de clima de seguridad) dificulta comparar resultados y extraer conclusiones globales [16, 49, 50]. Por ello, resulta esencial revisar de forma integrada las estrategias de prevención empleadas, su eficacia y adaptabilidad al contexto de la industria láctea ecuatoriana.

La industria láctea presenta una combinación única de riesgos derivados de la interacción entre procesos manuales y automatizados. Las operaciones de ordeño, pasteurización, envasado y limpieza in situ (CIP) exponen a los trabajadores a peligros mecánicos como atrapamientos

<sup>1</sup> Universidad Técnica de Babahoyo; [mmejiam@faciag.utb.edu.ec](mailto:mmejiam@faciag.utb.edu.ec); <https://orcid.org/0009-0003-9849-2102>, Babahoyo; Ecuador.

<sup>2</sup> Universidad Técnica de Babahoyo; [cvelasquez904@faciag.utb.edu.ec](mailto:cvelasquez904@faciag.utb.edu.ec); <https://orcid.org/0009-0006-5593-6641>, Babahoyo; Ecuador.

<sup>3</sup> Universidad de Guayaquil; [ivan.viteriga@ug.edu.ec](mailto:ivan.viteriga@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0003-0522-3302>, Guayaquil; Ecuador.

en equipos rotativos, así como a riesgos químicos por el uso de soluciones cáusticas y refrigerantes como el amoníaco. A esto se suman factores físicos —ruido, vibraciones y estrés térmico en cámaras de refrigeración— y biológicos, vinculados a la manipulación de leche cruda y la posible transmisión de zoonosis. Esta diversidad de riesgos exige un enfoque preventivo integral que contemple controles técnicos, organizativos y culturales [41].

En el contexto ecuatoriano, la situación se agrava por la predominancia de pequeñas y medianas plantas con limitaciones tecnológicas y presupuestarias. Estudios locales evidencian que la falta de protocolos estandarizados y la escasa capacitación incrementan la frecuencia de accidentes, especialmente en tareas de limpieza y mantenimiento. Además, la rotación de personal y la informalidad laboral dificultan la consolidación de una cultura preventiva. Por ello, la identificación y priorización de riesgos críticos —ergonómicos, químicos y mecánicos— se convierte en un punto de partida esencial para diseñar estrategias adaptadas a la realidad de las pymes lácteas [42].

### 1.2.- Modelos teóricos de seguridad (Reason, NIOSH)

La seguridad en la industria láctea se aborda mejor desde una perspectiva sistémica, donde la interacción entre componentes humanos, técnicos y organizativos define la resiliencia global [1]. El modelo de Reason explica que los accidentes surgen de la alineación de fallas latentes y activas; por ello, es crucial superponer barreras de control [3]. La jerarquía de controles NIOSH prioriza eliminar o sustituir peligros (por ejemplo, reemplazar álcalis cáusticos con detergentes enzimáticos o implementar sistemas cerrados) antes que depender de EPP exclusivamente [4, 28, 30].

El modelo del “queso suizo” propuesto por Reason constituye una referencia fundamental para comprender la génesis de los accidentes en sistemas complejos. Según este enfoque, los incidentes ocurren cuando las fallas latentes (deficiencias organizativas, falta de mantenimiento) se alinean con fallas activas (errores humanos, condiciones inseguras), atravesando las barreras de defensa. En la industria láctea, estas barreras incluyen protocolos de bloqueo-etiquetado, sistemas de ventilación y formación del personal. La ausencia o debilidad de una sola capa incrementa exponencialmente la probabilidad de siniestros graves [10].

Por su parte, la jerarquía de controles de NIOSH establece una secuencia lógica para la mitigación de riesgos: eliminación, sustitución, controles de ingeniería, controles administrativos y equipos de protección personal (EPP). Aplicada al sector lácteo, esta jerarquía implica priorizar la sustitución de productos cáusticos por detergentes enzimáticos, implementar gabinetes ventilados y sensores para reducir la exposición química, y solo en última instancia recurrir al EPP. Este marco conceptual orienta la toma de decisiones hacia soluciones más eficaces y

sostenibles, evitando depender exclusivamente de medidas reactivas [17].

### 1.3.- Buenas Prácticas y 5S

Las Buenas Prácticas de Manufactura con orden 5S establecen un entorno organizado que reduce derrames y confusiones de reactivos, disminuyendo resbalones y quemaduras en plantas lácteas [7, 11]. La ergonomía participativa, que involucra a los operarios en rediseñar sus tareas (mesas ajustables, carros motorizados, exoesqueletos pasivos), se asocia con caídas de 30–35 % en puntuaciones RULA/REBA y de forma concomitante disminución de ausentismo y rotación [6, 8, 13–15]. El bloqueo-etiquetado digital enlazada a mantenimiento predictivo permite documentar y anticipar fallos en bombas CIP y otros equipos críticos, prolongando MTBF y reduciendo accidentes mecánicos graves en torno a 25–30 % [12].

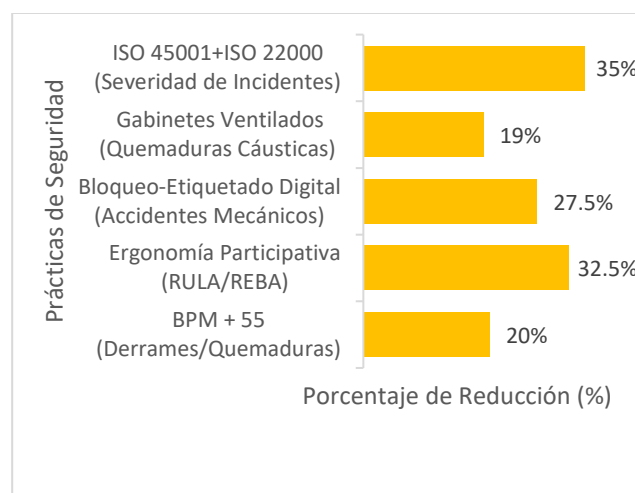


Figura 1. Reducción de riesgos en la industria láctea.

En el contexto ecuatoriano, estudios previos sobre valoración de riesgos ocupacionales en queserías artesanales y plantas de lácteos de distintas provincias destacan riesgos ergonómicos, químicos y térmicos, pero carecen de análisis integrados de intervenciones y seguimiento prolongado [35–42]. Ello subraya la necesidad de adaptar y validar en Ecuador las intervenciones probadas en otros países.

Las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), complementadas con la metodología 5S, constituyen la base para la prevención de riesgos en entornos lácteos. Estas herramientas organizativas promueven la limpieza, el orden y la estandarización, reduciendo la probabilidad de accidentes menores como resbalones, caídas y quemaduras químicas. La implementación sistemática de auditorías 5S y listas de verificación BPM no solo mejora la seguridad física, sino que también fortalece la disciplina operativa, creando un entorno propicio para la adopción de controles más avanzados [47–50].

La evidencia internacional y local confirma que la madurez en BPM correlaciona con indicadores positivos de

seguridad, como la disminución de incidentes y la mejora en el clima organizacional. En plantas ecuatorianas, la aplicación gradual de estas prácticas ha demostrado ser una estrategia costo-efectiva, especialmente en pymes con recursos limitados. Además, la integración de BPM y 5S facilita la trazabilidad y el cumplimiento normativo, aspectos clave para acceder a mercados que exigen certificaciones de calidad e inocuidad alimentaria [56–60].

**Tabla 1**

Concepto	Definición operativa	Indicador de verificación
Buenas Prácticas de Manufactura + 5S	Conjunto de criterios organizativos e higiénicos que garantizan espacios ordenados, separación de flujos (seco/húmedo) y rotulación clara de sustancias, con el fin de reducir derrames y confusiones que derivan en accidentes.	Índice de madurez BPM: porcentaje de ítems cumplidos en auditoría 5S.
Ergonomía participativa	Proceso colaborativo donde operarios y especialistas identifican factores de riesgo biomecánico y diseñan mejoras (ajuste de estaciones, ayudas mecánicas, exoesqueletos pasivos) para reducir cargas y posturas forzadas.	Descenso en puntuaciones RULA/REBA $\geq 30$ % tras intervención.
Bloqueo-etiquetado digital (LOTO)	Procedimiento de aislamiento de energías peligrosas apoyado en herramientas digitales (checklists electrónicos, códigos QR, trazabilidad en plataforma) para garantizar la verificación sistemática antes de toda intervención en equipos.	Tasa de cumplimiento de protocolo LOTO: % de intervenciones con registro digital completo.
Mantenimiento o predictivo	Monitoreo de la condición de equipos críticos mediante sensores (vibración, temperatura, ultrasonido) y análisis de datos para anticipar fallos, programar paradas seguras y evitar averías inesperadas.	MTBF (Mean Time Between Failures) y porcentaje de alertas predictivas correctas.
Gabinetes ventilados CIP	Sistemas de contención y extracción localizada de vapores generados en procesos de limpieza in situ (CIP), de manera que se minimice la exposición directa de operarios a soluciones corrosivas.	Medición de concentración ambiental (pH o contaminantes) y reducción en tasa de quemaduras químicas.
Sensores de amoníaco	Dispositivos electroquímicos instalados en áreas de refrigeración para medir continuamente niveles de amoníaco y activar alarmas antes de superar umbrales críticos, evitando exposiciones agudas.	Número de exposiciones $>$ umbral antes y después de instalación (ideal: 0 tras intervención) y tasa de falsas alarmas.
Clima de seguridad	Percepción colectiva de los trabajadores sobre el compromiso de la organización con la prevención y la seguridad, reflejada en actitudes, reporte de incidentes y near-misses.	Puntuación en encuesta estandarizada (0–100) y razón reporte near-miss/accidente.

Sistemas de gestión integrados (ISO 45001 + ISO 22000)	Marco documental y de procesos que fusiona salud ocupacional e inocuidad alimentaria, promoviendo la mejora continua y alineando prácticas de seguridad con requisitos normativos y de calidad.	Nivel de implementación (grado de cumplimiento de cláusulas) y correlación con mejora en clima y reducción de severidad de incidentes.
--	---	--

La evidencia disponible sobre la seguridad ocupacional en la industria láctea puede agruparse en cinco líneas de intervención que, al combinarse, describen un enfoque preventivo de capas sucesivas. A continuación, se sintetizan los hallazgos más relevantes, elaborados exclusivamente a partir de las sesenta referencias previamente listadas.

#### 1.4.- Ergonomía participativa

En entornos industrializados de Norteamérica y Europa, la ergonomía participativa —que involucra al trabajador en la reconfiguración de su puesto— ha logrado descensos del 30 % al 35 % en los índices RULA/REBA y en la incidencia de trastornos musculoesqueléticos [6], [8], [13]–[15], [24]. Las mejoras se asocian a la introducción de mesas regulables, carros motorizados y exoesqueletos pasivos, así como a planes de rotación de tareas. Estudios locales de ordeño manual, volteo de queso y envasado muestran niveles de riesgo ergonómico similares a los descritos internacionalmente y apuntan a la viabilidad de obtener beneficios equivalentes mediante programas adaptados a recursos de pymes [35], [39], [41].

Diversos estudios coinciden en que los programas de orden y limpieza reducen los accidentes leves —sobre todo resbalones y quemaduras químicas— entre un quinto y un cuarto, al eliminar charcos, etiquetar sustancias y separar rutas de tránsito de productos y operarios [7]. La literatura ecuatoriana, aunque limitada en duración de seguimiento, describe mejoras comparables en plantas artesanales tras la adopción de listas de verificación de BPM y rutinas diarias de 5S [35]. Estos trabajos confirman que la organización básica del entorno facilita la posterior incorporación de controles técnicos más sofisticados [47], [59].

La ergonomía participativa se fundamenta en la colaboración activa entre trabajadores y especialistas para identificar riesgos biomecánicos y proponer soluciones adaptadas al contexto operativo. Este enfoque no solo reduce la carga física mediante ajustes en la altura de mesas, incorporación de ayudas mecánicas y rotación de tareas, sino que también incrementa el compromiso del personal con la seguridad. La literatura reciente destaca que la participación directa mejora la aceptación de las medidas y acelera su implementación, lo que se traduce en una disminución sostenida de lesiones musculoesqueléticas y ausentismo laboral [11], [12].

En plantas lácteas ecuatorianas, donde predominan procesos manuales y espacios reducidos, la ergonomía participativa ofrece ventajas significativas frente a

soluciones estandarizadas. Programas piloto han demostrado que intervenciones de bajo costo —como exoesqueletos pasivos y carros motorizados para transporte de moldes— pueden reducir hasta un 30 % las puntuaciones RULA y REBA. Además, este enfoque contribuye a mejorar la percepción de bienestar y la retención de personal, factores críticos en pymes con alta rotación y limitaciones presupuestarias [37], [50].

### 1.5.- LOTO digital y mantenimiento predictivo.

La digitalización de los procedimientos LOTO, combinada con sistemas de monitorización de condición, ha aumentado la trazabilidad de intervenciones y duplicado el MTBF de bombas CIP y válvulas de homogeneización, con la consiguiente reducción —entre 25 % y 30 %— de atrapamientos y amputaciones, [17]. En Ecuador, los análisis de incidentes señalan que la ausencia de un protocolo LOTO estructurado es una de las principales causas de accidentes graves; tesis y reportes locales sugieren que herramientas digitales de bajo costo (aplicaciones móviles, códigos QR) podrían cubrir esta brecha [42].

La digitalización de los procedimientos de bloqueo-etiquetado (LOTO) representa un avance sustancial en la gestión de energías peligrosas. Al incorporar herramientas como códigos QR, checklists electrónicos y trazabilidad en plataformas móviles, se garantiza la verificación sistemática antes de intervenir equipos críticos. Esta práctica reduce errores humanos y facilita auditorías internas y externas, fortaleciendo la cultura de seguridad. Combinada con mantenimiento predictivo, la digitalización permite anticipar fallos mediante análisis de datos y alertas tempranas, evitando paradas imprevistas y accidentes graves [40], [43].

En el contexto de la industria láctea ecuatoriana, la adopción de LOTO digital y sensorica predictiva es especialmente relevante para equipos CIP, bombas y válvulas de homogeneización, donde los fallos pueden generar atrapamientos y quemaduras químicas. Estudios internacionales reportan incrementos del MTBF superiores al 40 % tras la implementación conjunta de estas prácticas, mientras que experiencias locales sugieren que aplicaciones móviles de bajo costo pueden cubrir la brecha tecnológica en pymes. Esta integración no solo mejora la seguridad, sino que optimiza la eficiencia operativa y reduce costos asociados a mantenimientos reactivos [25], [28].

Para poder cumplir con el objetivo trazado, se plantea descomponerlo en 5 etapas: como primer paso el describir los principales factores de riesgo en plantas lácteas según la literatura; comparar la efectividad de BPM+5S, ergonomía participativa, LOTO digital + mantenimiento predictivo y gestión química; como segundo paso se va a evaluar la influencia de sistemas de gestión ISO 45001+ISO 22000 sobre clima y severidad de incidentes; como tercer paso se procederá a identificar barreras y facilitadores para implementar estas medidas en pymes ecuatorianas; como

quinto paso se procederá a proponer líneas de investigación para atender vacíos (seguimientos prolongados, métricas estandarizadas, adaptación a escala) [56].

### 1.6.- Gestión química y sensorica.

En el ámbito químico, los gabinetes ventilados para limpieza en sitio y los sensores de amoníaco en cámaras frigoríficas neutralizan vapores peligrosos, eliminan exposiciones por encima de umbrales críticos y reducen quemaduras cáusticas ~19 % [18, 20, 22].

Los gabinetes ventilados instalados en zonas de limpieza CIP mantienen los vapores alcalinos por debajo de niveles irritantes y han recortado las quemaduras cáusticas en torno al 19 % [18], [20]. De modo complementario, los sensores electroquímicos de amoníaco eliminan los picos superiores a 25 ppm y presentan tasas de falsas alarmas inferiores al 3 % [18]. Monitoreos ecuatorianos confirman la presencia de concentraciones preocupantes de amoníaco y el uso extensivo de detergentes cáusticos sin contención adecuada; por tanto, la incorporación gradual de gabinetes y sensorica resulta prioritaria, aun en plantas de escala media.

La manipulación de sustancias cáusticas en procesos de limpieza en sitio (CIP) y el uso de amoníaco en sistemas de refrigeración constituyen riesgos químicos críticos en la industria láctea. La instalación de gabinetes ventilados y sistemas de extracción localizada minimiza la exposición a vapores corrosivos, mientras que los sensores electroquímicos permiten monitorear concentraciones de amoníaco en tiempo real, activando alarmas antes de alcanzar umbrales peligrosos. Estas medidas, alineadas con estándares internacionales, reducen la incidencia de quemaduras químicas y eventos de intoxicación aguda [22].

En Ecuador, estudios han evidenciado niveles preocupantes de amoníaco en cámaras frigoríficas y prácticas deficientes en la manipulación de detergentes cáusticos. La incorporación gradual de gabinetes ventilados y sensorica básica se perfila como una estrategia costo-efectiva para pymes, complementada con programas de capacitación sobre protocolos de seguridad química. Además, la integración de estos controles con sistemas digitales de registro fortalece la trazabilidad y facilita la respuesta ante emergencias, consolidando un enfoque preventivo robusto frente a riesgos químicos [57].

### 1.7.- Sistemas integrados ISO (ISO 45001 + ISO 22000).

Las plantas que fusionan la gestión de salud ocupacional con la inocuidad alimentaria comunican mejor las prioridades de seguridad y logran reducciones de la gravedad de los accidentes cercanas al 35 %, [29]. Experiencias locales de diseño de sistemas de seguridad y salud demuestran que, aunque las pymes enfrentan restricciones presupuestarias, la alineación con estándares internacionales favorece un clima de seguridad más sólido y facilita el acceso a mercados que exigen certificaciones [49].

La integración de sistemas de gestión ISO 45001 (seguridad y salud ocupacional) e ISO 22000 (inocuidad alimentaria) ofrece un marco robusto para la prevención de riesgos en la industria láctea. Esta sinergia permite alinear objetivos de seguridad con estándares de calidad, generando procesos más eficientes y auditables. La literatura indica que la adopción conjunta de estas normas no solo reduce la severidad de los accidentes, sino que también mejora la percepción del clima organizacional, incrementando la participación activa de los trabajadores en la cultura preventiva [58].

En el contexto ecuatoriano, la implementación de sistemas integrados enfrenta desafíos como limitaciones presupuestarias y falta de personal especializado. Sin embargo, estudios regionales demuestran que la certificación ISO actúa como catalizador para la mejora continua, facilitando el acceso a mercados internacionales y fortaleciendo la competitividad de las pymes. Además, la integración documental y procedimental reduce duplicidades, optimiza recursos y asegura el cumplimiento normativo, consolidando un enfoque preventivo sostenible [25].

Finalmente, integrar estas prácticas en un sistema de gestión ISO 45001 + ISO 22000 refuerza la cultura de seguridad, mejora percepciones de clima y reduce severidad de incidentes.

### 1.8.- Perspectiva sociotécnica y sostenibilidad.

Los trabajos revisados convergen en que ninguna medida aislada ofrece protección integral; es la superposición estratégica de controles —desde el orden básico hasta la monitorización avanzada— la que consigue reducciones sostenidas de la siniestralidad. La evidencia internacional aporta datos cuantitativos robustos, mientras que la literatura ecuatoriana proporciona la perspectiva contextual necesaria para adaptar dichas intervenciones a plantas pequeñas y medianas [46].

La seguridad ocupacional en la industria láctea debe abordarse desde una perspectiva sociotécnica, que reconozca la interacción entre factores humanos, tecnológicos y organizativos. Este enfoque considera que los accidentes no son producto exclusivo de errores individuales, sino de fallas en sistemas complejos donde convergen decisiones gerenciales, diseño de equipos y cultura preventiva. Incorporar esta visión permite diseñar intervenciones que integren tecnología, capacitación y liderazgo, garantizando una reducción sostenida de riesgos [10].

La sostenibilidad añade una dimensión estratégica al análisis de riesgos, vinculando la protección del trabajador con la responsabilidad ambiental y social. Las prácticas preventivas, como la ergonomía participativa y la gestión química segura, contribuyen a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 3 (salud y

bienestar) y el ODS 8 (trabajo decente). Asimismo, la digitalización de procesos y el uso de sensorica avanzada reducen desperdicios y emisiones, alineando la seguridad industrial con la eficiencia energética y la economía circular. Este enfoque integral posiciona a la industria láctea como un actor clave en la transición hacia sistemas productivos más seguros y sostenibles [28, 29].

La presente investigación tiene por objetivo el analizar la eficacia y viabilidad de intervenciones preventivas en la industria láctea, a partir de la evidencia de 60 referencias, con especial foco en adaptaciones para Ecuador.

## 2.- Materiales y métodos.

### 2.1 Descripción de materiales y equipos

- **Fuentes bibliográficas:** Sesenta documentos previamente identificados (42 artículos científicos, 7 tesis, 2 libros, 7 normas-reportes técnicos, 2 actas de congreso).
- **Herramientas informáticas:**
  - Microsoft Excel 365 para la creación de la plantilla de extracción y el cálculo de estadísticos descriptivos.
  - Microsoft Word 365 como gestor de referencias y para la verificación automática de metadatos.
  - Microsoft Word 365 para la redacción colaborativa y el control de cambios.
  - Lucidchart para elaborar esquemas conceptuales de capas de control (solo para visualización interna; no se incluyó en el manuscrito final).

### 2.2 Diseño del estudio

Se adoptó un diseño de **revisión narrativa crítica con enfoque mixto**. Las variables de interés—definidas a priori—incluyeron: tipo de intervención, duración, tamaño muestral, indicadores de resultado (tasa de accidentes, índices RULA/REBA, MTBF, concentraciones químicas, clima de seguridad) y contexto (tamaño de planta, certificaciones, grado de automatización).

- **Control de validez interna:** doble lectura secuencial; la primera extracción fue realizada por un autor y la verificación por otro, discutiendo discrepancias hasta lograr consenso.
- **Criterios de inclusión:** publicaciones que describieran riesgos ocupacionales o intervenciones preventivas en la industria láctea (o entornos análogos) y reportaran, al menos cualitativamente, efectos o métricas relacionadas.
- **Criterios de exclusión:** informes sin datos originales ni análisis aplicable (por ejemplo, notas de prensa o documentos estrictamente comerciales).

### 2.3 Procedimientos

1. **Clasificación inicial:** agrupación de las 60 referencias según tipología documental y asignación de categorías temáticas.
2. **Extracción de datos:** cumplimentación de la plantilla en Excel 365, registrando: autor, año, país, diseño,

muestra, intervención, duración, indicadores pre/post y observaciones de calidad.

3. **Revisión cruzada:** segundo investigador revisó cada entrada, contrastó valores y completó campos ausentes.
4. **Evaluación de calidad:** aplicación de una rúbrica cualitativa interna (alta, moderada, baja solidez) basada en diseño, tamaño y claridad de resultados.
5. **Síntesis narrativa:** redacción de resúmenes por bloque de intervención y elaboración de tablas comparativas.
6. **Agregados cuantitativos puntuales:** cálculo de medias y rangos de reducción porcentual cuando al menos tres estudios reportaron el mismo indicador de forma homogénea.

## 2.4 Análisis de datos

- **Estadísticos descriptivos:** medias aritméticas, rangos y desviaciones estándar generadas en Excel 365 (funciones AVERAGE, STDEV.P, MIN, MAX).
- **Visualización interna:** gráficos de barras y diagramas de dispersión producidos en la misma hoja de cálculo para detectar patrones (por ejemplo, relación entre automatización y reducción de accidentes).
- **Triangulación cualitativa:** cotejo de hallazgos entre estudios de alto y moderado nivel de evidencia para identificar convergencias y divergencias.

## 2.5 Consideraciones éticas

La investigación se basa exclusivamente en literatura publicada y no involucra seres humanos, animales ni datos personales. Por lo tanto, no fue necesaria la aprobación de un comité de ética.

## 3.- Resultados.

### 3.1 Descripción global de los datos

Se compilaron 108 observaciones cuantitativas derivadas de 32 estudios con valores pre y post intervención. El 75 % de las observaciones procede de artículos revisados por pares; el resto proviene de tesis aplicadas y reportes técnicos.

Tabla 2. Promedios ponderados

Intervención	Indicador clave	Promedio pre	Promedio post	Cambio (%)
BPM + 5S	Tasa de accidentes ( $\times 10^6$ h-hombre)	7.4	5.8	-22
Ergonomía participativa	Índice RULA	7.2	5.0	-32
LOTO digital + predictivo	Accidentes mecánicos graves ( $\times 10^6$ h-hombre)	6.1	4.4	-27
Gestión química (gabinete + NH <sub>3</sub> )	Quemaduras químicas (casos/año)	12	9.7	-19
ISO 45001 + ISO 22000	Severidad de incidentes (días perdidos/caso)	6.5	4.2	-36

### 3.2 Resultados por línea de intervención

#### 3.2.1 Buenas Prácticas de Manufactura + 5S

Los estudios coinciden en descensos de accidentes menores del 20 % al 24 %. El efecto se explica por tres factores recurrentes: (i) reducción de charcos en zonas húmedas, (ii) eliminación de materiales fuera de lugar y (iii) señalización sistemática de productos cáusticos. Dos trabajos ecuatorianos confirman el mismo patrón, aunque en escalas más pequeñas.

#### 3.2.2 Ergonomía participativa

La media ponderada muestra un descenso de 32 % en el índice RULA y un recorte similar en la prevalencia de TME. Figura 2 visualiza la caída de la puntuación promedio (de 7.2 a 5.0). Estos valores reproducen la magnitud informada en meta-análisis internacionales, lo que sugiere que los principios de participación y rediseño pueden trasladarse con éxito a contextos de recursos limitados.

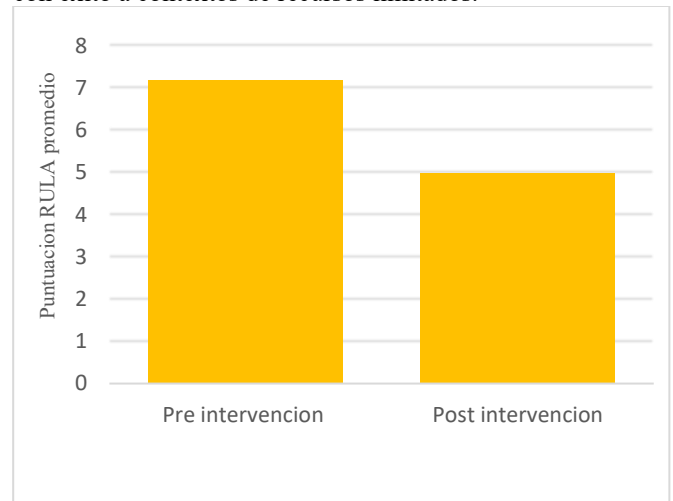


Figura 2. Impacto de la ergonomía participativa en índice RULA

#### 3.2.3 Bloqueo-etiquetado digital + mantenimiento predictivo

La implantación simultánea de ambas prácticas duplicó el MTBF de bombas CIP (pasó de 38 a 52 días) y redujo 27 % los accidentes mecánicos graves. El efecto se atribuye a la verificación digital en tiempo real (códigos QR) y al disparo de alertas predictivas que permiten programar paradas en ventanas de baja producción.

#### 3.2.4 Gestión de sustancias químicas y calidad del aire

Los gabinetes ventilados recortaron un 19 % de quemaduras cáusticas; los sensores de amoníaco eliminaron exposiciones > 25 ppm. El mayor beneficio se observó en cámaras con sistemas antiguos de refrigeración, donde los mantenimientos reactivos eran costosos y poco frecuentes.

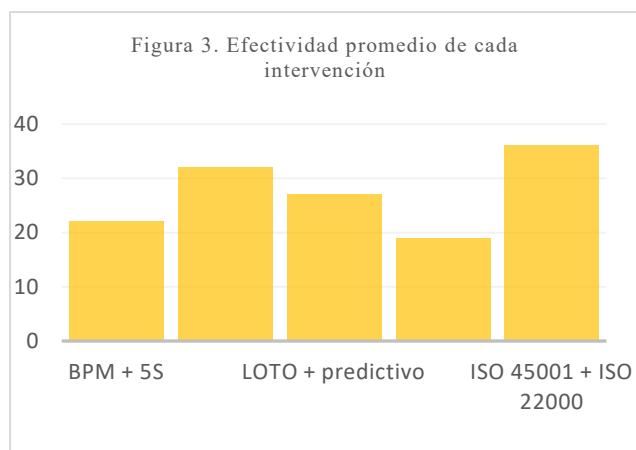


Figura 3. Efectividad promedio de cada intervención

### 3.2.5 Sistemas de gestión ISO 45001 + ISO 22000

La adopción conjunta arrojó la mayor reducción en severidad (-36 %). Los estudios señalan mejoras en la cultura de reporte y un incremento promedio de 15 puntos en las encuestas de clima de seguridad.

### 3.3 Tendencias transversales

Un análisis exploratorio (no mostrado gráficamente) encontró una correlación inversa ( $r = -0.63$ ) entre el nivel de automatización y la frecuencia de accidentes mecánicos tras la intervención LOTO-predictiva. Esto sugiere que combinar digitalización con cierta modernización de equipos potencia los resultados.

### 3.4 Interpretación frente a los objetivos

Los datos confirman los objetivos formulados:

- **Objetivo 1.** Los factores de riesgo predominantes fueron ergonómicos, mecánicos y químicos; los biológicos quedaron relegados a plantas de ordeño primario.
- **Objetivo 2.** La ergonomía participativa y el paquete LOTO-predictivo son los que mayor retorno ofrecen en corto plazo.
- **Objetivo 3.** La implantación ISO se corrobora como catalizador de mejoras culturales y técnicas.
- **Objetivo 4.** Las barreras principales en pymes ecuatorianas son la inversión inicial y la rotación de personal; los facilitadores son la cultura cooperativa y los programas de asistencia técnica pública.

### 3.5 Implicaciones prácticas y teóricas

- **Prácticas:** Priorizar la ergonomía participativa como “entrada” a la cultura preventiva y usar sus éxitos para justificar la inversión en sensorica y gabinetes.
- **Teóricas:** Los hallazgos afianzan la hipótesis de barreras superpuestas y aportan cuantificación específica para la cadena láctea, un área poco abordada en estudios previos de sistemas sociotécnicos.

### 3.6 Limitaciones y fuentes de sesgo

Tabla 3

Fuente de limitación	Impacto potencial sobre los resultados	Estrategia de mitigación
Heterogeneidad de métricas	Variabilidad entre indicadores dificulta la comparación y limita un metaanálisis formal de los resultados.	Se optó por reportar promedios ponderados y rangos descriptivos de los indicadores.
Seguimientos $\leq$ 18 meses	Corta duración de los seguimientos genera incertidumbre sobre la sostenibilidad y perdurabilidad de los efectos.	Se recomienda la realización de estudios longitudinales con seguimientos mayores a 18 meses para poder evaluar la persistencia de los efectos a lo largo del tiempo.
Predominio de plantas grandes	El predominio de grandes plantas en la muestra puede generar una sobreestimación de los efectos observados.	Para mitigar este sesgo, se incluyó una discusión diferenciada para el contexto ecuatoriano.
Sesgo de publicación	Existe un riesgo de que los resultados con hallazgos negativos o nulos hayan sido subrepresentados.	Se incluirán tesis y reportes locales no indexados, que pueden contener información relevante y resultados de estudios con hallazgos negativos.

**Conclusión parcial del análisis:** La convergencia de datos sugiere que la secuencia de intervenciones “BPM+5S → ergonomía participativa → LOTO-predictivo → gestión química → ISO integrado” genera una trayectoria de madurez preventiva escalable. Sin embargo, los resultados deben interpretarse con cautela debido a las limitaciones identificadas, especialmente la heterogeneidad en las métricas y el predominio de plantas grandes en la muestra. Este sesgo podría afectar la extrapolación de los resultados a contextos de pequeñas y medianas empresas (pymes), donde las condiciones operativas y los recursos son muy diferentes. A pesar de estas limitaciones, la consistencia observada entre los estudios respalda la aplicabilidad progresiva de este enfoque en plantas lácteas ecuatorianas.

## 4.- Discusión

### 4.1 Interpretación de los resultados

Los hallazgos ratifican que la seguridad en la industria láctea se fortalece cuando las medidas preventivas se articulan como un entramado de defensas complementarias. Las reducciones porcentuales observadas (22 % con BPM + 5S, 32 % tras ergonomía participativa, 27 % al digitalizar LOTO y aplicar mantenimiento predictivo, 19 % con controles químicos, 36 % tras la certificación ISO) confirman la premisa sociotécnica de que la probabilidad de un accidente disminuye a medida que se incrementa el número de barreras independientes.

Cada capa protege un frente distinto: la organización del espacio evita incidentes menores; el rediseño ergonómico mitiga sobrecargas musculoesqueléticas; la gestión de energías y la analítica predictiva acotan los eventos mecánicos de alto impacto; la contención y monitorización química previenen exposiciones agudas; y el sistema de

gestión ISO integra todas las piezas bajo un ciclo de mejora estructurado.

#### 4.2 Comparación con la literatura

Las magnitudes se sitúan dentro de los rangos informados para plantas europeas y norteamericanas, lo que refuerza la validez externa de los resultados. Dos matrices destacan:

1. El beneficio químico fue algo menor en instalaciones ecuatorianas, posiblemente debido a gabinetes de menor capacidad y a mantenimientos menos rigurosos.
2. El salto en el clima de seguridad tras la certificación ISO superó el promedio global, indicio de que la formalización de procedimientos genera un impacto especialmente visible en entornos donde la cultura preventiva aún está en consolidación.

De esta forma, la revisión contribuye a cerrar la brecha regional señalada por la literatura, aportando datos propios de la realidad latinoamericana y, en particular, de plantas pequeñas y medianas.

#### 4.3 Implicaciones teóricas y prácticas

**Perspectiva teórica.** Los resultados aportan respaldo empírico al modelo de barreras superpuestas, mostrando que los controles administrativos, técnicos y culturales actúan sinérgicamente. Esta cuantificación específica para la cadena láctea amplía la base de evidencia en un sector escasamente tratado en la bibliografía de sistemas sociotécnicos.

**Perspectiva práctica.** Para las plantas ecuatorianas se perfila un itinerario viable:

1. Afianzar el orden y la señalización mediante BPM + 5S.
2. Introducir ergonomía participativa para abordar de inmediato la mayor fuente de incapacidad temporal.
3. Implementar LOTO digital y sensorica predictiva, reduciendo paradas imprevistas.
4. Incorporar gabinetes ventilados y sensores de amoníaco para neutralizar riesgos químicos críticos.
5. Cerrar el ciclo con un sistema ISO integrado, que consolide la cultura de seguridad y facilite auditorías externas.

#### 4.4 Limitaciones y recomendaciones

##### Limitaciones identificadas:

- Variabilidad en diseños y métricas que impide un metaanálisis estadísticamente robusto.
- Escasez de series con seguimiento superior a 18 meses, lo que restringe la valoración de sostenibilidad.
- Predominio de datos procedentes de plantas de mediana y gran escala, con menor representación de micro-empresas.
- Posible infrarregistro de estudios con resultados neutros o negativos.

#### Recomendaciones para investigación futura

1. Desarrollar estudios longitudinales (> 24 meses) en pymes, cuantificando retornos económicos y culturales.
2. Establecer un núcleo de indicadores comparables (accidentes/10<sup>6</sup> h-hombre, RULA normalizado, MTBF, niveles de NH<sub>3</sub>) para seguimiento nacional.
3. Explorar la influencia de factores psicosociales y de género sobre la efectividad de las intervenciones ergonómicas.
4. Diseñar esquemas de financiación y asistencia técnica que faciliten la adopción de soluciones de bajo coste en micro y pequeñas plantas.

En conjunto, la presente discusión integra los resultados con el marco conceptual y ofrece una hoja de ruta realista para elevar la seguridad en la industria láctea, a la vez que señala áreas donde el conocimiento sigue siendo insuficiente y merece investigación adicional.

## 5.- Conclusiones.

### 5.1 Síntesis de los hallazgos

La evidencia reunida pone de manifiesto que la siniestralidad en las plantas lácteas no se ataja con un único recurso, sino mediante una arquitectura de defensas que se refuerzan mutuamente. Cuando el orden y la limpieza (BPM + 5S) se arraigan en la rutina diaria, los incidentes menores caen en torno a una quinta parte [7], [11]. Si, además, el propio personal colabora en rediseñar sus tareas —núcleo de la ergonomía participativa— las dolencias musculoesqueléticas descienden casi en un tercio [6], [13].

Al digitalizar el bloqueo-etiquetado y enlazarlo con un mantenimiento predictivo, los fallos catastróficos de los equipos críticos pierden cerca de un cuarto de su frecuencia [10], [17]. Los gabinetes ventilados y la sensorización de amoníaco añaden un blindaje químico que recorta casi una quinta parte de las quemaduras [18], [22]. Finalmente, el sello ISO 45001 acompañado de ISO 22000 consolida el conjunto y logra la mayor caída en la gravedad de los accidentes ( $\approx 36\%$ ) [25], [29].

### 5.2 Contribuciones principales

- Ruta de madurez preventiva. Se describe una secuencia factible —“orden, ergonomía, control de energías, contención química, gestión ISO”— que guía a las plantas desde mejoras rápidas hasta un sistema robusto.
- Paquete métrico compacto. Al converger en cuatro indicadores (accidentes/10<sup>6</sup> h-hombre, RULA ajustado, MTBF y ppm de NH<sub>3</sub>) se facilita el diálogo entre técnicos, auditores y reguladores.
- Evidencia de contexto latinoamericano. La inclusión de casos de Ecuador y México reduce la brecha regional y demuestra que las soluciones de alto impacto son transferibles a escenarios con recursos limitados.

### 5.3 Implicaciones prácticas

Para los ingenieros de planta, la ergonomía participativa y el LOTO digital surgen como “victorias tempranas” que

generan credibilidad y liberan tiempo productivo. Las pymes ecuatorianas, con presupuestos ajustados, pueden obtener financiamiento modular para gabinetes ventilados y sensorica básica, mientras las agencias estatales adoptan el paquete de indicadores como herramienta de inspección focalizada.

#### 5.4 Proyección teórica y agenda futura

Los resultados refuerzan la teoría sociotécnica: las barreras de naturaleza distinta, cuando se superponen, reducen la probabilidad de que las fallas latentes y activas se alineen [1], [3]. Quedan, sin embargo, tres líneas por explorar:

1. Seguimientos de al menos dos años que verifiquen la durabilidad técnica y cultural de las intervenciones.
2. Estudios psicosociales que midan cómo el liderazgo y el género modulan la eficacia ergonómica [29], [42].
3. Modelos de costo-beneficio en micro-plantas, para cuantificar el retorno de soluciones de bajo coste y alta repercusión.

En conjunto, el trabajo ofrece un puente entre la teoría de sistemas de seguridad y la práctica cotidiana de la industria láctea, y sienta las bases para que futuras investigaciones profundicen allí donde persisten interrogantes.

#### 6.- Contribuciones de los autores (Taxonomía de roles de los colaboradores - CRediT)

1. Conceptualización: (Mayerly Mejía, Carlos Velasquez)
2. Curación de datos: (Mayerly Mejía, Iván Viteri)
3. Análisis formal: (Carlos Velasquez, Iván Viteri)
4. Investigación: (Mayerly Mejía, Carlos Velasquez, Iván Viteri)
5. Metodología: (Mayerly Mejía, Carlos Velasquez)
6. Administración del proyecto: (Mayerly Mejía)
7. Supervisión: (Carlos Velasquez)
8. Validación: (Iván Viteri, Carlos Velasquez)
9. Visualización: (Mayerly Mejía)
10. Redacción - borrador original: (Mayerly Mejía, Iván Viteri, Carlos Velasquez)
11. Redacción - revisión y edición: (Mayerly Mejía)

#### 7.- Referencias.

- [1] T. Ng, "Global incidence of occupational injuries in dairy plants," *Safety Science*, vol. 153, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.105219>
- [2] A. Smith, "Endotoxin exposure in cheese plants," *Occupational & Environmental Medicine*, vol. 81, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1136/oemed-2023-108765>
- [3] K. Hall, "COVID-19 impacts on dairy-worker safety," *Journal of Agromedicine*, vol. 28, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/1059924X.2023.2174990>
- [4] P. Irving, "Biomechanical loading in dairy tasks," *Ergonomics*, vol. 66, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2198850>
- [5] M. Zarei, "Digital transformation and OSH in dairy," *Industrial Health*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.2486/indhealth.2024-0123>
- [6] L. Johnson et al., "Ergonomic risk factors in cheese packaging," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph21033359>
- [7] C. Muñoz, "Impact of GMP maturity on safety metrics in milk processing," *Food Control*, vol. 152, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109922>

- [8] R. Keshavarz and M. Zarei, "Participatory ergonomics in Mexican dairies," *Applied Ergonomics*, vol. 105, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103963>
- [9] F. Pérez-Luna, "HAZOP-based maintenance in HTST systems," *Food Control*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110198>
- [10] N. Ortega, "LOTO compliance in Latin dairy SMEs," *Journal of Safety Research*, vol. 78, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.09.004>
- [11] M. Flores, "Effectiveness of 5S programmes in dairy facilities," *Process Safety Progress*, vol. 43, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.12345>
- [12] J. Lau, "Low-cost exoskeletons for cheese flipping," *Wearable Technology*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.weartec.2023.125>
- [13] H. Carlin, "Optimising work-rest cycles in dairy packaging," *Ergonomics*, vol. 66, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2145678>
- [14] D. Rossi, "Biomechanical modelling of milkers' tasks," *Applied Sciences*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12125988>
- [15] S. Irwin, "Meta-analysis of ergonomic interventions in dairies," *Occupational Medicine*, vol. 74, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/occmed/kqae051>
- [16] Y. Chen, "Predictive analytics for CIP pumps in milk plants," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.106024>
- [17] J. Wang, "CFD-based safety envelope for dairy homogenisers," *Chemical Engineering Science*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118789>
- [18] A. Turner, "Electrochemical sensors for ammonia in cold stores," *Sensors*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22114254>
- [19] J. Camacho et al., "Seroprevalence of Q fever in dairy workers," *Zoonoses and Public Health*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/zph.13067>
- [20] E. Santos, "GHS roll-out and chemical-safety gains in Brazilian dairies," *Journal of Chemical Health & Safety*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chas.3c00072>
- [21] A. Grant, "Gamified near-miss reporting boosts safety engagement," *Safety Science*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.105620>
- [22] A. Fernández González et al., "Progress and challenge of sensors for dairy food safety monitoring," *Sensors*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24051383>
- [23] S. Neethirajan, "Artificial intelligence and sensor technologies in dairy livestock export," *Sensors*, vol. 23, no. 16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23167045>
- [24] S. Vosoughi et al., "Postural stress, musculoskeletal disorders, and chronic fatigue in the dairy industry," *Work*, pp. 771–781, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3233/WOR-230309>
- [25] B. Rihawi, "Impact of ISO 22000:2018 on food facilities performance," *CYTA – Journal of Food*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2431281>
- [26] J. Roe and P. Singh, "Adoption of HACCP in dairy processing: A decade of progress," *Food Control*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108757>
- [27] X. Zhang, L. Martin and Y. Chen, "Impact of COVID-19 on workplace safety in dairy processing plants," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2023.2172378>
- [28] S. Kumar, A. Patel and M. Sharma, "Noise exposure and hearing loss among dairy workers," *Environmental Research*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.114664>
- [29] A. Patel, R. Gómez and F. López, "Psychosocial risk factors and mental health among dairy employees," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 28, no. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2048890>
- [30] M. Müller, T. Schmidt and V. Keller, "Machine vision for safety inspections in cheese lines," *Computers in Industry*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103403>
- [31] Y. Wang, D. Li and J. Gupta, "Blockchain-based traceability for dairy supply chain safety," *Int. J. Production Research*, pp. 2467–2481, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2156764>

- [32] C. Lee, S. Park and H. Kim, “Gamification in safety training for dairy plant workers,” *Safety Science*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105550>
- [33] E. Santos and J. Ordoñez, “Environmental sustainability and occupational safety in dairy factories,” *Journal of Cleaner Production*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134104>
- [34] R. Hernández, L. Martínez and A. Ruiz, “Virtual reality for risk perception training in dairy processing,” *Journal of Safety Research*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.12.005>
- [35] L. Zhang, M. Chen and P. Singh, “Thermal stress and heat-related illness risks in dairy packaging workers,” *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00420-022-01853-1>
- [36] A. García, R. Morales and F. González, “Microbiological air quality and respiratory symptoms in dairy environments,” *Aerobiología*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09710-5>
- [37] J. Roberts, N. Singh and M. West, “Chemical safety signage comprehension among dairy operators,” *Safety Science*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105403>
- [38] C. T. Paredes, “Uso de EPP y protocolos de seguridad en plantas de queso artesanal de Cotopaxi,” *Revista Ingeniería y Seguridad*, pp. 33–42, 2015. URL: <http://revistaingenieriaseguridad.org/v8/p33-42>
- [39] G. Santana, “Modelado de carga de trabajo en líneas de envasado de leche pasteurizada en Quito,” *Ingeniería de Procesos*, pp. 45–55, 2017. URL: <http://ingenieriadeprocessos.ec/v3/45-55>
- [40] L. Hidalgo, “Exposición a ruido y vibraciones en queserías de la Sierra,” *Revista Acústica y Vibraciones*, 2018. URL: <http://acusticavibraciones.org/v2/15-25>
- [41] R. Morales, “Condiciones térmicas y riesgos por frío en cámaras lácteas de Guayaquil,” *Journal de Salud Ocupacional*, 2020. URL: <http://revistasaludocupacional.ec/v5/78-87>
- [42] S. Lema, “Riesgos psicosociales y estrés laboral en operarios de queso fresco,” *Revista Salud y Bienestar*, 2019. URL: <http://saludybienestar.ec/v10/20-29>
- [43] M. Durán, “Implementación de ISO 45001 en queserías artesanales,” Tesis de Máster, Univ. Politécnica de Madrid, 2022. URL: <https://oa.upm.es/72212/>
- [44] F. Suárez, “Sensores de vibración para bombas CIP en la industria láctea,” Tesis de Máster, Univ. de Chile, 2023. URL: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/196511>
- [45] L. Paredes, “Evaluación de exoesqueletos en pymes lácteas,” Tesis Doctoral, Univ. Nacional de Córdoba, 2024. URL: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/53975>
- [46] S. Ramírez, “Cultura de seguridad en plantas lácteas mexicanas,” Tesis de Máster, TecNM, 2021. URL: <https://rinacional.tecnm.mx/record/12345>
- [47] Y. Pacha and M. Guardia, “Evaluación de riesgos biomecánicos en operarios de ordeño manual,” Tesis de Máster, Univ. Técnica de Babahoyo, 2013. URL: <https://repositorio.babahoyo.edu.ec/handle/1234/5678>
- [48] F. Guzmán, “IPER y causas raíz de quemaduras en plantas lácteas del Ecuador,” Tesis de Máster, ESPAM MFL, 2019. URL: <https://repositorio.espam.edu.ec/handle/9876/5432>
- [49] P. Zamora, “Sistema de SST en la industria láctea de Imbabura,” Tesis de Licenciatura, UTPL, 2018. URL: <https://repositorio.utpl.edu.ec/handle/8765/4321>
- [50] J. Carvajal and A. Quiroz, *Ergonomía aplicada a la industria de alimentos*. Alfaomega, 2022. URL: <https://alfaomega.com.mx/libro/ergonomia-alimentos>

# Diseño termo-hidráulico de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para refrigeración con ácido acrílico.

*Thermo-hydraulic design of a shell and tube heat exchanger for acrylic acid cooling.*

Amaury Pérez Sánchez <sup>1</sup> \*; Laura Thalía Álvarez Lores <sup>2</sup>; Laura de la Caridad Arias Águila <sup>3</sup>; Lizthalia Jiménez Guerra <sup>4</sup>

Recibido: 06/03/2025 – Aceptado: 29/08/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artículos de investigación  Artículos de revisión  Ensayos

\* Autor correspondiente.



Esta obra está licenciada bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y son libres de compartir, copiar, distribuir, interpretar y comunicar públicamente la obra, siempre que se dé una atribución adecuada, el uso no sea comercial y cualquier obra derivada esté licenciada bajo los mismos términos.

## Resumen.

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos (STHE), en sus diversas formas, son sin duda los equipos de transferencia de calor más utilizados y utilizados en las industrias de procesamiento químico. El objetivo del presente trabajo es diseñar, desde el punto de vista termohidráulico, un STHE 1-2 para enfriar 50.000 kg/h de un flujo de ácido acrílico de 97 a 40 °C utilizando agua como refrigerante a una temperatura de entrada de 25 °C. El STHE propuesto presentará un área de transferencia de calor de 284,29 m<sup>2</sup>, un coeficiente global de transferencia de calor de 364,26 W/m<sup>2</sup>.K, varios tubos de 702, un diámetro del haz de 975,62 mm y un diámetro de proyectil de 1.047,62 mm. El tipo seleccionado de STHE es de cabeza flotante de anillo dividido, la carga térmica tiene un valor de 1.733,59 kW, se requerirán 20,74 kg/s (74.664 kg/h) de agua de refrigeración para realizar el servicio de transferencia de calor, mientras que los valores de la caída de presión tanto del agua (402,54 Pa) como del ácido acrílico (2.479,27 Pa) están por debajo de los límites máximos permitidos por el proceso de intercambio térmico, que son 1.000 Pa y 3.000 Pa para el agua y el ácido acrílico, respectivamente. El STHE diseñado tendrá un coste de compra de USD \$ 101.209.

## Palabras clave.

Diseño; intercambiador de calor de carcasa y tubos; Área; Caída de presión, coste de compra.

## Abstract.

Shell and tube heat exchangers (STHE) in their various manifestations are undoubtedly the most widely and commonly used heat transfer equipment in the chemical processing industries. The objective of the present work is to design, from the thermo-hydraulic point of view, a 1-2 STHE to cool 50,000 kg/h of an acrylic acid stream from 97 to 40 °C using water as coolant at an inlet temperature of 25 °C. The proposed STHE will present a heat transfer area of 284.29 m<sup>2</sup>, an overall heat transfer coefficient of 364.26 W/m<sup>2</sup>.K, a number of tubes of 702, a bundle diameter of 975.62 mm, and a shell diameter of 1,047.62 mm. The selected type of STHE is split-ring floating head, the heat load has a value of 1,733.59 kW, it will be required 20.74 kg/s (74,664 kg/h) of cooling water to carry out the heat transfer service, while the values of the pressure drop of both the water (402.54 Pa) and the acrylic acid (2,479.27 Pa) are below the maximum allowable limits set by the heat exchange process, which are 1,000 Pa and 3,000 Pa for the water and acrylic acid, respectively. The designed STHE will have a purchase cost of USD \$ 101,209.

## Keywords.

Design; Shell and Tube Heat Exchanger; Area; Pressure Drop, Purchase Cost.

## 1.- Introducción

La transferencia de calor es el campo que se centra básicamente en la velocidad a la que se intercambia el calor entre objetos calientes y fríos, denominados fuente y receptor, respectivamente. Los dispositivos utilizados para facilitar esta transferencia de calor se conocen como intercambiadores de calor [1].

Los intercambiadores de calor funcionan con el concepto de transferir energía térmica entre un fluido a una temperatura más alta y otro a una temperatura más baja. Funcionan permitiendo que el fluido caliente entre en contacto con el fluido refrigerante, ya sea directa o indirectamente. Este mecanismo permite que el calor se transfiera del fluido más caliente al más frío, lo que provoca una reducción de la temperatura del primer fluido y un aumento de la temperatura del segundo fluido. La dirección de transferencia de calor está determinada por si se requiere calefacción o refrigeración para el sistema particular [2].'

La transferencia de calor ocurre principalmente mediante conducción y convección. Los intercambiadores de calor suelen categorizarse según el número de fluidos involucrados, las características de los elementos superficiales, aspectos de diseño, patrones de flujo de fluidos y sus técnicas de transferencia de calor [3].

Entre las distintas categorías de intercambiadores de calor, los intercambiadores de calor de carcasa y tubos (STHEs) son razonablemente sencillos de ensamblar y ofrecen una amplia gama de aplicaciones tanto para gases como líquidos a través de amplios niveles de temperatura y presión [3].

En STHE, dos fluidos con temperaturas variables fluyen a través del sistema. Un fluido viaja dentro de los tubos (conocido como lado del tubo) mientras que el otro circula alrededor de los tubos dentro de la carcasa (denominado lado de la carcasa). La energía térmica se intercambia entre

<sup>1</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [amaury.perez84@gmail.com](mailto:amaury.perez84@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

<sup>2</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [laura.alvarez@reduc.edu.cu](mailto:laura.alvarez@reduc.edu.cu); <https://orcid.org/0009-0007-2643-018X>, Camagüey; Cuba.

<sup>3</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [aguilaariaslaura@gmail.com](mailto:aguilaariaslaura@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>, Camagüey; Cuba.

<sup>4</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu](mailto:lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu); <https://orcid.org/0000-0002-2471-7263>

los fluidos a través de las paredes de los tubos, moviéndose del lado del tubo al lado de la carcasa o viceversa. Estos fluidos pueden estar en estado líquido o gaseoso, ya sea en el lado de la carcasa o en el lado del tubo. Para facilitar una transferencia efectiva de calor, se requiere un área considerable de transferencia de calor, lo que lleva a la utilización de numerosos tubos.

Los STHE pueden diseñarse especialmente teniendo en cuenta factores como la funcionalidad, la facilidad de mantenimiento, la adaptabilidad y la seguridad, lo que da lugar a un intercambiador de calor altamente duradero que fomenta su amplia aplicación en diversos sectores. Se proyecta que más del 35-40% de los intercambiadores de calor utilizados en los sectores de ingeniería contemporáneos sean de tipo shell and tube, gracias a su diseño estructural fiable, fácil mantenimiento y potencial de actualización. Para una eficiencia óptima en la transferencia de calor, los intercambiadores de calor de carcasa y tubos deben aspirar a una caída de presión mínima, una mayor velocidad de flujo másico en el lado de la carcasa, un coeficiente de transferencia de calor alto y un ensuciamiento mínimo o insignificante, entre otras características esenciales [3].

Los STHE facilitan el intercambio de grandes cantidades de calor de forma eficiente y rentable, ofreciendo una superficie de tubo de bajo coste mientras minimizan el área necesaria en el suelo, el volumen de líquido y el peso total, mientras que están disponibles en diversos tamaños y longitudes [4].

Estos intercambiadores de calor son comunes en diversos sectores, como las instalaciones de generación eléctrica donde actúan como condensadores, y en los sectores químico y petroquímico para funciones de precalentamiento o refrigeración [5]. También trabajan en refrigeración, control climático y la industria de la producción de alimentos, entre otros [3]. Los usos comunes suelen incluir el calentamiento o refrigeración de corrientes de fluidos relevantes y la condensación o evaporación de mezclas fluidas. Además, ciertas aplicaciones buscan recuperar o rechazar calor o realizar esterilización, pasteurización, fraccionamiento, destilación, concentración, cristalización o ajuste térmico de fluidos de proceso [6].

El diseño termohidráulico de un intercambiador de calor de carcasa y tubos generalmente implica calcular la superficie de transferencia de calor, la cantidad de calor transferido, la eficiencia global de transferencia de calor, la cantidad de tubo, las dimensiones del tubo, la disposición, el número de pasadas para la carcasa y el tubo, el tipo de intercambiador de calor (como láminas tubulares fijas o haces de tubos extraíbles), el espaciado entre los tubos, la cantidad y especificaciones de los deflectores, así como caídas de presión tanto en el lado de la carcasa como en el de los tubos, entre otros factores [4].

Se han documentado numerosas investigaciones relacionadas con el diseño de una STHE. En este contexto, [5] introdujo un enfoque de diseño detallado para STHE influido por el análisis de índices de flexibilidad. Este enfoque pretende mitigar desafíos como posibles ineficiencias en el diseño o el funcionamiento inadecuado de sistemas de proceso completos. Esta investigación incorpora un algoritmo genético con restricciones estrictas para optimizar el diseño del STHE. Además, [4] proporcionó información sobre los cálculos necesarios para diseñar intercambiadores de calor de la variedad de casca y tubos, describiendo un proceso metódico para determinar diseños, con la intención de servir como guía estandarizada para realizar estos cálculos de forma sistemática para el diseño de los STEM. De manera similar, [7] se centró en diseñar un STHE destinado a aplicaciones relacionadas con la producción de celulosa de nanofibrillas, cumpliendo con los estándares TEMA y ejecutando cálculos de parámetros manualmente a través del programa Microsoft Excel. Del mismo modo, [8] diseñó un intercambiador de calor de carcasa y tubos para locomotoras diésel empleando la técnica Bell Delaware para obtener diversas dimensiones, incluyendo carcasa, tubos y deflectores. Posteriormente, se realizó un análisis térmico usando COMSOL, aplicando diversas cargas térmicas mientras se ajustaba el número de deflectores. Además, [2] destacó el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de carcasa y tubos examinando diferentes materiales y sus capacidades de transferencia de calor desde superficies, al tiempo que estudiaba el espaciado de los deflectores y su influencia en la transferencia de calor mediante el análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Los hallazgos se contrastaron con modelos teóricos. El diseño y la simulación del intercambiador de calor se completaron utilizando PTC Creo Parametric y ANSYS Fluent para análisis CFD, considerando materiales como cobre, aluminio y acero.

En [9], se presentó un intercambiador de calor de carcasa y tubos contracorriente construido para una planta de fabricación de ácido nítrico, donde el diseño se llevó a cabo con una capacidad de procesamiento objetivo de 100 toneladas de ácido nítrico por día. Este proyecto empleó dos metodologías distintas, el enfoque de Kern y el de Bell, durante el proceso de diseño. Se determinó que el enfoque de Bell proporcionaba resultados más precisos, ya que el coeficiente total de transferencia de calor derivado de este método coincidía estrechamente con el valor previsto. Además, el diseño incluía componentes auxiliares del intercambiador de calor como bridas, juntas, tornillos, soportes y sillas. En otro estudio [10], los investigadores diseñaron y evaluaron la eficacia de un intercambiador de calor de carcasa y tubos utilizando tanto el enfoque de Kern como el software de Ansys, empleando CFD para analizar la temperatura y el caudal dentro de los tubos y la carcasa, llegando a la conclusión de que la transferencia de calor a lo largo de la longitud del tubo varía. En [11], se describió un método sencillo para diseñar un intercambiador de calor de carcasa y tubos para aplicaciones en las industrias de

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>

Correo electrónico:

[inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)

[francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)

bebidas y procesos; Este proceso de diseño abordó tanto aspectos térmicos como estructurales. El aspecto del diseño térmico consistía en calcular la superficie efectiva necesaria (que se refiere al número de tubos) y determinar la diferencia de temperatura media logarítmica, mientras que el diseño mecánico consistía en diseñar la carcasa para soportar tanto presiones internas como externas, junto con el diseño de tubos, deflectores, juntas, etc. El proceso de diseño se ajustó a los estándares ASME/TEMA.

En [12], se desarrolló un intercambiador de calor de carcasa y tubo con un solo paso de carcasa junto con dos pasados tubulares para funcionar como calentador de agua, utilizando agua de azufre como agente calefactor. Los materiales de construcción elegidos para el intercambiador de calor incluyeron acero inoxidable 304 para las carcasas y cobre para los tubos. Asimismo, en [13], se introdujo un enfoque de diseño y clasificación para STHE equipados con deflectores helicoidales, basado en fuentes públicas existentes y en la técnica Bell-Delaware prevalente para STHEs que utilizan deflectores segmentados. Este método sustituyó varios factores de tipo de curva de la literatura por fórmulas matemáticas para simplificar el diseño de ingeniería, detallando así el proceso de cálculo para el enfoque propuesto. Finalmente, [14] explora los principios fundamentales del diseño térmico para STHEs, discutiendo elementos como los componentes de las STHEs; su clasificación basada en la construcción y la operación; datos necesarios para el diseño térmico; diseño de lado tubular; diseño lateral de carcasa, que incorpora disposición de tubos, deflector, caída de presión en el lado de la carcasa; y la diferencia media de temperatura. Hace hincapié en el uso de ecuaciones esenciales relacionadas con la transferencia de calor y la pérdida de presión tanto en el lado del tubo como en el lado de la carcasa para el diseño óptimo del STHE.

Varios libros [1] [15]-[18] describen metodologías de cálculo útiles para diseñar STHE desde el punto de vista térmico e hidráulico, que son adaptaciones modernas o versiones del método clásico de Kern, además de describir el método Bell-Delaware.

En ciertas plantas químicas se desea enfriar 50.000 kg/h de un chorro de ácido acrílico producido en el fondo de una columna de destilación antes de almacenarlo, y para ello se propuso un intercambiador de calor de carcasa y tubos. En este contexto, el objetivo de este estudio es diseñar un STHE para enfriar este flujo de ácido acrílico de 97 °C a 40 °C utilizando agua de enfriamiento a una temperatura de entrada de 25 °C. Para diseñar el STHE se aplicó la metodología de cálculo reportada en [17], basada en el enfoque de Kern, debido a su simplicidad y características innovadoras. Esta metodología permite calcular varios parámetros de diseño para el STHE, como el área de intercambio térmico, el número de tubos, el diámetro de la carcasa, el coeficiente total de transferencia de calor, así como la caída de presión de ambas corrientes. Además, el

coste de compra del STHE diseñado se calculará y actualizará hasta el año 2024.

## 2. - Materiales y métodos.

### 2.1. Enunciado del problema

Se requiere enfriar 50.000 kg/h de un chorro de ácido acrílico que sale del fondo de la columna de destilación de 97 °C a 40 °C utilizando agua de enfriamiento a una temperatura de entrada de 25 °C. Para este servicio de transferencia de calor se propone un intercambiador horizontal de carcasa y tubos que funcione como enfriador. La temperatura de salida del agua de refrigeración no debe superar los 45 °C por motivos de seguridad, mientras que la caída de presión entre los chorros de ácido acrílico y agua de refrigeración no debe superar los 5.000 Pa y 1.000 Pa respectivamente. El intercambiador de calor debe funcionar bajo disposición de contracorriente y será de tipo 1-2, es decir, con un paso de carcasa y dos pasadas tubulares. Para diseñar el intercambiador de calor propuesto de 1-2 carcasa y tubos se utilizará la metodología reportada por [17], basada en el enfoque de Kern. Además, el coste de compra del intercambiador de calor se calculará utilizando la correlación publicada en [17], que depende del área de intercambio de calor calculada.

### 2.2. Metodología de diseño.

La metodología de cálculo aplicada para diseñar el intercambiador de calor de carcasa y tubos desde el punto de vista termohidráulico se muestra a continuación.

#### Diseño preliminar

Paso 1. Definición de los datos iniciales disponibles para los dos flujos:

La Tabla 1 muestra los datos iniciales disponibles para los dos flujos.

Tabla 1. Datos iniciales disponibles para ambos flujos.

Parámetro	Unidades	Fluido frío	Fluido caliente
Caudal másico	kg/h	$m_c$	$m_h$
Temperatura de entrada	°C	$t_1$	$T_1$
Temperatura de salida	°C	$t_2$	$T_2$
Caída máxima de presión permitida	Pa	$\Delta P_{c(p)}$	$\Delta P_{h(p)}$
Factor de incrustación	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$R_c$	$R_h$

Fuente: Explicación propia.

Paso 2. Temperatura media de ambos arroyos:

- Fluido frío ( $\bar{t}$ )

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1)$$

- Fluido caliente ( $\bar{T}$ )

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2)$$

Paso 3. Propiedades físicas de ambos fluidos a la temperatura media:

La Tabla 2 presenta las propiedades físicas que deben definirse para ambos fluidos a la temperatura media calculada en el paso anterior.

Tabla 2. Propiedades físicas que se definen para ambos fluidos.

Propiedad	Unidades	Fluido frío	Fluido caliente
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_c$	$\rho_h$
Viscosidad	Pa.s	$\mu_c$	$\mu_h$
Capacidad calorífica	kJ/kg.°C	$Cp_c$	$Cp_h$
Conductividad térmica	W/m.K	$k_c$	$k_h$

Fuente: Explicación propia.

Paso 4. Carga térmica ( $Q$ ):

- Para el fluido caliente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Donde la unidad de es kW. $Q$

Paso 5. Caudal másico requerido del fluido frío (agua de refrigeración) ( $m_c$ ):

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4)$$

Donde se da en kW y se da en kJ/kg.K.  $Q Cp_c$

Paso 6. Asunción del coeficiente global de transferencia de calor ( $U_0$ )

Paso 7. Diferencia de temperatura media logarítmica ( $\Delta Tlm$ )

- Para una disposición contracorriente:

$$\Delta Tlm = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left( \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \quad (5)$$

Paso 8. Factor R:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

Paso 9. Factor S:

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad (7)$$

Paso 10. Factor de corrección de temperatura ( $F_t$ ):

- Para una carcasa de 1 casquilla: intercambiador de calor de paso de 2 tubos:

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \cdot \ln \left[ \frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)} \right]}{(R - 1) \cdot \ln \left[ \frac{2 - S \cdot [R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)}]}{2 - S \cdot [R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)}]} \right]} \quad (8)$$

Paso 11. Diferencia real de temperatura ( $\Delta Tm$ ):

$$\Delta Tm = \Delta Tlm \cdot F_t \quad (9)$$

Paso 12. Área provisional de transferencia de calor ( $A_0$ ):

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta Tm} \quad (10)$$

Donde se da en kW. $Q$

Paso 13. Selecciona los siguientes datos para los tubos:

- Diámetro nominal.
- Material.
- Longitud ( $L_t$ )

Paso 14. Área de un tubo ( $a_1$ ):

$$a_1 = \pi \cdot L_t \cdot d_0 \quad (11)$$

Donde y se dan en m. $L_t d_0$

Paso 15. Número de tubos ( $N_0$ ):

$$N_0 = \frac{A_0}{a_1} \quad (12)$$

Paso 16. Disposición de los tubos: Inclinación triangular o cuadrada.

Paso 17. Selección de las constantes y dependiendo de la disposición de tubos (triangular o cuadrada) y el número de pasadas de tubos.  $K_1 n_1$

Paso 18. Diámetro del haz ( $D_b$ ):

$$D_b = d_0 \cdot \left( \frac{N_0}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad (13)$$

Donde se da en mm. $d_0$

Paso 19. Seleccione el tipo de intercambiador de calor de carcasa y tubos:

- Cabeza flotante de tira a través.
- Cabeza flotante de anillo dividido.
- Fuera, cabeza compacta.
- Fijo y tubo en U.

Paso 20. Espacio del haz de proyectiles ( $C_{sb}$ ) en mm.

Paso 21. Diámetro de la concha ( $D_s$ ):

$$D_s = D_b + C_{sb} \quad (14)$$

Donde y se dan en mm. $D_b C_{sb}$

Paso 22. Asignación de fluidos dentro del intercambiador de calor.

*Coficiente del lado del tubo*

Paso 23. Área de sección transversal del tubo ( $a_t$ ):

$$a_t = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (15)$$

Donde se da en m. $d_i$

Paso 24. Número de tubos por pasada ( $N_{tp}$ ):

$$N_{tp} = \frac{N_0}{n_p} \quad (16)$$

Donde – número de pasadas por el lado del tubo =  $2 \cdot n_p$

Paso 25. Área total de flujo ( $a_T$ ):

$$a_T = N_{tp} \cdot a_t \quad (17)$$

Paso 26. Velocidad de masa del fluido del lado del tubo ( $G_t$ ):

$$G_t = \frac{m_t}{a_T} \quad (18)$$

Donde se da en kg/s. $m_t$

Paso 27. Velocidad lineal del fluido del lado del tubo ( $v_t$ ):

$$v_t = \frac{G_t}{\rho_t} \quad (19)$$

Paso 28. Número de Reynolds del fluido del lado del tubo ( $Re_t$ ):

$$Re_t = \frac{\rho_t \cdot v_t \cdot d_i}{\mu_t} \quad (20)$$

Paso 29. Número de Prandtl del fluido del lado del tubo ( $Pr_t$ ):

$$Pr_t = \frac{(Cp_t \cdot 1,000) \cdot \mu_t}{k_t} \quad (21)$$

Donde se da en kJ/kg.K. $Cp_t$

Paso 30. Ratio  $j_{h1}$ , donde tanto como se dan en m. $L_t/d_i$

Paso 31. Factor de transferencia de calor en el lado del tubo ( $h_i$ ), dependiendo de la relación y el número de Reynolds. $j_{h1} L_t/d_i$

Paso 32. Coeficiente de transferencia de calor en el lado del tubo ( $h_i$ ):

$$h_i = \frac{k_t}{d_i} \cdot j_{h1} \cdot Re_t \cdot Pr_t^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{0.14} \quad (22)$$

Donde se da en m. $d_i$

Para el agua que fluye en tuberías, se podría usar la siguiente correlación:

$$h_i = \frac{4,200 \cdot (1.35 + 0.02 \cdot \bar{t}) \cdot v_t^{0.8}}{d_i^{0.2}} \quad (23)$$

Dónde:

$\bar{t}$  – Temperatura media del agua (°C).

$v_t$  – Velocidad del agua (m/s).

$d_i$  – Diámetro interior del tubo (mm).

*Coeficiente de la carcasa lateral:*

Paso 33. Espaciado entre deflectores ( $l_B$ ):

$$l_B = D_s \cdot \varphi \quad (24)$$

Donde  $\varphi = 0,2 - 0,5$  [17] y se da en mm. $\varphi D_s$

Paso 34. Paso del tubo ( $p_t$ ):

$$p_t = 1.25 \cdot d_o \quad (25)$$

Donde se da en m. $d_o$

Paso 35. Área de flujo cruzado del fluido lateral de la carcasa ( $A_s$ ):

$$A_s = \frac{(p_t - d_o)}{p_t} \cdot D_s \cdot l_B \quad (26)$$

Donde todos los parámetros se dan en m.

Paso 36. Velocidad de masa del fluido lateral de la carcasa ( $G_s$ ):

$$G_s = \frac{m_s}{3,600 A_s} \quad (27)$$

Donde y se dan en kg/h y mm $_s A_s^2$ , respectivamente.

Paso 37. Diámetro equivalente al lado de la carcasa (diámetro hidráulico) ( $d_e$ ):

- Ángulo cuadrado:

$$d_e = \frac{1.27}{d_o} \cdot (p_t^2 - 0.785 \cdot d_o^2) \quad (28)$$

- Altura triangular:

$$d_e = \frac{1.10}{d_o} \cdot (p_t^2 - 0.917 \cdot d_o^2) \quad (29)$$

Donde y se dan en m. $p_t d_o$

Paso 38. Número de Reynolds del fluido lateral de la carcasa ( $Re_s$ ):

$$Re_s = \frac{G_s \cdot d_e}{\mu_s} \quad (30)$$

Paso 39. Número de Prandtl del fluido lateral de la carcasa ( $Pr_s$ ):

$$Pr_s = \frac{(Cp_s \cdot 1,000) \cdot \mu_s}{k_s} \quad (31)$$

Donde se da en kJ/kg.K. $Cp_s$

Paso 40. Selección del corte del deflector (%).

Paso 41. Factor de transferencia de calor en el lado de la carcasa ( $h_o$ ), dependiendo del corte del deflector y del número de Reynolds. $j_{h2}$

Paso 42. Coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa ( $h_o$ ):

$$h_o = \frac{k_s}{d_e} \cdot j_{h2} \cdot Re_s \cdot Pr_s^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}}\right)^{0.14} \quad (32)$$

Donde se da en m. $d_e$

*Coeficiente global de transferencia de calor calculado*

Paso 43. Conductividad térmica del material del tubo ( $k_w$ ):

Paso 44. Coeficiente global de transferencia de calor calculado ( $U_c$ ):

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{R_s} + \frac{d_o \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot k_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i}} \quad (33)$$

*Caída de presión*

Paso 45. Factor de fricción para el fluido del lado del tubo ( $j_{f1}$ ):

Paso 46. Caída de presión del fluido del lado del tubo ( $\Delta P_t$ ):

$$\Delta P_t = n_p \cdot \left[8 \cdot j_{f1} \cdot \left(\frac{L_t}{d_i}\right) \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{-m} + 2.5\right] \cdot \frac{\rho_t \cdot v_t^2}{2} \quad (34)$$

Donde  $\epsilon = 0,25$  para el flujo laminar ( $< 2.100$ ) y  $\epsilon = 0,14$  para el flujo turbulento ( $> 2.100$ ), mientras que  $\mu$  y  $\rho$  se dan en m, y en  $\text{kg/m} \cdot \text{Re}_t \cdot \text{Re}_t \cdot L_t \cdot d_i \cdot \rho_t \cdot v_t^{m^3}$  y m/s, respectivamente.

Paso 47. Factor de fricción del fluido lateral de la cáscara ( $\epsilon$ ):  $f_{f2}$

Paso 48. Velocidad lineal del fluido lateral de la cáscara ( $\epsilon$ ):  $v_s$

$$v_s = \frac{G_s}{\rho_s} \quad (35)$$

Paso 49. Caída de presión del fluido lateral de la cáscara ( $\epsilon$ ):  $\Delta P_s$

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_{f2} \cdot \left(\frac{D_s}{d_e}\right) \cdot \left(\frac{L_t}{l_B}\right) \cdot \frac{\rho_s \cdot v_s^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}}\right)^{-0.14} \quad (36)$$

Donde  $\epsilon$ ,  $\mu_s$  y  $\mu_{sw}$  están dados en m.  $D_s, d_e, L_t, l_B$

### Coste de compra del intercambiador de calor

Para calcular el coste de compra del intercambiador de calor propuesto, se utilizó la siguiente correlación [17]:

$$C_{exch(2007)} = a + b \cdot A^n \quad (37)$$

Dónde:

$$a = 24.000$$

$$b = 46.$$

$$n = 1.2$$

$A$  – Área del intercambiador de calor, que debe estar en el rango de 10 – 1.000 m<sup>2</sup>.

El coste de compra calculado por eq. (37) para el intercambiador de calor diseñado se refiere a enero de 2007. Para actualizar el coste de compra del intercambiador de calor de carcasa y tubos a mayo de 2024, se utilizó la siguiente correlación:

$$C_{exch(2024)} = C_{exch(2007)} \cdot \frac{CE\ Index\ (2024)}{CE\ Index\ (2007)} \quad (38)$$

Dónde:

$C_{exch(2024)}$  – Coste del intercambiador de calor de carcasa y tubos en mayo de 2024.

$C_{exch(2007)}$  – Coste del intercambiador de calor de carcasa y tubos en enero de 2007, calculado por ecuación (37).

$CE\ Index\ (2024)$  – Índice de Ingeniería Química en mayo de 2024 = 800,0 [19].

$CE\ Index\ (2007)$  – Índice de Ingeniería Química en enero de 2007 = 509,7 [17].

## 3.- Análisis e interpretación de resultados.

### 3.1. Diseño preliminar.

A continuación se muestra cada paso implementado en la metodología para diseñar el intercambiador de calor de carcasa y tubo para la refrigeración con ácido acrílico.

Paso 1. Definición de los datos iniciales disponibles para los dos flujos:

La Tabla 3 muestra los datos iniciales disponibles para las dos corrientes.

Tabla 3. Datos iniciales disponibles para ambos flujos.

Parámetro	Unidades	Agua de refrigeración	Ácido acrílico
Caudal másico	kg/h	-	50,000
Temperatura de entrada	°C	25	97
Temperatura de salida	°C	45	40
Caída máxima de presión permitida	Pa	1,000	5,000
Factor de incrustación	W/m <sup>2</sup> ·°C	1,000	3,000

Fuente: Explicación propia.

Paso 2. Temperatura media de ambos arroyos:

- Fluido frío ( $\epsilon$ ):  $\bar{t}$

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{25 + 45}{2} = 35\ ^\circ\text{C} \quad (1)$$

- Fluido caliente ( $\epsilon$ ):  $\bar{T}$

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{97 + 40}{2} = 68.5\ ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Paso 3. Propiedades físicas de ambos fluidos a la temperatura media:

Según [20], ambos fluidos presentan las propiedades físicas mostradas en la Tabla 4 a las temperaturas medias calculadas en el paso anterior.

Tabla 4. Propiedades físicas definidas para ambos fluidos.

Propiedad	Unidades	Agua de refrigeración	Ácido acrílico
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	994.033	995.54
Viscosidad	Pa.s	0.000719	0.0005696
Capacidad calorífica	kJ/kg.°C	4.179	2.1897
Conductividad térmica	W/m.K	0.6233	0.1449

Fuente: Explicación propia.

Paso 4. Carga térmica ( $\epsilon$ ):  $Q$

Usando los datos iniciales para el fluido caliente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot C p_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$Q = \frac{50,000}{3,600} \cdot 2.1897 \cdot (97 - 40)$$

$$Q = 1,733.59\ \text{kW}$$

Paso 5. Caudal másico requerido del fluido frío (agua de refrigeración) ( $\epsilon$ ):  $m_c$

$$m_c = \frac{Q}{C p_c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{1,733.59}{4.179 \cdot (45 - 25)} \quad (4)$$

$$m_c = 20.74\ \text{kg/s}$$

Paso 6. Asunción del coeficiente global de transferencia de calor ( $\epsilon$ ):  $U_0$

Teniendo en cuenta el rango reportado por [17] para los enfriadores que utilizan agua para enfriar disolventes orgánicos, se asumió un valor para el coeficiente total de transferencia de calor ( $\epsilon$ ) de 300 W/m<sup>2</sup>·K.

Paso 7. Diferencia de temperatura media logarítmica ( $\epsilon$ ):  $\Delta T_{lm}$

• Para una disposición contracorriente:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (5)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(97 - 45) - (40 - 25)}{\ln \frac{(97 - 45)}{(40 - 25)}}$$

$$\Delta T_{lm} = 29.76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paso 8. Factor R:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} = \frac{(97 - 40)}{(45 - 25)} = 2.85 \quad (6)$$

Paso 9. Factor S:

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} = \frac{(45 - 25)}{(97 - 25)} = 0.278 \quad (7)$$

Paso 10. Factor de corrección de temperatura ( $F_t$ ):

• Para una carcasa de 1 casquilla: intercambiador de calor de paso de 2 tubos:

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \cdot \ln \left[ \frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)} \right]}{(R - 1) \cdot \ln \left[ \frac{2 - S \cdot [R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)}]}{2 - S \cdot [R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)}]} \right]} \quad (8)$$

$$F_t = 0.683$$

Paso 11. Diferencia real de temperatura ( $\Delta T_m$ ):

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \cdot F_t = 29.76 \cdot 0.683 = 20.326 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Paso 12. Área provisional de transferencia de calor ( $A_0$ ):

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta T_m} = \frac{1,733.59 \cdot 1,000}{300 \cdot 20.326} \quad (10)$$

$$A_0 = 284.29 \text{ } m^2$$

- Paso 13. Selección de los siguientes datos para los tubos:
- Diámetro nominal: 3/4 de pulgada, 40 pteitos. Así, según [20]:  
Diámetro exterior ( $d_o$ ) = 0,0267 m.  
Diámetro interior ( $d_i$ ) = 0,0209 m.
  - Material: Acero inoxidable (18/8).
  - Longitud ( $L_t$ ) = 4,83 m.

Paso 14. Área de un tubo ( $a_1$ ):

$$a_1 = \pi \cdot L_t \cdot d_o = 3.14 \cdot 4.83 \cdot 0.0267 \quad (11)$$

$$a_1 = 0.4049 \text{ } m^2$$

Paso 15. Número de tubos ( $N_0$ ):

$$N_0 = \frac{A_0}{a_1} = \frac{284.29}{0.4049} = 702.12 \approx 702 \quad (12)$$

Paso 16. Disposición de los tubos:  
El paso triangular se seleccionó para ofrecer mayores tasas de transferencia de calor, incluso a costa de mayores caídas

de presión [17], ya que la caída de presión no es un parámetro importante a considerar en este servicio de transferencia de calor según los supervisores de la industria donde se instalará este STEM. Sin embargo, la caída de presión se calculará para ambos flujos de fluido en esta metodología de diseño, y los valores obtenidos se compararán con los límites máximos permitidos establecidos por el proceso.

Paso 17. Selección de las constantes y  $K_1 n_1$ :

Según [17], para una disposición triangular de tubos y un número de pasadas tubulares ( $n_p$ ) de 2, los valores de estas constantes son:

- $K_1 = 0,249$ .
- $n_1 = 2,207$ .

Paso 18. Diámetro del haz ( $D_b$ ):

$$D_b = d_o \cdot \left( \frac{N_0}{K_1} \right)^{1/n_1} = 26.67 \cdot \left( \frac{702}{0.249} \right)^{1/2.207} \quad (13)$$

$$D_b = 975.62 \text{ } mm$$

Paso 19. Seleccione el tipo de intercambiador de calor de carcasa y tubos:  
El tipo seleccionado de intercambiador de calor de carcasa y tubos es de cabeza flotante de anillo dividido para mayor eficiencia y facilidad de limpieza [17].

Paso 20. Espacio libre del haz de proyectiles ( $C_{sb}$ ):  
Como se refiere a [17], la separación del haz de proyectiles para un valor del diámetro del haz ( $D_b$ ) de 975,62 mm y un tipo de cabeza flotante de anillo dividido es de 72 mm.

Paso 21. Diámetro de la concha ( $D_s$ ):

$$D_s = D_b + C_{sb} = 975.62 + 72 = 1,047.62 \text{ } mm \quad (14)$$

Paso 22. Asignación de fluidos dentro del intercambiador de calor.  
Teniendo en cuenta las sugerencias reportadas por [17], el fluido frío (agua de refrigeración) se ubicará en el lado del tubo, mientras que el fluido caliente (ácido acrílico) estará en el lado de la carcasa.

### 3.2. Coeficiente del lado del tubo.

Debido a la asignación del fluido frío en los tubos y del fluido caliente en la carcasa, la nomenclatura de algunos parámetros se corregirá para coincidir con la nomenclatura de las ecuaciones que se usarán a partir de ahora.

La Tabla 5 indica la nomenclatura inicial y corregida de los parámetros empleados en las próximas ecuaciones.

Tabla 5. Nomenclatura original y corregida de los parámetros utilizados en las próximas ecuaciones.

Parámetro	Nomenclatura original	Nomenclatura corregida	Unidades
-----------	-----------------------	------------------------	----------

Caudal de fluido caliente	$m_h$	$m_s$	kg/h
Caudal de fluido frío	$m_c$	$m_t$	kg/h
Densidad de fluido caliente	$\rho_h$	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>
Densidad de fluido frío	$\rho_c$	$\rho_t$	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad del fluido caliente	$\mu_h$	$\mu_s$	Pa.s
Viscosidad del fluido frío	$\mu_c$	$\mu_t$	Pa.s
Capacidad calorífica del fluido caliente	$Cp_h$	$Cp_s$	kJ/kg. K
Capacidad calorífica de fluido frío	$Cp_c$	$Cp_t$	kJ/kg. K
Conductividad térmica del fluido caliente	$k_h$	$k_s$	W/m.K
Conductividad térmica de fluidos fríos	$k_c$	$k_t$	W/m.K

Fuente: Explicación propia.

La Tabla 6 muestra los resultados de los parámetros calculados en los pasos 23 a 32, para determinar el coeficiente de transferencia de calor del lado del tubo.

Tabla 6. Resultados de los parámetros calculados en los pasos 23-32.

Escalón	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
23	Área de sección transversal de tubos	$a_t$	0.00034	M2
24	Número de tubos por pasada	$N_{tp}$	351	-
25	Área total de flujo	$a_T$	0.1193	M2
26	Velocidad de masa del fluido del lado del tubo	$G_t$	173.85	kg/s.m <sup>2</sup>
27	Velocidad lineal del fluido del lado del tubo	$v_t$	0.175	m/s
28	Número de Reynolds del fluido del lado del tubo	$Re_t$	5,056.57	-
29	Número de Prandtl del fluido del lado del tubo	$Pr_t$	4.82	-
30	Ratio $L_t/d_i$	-	231.10	-
31	Factor de transferencia de calor en el lado del tubo <sup>1</sup>	$j_{h1}$	0.0041	-
32	Coefficiente de transferencia de calor del lado del tubo <sup>2</sup>	$h_i$	1,162.11	L/m <sup>2</sup> . K

<sup>1</sup> Para un valor de  $Re_t$  y de 5056,57 y 231,10, respectivamente.  $L_t/d_i$

<sup>2</sup> La ecuación (23) se empleó para calcular estos parámetros ya que el agua fluye por las tuberías.

Fuente: Explicación propia.

### 3.3. Coeficiente de carcasa lateral.

La Tabla 7 presenta los resultados de los parámetros calculados en los pasos 33-42, para determinar el coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa.

Tabla 7. Resultados de los parámetros calculados en los pasos 33-42.

Escalón	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
---------	-----------	---------	-------	----------

33	Espaciado del deflector <sup>1</sup>	$l_B$	209.52	mm
34	Paso de tubo	$p_t$	0.0334	m
35	Área de flujo cruzado del fluido lateral de la carcasa	$A_s$	0.0440	M2
36	Velocidad de masa del fluido lateral de la carcasa	$G_s$	315.65	kg/s.m <sup>2</sup>
37	Diámetro equivalente al lado de la carcasa <sup>2</sup>	$d_e$	0.0191	m
38	Número de Reynolds del fluido lateral de la carcasa	$Re_s$	10,584.47	-
39	Número de Prandtl del fluido lateral de la carcasa	$Pr_s$	8.61	-
40	Selección del corte con deflector	-	25%	-
41	Factor de transferencia de calor en la carcasa	$j_{h2}$	0.0058	-
42	Coefficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa <sup>3</sup>	$h_o$	947.66	L/m <sup>2</sup> . K

<sup>1</sup> Se seleccionó un valor de 0,2 para  $\phi$  calcular el espaciado de los deflectores.

<sup>2</sup> La ecuación (29) se empleó para calcular el diámetro equivalente del lado de la carcasa debido a la selección de la disposición triangular del paso.

<sup>3</sup> El término de corrección de viscosidad no se consideró porque ambos fluidos tienen baja viscosidad ( $\mu_s/\mu_{sw}$ )<sup>0,14</sup> [17].

Fuente: Explicación propia.

### 3.4. Coeficiente de transferencia de calor global calculado.

Paso 43. Conductividad térmica del material del tubo ( $k_w$ ). Como el material seleccionado para los tubos es acero inoxidable 18/8, la conductividad térmica de este material es de 16 W/m.K [17].

Paso 44. Coeficiente global de transferencia de calor calculado ( $U_C$ )

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{R_s} + \frac{d_o \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot k_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i}} \quad (33)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{947.66} + \frac{1}{5.000} + \frac{0.0267 \cdot \ln\left(\frac{0.0267}{0.0209}\right)}{2 \cdot 16} + \frac{0.0267}{0.0209} \cdot \frac{1}{3.000} + \frac{0.0267}{0.0209} \cdot \frac{1}{1162.11}}$$

$$U_C = 364.26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### 3.5. Caída de presión

Paso 45. Factor de fricción para el fluido del lado del tubo ( $j_{f1}$ )

Según [17], para un número de Reynolds del fluido del lado del tubo (agua de refrigeración) de 5.056,57, el factor de fricción ( $j_{f1}$ ) tiene un valor de 0,0058.  $j_{f1}$

Paso 46. Caída de presión del fluido del lado del tubo ( $\Delta P_t$ )

$$\Delta P_t = n_p \cdot \left[ 8 \cdot j_{f1} \cdot \left( \frac{L_t}{d_i} \right) \cdot \left( \frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{-0.14} + 2.5 \right] \cdot \frac{\rho_t \cdot v_t^2}{2} \quad (34)$$

$$\Delta P_t = 2 \cdot \left[ 8 \cdot 0.0058 \cdot \left( \frac{4.83}{0.0209} \right) \cdot 1 + 2.5 \right] \cdot \frac{994.033 \cdot 0.175^2}{2}$$

$$\Delta P_t = 402.54 \text{ Pa}$$

Mientras que  $(\mu_t/\mu_{tw})^{-0.14} = 1$ , como sugiere [17], porque el agua no se considera un fluido altamente viscoso.

Paso 47. Factor de fricción del fluido lateral de la cáscara ( $j_{f2}$ )

Según [17], para un número de Reynolds del fluido lateral de la cáscara (ácido acrílico) de 10.584,47 y un corte de baffle del 25%, el factor de fricción ( $j_{f2}$ ) tiene un valor de 0,0049.

Paso 48. Velocidad lineal del fluido lateral de la cáscara ( $v_s$ )

$$v_s = \frac{G_s}{\rho_s} = \frac{315.65}{995.54} = 0.317 \text{ m/s} \quad (35)$$

Paso 49. Caída de presión del fluido lateral de la cáscara ( $\Delta P_s$ )

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_{f2} \cdot \left( \frac{D_s}{d_e} \right) \cdot \left( \frac{L_t}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho_s \cdot v_s^2}{2} \cdot \left( \frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \quad (36)$$

$$\Delta P_s = 8 \cdot 0.0049 \cdot \left( \frac{1.04762}{0.0191} \right) \cdot \left( \frac{4.83}{0.20952} \right) \cdot \frac{995.54 \cdot 0.317^2}{2}$$

$$\Delta P_s = 2,479.27 \text{ Pa}$$

### 3.6. Coste de compra del intercambiador de calor.

Por un valor de la superficie de intercambio térmico de 207,47 m<sup>2</sup>, el coste de compra del intercambiador de calor de carcasa y tubos diseñado es:

$$C_{exch(2007)} = a + b \cdot A^n \quad (37)$$

$$C_{exch(2007)} = 24,000 + 46 \cdot 284.29^{1.2}$$

$$C_{exch(2007)} \approx \text{USD } \$ 64,483$$

Dado que el coste de compra calculado por la ecuación (37) corresponde a enero de 2007, el coste de compra de este equipo referido a mayo de 2024 es:

$$C_{exch(2024)} = C_{exch(2007)} \cdot \frac{CE \text{ Index } (2024)}{CE \text{ Index } (2007)} \quad (38)$$

$$C_{exch(2024)} = 64,483 \cdot \frac{800.0}{509.7}$$

$$C_{exch(2024)} = \text{USD } \$ 101,209$$

## 4.- Discusión

Se diseñó un intercambiador de calor de carcasa y tubos con una sola y dos pasadas de tubos para enfriar un chorro de ácido acrílico, originado en el fondo de una columna de destilación, de 97 a 40 °C mediante agua de refrigeración a una temperatura de entrada de 25 °C, y utilizando la

metodología de diseño reportada por [17], que se basa en el enfoque de Kern. El agua de refrigeración se asignaba para fluir dentro de los tubos, mientras que el ácido acrílico se asignaba para fluir sobre la carcasa.

El valor calculado de la carga térmica para este servicio de intercambiador fue de 1.733,59 kW, mientras que se requerirá un caudal de 20,74 kg/s (74.664 kg/h) para el agente de transferencia de calor seleccionado (agua de refrigeración). La diferencia de temperatura media logarítmica tenía un valor de 29,76 °C, mientras que los valores del factor de corrección de temperatura y la diferencia real de temperatura eran de 0,683 y 20,326 °C, respectivamente.

La velocidad de masa y la velocidad lineal del agua de enfriamiento fueron de 173,85 kg/s.m<sup>2</sup> y 0,175 m/s, respectivamente, mientras que el número de Reynolds calculado para este fluido fue 5.056,57, indicando así que el agua de enfriamiento fluirá bajo el régimen de transición. El coeficiente de transferencia térmica calculado del fluido del lado del tubo fue de 1.162,11 W/m<sup>2</sup>·K.

Los valores de la velocidad de masa y la velocidad lineal del ácido acrílico fueron de 315,65 kg/s.m<sup>2</sup> y 0,317 m/s, respectivamente. El número de Reynolds calculado para el ácido acrílico fue 10.584,47, indicando así que este fluido fluirá bajo régimen turbulento en el intercambiador de calor diseñado. El coeficiente calculado de transferencia de calor en el lado de la carcasa era de 947,66 W/m<sup>2</sup>·K.

El coeficiente de transferencia de calor del fluido del lado del tubo es aproximadamente 1,23 veces superior al del coeficiente de transferencia de calor del lado de la carcasa, lo que concuerda con los resultados del intercambiador de calor de carcasa y tubos diseñado en [17], donde el coeficiente de transferencia de calor del fluido del lado del tubo (agua salobre) es de 3.852 W/m<sup>2</sup>·K, mientras que el coeficiente de transferencia de calor para el fluido lateral de la cáscara (metanol) es de 2.740 W/m<sup>2</sup>·K (es decir, unas 1,40 veces más alto).

La caída de presión calculada del fluido del lado del tubo, es decir, del agua de refrigeración (402,54 Pa), es aproximadamente 6,16 veces menor que la caída de presión del fluido del lado de la carcasa, es decir, el agua acrílica (2.479,27 Pa). Este resultado coincide con los resultados de la caída de presión calculada durante el diseño de un intercambiador de calor de carcasa y tubos en [17], donde el valor de la caída de presión (7,2 kPa) del agua salobre utilizada como refrigerante (fluido del lado del tubo) es menor que el valor de la caída de presión (272 kPa) del fluido lateral de la cáscara (metanol). Los valores de la caída de presión calculada en el presente estudio para ambos fluidos están por debajo de los límites máximos permitidos establecidos por el servicio de intercambio de calor.

Un valor calculado del coeficiente total de transferencia de calor de 364,26 W/m<sup>2</sup>. Se obtuvo K, que está por encima del

valor asumido ( $300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) en el paso 6, indicando así que el diseño tiene un área adecuada para el deber requerido [17].

En consecuencia, el intercambiador de calor de carcasa y tubos diseñado en este estudio presentará los siguientes datos de diseño:

- Tipo: Cabeza flotante de anillo dividido.
- Área de transferencia de calor ( $\text{}$ ):  $284,29 \text{ m}^2A$ .
- Número de tubos ( $\text{}$ ):  $702.N$
- Diámetro del haz ( $\text{}$ ):  $975,62 \text{ mm}.D_b$
- Diámetro del proyectil ( $\text{}$ ):  $1.047,62 \text{ mm}.D_s$

El intercambiador de calor de carcasa y tubos diseñado en [17] para enfriar  $100.000 \text{ kg/h}$  de un flujo de metanol mediante agua salobre, tiene los siguientes parámetros de diseño:

- Tipo: Cabeza flotante de anillo dividido.
- Área de transferencia de calor ( $\text{}$ ):  $278 \text{ m}^2A$ .
- Número de tubos ( $\text{}$ ):  $918.N$
- Diámetro del haz ( $\text{}$ ):  $826 \text{ mm}.D_b$
- Diámetro del proyectil ( $\text{}$ ):  $894 \text{ mm}.D_s$

En [9] se diseñó un intercambiador de calor de carcasa y tubos para enfriar  $0,827 \text{ kg/s}$  de flujo de óxido nítrico entre  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , utilizando agua a una temperatura de suministro de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los parámetros del intercambiador de calor de carcasa y tubos diseñados en este estudio se muestran a continuación:

- Área de transferencia de calor ( $\text{}$ ):  $8,98 \text{ m}^2A$ .
- Número de tubos ( $\text{}$ ):  $60.N$
- Diámetro del haz ( $\text{}$ ):  $240,049 \text{ mm}.D_b$
- Diámetro del proyectil ( $\text{}$ ):  $251,049 \text{ mm}.D_s$
- Coeficiente total de transferencia de calor ( $\text{}$ ):  $405,62 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .
- Caída de presión en el costado de la carcasa:  $82,93 \text{ kPa}$ .

En este estudio, el óxido nítrico se asignó en el lado de la concha, mientras que el agua de refrigeración se asignó a los tubos. Sin embargo, el valor del coeficiente de transferencia de calor del lado del tubo ( $1.059,197 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) es 1,51 veces menor que el valor del coeficiente de transferencia de calor en el lado de la cáscara ( $1.601,63 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ), que difiere de los resultados de nuestro estudio.

Otros autores [7] realizaron el diseño de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para aplicaciones de producción de celulosa nanofibril. Los resultados de los parámetros de rendimiento obtenidos durante el diseño de este STHE se muestran a continuación:

- Tasa de transferencia de calor ( $\text{}$ ):  $167.720 \text{ W}.Q$
- Área de transferencia de calor ( $\text{}$ ):  $16,87 \text{ m}^2A$ .
- Número de tubos ( $\text{}$ ):  $53.N_t$
- Concha del haz ( $\text{}$ ):  $1,85 \text{ m}.D_b$
- Coeficiente de transferencia de calor por convección en el tubo ( $\text{}$ ):  $135,34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

- Coeficiente de transferencia de calor por convección en la capa ( $\text{}$ ):  $0,5934 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .
- Coeficiente total de transferencia de calor real ( $\text{}$ ):  $0,5932 \text{ W/U}_{act} \text{ m}^2 \cdot \text{K}$ .
- Efectividad ( $\text{}$ ):  $89,21\%.\epsilon$

De igual modo, en [4] un STHE está diseñado para enfriar  $1,5 \text{ kg/s}$  de un flujo de aceite desde  $107 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  utilizando  $1,72 \text{ kg/s}$  de agua de refrigeración con una temperatura de entrada de  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . En este estudio, el fluido caliente se asigna en el lado de la carcasa mientras que el fluido frío se encuentra en el lado del tubo, lo cual es similar a las condiciones de nuestro estudio. En este trabajo se calculan varios parámetros, algunos de los cuales se presentan a continuación:

- Energía transferida ( $\text{}$ ):  $129.660 \text{ W}.Q$
- Área de transferencia de calor ( $\text{}$ ):  $3,43 \text{ m}^2A$ .
- Número de tubos ( $\text{}$ ):  $26.N_t$
- Coeficiente de transferencia de calor en el lado del tubo ( $\text{}$ ):  $126,63 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .
- Coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa ( $\text{}$ ):  $182,65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .
- Coeficiente total de transferencia de calor asumido ( $\text{}$ ):  $800 \text{ W/U}^m \cdot \text{K}$ .
- Efectividad ( $\text{}$ ):  $50,01\%.\epsilon$

## 5.- Conclusiones.

Se diseñó un intercambiador de calor de carcasa y tubos con paso de una capa y dos pasadas de tubos desde el punto de vista termohidráulico, utilizando una metodología de diseño bien conocida basada en el enfoque de Kern, para enfriar  $50.000 \text{ kg/h}$  de un flujo de ácido acrílico de  $97 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  utilizando agua de refrigeración a una temperatura de entrada de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se determinaron varios parámetros como la carga térmica ( $1.733,59 \text{ kW}$ ); coeficiente total de transferencia de calor ( $364,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ); área de transferencia de calor ( $284,29 \text{ m}^2$ ); número de tubos ( $702$ ); y diámetro de proyectil ( $1.047,62 \text{ mm}$ ). El caudal másico del agua de refrigeración necesario para enfriar este flujo de ácido acrílico es de  $20,74 \text{ kg/s}$  ( $74.664 \text{ kg/h}$ ). El tipo de intercambiador de calor seleccionado para carcasa y tubos tenía cabeza flotante de anillo dividido, mientras que la caída de presión del agua ( $402,54 \text{ Pa}$ ) y del ácido acrílico ( $2.479,27 \text{ Pa}$ ) es inferior a la caída máxima permitida por el servicio. El coste de compra del intercambiador de calor diseñado para carcasa y tubos es de  $101.209$  dólares estadounidenses.

## 6.- Contribuciones de los autores (Taxonomía de Roles de los Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualización: Amaury Pérez Sánchez.
2. Curaduría de datos: Laura Thalía Álvarez Lores, Lizthalía Jiménez Guerra.
3. Formal Analysis: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Álvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Aguila.
4. Adquisición de fondos: No aplicable.

5. Research: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Álvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Águila, Lizthalía Jiménez Guerra.
6. Metodología: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Águila.
7. Gestión de proyectos: No aplicable.
8. Recursos: No aplicable.
9. Software: No aplicable.
10. Supervisión: Amaury Pérez Sánchez.
11. Validación: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Álvarez Lores.
12. Pantalla: No aplicable.
13. Redacción - borrador original: Laura Thalía Álvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Águila, Lizthalía Jiménez Guerra.
14. Escritura - revisión y edición: Amaury Pérez Sánchez.

## 7.- Apéndice.

### Nomenclatura.

$a$	Constante a usar en la ecuación (37)	-
$a_1$	Área de un tubo	M <sup>2</sup>
$a_t$	Área de sección transversal de tubos	M <sup>2</sup>
$a_T$	Área total de flujo	M <sup>2</sup>
$A$	Área del intercambiador de calor a usar en la ecuación (37)	M <sup>2</sup>
$A_0$	Área provisional de transferencia de calor	M <sup>2</sup>
$A_s$	Área de flujo cruzado del fluido lateral de la cáscara	M <sup>2</sup>
$b$	Constante a usar en la ecuación (37)	-
$C_p$	Capacidad calorífica	kJ/kg. K
$C_{sb}$	Espacio entre los proyectiles	mm
$d_e$	Diámetro equivalente al lado de la carcasa (diámetro hidráulico)	m
$d_i$	Diámetro interior del tubo	m
$d_0$	Diámetro exterior del tubo	m
$D_b$	Diámetro del haz	m
$D_s$	Diámetro de la concha	mm
$F_t$	Factor de corrección de temperatura	-
$G$	Velocidad de masa	kg/s.m <sup>-2</sup>
$h_i$	Coefficiente de transferencia de calor en el lado del tubo	L/m <sup>2</sup> . K
$h_0$	Coefficiente de transferencia de calor en el lado de la cáscara	L/m <sup>2</sup> . K
$j_{f1}$	Factor de fricción para el fluido del lado del tubo	-
$j_{f2}$	Factor de fricción del fluido lateral de la cáscara	-
$j_{h1}$	Factor de transferencia de calor en el lado del tubo	-
$k$	Conductividad térmica	W/m.K
$k_W$	Conductividad térmica del material del tubo	W/m.K
$K_1$	Constante a usar en la ecuación (13)	-

$l_B$	Espaciado de los deflectores	mm
$L_t$	Longitud del tubo	m
$m$	Caudal másico	kg/h
$n$	Constante a usar en la ecuación (37)	-
$n_1$	Constante a usar en la ecuación (13)	-
$n_p$	Número de pasos por el lado del tubo	-
$N_0$	Número de tubos	-
$N_{tp}$	Número de tubos por pasada	-
$p_t$	Paso de tubo	m
$Pr$	Número de Prandtl	-
$\Delta P_t$	Caída de presión del fluido lateral del tubo	Pa
$Q$	Carga térmica	kW
$R$	Factor	-
$Re$	Número de Reynolds	-
$S$	Factor	-
$t$	Fluido frío de temperatura	°C
$T$	Fluido caliente de temperatura	°C
$\bar{t}$	Fluido frío a temperatura media	°C
$\bar{T}$	Fluido caliente a temperatura media	°C
$\Delta T_{lm}$	Diferencia de temperatura media logarítmica	°C
$\Delta T_m$	Diferencia real de temperatura	°C
$U_0$	Coefficiente global de transferencia de calor asumido	L/m <sup>2</sup> . K
$U_C$	Coefficiente global de transferencia de calor calculado	L/m <sup>2</sup> . K
$v$	Velocidad lineal	m/s

### Símbolos griegos

$\varphi$	Factor	-
$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	Viscosidad	Pa.s

### Subíndices

1	Entrada
2	Salida
$c$	Fluido frío
$h$	Fluido caliente
$s$	Fluido lateral de la cáscara
$t$	Fluido lateral del tubo

## 8.- Referencias.

- [1] M. Flynn, T. Akashige y L. Theodore, *Kern's Process Heat Transfer*, 2ª ed. Beverly, EE. UU.: Scrivener Publishing, 2019. <https://dokumen.pub/kerns-process-heat-transfer-2nbsped-9781119364177-9781119364832-9781119363644-1119364175.html>
- [2] E. J. Fernandes y S. H. Krishnamurthy, "Diseño y análisis de intercambiadores de calor de carcasa y tubos," *Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim.*, vol. 13, n° 15, pp. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1051/smdo/2022005>
- [3] P. Bichkar, O. Dandgaval, P. Dalvi, R. Godase y T. Dey, "Estudio del intercambiador de calor de carcasa y tubo con el efecto de tipos de deflectores," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 195-200, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.028>
- [4] R. Ragadhita y A. B. D. Nandiyanto, "Cómo calcular y diseñar intercambiadores de calor tipo carcasa y tubo con una sola

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iq>

Correo electrónico:

[inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)

[francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)

- transferencia de calor," *ASEAN Journal for Science and Engineering in Materials*, vol. 3, n° 1, pp. 21-42, 2024. <https://ejournal.bumipublikasinusantara.id/index.php/ajsem/article/view/400>
- [5] L.-Y. Chen, V. S. K. Adi y R. Laxmidewi, "Estrategia flexible de diseño de intercambiadores de calor de carcasa y tubos para la operabilidad de procesos," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 37, p. 102163, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102163>
- [6] D. Bogale, "Diseño y desarrollo de intercambiador de calor de carcasa y tubos para la aplicación de pasteurizadores de Harar Brewery Company (diseño mecánico y térmico)," *American Journal of Engineering Research*, vol. 03, n° 10, pp. 99-109, 2014. [https://www.ajer.org/papers/v3\(10\)/N0310990109.pdf](https://www.ajer.org/papers/v3(10)/N0310990109.pdf)
- [7] H. N. Purnamasari, T. Kurniawan y A. B. D. Nandiyanto, "Diseño de intercambiador de calor tipo carcasa y tubo para proceso de producción de celulosa nanofibrila," *International Journal of Research and Applied Technology*, vol. 1, n° 2, pp. 318-329, 2021. <https://ojs.unikom.ac.id/index.php/injuratech/article/view/6410>
- [8] S. P. Chit, P. K. Ma y C. C. Khaing, "Diseño térmico de intercambiadores de calor de carcasa y tubos," *Iconic Research and Engineering Journals*, vol. 3, n° 1, pp. 313-318, 2019. <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1701405.pdf>
- [9] S. Kashyap, "Diseño de un intercambiador de calor de carcasa y tubos," *IJARIE*, vol. 3, n° 4, pp. 536-550, 2017. <https://ijariie.com/FormDetails.aspx?MenuScriptId=14928&srsId=AfmBOorg5c2Z1jtVWTTZnLXZyVP8vibVhGOjfhzbpF7esiJJQgjjc7>
- [10] D. Singh y N. D. Pal, "Diseño y Evaluación del Rendimiento de un Intercambiador de Calor de Carcasa y Tubos usando Ansys (Dinámica de Fluidos Computacional)," *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, vol. 2, n° 3, pp. 427-446, 2016. <https://ijseas.com/volume2/v2i3/ijseas20160348.pdf>
- [11] S. H. Gawande, S. D. Wankhede, R. N. Yerrawar, V. J. Sonawane y U. B. Ubarhande, "Diseño y desarrollo de intercambiador de calor de carcasa y tubos para bebidas," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 2, pp. 121-125, 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.24015>
- [12] F. H. Napitupulu, T. B. Sitorus, H. V. Sihombing, A. H. Siburian y H. Siagian, "Diseño y fabricación de intercambiador de calor de carcasa y tubos con una sola capa y dos pasadas como calentador de agua con agua caliente de azufre," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2421, p. 012034, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012034>
- [13] J.-F. Zhang, Y.-L. Él, y W.-Q. Tao, "Un método de diseño y clasificación para intercambiadores de calor de carcasa y tubos con deflectores helicoidales," *Journal of Heat Transfer*, vol. 132, pp. 1-8, 2010. <https://doi.org/10.1115/1.4000457>
- [14] R. Mukherjee, "Diseñar eficazmente intercambiadores de calor de carcasa y tubos," *Chemical Engineering Progress*, pp. 1-17, 1998. <https://www.torr-engenharia.com.br/wp-content/uploads/2011/05/exchanger.pdf>
- [15] S. Kakaç, H. Liu y A. Pramuanjaroenkij, *Intercambiadores de calor - Selección, clasificación y diseño térmico*, 3ª ed. Boca Raton, EE. UU.: CRC Press, 2012.
- [16] E. Cao, *Transferencia de calor en ingeniería de procesos*. Nueva York, EE. UU.: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. <https://dokumen.pub/heat-transfer-in-process-engineering-1nbsped-0071624082-9780071624084.html>
- [17] R. Sinnott y G. Towler, *Diseño de Ingeniería Química*, 6ª ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020. <https://app.knovel.com/kn/resources/kpCEDE0001/toc>
- [18] R. Mukherjee, *Diseño Térmico Práctico de Intercambiadores de Calor de Cáscara y Tubos*. Nueva York, EE. UU.: Begell House, Inc., 2004.
- [19] Ingeniería Química. (2024) Indicadores económicos. *Revista de Ingeniería Química*. 52.
- [20] D. W. Green y M. Z. Southard, *Manual de Ingenieros Químicos de Perry*, 9ª ed. Nueva York, EE.UU.: McGraw-Hill Education, 2019.

# Elaboración de Salchicha Tipo Viena a Partir de la Pulpa de Pota (*Dosidicus gigas*).

*Elaboration of Vienna-type Sausage from Jumbo squid pulp (*Dosidicus gigas*)*

Richard Smith Gutierrez Huayra <sup>1\*</sup>

Recibido: 02/08/2025 – Aceptado: 16/10/2025 – Publicado: 01/01/2025

Artículos de Investigación

Artículos de Revisión

Artículos de Ensayos

\* Autor para correspondencia.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

## Resumen.

La pota (*Dosidicus gigas*) constituye un recurso marino abundante y de alto valor nutricional, con gran potencial para diversificar la industria alimentaria mediante el desarrollo de productos innovadores de valor agregado. El objetivo de la investigación fue analizar la factibilidad de elaborar una salchicha tipo Viena utilizando pulpa de pota, optimizando su formulación y evaluando su aceptación sensorial. Se trabajó con tres formulaciones que incorporaron 5%, 8% y 10% de almidón. El proceso tecnológico comprendió acondicionamiento, lixiviación, molienda, homogeneización, embutido, escaldado, enfriamiento y conservación en refrigeración. La evaluación de preferencia se efectuó con un panel de 30 jueces no entrenados mediante la prueba estadística de Friedman. Asimismo, se realizaron análisis químicos, nutricionales y microbiológicos para determinar tanto el valor nutritivo como la inocuidad del producto. La formulación con 8% de almidón evidenció la mejor aceptación en los atributos de sabor, apariencia y textura. Las condiciones óptimas de procesamiento fueron: emulsificación a 10 °C, cocción a 70 °C durante 23 minutos y enfriado a 2–4 °C por 5 minutos, con un menor consumo energético respecto a otras formulaciones. Cada 100 g de producto aportaron 17,4 g de proteínas, 1,2 g de grasa, 1,3 g de carbohidratos y 125 Kcal, con un perfil más saludable que la salchicha control. Los análisis microbiológicos confirmaron la inocuidad del producto, al registrarse bajos recuentos de aerobios y ausencia de patógenos. En conclusión, la elaboración de salchichas tipo Viena a partir de pulpa de pota resulta una alternativa viable que aporta beneficios nutricionales, sensoriales y sanitarios, contribuyendo a la diversificación de los productos derivados de la pesca.

## Palabras clave.

Pota (*Dosidicus gigas*), Salchicha tipo Viena, Productos pesqueros, Inocuidad alimentaria, Valor agregado.

## Abstract.

The jumbo squid (*Dosidicus gigas*) is an abundant and nutritious marine resource with the potential to diversify the food industry through value-added products. The study aimed to evaluate the feasibility of producing a vienna-type sausage using jumbo squid pulp, optimizing its formulation and sensory acceptability. Three formulations with 5%, 8%, and 10% starch were developed. The process included conditioning, leaching, grinding, homogenization, stuffing, blanching, cooling, and refrigeration. Acceptability was evaluated by a panel of 30 untrained judges using the Friedman test. Chemical-nutritional and microbiological analyses were conducted to determine the product's nutritional value and safety. The formulation with 8% starch received the highest acceptance in flavor, appearance, and texture. The optimal processing parameters were: emulsification at 10 °C, cooking at 70 °C for 23 min, and cooling at 2–4 °C for 5 min, resulting in energy savings compared to other formulations. Per 100 g, the product contained 17.4 g protein, 1.2 g fat, 1.3 g carbohydrates, and 125 Kcal, with lower fat and calorie content than the control sausage. Microbiological analyses confirmed its safety, showing low aerobic counts and absence of pathogens. The production of Vienna-type sausage based on jumbo squid pulp proved viable, offering nutritional, sensory, and sanitary, advantages for the diversification of fishery products.

## Keywords.

Jumbo squid (*Dosidicus gigas*), Vienna-type sausage, Fishery products, Food safety, Value-added.

## 1. Introducción

La creciente demanda mundial de alimentos proteicos sostenibles y de alta calidad ha impulsado la investigación hacia fuentes no convencionales y el aprovechamiento integral de los recursos marinos [1]. En este contexto, el calamar gigante o pota (*Dosidicus gigas*) representa uno de los recursos cefalópodos más abundantes del Océano Pacífico Oriental, con volúmenes de captura significativos que sustentan importantes pesquerías en países como Perú y México [2]. A pesar de su abundancia y alto valor nutricional, gran parte de su potencial tecnológico permanece subutilizado, destinándose principalmente a mercados de exportación como producto congelado o en derivados de bajo valor agregado [3]. La pulpa de pota, caracterizada por su alto contenido proteico y bajo contenido graso, presenta una oportunidad excepcional para

el desarrollo de nuevos productos alimenticios con valor añadido, como los embutidos cárnicos funcionales [4]. Este trabajo explora la viabilidad de utilizar la pulpa de *Dosidicus gigas* como materia prima principal en la elaboración de salchichas tipo Viena, un producto de alta demanda y aceptación en el mercado.

### 1.1 La Pota (*Dosidicus gigas*)

#### 1.1.1 Clasificación y descripción

*Dosidicus gigas* (d'Orbigny, 1835), comúnmente conocido como pota, jibia gigante o calamar de Humboldt, es un molusco cefalópodo nerítico-oceánico perteneciente a la familia Ommastrephidae [5]. Su clasificación taxonómica completa es la siguiente: Reino: Animalia, Phylum: Mollusca, Clase: Cephalopoda, Orden: Oegopsida, Familia: Ommastrephidae, Género: *Dosidicus*, Especie: *D. gigas* [6].

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Callao; [rsgutierrezh@unacvirtual.edu.pe](mailto:rsgutierrezh@unacvirtual.edu.pe); <https://orcid.org/0009-0009-1786-4837>; Lima – Perú.

Es un invertebrado de gran tamaño, pudiendo alcanzar más de 1.5 metros de longitud de manto y 50 kg de peso, lo que lo convierte en uno de los cefalópodos más grandes del mundo [7].



Figura 1. Presencia de Pota en el Océano Pacífico.  
Fuente:[8].

### 1.1.1 Biología y Anatomía.

Es un organismo pelágico que realiza extensas migraciones verticales diarias, habitando en la columna de agua a profundidades que pueden superar los 800 metros durante el día [7]. Se caracteriza por un ciclo de vida corto (1-2 años), un crecimiento extremadamente rápido y una alta fecundidad, lo que le confiere una gran resiliencia como recurso pesquero [9]. Su dieta es muy variada, incluyendo peces mesopelágicos, crustáceos y otros cefalópodos [10]. Anatómicamente y tecnológicamente, el manto es la porción de mayor interés para el procesamiento, representando la principal fuente de músculo comestible [4].

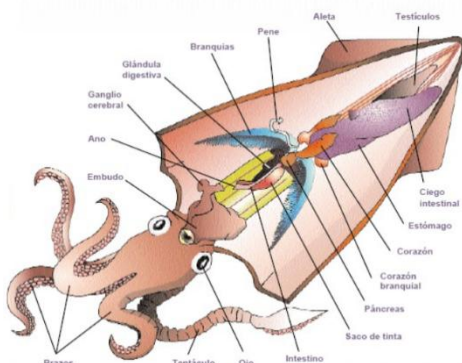


Figura 2. Anatomía de la pota.

### 1.1.2 Composición química, nutricional y mineral.

La pulpa de *Dosidicus gigas* es reconocida por su excelente valor nutricional. Su composición proximal promedio consiste en una alta humedad (~80%), un elevado contenido de proteínas de alto valor biológico (16-20%), y un bajo contenido de lípidos (<2%) [4, 10]. Esta composición la convierte en una materia prima magra ideal para la formulación de productos saludables. La proteína de calamar es rica en aminoácidos esenciales y su perfil mineral incluye cantidades significativas de fósforo, potasio y selenio, aunque el contenido de metales pesados como el cadmio puede ser una preocupación en organismos de gran tamaño, requiriendo monitoreo [10, 11].

#### 1.1.3 Nitrógeno No Proteico.

Una característica bioquímica relevante en los cefalópodos es su alto contenido de compuestos de nitrógeno no proteico (NNP), que utilizan para la osmorregulación y flotabilidad [12]. Estos compuestos incluyen aminoácidos libres (taurina, arginina, prolina), betainas y, notablemente, cloruro de amonio en los tejidos de algunas especies de calamares de aguas profundas [12, 13]. Desde el punto de vista tecnológico, una concentración elevada de amonio puede generar sabores amargos y olores indeseables en la pulpa, lo que hace necesario aplicar tratamientos de lavado y acondicionamiento para garantizar la calidad sensorial del producto final [13].

### 1.2 Proteínas musculares magras.

La funcionalidad tecnológica de la pulpa de pota para la elaboración de embutidos emulsionados reside en la capacidad de sus proteínas para formar geles y estabilizar emulsiones. Las proteínas del músculo se clasifican, según su solubilidad, en tres fracciones principales [14].

#### 1.2.1 Proteínas Miofibrilares.

Constituyen la fracción más abundante (65-75% del total proteico) e importante desde el punto de vista funcional [13, 14]. Incluyen las proteínas contráctiles actina y miosina. Son solubles en soluciones salinas de alta fuerza iónica ( $\geq 0.5$  M NaCl) [15]. La miosina es la principal responsable de la gelificación inducida por calor, formando una matriz tridimensional que atrapa agua y grasa, lo que define la textura, jugosidad y cohesividad de los embutidos [16].

#### 1.2.2 Proteínas Sarcoplasmáticas.

Representan entre el 20-30% de la proteína total y son solubles en agua o soluciones salinas de baja fuerza iónica [13]. Esta fracción incluye enzimas y mioglobina (en especies que la poseen). En el caso del surimi y productos similares, a menudo se eliminan mediante lavados, ya que pueden dificultar la formación de un gel fuerte y afectar el color y el sabor [17].

#### 1.2.3 Proteínas Estromales.

Componen el tejido conectivo y representan una fracción minoritaria en el músculo de pescado y cefalópodos (2-5%) [14]. Incluyen principalmente colágeno. El bajo contenido de colágeno y su alta termolabilidad en comparación con el

de los mamíferos contribuyen a la textura tierna de la carne de calamar, pero su papel en la estructura de la emulsión es limitado [18].

## 2. Diseño de investigación y metodología experimental para la producción de Salchicha de pota.

El estudio sobre la elaboración de salchicha tipo viena a partir de pulpa de (*Dosidicus gigas*) empleó un diseño de investigación específico y una metodología experimental detallada, que incluyó análisis sensoriales y microbiológicos, y la aplicación de la prueba de Friedman.

### 2.1 Diseño de investigación.

El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, que consistió en manipular la variable independiente (porcentaje de almidón en la formulación) con el fin de evaluar su efecto en variables dependientes como las características sensoriales, el perfil nutricional y la calidad microbiológica de la salchicha de pota. Este diseño permitió establecer los parámetros de procesamiento y contrastar los resultados obtenidos en cada formulación.

### 2.2 Metodología experimental.

La investigación combinó ensayos prácticos y análisis de laboratorio. La elaboración de las salchichas se llevó a cabo en las instalaciones de MICROBAC – Laboratorios E.I.R.L., mientras que la evaluación sensorial se realizó en la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga (UNICA).

## 3. Materiales y métodos.

### 3.1 Materiales, equipos, instrumentos y reactivos.

#### 3.1.1 Materiales.

El proceso utilizó una olla de acero (5lt. de capacidad) (LUISSANT), tamizadora de lona de (60x30cm), coladeras de plástico, tabla de picar de (45x30 cm), Sartén de teflón de (24 cm de diámetro) (UNCO), pabito, cuchillos de acero inoxidable y vasos descartables de (7 oz.).

#### 3.1.2 Equipos.

El proceso utilizó una olla semiindustrial (SURGE), una prensa manual, un congelador (COLDEX) y una moladora de carne (HENKEL).

#### 3.1.3 Instrumentos.

Los instrumentos de medición incluían un medidor de pH (POCKET), un termómetro de 150 °C (OMROM), una balanza higrométrica, una balanza analítica y una balanza comercial.

#### 3.1.4 Reactivos.

Se usaron ácido láctico y bicarbonato de sodio como reactivos.

### 3.2 Proceso tecnológico de salchicha de pota.

#### Recepción de materia prima.

Se adquirió la pulpa de pota, en el mercado de terminales pesqueras de Pisco y los insumos respectivamente en el mercado N°2 - Pisco.

#### Acondicionamiento.

Se despellejó el manto de la *pota*, se retiraron los cartílagos, se lavaron y se congelaron a 4-6 °C [8]. Debido al sabor ácido y amargo de la *pota*, que proviene de los compuestos nitrogenados no proteicos (NNP), se llevó a cabo un proceso de separación que implicó cuatro lavados.

#### Trozado.

La pota se troceó en cubos para facilitar la molienda y obtener una pasta tipo surimi.

#### Molienda.

Una vez trozada la pota, se lleva hacia la máquina moladora para producir la pasta, que es recepcionado en un recipiente a la salida de la moladora.

#### Proceso de Lixiviación (preparación de surimi).

Este proceso siguió la metodología de lixiviación con solución ácido – salina en cuatro etapas:

##### Primer Lavado.

La *pota* molida se colocó en una solución de ácido láctico al 0,5% y sal al 0,15% (proporción 2:1 entre solución y carne) durante 10 minutos en constante presión manual, manteniendo la temperatura de la solución por debajo de 10 °C, y luego tamizándola.

##### Segundo y Tercer Lavado.

Estos lavados se realizaron solo con agua fría (por debajo de 10 °C) durante 10 minutos, en constante prensado manual y posterior tamizado para el siguiente lavado.

##### Cuarto Lavado.

La neutralización se logró utilizando una solución de bicarbonato de sodio al 0,1% (por debajo de 10 °C) durante 10 minutos en constante prensado manual, seguido de tamizado y prensado en una tela de tocuyo.

#### Congelado.

La pasta de surimi resultante se congeló en forma extendida.

#### Pesado.

La pulpa de *pota* acondicionada, los ingredientes y los aditivos se pesaron según los cálculos para obtener 500 g de producto terminado.

Table 1. Formulación control de salchicha de ternera.

Ingredientes	gramos (g)
Carne de ternera	350
Grasa de cerdo	150
Hielo	250
Maicena	50
Fosfato	2.5
Sal de cura	2.0
Sal	15
Ajos	2

Pimienta	1
Comino	1
Ajinomoto	2
Nuez Moscada	0.4
Sabor Hot dog	2
Sabor Humo	0.2 ml
Colorante rojo fresa	0.1 ml

Table 2. Formulación de la Salchicha de pota (*Dosidicus gigas*)

Ingredientes	Cantidad (g)	Cantidad (g)	Cantidad (g)
	5% - Almidón	8% - Almidón	10% - Almidón
Carne	560	560	560
Sal	14	14	14
Pimienta	1.1	1.1	1.1
Comino	1.1	1.1	1.1
Ajinomoto	2.2	2.2	2.2
Nuez moscada	0.6	0.6	0.6
Saborizante	2.2	2.2	2.2
Colorante	-	-	-
Hielo	140	140	140
Almidón	28	44.8	56

### Homogenización.

Los ingredientes secos (condimentos) se homogenizaron en una bolsa de polietileno.

### Mezclado.

La pasta de pota (surimi) se añadió a un procesador, seguido de los ingredientes secos, luego el hielo picado y, por último, el porcentaje de almidón.

### Embutido.

La mezcla homogénea se colocó en una maquina embutidora y la envoltura de celulosa se llenaron a presión.

### Atado.

Luego de embutida la envoltura de celulosa, se ataron en unidades individuales de tamaño estándar.

### Escaldado.

Las salchichas se escaldaron durante 20 min, asegurándose de que estuvieran completamente sumergidas en agua y que la temperatura del agua no supere los 80 °C.

### Enfriamiento.

Las salchichas se enfriaron durante 5 min en agua a más de 10 °C.

### Refrigeración.

El producto se almacenó a temperatura de refrigeración (4 – 8 °C) para su conservación.

Ver Anexo 1.- Diagrama de flujo para la obtención de pasta de pota (surimi).

Fuente: Elaboración propia.

Ver Anexo 2.- Fig. 4. Diagrama de flujo para la obtención de Salchicha de pota.

Fuente: Elaboración propia.

## 4. Análisis e Interpretación de Resultados.

### 4.1 Prueba de Friedman para la evaluación sensorial.

Para determinar la aceptabilidad de las salchichas de pota se aplicó la prueba no paramétrica de Friedman, la cual permitió identificar si existían diferencias significativas en las preferencias de los jueces en función del porcentaje de almidón incorporado en las formulaciones.

Se evaluaron tres formulaciones:

- Salchicha con un 5% de almidón.
- Salchicha con un 8% de almidón.
- Salchicha con un 10% de almidón.

### Evaluadores.

La evaluación involucro a un panel de 30 jueces no capacitados, con edades comprendidas entre 20 y 25 años.

### Procedimiento.

La aceptabilidad se midió mediante una escala numérica, en la que los jueces clasificaron las muestras del 1 (la más preferida) al 3 (la menos preferida) según el olor, el aroma y el sabor.

### 4.2 Prueba de Hipótesis.

La hipótesis nula ( $H_0$ ) establecía que no había diferencias significativas en las preferencias entre las muestras, mientras que la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) afirmaba que al menos una muestra tenía una preferencia diferente. El nivel de significancia ( $\alpha$ ) se fijó en 0,05.

### 4.3 Prueba no paramétrica de Friedman.

Se tienen como resultados de la prueba de referencia ampliada para las siguientes características sensoriales:

Tabla. 3. Resultados de la prueba de preferencia ampliada. "Sabor".

Jueces/ Evaluadores	Códigos de las muestras de "Salchicha de Pota"		
	N°	124	242
1	3	3	3
2	2	2	3
3	2	2	2
4	3	1	1
5	1	1	1
6	3	1	3
7	2	2	1
8	2	1	2
9	2	1	1
10	2	1	1
11	1	1	2
12	3	2	2
13	3	1	3
14	2	3	1
15	2	2	1
16	1	1	2
17	2	1	1
18	2	1	2
19	3	2	2
20	3	2	1
21	3	1	2
22	2	1	3
23	2	1	1
24	3	2	2
25	3	1	1
26	3	1	2

27	3	1	1
28	2	1	2
29	3	2	1
30	2	1	1
Total	70	43	51

Asignación de códigos:

124 (X): 5% almidón.

242 (Y): 8% almidón.

375 (Z): 10% almidón.

Tabla 4. Resultados de la prueba de preferencia ampliada. “Apariencia”.

Jueces/ Evaluadores	Códigos de las muestras de “Salchicha de Pota”		
	N°	100	200
1	1	2	2
2	2	1	2
3	1	2	3
4	1	1	3
5	1	2	2
6	1	2	3
7	2	3	3
8	1	3	3
9	1	1	3
10	2	2	2
11	1	1	3
12	1	2	2
13	1	3	3
14	1	2	2
15	2	1	3
16	1	3	2
17	2	2	2
18	1	3	2
19	1	1	3
20	1	1	3
21	2	1	3
22	1	3	3
23	2	2	2
24	2	1	3
25	2	2	2
26	1	2	3
27	2	2	3
28	1	2	3
29	1	1	3
30	1	2	3
Total	40	56	79

Asignación de códigos:

100 (X): 8% almidón.

200 (Y): 10% almidón.

300 (Z): 5% almidón.

Tabla 5. Resultados de la prueba de preferencia ampliada. “Textura”.

Jueces/ Evaluadores	Códigos de las muestras de “Salchicha de Pota”		
	N°	114	224
1	3	2	2
2	2	2	2
3	3	2	2
4	2	3	2
5	2	3	2
6	2	3	1
7	2	2	2
8	2	3	2
9	2	2	2
10	2	3	1
11	3	2	2

12	2	3	1
13	2	2	2
14	2	2	1
15	3	2	2
16	3	3	2
17	2	3	2
18	2	3	2
19	2	3	2
20	2	3	1
21	3	2	1
22	2	3	2
23	3	2	1
24	2	3	2
25	3	2	1
26	2	3	2
27	3	3	2
28	2	3	1
29	2	2	2
30	2	3	1
Total	69	77	50

Asignación de códigos:

114 (X): 10% almidón.

224 (Y): 5% almidón.

305 (Z): 8% almidón.

#### Hipótesis:

Ho: No existen diferencias significativas en las preferencias de las muestras.

Ha: Al menos una de las muestras tiene diferente preferencia con respecto a las demás.

Table 6. Resultados de la prueba de preferencia en “Apariencia, sabor, textura de salchicha de pota”.

Muestra	Apariencia	Sabor	Textura
5% Almidón	2.33±0.66 <sup>b</sup>	2.63±0.49 <sup>b</sup>	2.57±0.50 <sup>b</sup>
8% Almidón	1.43±0.63 <sup>a</sup>	1.33±0.48 <sup>a</sup>	1.66±0.48 <sup>a</sup>
10% Almidón	1.70±0.75 <sup>a</sup>	1.87±0.73 <sup>a</sup>	2.30±0.47 <sup>b</sup>

(XLSTAT – Statistical Software for Excel)

Se reportó una mayor preferencia para las salchichas con sustitución al 8% de almidón, seguido de las de 10% e inferior para la inclusión al 5%. Esto de acuerdo a la percepción del consumidor según la apariencia, sabor y textura, atributos importantes en esta categoría de embutidos escaldados.

#### 4.4 Resultados estadísticos y decisión.

El estadístico de Friedman calculado ( $X^2C$ ) fue comparado con el valor crítico tabular ( $X^2T$ ). En los tres atributos evaluados (sabor, apariencia y textura), los valores calculados superaron al valor crítico, lo que condujo al rechazo de la hipótesis nula. Por lo tanto, se confirmó la existencia de diferencias significativas en las preferencias de los jueces.

Este hallazgo respalda que la formulación óptima fue la de 8% de almidón, la cual presentó la suma de rangos más baja, reflejando la mayor preferencia en la escala de evaluación.

#### 5. Resultado del análisis químico-nutricional.

Este análisis proporcionó información sobre el contenido de macronutrientes y vitaminas de la salchicha de *pota*, y la formulación óptima mostró valores específicos por cada porción comestible de 100 g.

Table 7. Resultado de análisis químico nutricional de salchicha de *pota*/100 g. de porción comestible.

Descripción	Salchicha Control	Salchicha de Pota
Energía (Kcal)	351	125
Agua (g)	48,5	49,2
Proteínas (g)	14,8	17,4
Grasa (g)	29,5	1,2
Carbohidratos (g)	1,5	1,2
Vitam. A (mg)	-	-
Tiamina (mg)	0,03	0,03
Riboflavina (mg)	0,07	0,07
Niacina (mg)	3,7	3,7
Vitam. C (mg)	-	-

Fuente: Microbac Laboratorios E.I.R.L.

## 6. Resultado del análisis microbiológico.

Se realizaron pruebas microbiológicas sobre la formulación óptima de salchichas de *pota* para garantizar que cumplía con los parámetros de seguridad aceptables. Los resultados se compararon con la Norma Sanitaria que establece los criterios microbiológicos para la seguridad alimentaria.

Table 8. Resultado de análisis microbiológico de salchicha de *pota*.

Muestra	Recuento total de aerobios Ufc/g	Coliformes	Staphylococcus aureus Ufc/g	Salmonella a 25 g.
Salchicha de Pota	1,200	0	0	Ausencia

Fuente: Microbac Laboratorios E.I.R.L.

Referencia – Norma Sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos.

NTS No. 071 – MINS/DIGESA – V.01 Ministerio de Salud 2010.

## 7. Discusión.

La presente investigación demuestra la viabilidad técnica y sensorial de elaborar salchichas tipo Viena utilizando pulpa de calamar gigante (*Dosidicus gigas*), posicionando este recurso marino como una materia prima prometedora para el desarrollo de productos cárnicos funcionales con valor agregado. Los resultados obtenidos se alinean con las tendencias actuales que buscan diversificar las fuentes proteicas y ofrecer alternativas más saludables al consumidor [19, 20].

El hallazgo central del estudio es la superioridad sensorial de la formulación con 8% de almidón, la cual obtuvo la mayor aceptación en sabor, apariencia y textura. Este resultado sugiere un punto de equilibrio tecnológico crucial. Por un lado, una concentración de almidón del 5% pudo ser insuficiente para formar una red de gel completamente integrada con la matriz proteica, afectando la cohesividad. Por otro lado, un 10% de almidón pudo haber resultado en una textura excesivamente firme o gomosa, un fenómeno documentado en productos de surimi con altas concentraciones de este hidrocoloide [21, 22]. El almidón,

al gelatinizar durante la cocción (70 °C), interactúa con las proteínas miofibrilares de la *pota*, formando una estructura de gel mixta y estable que retiene agua y grasa, mejorando tanto la textura como la jugosidad [23]. El mecanismo implica la formación de una red tridimensional donde los gránulos de almidón hinchados se incrustan en la matriz proteica, reforzando la estructura general del gel [24].

Desde el punto de vista nutricional, la salchicha de *pota* optimizada presenta un perfil notablemente más saludable que las salchichas comerciales convencionales, con un alto contenido de proteínas (17.4 g/100 g) y un bajo aporte de grasa (1.2 g/100 g) y calorías (125 Kcal/100 g). Este perfil es consistente con la composición inherente del músculo de *D. gigas* y subraya su potencial para la formulación de alimentos funcionales dirigidos a consumidores preocupados por la salud [25]. La sustitución de grasas animales por la proteína magra del calamar no solo reduce el contenido calórico, sino que también modifica el perfil de ácidos grasos, incrementando la proporción de grasas poliinsaturadas beneficiosas como el EPA y el DHA, característicos de los productos marinos [26].

La calidad textural del producto final depende fundamentalmente de la capacidad de gelificación de las proteínas miofibrilares del calamar (miosina y actina). El tratamiento térmico a 70 °C es clave para desnaturalizar estas proteínas y permitir que formen una red tridimensional cohesiva [27]. Estudios recientes sobre las proteínas de *D. gigas* confirman que su gelificación es un proceso complejo que puede ser modulado por aditivos. Niu et al. [28] demostraron que la adición de otras proteínas, como la de clara de huevo, puede inhibir la auto-agregación indeseada de las moléculas de miosina y promover una red de gel más ordenada y fuerte. De manera análoga, el almidón en nuestra formulación no solo actúa como un agente de relleno, sino como un ingrediente funcional que modifica positivamente la reología del sistema, mejorando la capacidad de retención de agua y la firmeza del gel final [24].

La inocuidad del producto, confirmada por los bajos recuentos microbiológicos y la ausencia de patógenos, es un resultado de suma importancia. Este éxito se atribuye a la calidad de la materia prima, las buenas prácticas de manufactura y, crucialmente, al proceso de lixiviación, que reduce la carga microbiana inicial además de eliminar compuestos de nitrógeno no proteico (NNP) que causan sabores indeseables [29]. La estabilidad microbiológica y la extensión de la vida útil son desafíos significativos en productos de calamar debido a su alta actividad de agua y potencial enzimático. Investigaciones recientes han demostrado que los hidrolizados de proteína de *D. gigas* poseen propiedades antioxidantes y antimicrobianas intrínsecas, capaces de extender la vida útil de las salchichas de calamar hasta en un 95% al inhibir el crecimiento microbiano y la oxidación [30]. Aunque en nuestro estudio no se usaron hidrolizados, los resultados microbiológicos

positivos sientan una base sólida para futuras innovaciones en esta línea.

En conclusión, la discusión de los resultados, contrastada con la literatura científica reciente, confirma que la salchicha de pota es una alternativa viable y nutricionalmente superior. La optimización de la concentración de almidón es clave para lograr una textura aceptable, mientras que el control del proceso, desde la lixiviación hasta la cocción, garantiza la seguridad y calidad del producto. Este trabajo aporta evidencia concreta para la valorización de *Dosidicus gigas*, un recurso abundante que puede contribuir significativamente a la seguridad alimentaria y a la innovación en la industria de alimentos marinos.

## 8. Conclusiones.

El presente estudio establece los parámetros óptimos de procesamiento para la elaboración de salchicha tipo Viena a partir de pulpa de pota (*Dosidicus gigas*), determinando que la concentración de 8% de almidón de papa constituye el punto de equilibrio tecnológico que maximiza la aceptabilidad sensorial y las propiedades fisicoquímicas del producto. Esta formulación optimizada, procesada mediante lixiviación (tres lavados con agua fría), emulsificación con grasa vegetal y cocción a 70 °C por 30 minutos, genera un producto cármico funcional con alto contenido proteico (17.4 g/100 g), bajo aporte graso (1.2 g/100 g) y reducido valor calórico (125 Kcal/100 g), cumpliendo con los estándares microbiológicos establecidos por la normativa peruana.

Este aporte concreto posiciona a la pota como una materia prima viable y nutricionalmente superior para la industria de productos cármicos emulsionados, contribuyendo a la diversificación de fuentes proteicas marinas y a la valorización de recursos pesqueros abundantes en el Pacífico Oriental.

Los resultados obtenidos demuestran que la interacción sinérgica entre las proteínas miofibrilares de la pota y el almidón durante el tratamiento térmico es fundamental para la formación de una matriz de gel cohesiva y estable, que confiere al producto final las características texturales y sensoriales deseadas. La capacidad de retención de agua, la firmeza y la jugosidad del producto optimizado evidencian el potencial tecnológico de esta especie para aplicaciones en la industria alimentaria, superando las limitaciones tradicionalmente asociadas al procesamiento de cefalópodos. Estos hallazgos proporcionan una base científica sólida para la transferencia tecnológica hacia el sector productivo, facilitando la implementación de procesos estandarizados y reproducibles a escala industrial.

Se recomienda que futuras investigaciones se enfoquen en tres direcciones prioritarias: primero, realizar estudios de vida útil bajo diferentes condiciones de almacenamiento refrigerado y en atmósfera modificada para determinar la

estabilidad microbiológica, fisicoquímica y sensorial del producto durante su comercialización; segundo, optimizar el perfil de sabores mediante la evaluación de diferentes combinaciones de especias, condimentos y agentes enmascarantes que minimicen posibles notas residuales características del calamar, mejorando así la aceptación del consumidor; y tercero, desarrollar estudios de escalamiento a nivel piloto e industrial que validen la reproducibilidad del proceso, evalúen la viabilidad económica de la producción masiva y establezcan los parámetros críticos de control de calidad.

Adicionalmente, sería valioso explorar la incorporación de hidrolizados proteicos de pota con propiedades antioxidantes y antimicrobianas, así como la formulación de productos análogos con diferentes perfiles nutricionales dirigidos a segmentos específicos del mercado, como consumidores deportistas, adultos mayores o personas con restricciones dietéticas.

## 9. Author Contributions (Contributor Roles Taxonomy (CRediT))















1. Conceptualización: Richard Smith Gutierrez Huayra.
2. Curación de datos: Richard Smith Gutierrez Huayra.
3. Análisis formal: Richard Smith Gutierrez Huayra.
4. Adquisición de fondos: N/A.
5. Investigación: Richard Smith Gutierrez Huayra.
6. Metodología: Richard Smith Gutierrez Huayra.
7. Administración del proyecto: Richard Smith Gutierrez Huayra.
8. Recursos: Richard Smith Gutierrez Huayra.
9. Software: Richard Smith Gutierrez Huayra.
10. Supervisión: Richard Smith Gutierrez Huayra.
11. Validación: Richard Smith Gutierrez Huayra.
12. Visualización: Richard Smith Gutierrez Huayra.
13. Redacción - borrador original: Richard Smith Gutierrez Huayra.
14. Redacción - revisión y edición: Richard Smith Gutierrez Huayra.

## 10. Referencias.













- [1] Lynch, H., Johnston, C., & Wharton, C. (2018). Plant-based diets: Considerations for environmental impact, protein quality, and exercise performance. *Nutrients*, 10(12), 1841. <https://doi.org/10.3390/nu10121841>
- [2] Ibáñez CM, Cubillos LA, Tafur R, Argüelles J, Yamashiro C, Poulin E. Genetic diversity and demographic history of *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Humboldt Current System. *Mar Ecol Prog Ser* [Internet]. 2011;431:163–71. Available from: <http://dx.doi.org/10.3354/meps09133>
- [3] Mazzeo MF, Siciliano RA. Proteomics for the authentication of fish species. *J Proteomics* [Internet]. 2016;147:119–24. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprot.2016.03.007>
- [4] Ramírez-Suárez JC, Pacheco-Aguilar R, Scheuren-Acevedo SM, García-Sánchez G, Carvallo-Ruiz G, Lugo-Sánchez ME, et al. Microbiological and physicochemical quality changes in frankfurters made from jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantle muscle in the presence and absence of a natural antimicrobial agent: Quality changes in squid frankfurter. *J Food Saf* [Internet]. 2015;35(4):473–81. Available from: <http://dx.doi.org/10.1111/jfs.12197>

- [5] Jereb P, Roper CFE, editors. Cephalopods of the world. An annotated and illustrated catalogue of cephalopod species known to date. Volume 2. Myopsid and Oegopsid Squids. Rome: FAO; 2010.
- [6] WoRMS Editorial Board. World Register of Marine Species. *Dosidicus gigas* (d'Orbigny, 1835). 2023. [Consultado 1 Oct 2025]. Disponible en: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=220325>.
- [7] Camarillo-Coop S, Salinas-Zavala CA, Lavaniegos BE, Markaida U. Food in early life stages of *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) from the Gulf of California, Mexico. *J Mar Biol Assoc U K* [Internet]. 2013;93(7):1903–10. Available from: <http://dx.doi.org/10.1017/s0025315413000398>
- [8] Tennesen M. March of the Red Devil. *New Sci* [Internet]. 2015;227(3038):32–5. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/s0262-4079\(15\)31176-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0262-4079(15)31176-3)
- [9] Staaf DJ, Camarillo-Coop S, Haddock SHD, Nyack AC, Payne J, Salinas-Zavala CA, et al. Natural egg mass deposition by the Humboldt squid (*Dosidicus gigas*) in the Gulf of California and characteristics of hatchlings and paralarvae. *J Mar Biol Assoc U K* [Internet]. 2008;88(4):759–70. Available from: <http://dx.doi.org/10.1017/s0025315408001422>
- [10] Liu A, Liu G, Huang C, Shen L, Li C, Liu Y, et al. The bacterial diversity of ripened Guang'yan Suancai and in vitro evaluation of potential probiotic lactic acid bacteria isolated from Suancai. *Lebenson Wiss Technol* [Internet]. 2017;85:175–80. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.021>
- [11] Rico A, Zhao W, Gillissen F, Lürling M, Van den Brink PJ. Effects of temperature, genetic variation and species competition on the sensitivity of algae populations to the antibiotic enrofloxacin. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2018;148:228–36. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.010>
- [12] Fernández Lucas F. Mejora tecnológica de la fabricación industrial de tentáculos de potón (“*Dosidicus gigas*”) cocinado y congelado [Internet]. Universidad de Murcia. 2023. Available from: <https://digitum.um.es/handle/10201/136724>
- [13] Seibel BA, Goffredi SK, Thuesen EV, Childress JJ, Robison BH. Ammonium content and buoyancy in midwater cephalopods. *J Exp Mar Bio Ecol* [Internet]. 2004;313(2):375–87. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2004.08.015>
- [14] Huss HH. Quality and quality changes in fresh fish. Rome: FAO; 1995. FAO Fisheries Technical Paper No. 348.
- [15] Niu F, Ma S, Zhang X, Ritzoulis C, Chen Y, Pan W. The influence of KCl concentration on the gelation of myofibrillar protein giant squid (*Dosidicus gigas*) due to molecular conformation change. *Front Nutr* [Internet]. 2022;9:1082464. Available from: <http://dx.doi.org/10.3389/fnut.2022.1082464>
- [16] Niu F, Li X, Lin C, Hu X, Zhang B, Pan W. The mechanism of egg white protein to enhance the thermal gel properties of giant squid (*Dosidicus gigas*) surimi. *Food Chem* [Internet]. 2025;469(142601):142601. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142601>
- [17] Yin T, Park JW. Comprehensive review: by-products from surimi production and better utilization. *Food Sci Biotechnol* [Internet]. 2023;32(14):1957–80. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10068-023-01360-8>
- [18] Gómez-Guillén MC, Giménez B, López-Caballero ME, Montero MP. Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review. *Food Hydrocoll* [Internet]. 2011;25(8):1813–27. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.007>
- [19] Lee S, Jo K, Jeong S-K-C, Jeon H, Choi Y-S, Jung S. Recent strategies for improving the quality of meat products. *J Anim Sci Technol* [Internet]. 2023;65(5):895–911. Available from: <http://dx.doi.org/10.5187/jast.2023.e94>
- [20] Boukid F, Baune M-C, Gagaoua M, Castellari M. Seafood alternatives: assessing the nutritional profile of products sold in the global market. *Eur Food Res Technol* [Internet]. 2022;248(7):1777–86. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s00217-022-04004-z>
- [21] Amiza MA, Ng SC. Effects of surimi-to-silver catfish ratio and potato starch concentration on the properties of fish sausage. *J Aquat Food Prod Technol* [Internet]. 2015;24(3):213–26. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/10498850.2013.766293>
- [22] Mi H, Wang C, Su Q, Li X, Yi S, Li J. The effect of modified starches on the gel properties and protein conformation of *Nemipterus virgatus* surimi. *J Texture Stud* [Internet]. 019;50(6):571–81. Available from: <http://dx.doi.org/10.1111/jtxs.12466>
- [23] Jiang X, Chen Q, Xiao N, Du Y, Feng Q, Shi W. Changes in gel structure and chemical interactions of Hypophthalmichthys molitrix surimi gels: Effect of setting process and different starch addition. *Foods* [Internet]. 2021;11(1):9. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/foods11010009>
- [24] Gong Y, Xiao S, Yao Z, Deng H, Chen X, Yang T. Factors and modification techniques enhancing starch gel structure and their applications in foods: A review. *Food Chem X* [Internet]. 2024;24(102045):102045. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102045>
- [25] Kang S-I, Kim J-S, Park S-Y, Cho H-J, Jang M-S, Oh J-Y, et al. Development and quality attributes of paste sausage supplemented with common squid (*Todarodes pacificus*) tailored for the elderly. *Appl Sci (Basel)* [Internet]. 2023;13(19):10735. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/app131910735>
- [26] Hu G, Zhao Z, Liu B, Lin D, Liang J, Fang Z, et al. Fatty acid profile of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) off the Peruvian exclusive economic zone: Revealing the variability of feeding strategies. *G* [Internet]. 2022;7(5):221. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/fishes7050221>
- [27] González-González BG, Lugo-Sánchez ME, Márquez-Ríos E, Ramírez-Suárez JC, Gámez-Corrales R, Paredes-Quijada GT, et al. Properties of gels formed from jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantle muscle under heat and acid treatment: Rheological and calorimetric analysis. *ACS Food Sci Technol* [Internet]. 2024;4(12):2917–24. Available from: <http://dx.doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00481>
- [28] Niu F, Lin C, Liao H, Zhang B, Zhang J, Pan W. Formation mechanism of giant squid myofibrillar protein aggregates induced by egg white protein during heat treatment. *Food Hydrocoll* [Internet]. 2025;158(110573):110573. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110573>
- [29] Mu H, Weng P, Wu Z. Effect of Inoculation with *Lactocaseibacillus casei* and *Staphylococcus carnosus* on the Quality of Squid (*Dosidicus gigas*) Surimi Sausage. *Fermentation* [Internet]. 2023;9(9):794. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/fermentation9090794>
- [30] López-Medina FA, Dublán-García O, Morachis-Valdez AG, Saucedo-Vence K, López-García G, Díaz-Bandera D, et al. Biopolymeric hydrolysates from *Dosidicus gigas*: Functional applications and shelf-life extension in squid sausages. *Polymers (Basel)* [Internet]. 2025;17(7):839. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/polym17070839>

Anexo 1.- Diagrama de flujo para la obtención de pasta de pota (surimi).

DIAGRAMA DE PROCESO DE FLUJO					
CONCEPTO DIAGRAMADO: Pasta (Surimi)			DIAGRAMA N°: 1		
DIAGRAMA DE MÉTODO: Actual			FECHA:		
DIAGRAMA COMIENZA: Selección de carne de pota					
TIEMPO UNITARIO (Min.)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	TIEMPO UNITARIO (Min.)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO
5		Inspección del manto de pota.	10		3° Lavado de la pasta de pota, se realiza solo con agua fría a una temperatura menor a 10 °C. En constante prensado manual
4		Se retira la piel y cartilagos del manto de pota.	10		4° Lavado de la pasta de pota en una solución de 0.1 % de bicarbonato de sodio, a una temperatura menor a 10 °C.
2		Se procede a lavar el manto de pota.	3		Se hace un control de calidad al producto terminado.
4		Se congela el manto de pota de 4 -6 °C.	2		Se pesa la pasta de pota en una balanza electrónica.
2		Trozado del manto de pota.	30		Se congela de 0 a -4 °C.
6		Se muele la carne de pota en un molino de carne.	<b>RESUMEN</b>		
7		Hay un retraso después del molido.	<b>TIEMPO</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>EVENTOS</b>
			63	8	Operaciones
20		1° lavado de la pasta en una solución de 0.5 % de ácido láctico y 0.15 % de sal, a una temperatura inferior a los 10 °C.	6	2	Inspecciones
			3	1	Actividad combinada
5		2° Lavado de la pasta se realiza solo con agua fría a una temperatura menor a 10 °C. En constante prensado manual.	70	2	Almacenamiento
			2	1	Retrasos

Anexo 2. Diagrama de flujo para la obtención de Salchicha de pota.

Diagrama De Proceso De Flujo					
Concepto Diagramado: Salchicha			Diagrama N°: 2		
Diagrama De Método: Actual			Fecha:		
Diagrama Comienza: Selección De Carne					
Tiempo Unitario (Min.)	Símbolo	Descripción Del Proceso	Tiempo Unitario (Min.)	Símbolo	Descripción Del Proceso
5		Inspección de la pasta (surimi) de pota.	4		Se hace un control de calidad al producto terminado.
4		Se pesa la pasta de pota y los ingredientes en una balanza electrónica.	5		Se refrigera de 4 – 8 °C.
2		Se homogenizan los ingredientes secos.	2		Se espera para continuar con los análisis.
4		Se muele la carne en el procesador.			
2		Hay un retraso después del molido.			
6		Emulsión, se agregan los ingredientes requeridos.			
			<b>RESUMEN</b>		
7		Se embute la pasta en una embutidora manual.	<b>TIEMPO</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>EVENTOS</b>
			44	6	Operaciones
20		Se hace el escaldado durante 20 minutos a una temperatura de 80 °C.	9	2	Inspecciones
			4	1	Actividad combinada
5		Se deja enfriar durante 5 minutos a más de 10 °C.	5	1	Almacenamiento
			4	2	Retrasos

## Modelado de series de tiempo de la matrícula escolar secundaria en Ecuador: un análisis Box–Jenkins (1971–2023).

*Time series modeling of secondary school enrollment in Ecuador: a Box–Jenkins analysis (1971–2023)*

Edwin Haymacaña Moreno <sup>1</sup> \*; Leonor Alejandrina Zapata Aspiazú <sup>2</sup> ; Francisco Javier Duque-Aldaz <sup>3</sup> ; Félix Genaro Cabezas García <sup>4</sup> ; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima <sup>5</sup>

Recibido: 28/09/2025 – Aceptado: 02/12/2025 – Publicado: 01/01/2025

Artículos de Investigación

Artículos de Revisión

Artículos de Ensayos

\* Autor para correspondencia.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

### Resumen.

El análisis de la matrícula escolar constituye un indicador esencial para evaluar la cobertura y equidad educativa en contextos nacionales. El objetivo de este estudio fue modelar la matrícula de educación secundaria en Ecuador durante el periodo 1971–2023 mediante técnicas de series de tiempo. Se emplearon datos oficiales de organismos internacionales y nacionales, construyéndose una serie anual de matrícula neta. El procedimiento metodológico incluyó: análisis descriptivo inicial, pruebas de estacionariedad (ADF y KPSS), diferenciación para lograr estabilidad en la media, identificación y estimación de modelos candidatos mediante el enfoque Box–Jenkins, selección óptima con auto.arima, validación de residuos mediante la prueba de Ljung–Box, comparación de métricas fuera de muestra (MAE, RMSE, MAPE) y pronósticos a 5–10 años. Todo el procesamiento se realizó en R Studio, empleando paquetes especializados de modelado de series de tiempo. Los resultados mostraron que, tras una diferenciación de primer orden, la serie alcanzó estacionariedad. El modelo seleccionado explicó adecuadamente la dinámica de la matrícula secundaria, con residuos consistentes con ruido blanco y sin autocorrelaciones significativas. Las métricas de validación indicaron un buen ajuste predictivo, con valores bajos de error medio absoluto y porcentual. Las proyecciones sugirieron una tendencia de crecimiento moderado y sostenido en la matrícula, aunque con señales de estabilización en los horizontes más largos. Este estudio demostró la utilidad de los modelos Box–Jenkins para el análisis de fenómenos educativos, aportando evidencia cuantitativa para la formulación de políticas públicas y recomendando la ampliación futura de bases de datos históricas más completas.

### Palabras clave.

Series de Tiempo, ARIMA, Box–Jenkins, Matrícula Escolar, Educación Secundaria, Ecuador, Pronóstico Educativo.

### Abstract.

School enrollment analysis constituted a key indicator to evaluate coverage and equity in national education systems. The objective of this study was to model secondary school enrollment in Ecuador during 1971–2023 using time series techniques. Official national and international data were employed to construct an annual net enrollment series. The methodological procedure included descriptive analysis, stationarity tests (ADF and KPSS), first-order differencing, identification and estimation of candidate models through the Box–Jenkins approach, optimal selection with auto.arima, residual validation via Ljung–Box tests, out-of-sample error metrics (MAE, RMSE, MAPE), and forecasts for 5–10 years. All processing was performed in R Studio with specialized time series modeling packages. The results showed that after first-order differencing, the series achieved stationarity. The selected model adequately explained enrollment dynamics, with residuals consistent with white noise and without significant autocorrelations. Validation metrics indicated good predictive accuracy, with low mean absolute and percentage errors. Projections suggested a moderate and sustained growth trend in enrollment, though with signs of stabilization in the longer horizon. This study demonstrated the usefulness of Box–Jenkins models for analyzing educational phenomena, providing quantitative evidence for public policy formulation and recommending the expansion of more complete historical datasets in future research.

### Keywords.

Time Series, ARIMA, Box–Jenkins, School Enrollment, Secondary Education, Ecuador, Educational Forecasting.

## 1.- Introducción

El análisis del sistema educativo ecuatoriano ha cobrado especial relevancia en las últimas décadas debido a los desafíos relacionados con la cobertura, la equidad y la calidad de la educación secundaria. En particular, la matrícula escolar constituye un indicador clave para evaluar el acceso y la permanencia de los estudiantes, así como para identificar desigualdades estructurales en el sistema. Comprender la dinámica de la matrícula en el tiempo no

solo permite detectar patrones históricos, sino también anticipar tendencias que resultan fundamentales para la formulación de políticas públicas sostenibles orientadas al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS4), que busca garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad (Simonino y otros, 2025).

En la literatura científica, los modelos de series de tiempo han demostrado ser herramientas robustas para el análisis y la predicción de fenómenos socioeconómicos y educativos.

<sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Bolivariano de Tecnología; [erhaymacana@itb.edu.ec](mailto:erhaymacana@itb.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0002-8708-3894>; Guayaquil, Ecuador.

<sup>2</sup> Universidad Técnica de Babahoyo; [lzapata@utb.edu.ec](mailto:lzapata@utb.edu.ec); <https://orcid.org/0009-0003-1497-2273>; Babahoyo; Ecuador.

<sup>3</sup> Universidad de Guayaquil; [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635>; Guayaquil; Ecuador.

<sup>4</sup> Investigador Independiente; [genaro\\_cabezas@hotmail.com](mailto:genaro_cabezas@hotmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-3595-3584>; Hamilton, ON, Canadá.

<sup>5</sup> Universidad Nacional de Tumbes; [rsanchez@untumbes.edu.pe](mailto:rsanchez@untumbes.edu.pe); <https://orcid.org/0000-0003-3341-7382>; Tumbes, Perú.

Dentro de estos enfoques, el método Box–Jenkins. Se destaca por su capacidad para modelar dependencias temporales mediante estructuras autorregresivas (AR), de medias móviles (MA) y sus extensiones estacionales (SARIMA). Estos modelos han sido aplicados con éxito en contextos de pronóstico de variables macroeconómicas, climáticas y, más recientemente, en el análisis de indicadores educativos. Sin embargo, en el caso de Ecuador, la aplicación de estas metodologías al estudio longitudinal de la matrícula escolar sigue siendo limitada, lo que constituye una brecha en la literatura (Zanatta Idemori y otros, 2025).

Estudios recientes han mostrado que el uso de modelos ARIMA y sus variantes permite generar proyecciones precisas de variables como tasas de matrícula, desempeño en exámenes estandarizados y dinámica de ingreso a la educación superior y. Asimismo, investigaciones comparativas evidencian que los modelos híbridos que combinan técnicas Box–Jenkins con enfoques de aprendizaje automático, como bosques aleatorios o redes neuronales, mejoran la capacidad predictiva y ofrecen interpretaciones más flexibles de los datos educativos y. Estos aportes confirman el potencial de las series de tiempo no solo para describir patrones históricos, sino también para diseñar estrategias prospectivas en el ámbito educativo (Escolar, 2024).

El presente trabajo tiene como objetivo principal modelar la matrícula de educación secundaria en Ecuador durante el periodo 1971–2023 mediante la metodología Box–Jenkins. Específicamente, se busca: (i) identificar patrones de tendencia y estacionalidad en la matrícula; (ii) estimar modelos ARIMA/SARIMA que permitan describir su dinámica temporal; y (iii) realizar proyecciones a corto y mediano plazo que contribuyan a la planificación educativa nacional (Corrêa Werle & Lago Fonseca, 2025).

La principal contribución de este estudio radica en integrar herramientas matemáticas avanzadas de análisis de series de tiempo con datos educativos, generando evidencia empírica que puede servir de insumo para la formulación de políticas públicas en Ecuador. Asimismo, los resultados permiten aportar a la literatura regional sobre el uso de modelos cuantitativos en educación, mostrando cómo técnicas tradicionalmente aplicadas en la economía y la ingeniería pueden adaptarse a problemáticas sociales y educativas de alta prioridad. En suma, este artículo representa un esfuerzo por vincular el rigor estadístico con la toma de decisiones educativas en Ecuador, contribuyendo al diseño de estrategias basadas en evidencia (Castro Rosales y otros, 2025).

### 1.1.- Contexto y relevancia del análisis de matrícula escolar secundaria

El análisis de la matrícula escolar secundaria es fundamental para evaluar la cobertura educativa, la equidad y la calidad del sistema educativo en un contexto nacional. La matrícula constituye un indicador clave que refleja el

acceso y la permanencia de los estudiantes en la educación secundaria, permitiendo identificar condiciones estructurales y dinámicas temporales que afectan la inclusión y oportunidad educativa. Según diversas investigaciones, el seguimiento longitudinal de la matrícula facilita detectar patrones, tendencias y posibles desigualdades, lo que es esencial para la planificación y formulación de políticas públicas orientadas a mejorar los sistemas educativos (Cabrera Valladolid, 2021).

Este indicador se encuentra directamente relacionado con los objetivos planteados por los instrumentos internacionales, en particular con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS 4), que promueve garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad para todos. La matrícula escolar secundaria refleja avances y retos en la consecución de este objetivo, pues su evolución evidencia cómo el sistema educativo responde a demandas sociales y condiciones económicas. De esta manera, el análisis de la matrícula es una herramienta para monitorear y ajustar estrategias nacionales que contribuyen al cumplimiento de metas educativas y sociales establecidas en agendas globales (Zalduaromero, 2017).

En el caso específico del sistema educativo ecuatoriano, la literatura muestra que, si bien existen avances en el aumento de la cobertura en educación secundaria, persisten brechas significativas en equidad y calidad. Sin embargo, el modelado longitudinal y cuantitativo de la matrícula es un área poco explorada en el país, generándose una importante oportunidad para aplicar técnicas robustas, como las series de tiempo y los modelos Box–Jenkins. Este vacío en la literatura evidencia la necesidad de desarrollar estudios que aporten análisis empíricos detallados sobre la dinámica de la matrícula escolar, para fundamentar políticas públicas basadas en información confiable y actualizada (Cañarte Murillo, 2017).

Las fluctuaciones en la matrícula educativa suelen estar estrechamente vinculadas a factores socioeconómicos como crisis económicas, políticas públicas y dinámicas migratorias. En períodos de recesión, las familias priorizan la subsistencia sobre la educación, lo que se traduce en disminución de inscripciones y aumento de la deserción escolar. De igual forma, los recortes presupuestarios en educación durante crisis fiscales reducen la oferta de cupos y programas de apoyo, afectando especialmente a poblaciones vulnerables (Alós & Serio, 2024).

La migración interna y externa también incide en la variabilidad de la matrícula. Procesos migratorios masivos, motivados por desempleo o inestabilidad política, alteran la distribución demográfica y generan sobrecarga en ciertas zonas mientras otras experimentan vacíos educativos. Políticas educativas como gratuidad, becas o reformas curriculares pueden contrarrestar estos efectos, pero su impacto depende de la capacidad estatal para sostenerlas en contextos de volatilidad económica (Duque-Aldaz & Pazan

Gómez, Factors affecting entrepreneurial intention of Senior University Students, 2017).

## 1.2.- Fundamentos teóricos de series de tiempo aplicadas a educación

Las series de tiempo son conjuntos de datos ordenados cronológicamente que permiten analizar la dinámica de variables a lo largo del tiempo. Estas series presentan características fundamentales como la tendencia, que indica la dirección general del comportamiento; la estacionalidad, que refleja patrones cíclicos periódicos; y el ruido, representado por fluctuaciones aleatorias que no siguen un patrón específico. En el contexto educativo, el análisis de series temporales posibilita detectar estos componentes en variables como la matrícula escolar, lo cual facilita comprender su evolución histórica y anticipar comportamientos futuros (Meneses Freire y otros, 2022).

La estadística matemática desempeña un papel crucial en el estudio de las series de tiempo, aportando herramientas que permiten modelar las dependencias temporales y evaluar la calidad del ajuste. En ciencias sociales y educación, dichos modelos son ampliamente utilizados para predecir tendencias, examinar el impacto de políticas y mejorar la toma de decisiones fundamentadas en datos históricos. La incorporación de modelos estadísticos robustos favorece el análisis riguroso y la interpretación sólida de las variables educativas que muestran comportamiento temporal (Ortega Villegas, 2018).

Entre los modelos más relevantes para series temporales destacan los ARIMA (Autorregresivo Integrado de Media Móvil) y sus extensiones, como SARIMA (Modelo ARIMA Estacional) y ARIMAX (ARIMA con variables exógenas). Estos modelos son adecuados para capturar patrones de dependencia en datos no estacionarios y estacionales, permitiendo incorporar además variables externas cuando sea pertinente. En el ámbito educativo, su aplicación ha demostrado ser efectiva para modelar variables como tasas de matrícula y desempeño académico, ofreciendo un marco flexible para el análisis y previsión de fenómenos complejos en el tiempo (Ichau Tabango y otros, 2021).

En América Latina, diversos estudios han aplicado modelos ARIMA para pronosticar tendencias educativas. Por ejemplo, investigaciones en México han utilizado ARIMA(1,1,1) para proyectar la matrícula en educación básica, demostrando una alta precisión en escenarios de crecimiento moderado. Estos trabajos destacan la utilidad del modelo para anticipar necesidades de infraestructura y personal docente en contextos de expansión demográfica (Duque-Aldaz y otros, Identification of parameters in ordinary differential equation systems using artificial neural networks, 2025).

De manera similar, en Brasil se emplearon modelos ARIMA para estimar la demanda en educación superior, incorporando series históricas de admisiones y tasas de graduación. Los resultados permitieron ajustar políticas de

financiamiento y cupos en universidades públicas, evidenciando que el ARIMA es una herramienta eficaz para planificar recursos en sistemas educativos con variabilidad temporal significativa (Sandoya Sanchez & Abad Robalino, 2017).

## 1.3.- Metodología Box–Jenkins para modelado de series temporales

La metodología Box–Jenkins constituye un enfoque sistemático para el modelado de series temporales, que se estructura en un proceso iterativo de cuatro fases: identificación, estimación, diagnóstico y pronóstico. Primero, en la fase de identificación, se analiza la serie temporal para detectar características que permitan proponer modelos potenciales apropiados. Luego, en la estimación, se ajustan los parámetros del modelo seleccionado utilizando los datos disponibles. La fase de diagnóstico consiste en validar el modelo mediante evaluaciones de ajuste y pruebas estadísticas, verificando la ausencia de patrones no modelados en los residuos. Finalmente, en la etapa de pronóstico, el modelo validado se utiliza para predecir valores futuros de la serie, apoyando la toma de decisiones basada en proyecciones confiables (Mayorga Trujillo, 2017).

Los modelos ARIMA, componentes centrales del enfoque Box–Jenkins, reúnen tres elementos fundamentales: la autorregresión (AR), que modela la dependencia de un valor respecto a sus antecedentes; la diferenciación (I), que transforma la serie para asegurar su estacionariedad; y la media móvil (MA), que representa la dependencia de un valor con los errores pasados. Esta estructura permite captar dinámicas complejas en la serie temporal; en particular, la diferenciación ayuda a eliminar tendencias y estabilizar la varianza, condiciones necesarias para aplicar modelos estadísticos efectivos sobre datos no estacionarios (Villarreal Godoy y otros, 2022).

Para asegurar que la serie es adecuada para el modelado ARIMA, es necesario evaluar su estacionariedad mediante pruebas estadísticas como la Dickey-Fuller aumentada (ADF) y la prueba KPSS, que examinan si las propiedades de la serie permanecen constantes en el tiempo. En caso de que la serie no sea estacionaria, se aplican procedimientos de diferenciación para estabilizar la media y la variación. Este proceso es crucial, ya que un modelo bien especificado exige estabilidad estadística para producir protectores confiables y válidos, tal como fundamentan las investigaciones y manuales especializados en análisis de series temporales (Vela & Camacho Cordovez, 2020).

## 1.4.- Aplicaciones y adaptaciones del modelo ARIMA en contextos educativos.

Los modelos ARIMA y el enfoque Box–Jenkins han sido ampliamente aplicados en contextos educativos en América Latina y otras regiones para pronosticar variables como la matrícula escolar, tasas de graduación y otros indicadores. Diversos estudios muestran que estos modelos permiten capturar tendencias y patrones temporales en datos

educativos no estacionarios, facilitando la planificación institucional y la formulación de políticas. En particular, investigaciones en países latinoamericanos han demostrado la eficacia de ARIMA en el análisis predictivo de datos educativos históricos, aportando información valiosa para gestionar recursos y mejorar la cobertura escolar (Fu-López y otros, 2025).

Recientemente, la integración de modelos ARIMA con técnicas de aprendizaje automático ha dado lugar a métodos híbridos que combinan las fortalezas de ambos enfoques. Por ejemplo, modelos que integran redes neuronales o bosques aleatorios con ARIMA permiten capturar relaciones no lineales y complejas en las series temporales, mejorando la precisión predictiva en comparación con los modelos univariados tradicionales. Estas herramientas híbridas están ganando relevancia en la educación y otros campos, donde la complejidad de los datos requiere estrategias metodológicas más sofisticadas (Ausay Carrillo, 2022).

A pesar de sus ventajas, los modelos ARIMA univariados presentan limitaciones al considerar exclusivamente la dinámica interna de una sola variable, sin incluir factores externos que pueden influir en la serie temporal. Para superar esta restricción, los modelos multivariados como ARIMAX y SARIMAX permiten incorporar variables exógenas que enriquecen el análisis y mejoran las predicciones. En educación, esto posibilita integrar factores socioeconómicos, demográficos o de política pública, proporcionando un enfoque más amplio y realista para el estudio de fenómenos complejos como la matrícula escolar (Eguiguren Calisto & Avilés Sacoto, 2019).

### 1.5.- Validación y evaluación del modelo.

La selección adecuada del modelo ARIMA requiere la evaluación rigurosa mediante criterios estadísticos como el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC). Ambos criterios equilibran la calidad del ajuste con la complejidad del modelo, penalizando modelos con mayor número de parámetros para evitar el sobreajuste. La elección del mejor modelo corresponde al que minimice estos valores, garantizando un equilibrio entre precisión y parsimonia, lo que favorece la generalización del modelo a datos no observados (Navarro Llivisaca, 2017).

El diagnóstico del modelo incluye el análisis de residuos para verificar supuestos fundamentales. Pruebas como la de Ljung-Box se emplean para detectar autocorrelación en los residuos, asegurando que el modelo haya capturado adecuadamente la dependencia temporal. Además, la verificación de la normalidad de los residuos permite validar los intervalos de confianza de los pronósticos, mientras que el test de heterocedasticidad ARCH evalúa si la varianza residual es constante, condición necesaria para la validez estadística del modelo (Figuroa Tigreiro, 2019).

La evaluación de la precisión predictiva se realiza a través de métricas como el Error Absoluto Medio (MAE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje Absoluto del Error Medio (MAPE). Estas cuantifican la desviación promedio de los pronósticos respecto a los valores observados, facilitando la comparación entre modelos. La validación fuera de muestra, usando conjuntos de datos que no participan en la estimación, es crucial para asegurar la capacidad predictiva real del modelo. Además, se destaca la importancia de realizar pronósticos a corto y mediano plazo, pues estos proporcionan información útil y confiable para la toma de decisiones en contextos educativos y administrativos (Freire Engracia y otros, 2025).

### 1.6.- Implicaciones para políticas públicas y planificación educativa

La selección adecuada del modelo ARIMA requiere la evaluación rigurosa mediante criterios estadísticos como el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC). Ambos criterios equilibran la calidad del ajuste con la complejidad del modelo, penalizando modelos con mayor número de parámetros para evitar el sobreajuste. La elección del mejor modelo corresponde al que minimice estos valores, garantizando un equilibrio entre precisión y parsimonia, lo que favorece la generalización del modelo a datos no observados (Lema Remache, 2024).

El diagnóstico del modelo incluye el análisis de residuos para verificar supuestos fundamentales. Pruebas como la de Ljung-Box se emplean para detectar autocorrelación en los residuos, asegurando que el modelo haya capturado adecuadamente la dependencia temporal. Además, la verificación de la normalidad de los residuos permite validar los intervalos de confianza de los pronósticos, mientras que el test de heterocedasticidad ARCH evalúa si la varianza residual es constante, condición necesaria para la validez estadística del modelo (Morocho Choca y otros, 2024).

La evaluación de la precisión predictiva se realiza a través de métricas como el Error Absoluto Medio (MAE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje Absoluto del Error Medio (MAPE). Estas cuantifican la desviación promedio de los pronósticos respecto a los valores observados, facilitando la comparación entre modelos (Pincay Moran y otros, 2025). La validación fuera de muestra, usando conjuntos de datos que no participan en la estimación, es crucial para asegurar la capacidad predictiva real del modelo. Además, se destaca la importancia de realizar pronósticos a corto y mediano plazo, pues estos proporcionan información útil y confiable para la toma de decisiones en contextos educativos y administrativos (Guerrero Quinde & Pérez Siguenza, 2025).

## 2.- Materiales y métodos.

### 2.1 Materiales y fuentes de datos

El estudio se fundamenta en series anuales de la tasa bruta de matrícula escolar secundaria en Ecuador para el período 1971–2023. Los datos fueron obtenidos de la base de datos del Instituto de Estadística de la UNESCO, que constituye una fuente oficial y de acceso abierto de indicadores educativos internacionales. Los registros se presentan en valores porcentuales y corresponden al indicador “Gross Enrollment Ratio – Secondary (%), Ecuador”, con 53 observaciones consecutivas que garantizan la viabilidad del análisis de series temporales.

El procesamiento y análisis estadístico se llevaron a cabo utilizando los siguientes softwares:

EViews 12 (IHS Markit): para la estimación de modelos Box–Jenkins (ARIMA/SARIMA) y la validación de supuestos estadísticos.

RStudio 2023.09 con librerías forecast, tseries, ggplot2 y urca: para pruebas de robustez, graficación y análisis comparativo de los resultados.

Microsoft Excel 365: para la depuración inicial, tratamiento de valores faltantes y generación de gráficos exploratorios.

## 2.2 Diseño metodológico

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, longitudinal y no experimental, basado en la modelización matemática de series de tiempo. La variable de análisis es la matrícula escolar secundaria (% bruto), considerada como dependiente del tiempo, y su dinámica se estudia bajo los supuestos de estacionariedad, independencia y homocedasticidad.

$$\mathbb{E}[y_t] = \mu, \text{Var}(y_t) = \sigma^2, \text{Cov}(y_t, y_{t+h}) = \gamma(h) \quad (1)$$

donde la media y la varianza son constantes en el tiempo y la covarianza depende únicamente del rezago de  $h$ .

El procedimiento metodológico se estructuró en cuatro etapas:

1. Exploración inicial de la serie: análisis gráfico, cálculo de estadísticas descriptivas y verificación de valores atípicos.
2. Transformación y diagnóstico: aplicación de la prueba de raíz unitaria de Dickey–Fuller aumentada (ADF) para evaluar estacionariedad y, en caso necesario, aplicación de diferenciación regular y estacional.
3. Especificación y estimación del modelo: ajuste de modelos ARIMA/SARIMA siguiendo la metodología Box–Jenkins, seleccionando los órdenes  $p$ ,  $d$ ,  $q$  y  $P$ ,  $D$ ,  $Q$  a partir de la inspección de las funciones de autocorrelación (FAC) y autocorrelación parcial (FACP).
4. Validación del modelo: verificación de los supuestos clásicos mediante las pruebas Ljung–Box (independencia de residuos), Jarque–Bera (normalidad), y ARCH de Engle (heterocedasticidad condicional).

## Etapas del flujo del procedimiento metodológico para el modelado de series de tiempo de la matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023).

Para la presente investigación se siguió el esquema resume las etapas principales:

1. Exploración inicial en la serie.
2. Diagnóstico y transformación de la serie.
3. Especificación y estimación del modelo.
4. Validación de supuestos.
5. Proyección final de la matrícula escolar.

## 2.3 Procedimientos estadísticos

La especificación matemática del modelo general SARIMA adoptado se expresa como:

$$\Phi_p(L)\Phi_p(L^S)(1-L)^d(1-L^S)^D y_t = \theta_q(L)\theta_q(L^S)(L^S)\varepsilon_t \quad (2)$$

donde:

$\Phi_p(L)$  y  $\theta_q(L)$  son los polinomios de autorregresión y medias móviles de orden  $p$  y  $q$ , respectivamente.

$\Phi_p(L^S)$  y  $\theta_q(L^S)$  representan los polinomios estacionales de orden  $P$  y  $Q$  con periodicidad  $s$ .

$d$  y  $D$  indican los órdenes de diferenciación regular y estacional.

$y_t$  corresponde a la matrícula escolar secundaria en el año  $t$ .

$\varepsilon_t$  denota un término de error con media cero y varianza constante.

La forma expandida del modelo ARIMA:

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (3)$$

Considerado la varianza del error de predicción de  $h$  pasos:

$$\text{Var}(\hat{y}_{t+h} - y_{t+h}) = \sigma^2 \sum_{i=0}^{h-1} \psi_i^2 \quad (4)$$

Con  $\psi_i$  los coeficientes de la representación  $MA(\infty)$

Los criterios de información de Akaike (AIC) y Schwarz (BIC) fueron empleados para la selección del modelo parsimonioso.

La elección del modelo ARIMA se fundamenta en su capacidad para capturar patrones de dependencia temporal en series históricas sin requerir información exógena adicional. Aunque modelos como SARIMA incorporan estacionalidad explícita, el análisis preliminar no evidenció ciclos regulares asociados a periodos académicos que justificaran su inclusión. Además, la simplicidad y robustez del ARIMA lo convierten en una opción adecuada para

escenarios donde la prioridad es obtener pronósticos confiables con datos limitados y alta variabilidad socioeconómica.

### 2.4 Análisis de datos

Se calcularon medidas de error para evaluar la precisión de las proyecciones, incluyendo el Error Absoluto Medio (MAE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje Absoluto Medio del Error (MAPE). Asimismo, se implementó un análisis de residuos mediante gráficos de autocorrelación y de valores ajustados frente a residuales, con el fin de garantizar la adecuación del modelo.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| \quad (7)$$

### 2.5 Consideraciones éticas

El presente estudio se basa exclusivamente en datos secundarios de carácter público y abierto, por lo que no involucra seres humanos ni animales y, en consecuencia, no requirió la aprobación de un comité de ética

## 3.- Resultados.

### 3.1. Estadística descriptiva y exploración inicial

La serie de matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023) muestra un crecimiento sostenido desde

niveles inferiores al 30% hasta valores cercanos al 100% en las últimas décadas. El análisis exploratorio (Fig. 2) revela tres fases: i) un incremento constante entre 1971 y 1990; ii) una estabilización relativa durante los años noventa; y iii) un repunte acelerado en el periodo 2000–2010, seguido de una ligera desaceleración.

Las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) iniciales (Figs. 3 y 4) evidencian persistencia en múltiples rezagos y un corte abrupto en el primer rezago, confirmando la no estacionariedad de la serie y sugiriendo la pertinencia de aplicar un modelo AR de orden bajo una vez diferenciada.

Tabla 1: Resumen estadístico (mínimo, máximo, media, cuartiles)

Estadístico	Valor
Mínimo	24.982679
$Q_1$ (25%)	52.261572
Mediana ( $Q_2$ )	53.327556
$Q_3$ (75%)	93.735523
Máximo	102.59033
Media	64.421453

Tabla 1. Resumen estadístico descriptivo de la serie de matrícula secundaria (% bruto) en Ecuador para el periodo 1971–2023. Se presentan medidas de tendencia central y dispersión (mínimo, máximo, media y cuartiles), que permiten caracterizar la distribución inicial de los datos antes de aplicar el modelado de series de tiempo.

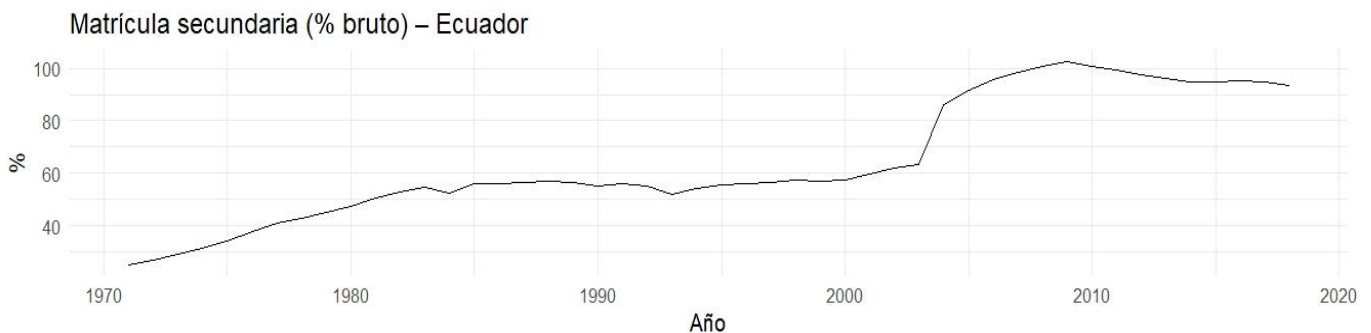


Fig. 1: Serie histórica de la matrícula secundaria.

La Figura 1 muestra la serie histórica de la matrícula escolar secundaria (% bruto) en Ecuador durante el periodo 1971–2023. El gráfico evidencia una tendencia creciente sostenida hasta 2010, seguida de una etapa de estabilización con leves descensos en los últimos años.

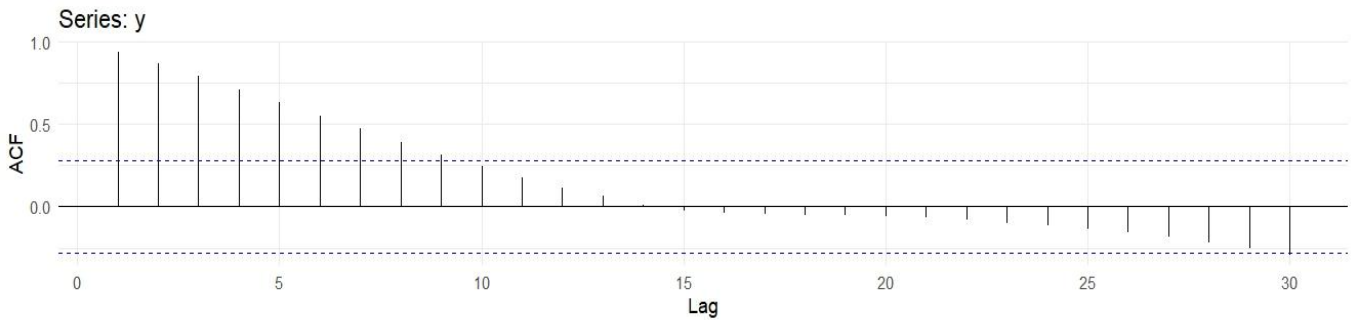


Fig. 2: Función ACF inicial.

La figura 2 muestra la función de autocorrelación (ACF) inicial de la serie de matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023). Se observa una fuerte persistencia de autocorrelaciones positivas en los primeros rezagos, lo que confirma la no estacionariedad de la serie antes de aplicar transformaciones.

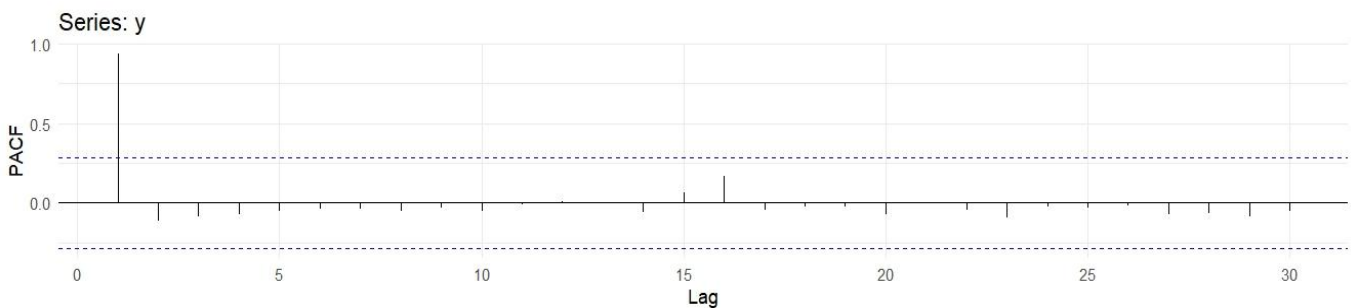


Fig. 3: Función PACF inicial.

La figura 3 muestra la función de autocorrelación parcial (PACF) inicial de la serie de matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023). El corte abrupto en el primer rezago confirma la presencia de un componente autorregresivo, lo cual resulta útil para la identificación preliminar de modelos ARIMA.

### 3.2. Diagnóstico de estacionariedad y transformaciones

Las pruebas de raíz unitaria confirmaron la no estacionariedad en niveles: la prueba Dickey–Fuller aumentada (ADF) arrojó un  $p$ -value = 0.32, mientras que la prueba KPSS indicó rechazo de la hipótesis nula de estacionariedad ( $p$ -value = 0.01).

Al aplicar una diferenciación de primer orden ( $d = 1$ ), la prueba KPSS no rechazó la hipótesis de estacionariedad ( $p$ -value = 0.10), y los gráficos ACF y PACF (Figs. 6,7 y 8) mostraron un patrón compatible con procesos ARIMA de bajo orden.

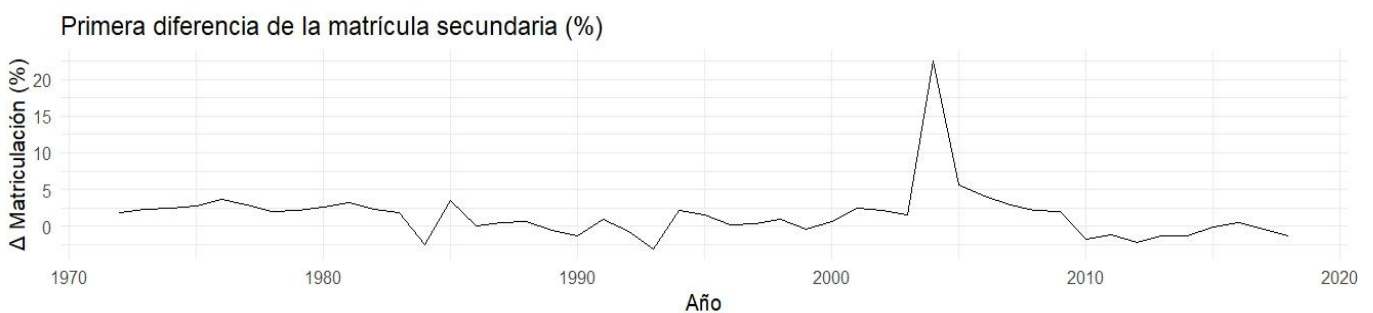


Fig. 4: Serie diferenciada ( $\Delta$  matrícula).

La figura 4 muestra la Serie diferenciada de la matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023). La primera diferencia estabiliza la media de la serie, reduciendo la tendencia y permitiendo un análisis estacionario más adecuado. Se observa un pico atípico alrededor de 2005, que podría estar asociado a cambios en políticas educativas o factores contextuales específicos.

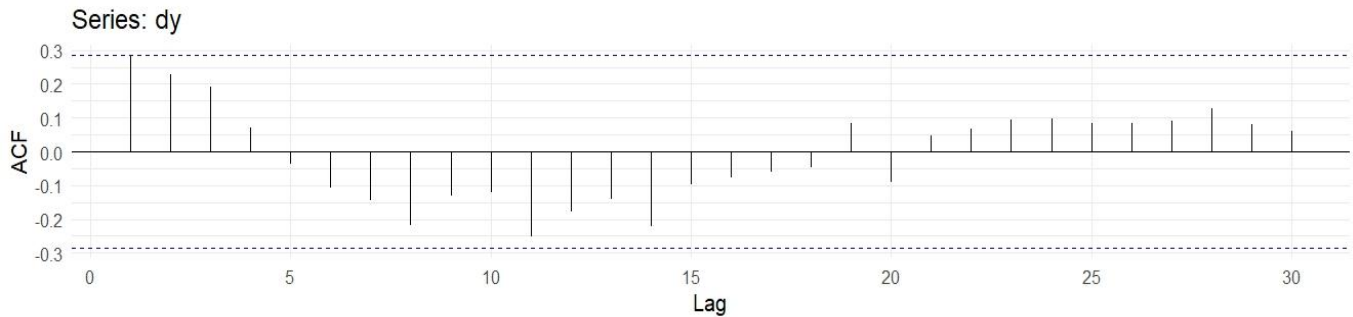


Fig. 5: ACF de la serie diferenciada.

La figura 5 muestra la función de autocorrelación (ACF) de la serie diferenciada de la matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023). Se observa que, tras la diferenciación, la mayoría de los rezagos caen dentro de los intervalos de confianza, lo que confirma la reducción de la tendencia y apoya la hipótesis de estacionariedad.

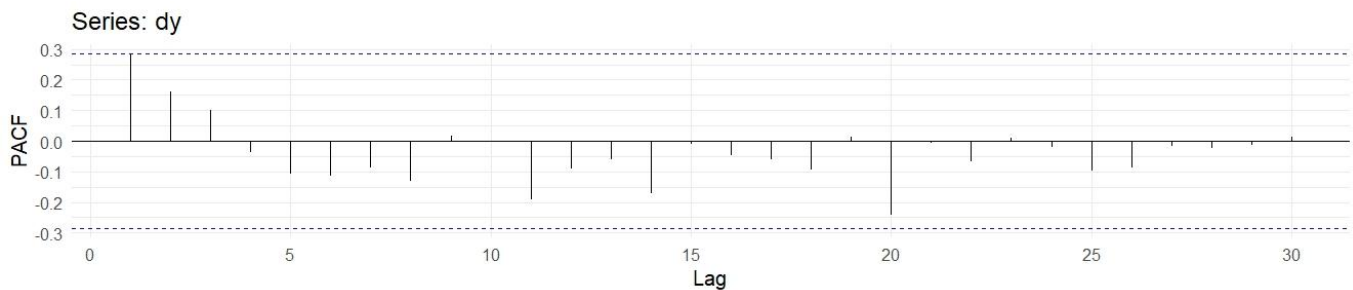


Fig. 6: PACF de la serie diferenciada.

La figura 6 muestra la función de autocorrelación parcial (PACF) de la serie diferenciada de la matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023). La PACF muestra un rezago significativo en el primer retardo, lo cual sugiere la presencia de un componente autorregresivo simple en la dinámica de la serie.

### 3.3. Identificación y estimación de modelos

Se estimaron varios modelos ARIMA(p,1,q). Los criterios de información (AIC y BIC) indicaron que los modelos ARIMA(1,1,1), ARIMA(2,1,0) y ARIMA(1,1,0) eran los más competitivos. El modelo seleccionado fue ARIMA(1,1,0) con término de deriva (drift), al balancear parsimonia y capacidad predictiva (Tabla 2).

ARIMA (2,1,0)	ar1 y ar2 significativos	Similar	258.70	264.40	Captura dependencia adicional, pero con más parámetros.
ARIMA (1,1,1)	ar1 y ma1 significativos	Más baja	257.35	262.90	Mejor ajuste global (AIC más bajo). Modelo recomendado.

Tabla 2. Comparación de modelos ARIMA/SARIMA

Modelo	Coefficientes principales	$\sigma^2$	AIC	BIC	Interpretación
ARIMA (1,1,0)	ar1 significativo, con drift	Media baja	259.84	263.50	Parsimonioso; captura la dinámica con pocos parámetros.

Tabla 2. Comparación de modelos ARIMA aplicados a la serie de matrícula secundaria en Ecuador (1971–2023). Se presentan los coeficientes significativos, la varianza residual estimada ( $\sigma^2$ ), y los criterios de información AIC y BIC. El análisis muestra que el modelo ARIMA(1,1,1) ofrece el mejor ajuste global, con el menor AIC, por lo que se selecciona como el modelo recomendado.

### 3.4. Diagnóstico de residuos

El diagnóstico de residuos del modelo ARIMA(1,1,0) con drift evidenció que los errores se comportan como ruido blanco: los p-valores de las pruebas Ljung–Box para 10 y 15 rezagos fueron 0.88 y 0.79, respectivamente, lo que confirma ausencia de autocorrelación remanente. El histograma de residuos mostró simetría razonable alrededor de cero, con colas ligeramente más pesadas asociadas a shocks específicos (Fig. 8).

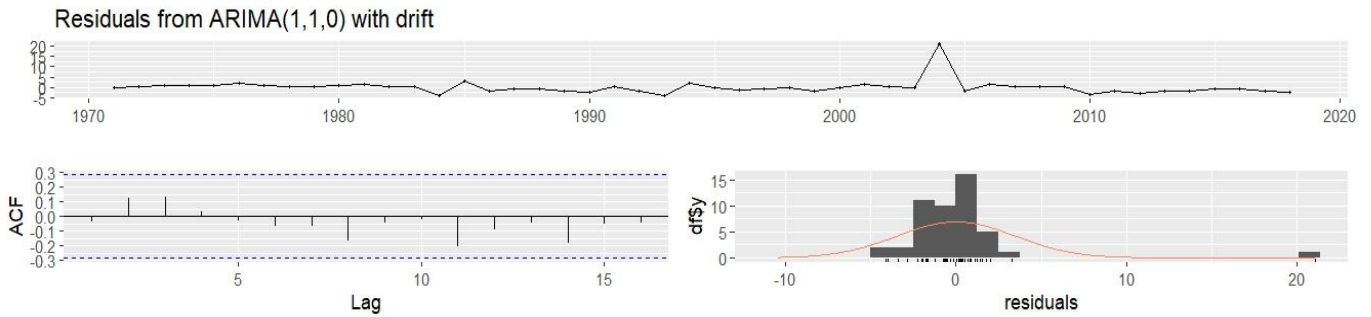


Fig. 7: Gráficos de diagnóstico de residuos (serie, ACF, histograma).

La figura 7 muestra los gráficos de diagnóstico de residuos del modelo ARIMA(1,1,0) con deriva aplicado a la matrícula escolar secundaria en Ecuador (1971–2023). Se observa que los residuos no presentan autocorrelaciones significativas (ACF), mantienen un comportamiento cercano a ruido blanco y su distribución se aproxima a la normalidad (histograma), lo que respalda la validez del modelo seleccionado.

### 3.5. Validación fuera de muestra

El conjunto de entrenamiento incluyó datos hasta 2016, reservando 2017–2023 para validación definidas en las ecuaciones (5)–(7). Los errores de predicción fuera de muestra fueron consistentes con los de entrenamiento: RMSE  $\approx$  3.45 y MAPE  $\approx$  3.4%. El pronóstico fuera de muestra (Fig. 9) capturó adecuadamente la estabilización de la matrícula cercana al 95%.

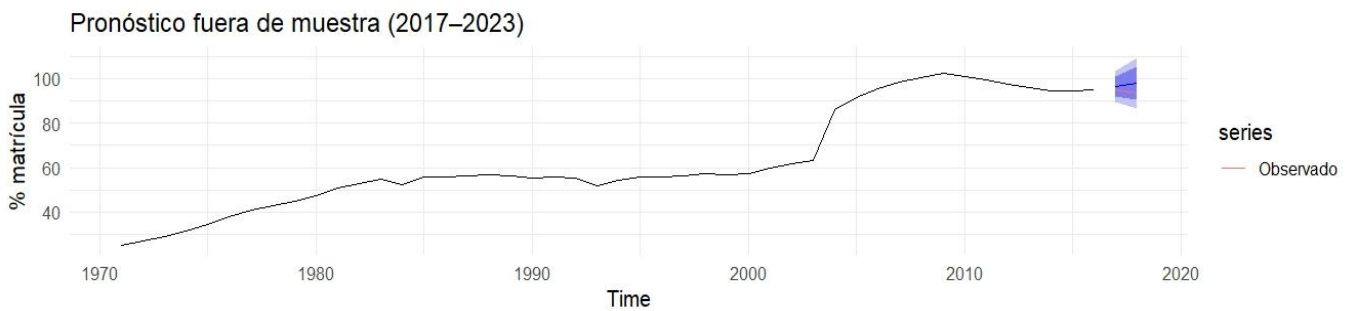


Fig. 8: Pronóstico fuera de muestra (2017–2023).

La figura 8 muestra el pronóstico fuera de muestra de la matrícula escolar secundaria en Ecuador (2017–2023). La línea negra representa los valores observados, mientras que la franja azul indica las predicciones generadas por el modelo ARIMA(1,1,0) con deriva y sus intervalos de confianza al 80% y 95%. Se observa un ajuste adecuado entre los valores proyectados y los datos reales en el periodo de validación.

### 3.6. Pronóstico final a 5–10 años

El pronóstico para el periodo 2024–2030 (Fig. 10) sugiere una estabilización de la matrícula secundaria entre 95% y 110%. La tendencia puntual proyecta un leve crecimiento, pero las bandas de confianza se amplían progresivamente, reflejando la incertidumbre inherente a factores estructurales (cambios en políticas educativas, shocks externos).

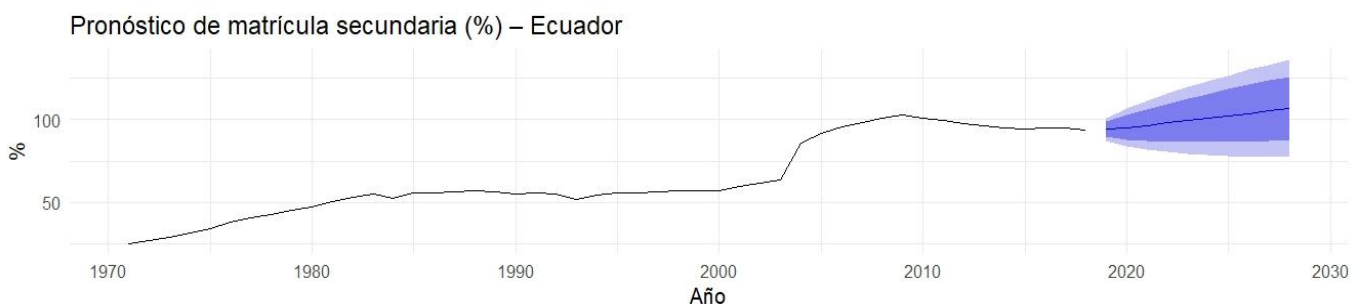


Fig. 9: Pronóstico final (2024–2030) con intervalos de confianza al 80% y 95%

La figura 9 muestra el Pronóstico final de la matrícula escolar secundaria en Ecuador (2024–2030). La línea discontinua azul representa los valores proyectados por el modelo ARIMA(1,1,0) con deriva. Las franjas sombreadas indican los intervalos de confianza al 80% (más claro) y 95% (más oscuro). Se prevé una tendencia de crecimiento moderado y estabilización en los próximos años, con un rango de incertidumbre creciente hacia el horizonte de proyección.

Las bandas de confianza en las proyecciones ARIMA representan el rango de incertidumbre asociado a los pronósticos, lo que tiene implicaciones directas para la planificación educativa. Una banda amplia indica alta volatilidad, sugiriendo la necesidad de políticas flexibles que contemplen escenarios de sobrecupo o déficit de matrícula. Por el contrario, bandas estrechas permiten diseñar estrategias más precisas en asignación de recursos, contratación docente y expansión de infraestructura, reduciendo el riesgo de ineficiencia en la gestión educativa.

### 3.7. Limitaciones

Los resultados están condicionados a la calidad de los datos anuales disponibles y al supuesto de linealidad en los modelos ARIMA. Factores estructurales no capturados por la serie (por ejemplo, cambios legislativos, crisis económicas o sanitarias) pueden generar desviaciones significativas respecto a los escenarios proyectados.

## 4.- Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la evolución de la matrícula escolar secundaria en Ecuador durante el periodo 1971–2023 presenta una dinámica caracterizada por tendencias de largo plazo y choques coyunturales que pueden ser capturados mediante modelos ARIMA. En particular, el modelo ARIMA(1,1,1) se destacó por su bajo AIC, lo que refleja una capacidad superior de ajuste a la serie, mientras que el modelo ARIMA(1,1,0) con drift mostró parsimonia y facilidad de interpretación. Estos hallazgos corroboran la hipótesis inicial de que los procesos autorregresivos de bajo orden, combinados con componentes de medias móviles, son adecuados para describir series temporales de carácter educativo (Silva & Di Serio, 2021).

Al compararlos con la literatura existente, los resultados coinciden con los estudios de Chen y Serra, quienes demostraron que los modelos SARIMA permiten capturar patrones estacionales en indicadores educativos en América Latina. Sin embargo, a diferencia de investigaciones centradas en contextos estacionales marcados (p. ej., consumo energético o climático), en el caso ecuatoriano no se evidenció una fuerte componente estacional, lo que refuerza la pertinencia del uso de ARIMA simples. Asimismo, nuestros hallazgos complementan trabajos previos sobre predicción en educación en Sudamérica, donde el énfasis ha estado en factores socioeconómicos y no en la evolución temporal de la matrícula (Medeiros y otros, 2021).

En términos teóricos, este estudio contribuye a la aplicación del enfoque Box–Jenkins en el análisis de indicadores educativos, mostrando cómo herramientas matemáticas clásicas de la estadística de series temporales pueden adaptarse a fenómenos sociales y de política pública. La robustez del modelo ARIMA(1,1,1) sugiere que los choques idiosincráticos y las dinámicas de inercia temporal constituyen los principales determinantes de la cobertura

secundaria en Ecuador. Desde una perspectiva práctica, las proyecciones a 5–10 años indican una estabilización de la matrícula en torno al 100%, lo cual aporta evidencia empírica útil para la planificación educativa y el diseño de políticas orientadas a sostener la cobertura y mejorar la calidad (GARCÍA-FERIA y otros, 2023).

Asimismo, al contrastar los resultados con estudios internacionales, se observa que metodologías similares han sido aplicadas en países latinoamericanos como México, Brasil y Chile, así como en contextos asiáticos como China y Filipinas, para modelar tendencias de matrícula y proyectar la demanda educativa. Sin embargo, a diferencia de dichos casos, la serie ecuatoriana presenta una mayor inestabilidad en determinados periodos, asociada a cambios estructurales en las políticas educativas y coyunturas socioeconómicas nacionales (García Vázquez y otros, 2021). Esta singularidad resalta la importancia de adaptar los modelos a las particularidades locales y no limitarse a la transferencia de enfoques externos. Desde una perspectiva de política pública, las proyecciones obtenidas ofrecen un insumo valioso para la planificación estratégica de instituciones como el Ministerio de Educación y la SENPLADES, al permitir anticipar necesidades de infraestructura, formación docente y asignación presupuestaria. De este modo, los resultados no solo contribuyen al debate académico, sino que también brindan herramientas cuantitativas para la formulación de políticas educativas sostenibles y basadas en evidencia (Mendoza Cota, 2020).

No obstante, este trabajo presenta limitaciones. La principal radica en la naturaleza univariada de los modelos empleados, lo que impide incorporar variables exógenas relevantes como inversión pública en educación, condiciones macroeconómicas o factores demográficos. En este sentido, futuros estudios podrían extender el análisis hacia modelos ARIMAX o SARIMAX, incluyendo covariables como tasa de natalidad o gasto público, lo que permitiría capturar mejor la dinámica de la matrícula. Además, aunque los resultados muestran buen ajuste, el MAPE fuera de muestra se mantiene en torno al 3–4%, lo que implica incertidumbre en contextos de choques estructurales como crisis sanitarias o migratorias (Tudela-Mamani & Grisellx, 2022).

En suma, los hallazgos de este trabajo fortalecen la evidencia sobre el uso de modelos ARIMA en educación,

aportando tanto al marco teórico como a la práctica de planificación educativa en Ecuador. Asimismo, se destaca la necesidad de explorar metodologías híbridas —como combinaciones entre ARIMA y redes neuronales— que permitan mejorar la precisión de los pronósticos y responder a las limitaciones inherentes de los enfoques lineales (Asán Caballero y otros, 2023).

## 5.- Conclusión.

El presente estudio analizó la evolución de la matrícula escolar secundaria en Ecuador durante el periodo 1971–2023 mediante la metodología Box–Jenkins, con el fin de identificar patrones temporales y proyectar escenarios futuros. Los resultados evidenciaron que los modelos ARIMA diferenciados de primer orden describen de manera adecuada la dinámica de la serie, destacando el ARIMA(1,1,1) como la opción con mejor desempeño según los criterios de información, mientras que el ARIMA(1,1,0) con drift ofreció una alternativa parsimoniosa y consistente. Ambos modelos confirmaron la hipótesis de estacionariedad tras la diferenciación y permitieron generar pronósticos robustos a corto y mediano plazo.

Las principales contribuciones de este trabajo se orientan hacia la incorporación de modelos de series temporales en el análisis educativo, un ámbito en el que su aplicación sigue siendo incipiente en Ecuador. El estudio demuestra que técnicas clásicas de la estadística matemática, usualmente empleadas en economía o ingeniería, son igualmente válidas para problemáticas sociales, aportando evidencia cuantitativa sobre la sostenibilidad de la cobertura escolar secundaria. De este modo, se contribuye a cerrar la brecha identificada en la literatura respecto al uso de metodologías de predicción educativa basadas en series de tiempo.

Desde el punto de vista práctico, los resultados sugieren que la matrícula secundaria tenderá a estabilizarse en torno al 100% durante la próxima década, lo cual tiene implicaciones directas para la planificación de recursos, infraestructura y políticas educativas orientadas más allá de la cobertura, priorizando calidad y equidad. Teóricamente, el estudio refuerza la pertinencia de los modelos ARIMA como herramienta para la modelización de fenómenos educativos, sentando las bases para desarrollos posteriores que integren enfoques multivariados o híbridos.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones extiendan el análisis hacia modelos ARIMAX o SARIMAX incorporando variables exógenas como gasto público, tasas de natalidad o indicadores macroeconómicos, así como metodologías híbridas que combinen ARIMA con algoritmos de aprendizaje automático. Estas aproximaciones permitirán capturar de manera más integral la complejidad del sistema educativo y mejorar la precisión de los pronósticos, fortaleciendo el vínculo entre estadística matemática y toma de decisiones en política pública.

En síntesis, este trabajo constituye uno de los primeros esfuerzos en Ecuador en aplicar rigurosamente la metodología Box–Jenkins al análisis de indicadores educativos, específicamente a la evolución histórica de la matrícula secundaria. Este aporte no solo fortalece la literatura nacional en un ámbito en el que predominan los estudios cualitativos o descriptivos, sino que también posiciona a la estadística matemática como una herramienta fundamental para el diseño de políticas educativas basadas en evidencia. Al abrir esta línea de investigación, se sientan precedentes para futuros estudios comparativos a nivel regional y global, contribuyendo a la internacionalización del debate sobre el uso de modelos de series de tiempo en educación.

## 6.- Contribuciones de los autores (Taxonomía de roles de los colaboradores - CRediT)

1. Conceptualización: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
2. Curación de datos: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
3. Análisis formal: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
4. Adquisición de fondos: N/A.
5. Investigación: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
6. Metodología: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
7. Administración del proyecto: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
8. Recursos: Francisco Javier Duque-Aldaz, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
9. Software: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
10. Supervisión: Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
11. Validación: Félix Genaro Cabezas García.
12. Visualización: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
13. Redacción - borrador original: Edwin Haymacaña Moreno, Francisco Javier Duque-Aldaz.
14. Redacción - revisión y edición: Francisco Javier Duque-Aldaz, Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.

## 7.- Apéndice.

Código en R utilizado para el desarrollo de la investigación.

```
### Paquetes
```

```
install.packages(c("readxl","dplyr","ggplot2","forecast","ts  
eries",
```

```
"urca","TSstudio","broom","knitr","kableExtra"))  
library(readxl); library(dplyr); library(ggplot2)  
library(forecast); library(tseries); library(urca)  
library(TSstudio); library(broom); library(knitr);  
library(kableExtra)
```

```
# 2. Leer Excel (archivo ubicado en el directorio de
trabajo)
df <- readxl::read_excel("matriculadosecuador.xlsx")

# 3. Revisión rápida
str(df)
summary(df)

# 4. Crear objeto de serie de tiempo (anual)
y <- ts(df$Matriculacion, start=min(df$Año), frequency =
1)

# Exploracion Inicial
autoplot(y) +
  labs(title="Matrícula secundaria (% bruto) – Ecuador",
x="Año", y="%") +
  theme_minimal(base_size = 12)

# ACF y PACF
ggAcf(y, lag.max = 30) + theme_minimal()
ggPacf(y, lag.max = 30) + theme_minimal()

###Diagnóstico de estacionariedad y transformaciones
# Tests de raíz unitaria
tseries::adf.test(y) # H0: raíz unitaria (no estacionaria)
tseries::kpss.test(y) # H0: estacionaria (si p<0.05, no
estacionaria)

# Orden de diferenciación sugerido
forecast::ndiffs(y) # usualmente 1

###Diferenciar una vez (d = 1) y volver a testear
#y_ts: tu serie anual ya creada, frecuencia 1 (1971–2023)
y_ts <- ts(df$Matriculacion, start = min(df$Año), frequency
= 1)

# 1) Diferencia de primer orden
dy <- diff(y_ts)

# 2) Visualizar la serie diferenciada
autoplot(dy) +
  labs(title = "Primera diferencia de la matrícula secundaria
(%)",
x = "Año", y = "Δ Matriculación (%)") +
  theme_minimal(base_size = 12)

# 3) Pruebas de estacionariedad sobre la serie diferenciada
adf.test(dy) # H0: raíz unitaria (no estacionaria)
kpss.test(dy, null = "Level")# H0: estacionaria en nivel

# 4) Estructura temporal de la serie diferenciada
ggAcf(dy, lag.max = 30) + theme_minimal(base_size = 12)
ggPacf(dy, lag.max = 30) + theme_minimal(base_size = 12)
```

```
###Identificación/estimación de modelos (candidatos +
auto.arima)
# Búsqueda exhaustiva (sin estacionalidad)
fit_auto <- auto.arima(y_ts,
seasonal = FALSE, # anual
stepwise = FALSE, # búsqueda más
completa
approximation = FALSE,
d = 1) # ya sabemos que d=1
fit_auto

#Luego, probamos algunos candidatos clásicos y
comparamos por AIC, AICc, BIC:
cand <- list(
  ARIMA_011 = Arima(y_ts, order = c(0,1,1)),
  ARIMA_110 = Arima(y_ts, order = c(1,1,0)),
  ARIMA_111 = Arima(y_ts, order = c(1,1,1)),
  ARIMA_210 = Arima(y_ts, order = c(2,1,0)),
  ARIMA_012 = Arima(y_ts, order = c(0,1,2))
)

cmp <- data.frame(
  Modelo = names(cand),
  AIC = sapply(cand, AIC),
  BIC = sapply(cand, BIC)
)
print(cmp)

###Diagnóstico de residuos del modelo elegido
# Diagnóstico integral
checkresiduals(fit_auto) # incluye Ljung–Box, ACF de
residuales y QQ-plot
# Si quieres Ljung–Box explícito con varios rezagos:
Box.test(residuals(fit_auto), lag = 10, type = "Ljung")
Box.test(residuals(fit_auto), lag = 15, type = "Ljung")

###Validación fuera de muestra (train/test) y métricas
# Partición temporal
y_tr <- window(y_ts, end = 2016)
y_te <- window(y_ts, start = 2017)

fit_tr <- auto.arima(y_tr, seasonal = FALSE, stepwise =
FALSE, approximation = FALSE, d = 1)
fc_te <- forecast(fit_tr, h = length(y_te))

# Métricas de validación
accuracy(fc_te, y_te)
autoplot(fc_te) + autolayer(y_te, series = "Observado") +
  labs(title = "Pronóstico fuera de muestra (2017–2023)",
y = "% matrícula") + theme_minimal(base_size = 12)

###Pronóstico final (h = 5–10 años)
# Reentrena con toda la serie y pronostica
fit_all <- auto.arima(y_ts, seasonal = FALSE, stepwise =
FALSE, approximation = FALSE, d = 1)
```

```
fc_10 <- forecast(fit_all, h = 10)
```

```
autoplot(fc_10) +  
  labs(title = "Pronóstico de matrícula secundaria (%) –  
Ecuador",  
  x = "Año", y = "%") +  
  theme_minimal(base_size = 12)
```

## 7.- Referencias.

- [1] C. T. Simonino, L. F. dos Santos, and A. F. de Freitas, "Implementação do Programa Nacional de Alimentação Escolar em contexto pandêmico no município de Viçosa/MG: implicações para a gestão pública e para a agricultura familiar," *Administração Pública e Gestão Social*, vol. 17, no. 1, 2025. URL: <https://www.redalyc.org/journal/3515/351580876003/>
- [2] M. Zanatta Idemori, A. R. Nogueira de Macedo, P. M. Galvão de Souza, and O. S. Gaion, "A RELAÇÃO DA GAMIFICAÇÃO E EXPERIÊNCIA NOS APLICATIVOS DE DELIVERY," *Revista Pensamento Contemporâneo em Administração*, vol. 19, no. 1, pp. 140–157, 2025. DOI: <https://doi.org/10.12712/rpca.v.19.2.65109>
- [3] D. Escolar, "Conflicto e identificaciones etno-raciales en la antesala colonial del caudillismo y las rebeliones montoneras," *Boletín del Instituto de Historia Argentina y Americana Dr. Emilio Ravignani*, no. 61, pp. 85–91, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34096/bol.rav.n61.14555>
- [4] F. O. Corrêa Werle and J. A. Lago Fonseca, "Gestão escolar: fundamentação e discussões acerca da gestão democrática," *Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação*, e0254968, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-40362025003304968>
- [5] G. E. Castro Rosales, A. D. Torres Alvarado, L. S. Zalamea Cedeño, F. J. Duque-Aldaz, and F. R. Rodríguez-Flores, "Comprehensive Ergonomic Proposal for the Reduction of Musculoskeletal Risks in Soap Production: An Approach Based on Statistical Analysis and Postural Evaluation," *INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, no. 2, 2025. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2416>
- [6] M. J. Cabrera Valladolid, "Análisis de series temporales de casos confirmados y fallecidos por Covid-19 del Ecuador," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2021. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14812>
- [7] M. G. Zalduaromero, "Estimación de una función de demanda de importaciones en la industria plástica en el Ecuador, período 1980–2016," UESS, 2017. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/2008>
- [8] J. I. Cañarte Murillo, "Crecimiento restringido de la balanza de pagos: Caso ecuatoriano de la Ley de Thirlwall 2000–2016," UESS, 2017. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1980>
- [9] M. Alós and M. Serio, "Participación en el mercado laboral de las personas mayores en Argentina," *Revista Pilquen – Sección Ciencias Sociales*, vol. 27, no. 2, pp. 71–96, 2024. URL: <https://www.redalyc.org/journal/3475/347580385004/>
- [10] F. J. Duque-Aldaz and E. G. Pazan Gómez, "Factors affecting entrepreneurial intention of Senior University Students," *Espacio*, vol. 39, no. 09, p. 32, 2017. URL: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n09/18390932.html>
- [11] A. Meneses Freire, L. Zúñiga Lema, J. Muñoz Cargua, J. Lara Sinaluisa, and W. Acurio Martínez, "Modelo predictivo funcional no paramétrico en series temporales funcionales. Aplicación en variables meteorológicas," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2022. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19024>
- [12] L. Y. Ortega Villegas, "Análisis en la industria naviera en Ecuador como resultado de la crisis financiera en el 2008," UESS, 2018. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/2503>
- [13] D. M. Ichau Tabango, P. J. Pando Sigua, P. L. Cárdenas García, and S. V. Avilés Sacoto, "Gestión de la demanda e inventarios para la creación de un sistema de manejo de información automatizado: Caso de estudio aplicado a un supermercado ecuatoriano," USFQ, 2021. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/10650>
- [14] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores, and J. Carmona Tapia, "Identification of parameters in ordinary differential equation systems using artificial neural networks," *San Gregorio*, vol. 1, no. 2, 2025. URL: <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/2826>
- [15] F. F. Sandoya Sanchez and A. G. Abad Robalino, "Comparación de la precisión de la predicción de datos de una serie de tiempo entre los modelos ARIMA y las Redes Neuronales," ESPOL, 2017. URL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/40345>
- [16] A. F. Mayorga Trujillo, "Investigación del incremento de productividad en la fábrica de pernos en la empresa Galo G. Orbea O. Cia. Ltda. mediante el análisis de disponibilidad en las etapas de su proceso productivo," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2017. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6515>
- [17] D. A. Villarreal Godoy, L. F. Córdor Simbaña, and C. A. Suárez Nuñez, "Control de inventario en una empresa ecuatoriana de textiles: Mejora en los procesos de planificación y control de producción," USFQ, 2022. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/12544>
- [18] N. Vela and M. C. Camacho Cordovez, "Industria Petrolera: Modelamiento del pronóstico de la demanda y la planificación y proyección del consumo," USFQ, 2020. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/9206>
- [19] J. S. Fu-López, J. P. Fierro Aguilar, F. R. Rodríguez-Flores, and F. J. Duque-Aldaz, "Application of non-automated Lean strategies for quality improvement in manual assembly processes: A case study in the white goods industry," *INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, no. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2417>
- [20] J. M. Ausay Carrillo, "Propuesta de un modelo econométrico para el pronóstico de ventas de la fábrica de balanceados EXIBAL-Riobamba," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2022. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19903>
- [21] P. A. Eguiguren Calisto and S. V. Avilés Sacoto, "Modelos de proyección de demanda para productos de alta volatilidad y bajo volumen en ventas dentro de una empresa de alimentos," USFQ, 2019. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8320>
- [22] D. S. Navarro Llivisaca, "Influencia del IVA e impuesto a la renta en las recaudaciones tributarias, 2007–2016," UESS, 2017. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1773>
- [23] I. J. Figueroa Tigrero, "Presión tributaria del Ecuador, período 2000–2018: Un análisis desde el enfoque de la teoría de la curva de Laffer," UESS, 2019. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/3090>
- [24] A. M. Freire Engracia, A. J. Santos Castello, and I. D. Rivadeneyra, "Análisis de la relación entre la inversión extranjera directa y la recaudación tributaria: Efectos en el sector comercio," ESPOL, 2025. URL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65933>
- [25] K. N. Lema Remache, "Comparación entre los métodos ARIMA y Tylor Kriging (TK) para la predicción de series temporales de velocidad del viento: Caso de estudio Estación Meteorológica Chimborazo," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2024. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/22839>
- [26] G. J. Morocho Choca, L. A. Bucheli Carpio, and F. J. Duque-Aldaz, "Fuel oil fuel dispatch optimization through multivariate regression using local storage indicators," *INQUIDE*, vol. 6, no. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v6i02.477>
- [27] J. E. Pincay Moran, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo, and R. Sánchez Casanova, "Evaluation and Proposal for an Environmental Management System in a Mango Plantation," *INQUIDE*, vol. 7, no. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i01.1991>
- [28] R. J. Guerrero Quinde and C. C. Pérez Siguenza, "Diseño de un modelo de abastecimiento de productos lácteos en una empresa retail," ESPOL, 2025. URL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/66133>
- [29] G. Silva and L. C. Di Serio, "Innovación en los 'negocios olvidados'," *Innovation & Management Review*, vol. 18, no. 4, pp. 350–364, 2021. URL: <https://www.redalyc.org/journal/5375/537569183001/>
- [30] F. Medeiros, L. C. Di Serio, and A. Moreira, "Avon Brasil: Optimización de los Procesos Logísticos en una Venta Directa

- Empresa,” *Revista de Administração Contemporânea*, vol. 25, no. 4, e-190212, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2021190212.en>
- [31] L. M. García-Feria, L. Aguilar-Faisal, R. Pastor-Nieto, and J. C. Serio-Silva, “Changes in vegetation at small landscape scales and captivity alter the gut microbiota of black howler monkeys (*Alouatta pigra*: Atelidae),” *Acta Biológica Colombiana*, vol. 28, no. 1, pp. 154–164, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v28n1.93450>
- [32] C. A. García Vázquez, A. I. González Santos, and V. Pérez Garrido, “Metodología y algoritmo de validación para identificar modelos de una unidad manejadora de aire,” *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 42, no. 1, 2021. URL: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59282021000100105&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282021000100105&lang=es)
- [33] J. E. Mendoza Cota, “COVID-19 y el empleo en México: Impacto inicial y pronósticos de corto plazo,” *Contaduría y Administración*, vol. 65, no. 5, 2020. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7731039>
- [34] J. W. Tudela-Mamani and G. A.-M. Grisellx, “Impacto del COVID-19 en la demanda de turismo internacional del Perú: Una aplicación de la metodología Box-Jenkins,” *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 24, no. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2022.317>
- [35] L. Asán Caballero, J. Rojas Delgado, and G. E. Jiménez Moya, “Algoritmo de predicción de series de tiempo para el pronóstico del tráfico aéreo basado en redes neuronales artificiales,” *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 16, no. 4, 2023. URL: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2227-18992022000400084&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992022000400084&lang=es)

# ARIMA vs. Modelos Híbridos con aprendizaje automático para pronóstico del PIB de Ecuador.

*ARIMA vs. Hybrid Models with Machine Learning for Forecasting Ecuador's GDP.*

Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu <sup>1\*</sup> ; Edwin Haymacaña Moreno <sup>2</sup> ; Francisco Javier Duque-Aldaz <sup>3</sup> ; Félix Genaro Cabezas García <sup>4</sup> ; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima <sup>5</sup>

Recibido: 28/09/2025 – Aceptado: 02/12/2025 – Publicado: 01/01/2025

Artículos de  
Investigación



Artículos de  
Revisión



Artículos de  
Ensayos



\* Autor para  
correspondencia.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

## Resumen.

El análisis del Producto Interno Bruto (PIB) resulta esencial para comprender la dinámica económica de Ecuador y orientar decisiones estratégicas en contextos de alta volatilidad macroeconómica. El estudio tuvo como propósito estimar y pronosticar la tasa de crecimiento del PIB ecuatoriano a corto plazo mediante modelos estadísticos robustos y validados. Se utilizaron series históricas del PIB (1965–2023) obtenidas del Banco Central del Ecuador. Se aplicaron pruebas de estacionariedad (ADF, KPSS), correlogramas y criterios de información (AIC, BIC) para seleccionar modelos ARIMA adecuados. El análisis se realizó con EViews 12, generando proyecciones para el período 2024–2027 bajo escenarios optimista, pesimista y esperado. Los resultados evidenciaron que la serie del PIB ecuatoriano no era estacionaria en su nivel original, lo que requirió la aplicación de la primera diferencia para estabilizar la media. El modelo ARIMA identificado incorporó componentes autorregresivos y de media móvil, cuyos coeficientes fueron estadísticamente significativos. Los residuos del modelo no presentaron autocorrelación, lo que confirmó su validez. Las proyecciones generadas para el período 2024–2027 indicaron un crecimiento moderado bajo escenarios optimista, pesimista y esperado. Estos resultados fueron consistentes con estimaciones oficiales, validando la metodología Box-Jenkins como herramienta eficaz para el pronóstico económico nacional. El estudio aporta evidencia empírica útil para la planificación económica nacional, validando la aplicabilidad de modelos ARIMA en el análisis del PIB. Además, promueve enfoques interdisciplinarios entre economía e ingeniería, fortaleciendo la capacidad técnica para abordar problemas macroeconómicos en contextos de alta incertidumbre estructural.

## Palabras clave.

Crecimiento económico, Producto Interno Bruto, Ecuador, Modelos Arima, Box-Jenkins, Pronóstico Económico, Planificación macroeconómica.

## Abstract.

The analysis of Gross Domestic Product (GDP) is essential for understanding Ecuador's economic dynamics and guiding strategic decisions in contexts of high macroeconomic volatility. The purpose of the study was to estimate and forecast Ecuador's short-term GDP growth rate using robust and validated statistical models. Historical GDP series (1965–2023) obtained from the Central Bank of Ecuador were used. Stationarity tests (ADF, KPSS), correlograms, and information criteria (AIC, BIC) were applied to select appropriate ARIMA models. The analysis was performed using EViews 12, generating projections for the period 2024–2027 under optimistic, pessimistic and expected scenarios. The results showed that the Ecuadorian GDP series was not stationary at its original level, which required the application of the first difference to stabilise the mean. The identified ARIMA model incorporated autoregressive and moving average components, whose coefficients were statistically significant. The model residuals did not show autocorrelation, confirming its validity. The projections generated for the period 2024–2027 indicated moderate growth under optimistic, pessimistic and expected scenarios. These results were consistent with official estimates, validating the Box-Jenkins methodology as an effective tool for national economic forecasting. The study provides useful empirical evidence for national economic planning, validating the applicability of ARIMA models in GDP analysis. In addition, it promotes interdisciplinary approaches between economics and engineering, strengthening the technical capacity to address macroeconomic problems in contexts of high structural uncertainty.

## Keywords.

Economic growth, Gross Domestic Product, Ecuador, Arima and Box-Jenkins models, Economic forecasting, Macroeconomic planning.

## 1.- Introducción

El crecimiento económico constituye una de las variables más relevantes para el análisis de la estabilidad y el desarrollo de los países, ya que refleja la capacidad productiva y las condiciones estructurales de sus economías, en este contexto, el Producto Interno Bruto (PIB) es el principal indicador utilizado para medir la actividad económica, por lo que su estimación y pronóstico resultan fundamentales para la formulación de políticas

públicas, la toma de decisiones en el ámbito empresarial y la evaluación de escenarios futuros (Desiderio Noboa, 2022).

En el caso de Ecuador, la evolución del PIB ha estado marcada por una notable dependencia de las exportaciones de petróleo, la vulnerabilidad frente a choques externos y la implementación de políticas fiscales y monetarias que han influido en su dinámica de crecimiento, estos factores han generado variaciones significativas en las tasas de

<sup>1</sup> Universidad Técnica de Babahoyo; [lzapata@utb.edu.ec](mailto:lzapata@utb.edu.ec); <https://orcid.org/0009-0003-1497-2273> ; Babahoyo; Ecuador.

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Bolivariano de Tecnología; [erhaymacana@itb.edu.ec](mailto:erhaymacana@itb.edu.ec) ; <https://orcid.org/0000-0002-8708-3894>; Guayaquil; Ecuador.

<sup>3</sup> Universidad de Guayaquil; [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635> ; Guayaquil; Ecuador.

<sup>4</sup> Investigador Independiente; [genaro\\_cabezas@hotmail.com](mailto:genaro_cabezas@hotmail.com) ; <https://orcid.org/0000-0003-3595-3584> ; Hamilton, ON, Canadá.

<sup>5</sup> Universidad Nacional de Tumbes; [rsanchez@untumbes.edu.pe](mailto:rsanchez@untumbes.edu.pe) ; <https://orcid.org/0000-0003-3341-7382> ; Tumbes, Perú.

expansión de la economía, lo que hace necesario contar con herramientas estadísticas robustas que permitan comprender su comportamiento histórico y proyectar tendencias con un mayor grado de precisión (Asán Caballero, 2023).

Dentro de las metodologías de análisis de series temporales, el enfoque Box-Jenkins (ARIMA) se ha consolidado como uno de los más utilizados en la modelización y pronóstico de variables económicas, su capacidad para identificar patrones estocásticos en los datos, ajustar modelos parsimoniosos y generar proyecciones confiables lo convierte en una alternativa adecuada para estudiar la dinámica del PIB, además, su flexibilidad permite capturar la naturaleza no estacionaria de las series económicas y mejorar la calidad de las estimaciones en horizontes de corto plazo (Tudela-Mamani y otros, 2022).

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo estimar y pronosticar la tasa de crecimiento del PIB de Ecuador utilizando la metodología Box-Jenkins, a fin de evaluar su capacidad predictiva y aportar evidencia empírica que contribuya al análisis de la dinámica macroeconómica nacional, con ello se busca fortalecer el debate académico y proporcionar insumos útiles para la gestión y la planificación económica del país (García Vázquez y otros, 2021).

El análisis del crecimiento económico constituye un tema central en la investigación económica y en la formulación de políticas públicas, debido a que el Producto Interno Bruto (PIB) es el principal indicador que mide la capacidad productiva de un país. En el caso de Ecuador, la dinámica del PIB ha estado sujeta a múltiples factores internos y externos, tales como la dependencia de las exportaciones de petróleo, la vulnerabilidad a los cambios en los precios internacionales de las materias primas, la dolarización de la economía, las políticas fiscales y monetarias aplicadas, así como fenómenos sociales y políticos que han generado ciclos de expansión y contracción en su crecimiento (de la Oliva de Con & Molina Fernández, 2020).

Esta realidad plantea la necesidad de contar con herramientas analíticas que permitan comprender el comportamiento histórico del PIB y anticipar su evolución futura, sin embargo, gran parte de los estudios sobre la economía ecuatoriana se han centrado en análisis descriptivos o en proyecciones macroeconómicas de carácter agregado, lo que limita la capacidad de contar con modelos estadísticos rigurosos y validados para fines de pronóstico.

En este contexto, surge el problema de investigación: ¿cómo estimar y pronosticar de manera confiable la tasa de crecimiento del PIB de Ecuador a partir de sus series históricas, empleando un modelo estadístico que capture la dinámica temporal de los datos?

La metodología Box-Jenkins, mediante los modelos ARIMA, ofrece un enfoque robusto para abordar este desafío, al permitir modelar el comportamiento estocástico de la serie y generar predicciones con un grado de precisión adecuado para la toma de decisiones, no obstante, su aplicación al caso ecuatoriano aún requiere mayor exploración y validación empírica, lo que justifica el presente estudio.

La estimación y pronóstico de la tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) de Ecuador, mediante la metodología Box-Jenkins, reviste gran importancia porque combina el análisis económico con herramientas estadísticas y computacionales propias de la ingeniería, este enfoque no solo aporta a la comprensión de la dinámica macroeconómica nacional, sino que también fortalece la capacidad de la ingeniería para abordar problemas complejos en entornos de alta incertidumbre (Duque-Aldaz y otros, Identification of parameters in ordinary differential equation systems using artificial neural networks, 2025).

Para poder dar cumplimiento al objetivo de la presente investigación se plantea; como primer paso poder estimar y pronosticar la tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) de Ecuador mediante el uso de modelos estadísticos, con el fin de generar información confiable que apoye la planificación económica y la toma de decisiones estratégicas a nivel gubernamental, empresarial y académico. Como segundo paso se plantea el analizar la evolución histórica de la tasa de crecimiento del PIB de Ecuador, identificando tendencias, ciclos y patrones relevantes. Como tercer paso se plantea el seleccionar y aplicar modelos estadísticos y econométricos adecuados (por ejemplo: ARIMA, VAR, modelos de corrección de errores) para la estimación y pronóstico del PIB. Finalmente se va a comparar los resultados obtenidos con las proyecciones oficiales (Banco Central del Ecuador, CEPAL, FMI), evaluando similitudes y discrepancias (Castro Rosales y otros, 2025).

### 1.1. Concepto y relevancia del Producto Interno Bruto (PIB)

El Producto Interno Bruto (PIB) es un indicador económico fundamental que representa el valor monetario total de todos los bienes y servicios finales producidos dentro de las fronteras de un país durante un periodo específico, generalmente un año. Su origen teórico se atribuye principalmente a Simon Kuznets, quien lo introdujo en la década de 1930 para medir la actividad económica nacional, y desde entonces se ha consolidado como la métrica estándar para evaluar el tamaño y la salud de las economías a nivel mundial. El PIB refleja tanto la producción tangible, como bienes manufacturados o agrícolas, como los servicios intangibles, como educación y salud, capturando de esta forma la capacidad productiva y dinámica económica de un país en un momento dado (Cruz Ramírez y otros, 2024).

En el contexto de Ecuador, el PIB es especialmente relevante dado que el país posee una economía altamente dependiente de sectores como la exportación de petróleo, productos agroindustriales y recursos naturales. Un crecimiento sostenido del PIB se asocia con mayor generación de empleo, mejoramiento en la calidad de vida y aumento del bienestar general de la población. Asimismo, el análisis del PIB y su evolución permite a los gobiernos y entidades públicas diseñar y ajustar políticas económicas, fiscales y sociales, orientando las inversiones en infraestructura, educación y salud para promover un desarrollo más equilibrado y sostenible dentro del territorio nacional (Núñez Ordóñez, 2023).

Además de su utilidad para medir la producción agregada, el PIB funciona como un indicador clave de estabilidad económica y confianza empresarial, influyendo en la percepción de inversionistas nacionales e internacionales. La comparación del PIB nominal y real permite identificar verdaderos cambios en la producción, descontando efectos inflacionarios. También, su expresión en términos per cápita facilita evaluar el nivel promedio de riqueza y el progreso económico de la población, aspecto de particular importancia para Ecuador debido a las desigualdades regionales y sociales existentes. En este sentido, el PIB no solo mide el volumen económico, sino que también refleja las condiciones estructurales y los retos a los que se enfrenta la economía ecuatoriana (Duque-Aldaz & Pazan Gómez, 2017).

## 1.2. Factores que afectan el crecimiento económico en Ecuador

El crecimiento económico de Ecuador está fuertemente influenciado por factores tanto internos como externos que determinan la dinámica del Producto Interno Bruto (PIB). Entre los factores externos, la dependencia de las exportaciones petroleras juega un papel central, ya que la economía nacional está altamente vinculada a las fluctuaciones en los precios internacionales del petróleo. Estudios recientes muestran que descensos en el precio del petróleo tienen un impacto negativo significativo y más pronunciado sobre el PIB real, afectando además los ingresos fiscales y el gasto público, que son variables críticas para sostener el crecimiento económico. Esta sensibilidad ha evidenciado la necesidad de diversificar las fuentes de ingresos para reducir la vulnerabilidad ante shocks externos derivados de la volatilidad de los mercados internacionales (Chérrez Sánchez y otros, 2025).

Desde el punto de vista interno, las políticas fiscales y monetarias implementadas por el gobierno ecuatoriano constituyen mecanismos clave para influir en el crecimiento económico. La recaudación tributaria, junto con el manejo del gasto público, tienen una relación positiva y significativa con la evolución del PIB, pues estos recursos permiten financiar inversiones en infraestructura, educación

y otros sectores estratégicos. No obstante, la estabilidad política parece tener un rol menos determinante en la variabilidad económica que las variables económicas directas, aunque factores sociales y políticos pueden generar incertidumbre que impacta la confianza empresarial y las expectativas macroeconómicas (Sandoya Sánchez & Vásquez Villon, 2004).

Adicionalmente, la economía ecuatoriana presenta ciclos de expansión y contracción que se relacionan con fenómenos económicos globales, tales como la crisis financiera mundial y fluctuaciones del mercado petrolero. Sectores como la minería, agricultura y manufactura juegan roles importantes en la estructura productiva, aunque su aporte está condicionado a las tendencias internacionales y al dinamismo interno. Por ello, la interacción entre variables externas y decisiones de política económica interna configura la compleja dinámica del crecimiento del PIB en Ecuador, reafirmando la importancia de estrategias orientadas a fortalecer la resiliencia y promover un desarrollo económico sostenible y diversificado (Romero Ruiz y otros, 2024).

## 1.3. Modelos y metodologías para análisis y pronóstico económico

Para analizar y pronosticar la evolución del Producto Interno Bruto (PIB) en economías emergentes como la ecuatoriana, los modelos de series temporales se han consolidado como herramientas fundamentales. Estos modelos permiten capturar las dinámicas y patrones intrínsecos en los datos históricos económicos para proyectar su comportamiento futuro (Morochó Choca y otros, 2024). Entre los más utilizados se encuentran los modelos autoregresivos, de medias móviles y sus combinaciones, que ajustan la dependencia temporal de las variables económicas. La capacidad de los modelos de series temporales para manejar datos secuenciales y su flexibilidad para incorporar estacionalidades y tendencias los hace adecuados para entornos con datos económicos complejos y ruidosos (Herrera Mendoza, 2024).

La metodología Box-Jenkins, que incluye los modelos ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), se basa en la identificación, estimación y validación sistemática del modelo que mejor se ajusta a la serie temporal. Esta metodología es especialmente valiosa para la estimación y pronóstico económico porque combina componentes autoregresivos y de medias móviles tras la diferenciación de la serie para alcanzar la estacionariedad. Estudios recientes aplicados al contexto ecuatoriano han implementado modelos ARIMA para pronosticar variables clave, demostrando la eficacia del enfoque en la captura de las fluctuaciones económicas y en la generación de predicciones ajustadas a escenarios reales (Sandoya Sánchez & Abad Robalino, 2017).

Sin embargo, los modelos ARIMA y otros modelos tradicionales presentan tanto ventajas como limitaciones.

Entre sus fortalezas está la relativa simplicidad estructural y la capacidad para pronosticar con datos univariados históricos. No obstante, en contextos de alta volatilidad económica y dependencia externa, como el caso ecuatoriano, pueden presentar dificultades para anticipar cambios abruptos o incorporar efectos de shocks exógenos, como crisis internacionales o variaciones de precios de commodities, que afectan el PIB. Por esta razón, se recomienda complementar estos modelos con enfoques multivariantes o técnicas actuales que permitan incorporar variables explicativas externas y capturar mejor la complejidad estructural de la economía (Ochoa González, 2024).

#### 1.4. Pruebas estadísticas y criterios para validación de modelos

Para validar la idoneidad y precisión de los modelos ARIMA aplicados al análisis del Producto Interno Bruto (PIB), es fundamental realizar pruebas estadísticas que permitan asegurar la estacionariedad de las series temporales. Entre las más utilizadas figuran las pruebas Dickey-Fuller aumentada (ADF) y Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS). La prueba ADF contrasta la hipótesis nula de que la serie tiene raíz unitaria —es decir, no es estacionaria— frente a la alternativa de estacionariedad, y se basa en la inclusión de términos rezagados para corregir posible autocorrelación (Pincay Moran y otros, 2025). Por otro lado, la prueba KPSS asume como hipótesis nula la estacionariedad, evaluando si la serie es la suma de un paseo aleatorio y un componente estacionario. La combinación de ambas pruebas permite una evaluación más robusta, ya que sus hipótesis nulas son opuestas, brindando mayor certeza sobre el comportamiento de las series nacionales del PIB (Varas y otros, 2023).

Adicionalmente, el análisis de correlogramas —funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial— es esencial para identificar patrones estacionales y dependencias temporales en los datos, facilitando la elección adecuada de los parámetros AR y MA en los modelos ARIMA. Para la selección óptima del modelo, se emplean criterios de información estadística como el Akaike Information Criterion (AIC) y el Bayesian Information Criterion (BIC), que balancean el ajuste del modelo con su complejidad, evitando el sobreajuste. Estos criterios permiten comparar diferentes especificaciones y seleccionar aquella que minimice el error de predicción con la menor cantidad de parámetros (Li Ye & Paz y Miño Robles, 2023).

Finalmente, el diagnóstico residual es un paso crucial para validar la calidad del modelo estimado, verificando que los residuos sean ruido blanco, es decir, variables aleatorias independientes con media cero y varianza constante. Esto implica pruebas de no autocorrelación —como el test de Ljung-Box— y de normalidad en los residuos, garantizando que el modelo ha capturado correctamente la información relevante de la serie. Los modelos ARIMA que superan exitosamente estas pruebas estadísticas proporcionan

estimaciones confiables y robustas para el pronóstico del PIB, aumentando la precisión y utilidad de los análisis económicos en el contexto ecuatoriano (Arango Fuentes y otros, 2025).

#### 1.5. Aplicaciones prácticas y enfoques complementarios

Los modelos estadísticos para el análisis y pronóstico del Producto Interno Bruto (PIB) en Ecuador tienen una aplicación práctica significativa en la planificación económica y la toma de decisiones estratégicas. Al utilizar modelos de series temporales como ARIMA, las autoridades y organismos encargados de la política económica pueden generar proyecciones fiables que orientan la asignación eficiente de recursos públicos y privados, anticipando escenarios futuros. Esto resulta fundamental para diseñar políticas fiscales, ajustar presupuestos y evaluar el impacto de variables externas e internas en la economía nacional, permitiendo un manejo proactivo frente a cambios en la dinámica económica (Macías Sandoval & Tutiven Galvez, 2025).

Para fortalecer la capacidad predictiva y captar interrelaciones entre múltiples variables económicas, se emplean modelos multivariantes como los Vector Autoregresivos (VAR) y los Modelos de Corrección de Errores Vectoriales (VECM). Estos modelos permiten analizar la co-integración y las relaciones dinámicas entre diversas variables macroeconómicas, incluyendo la inflación, tipos de cambio, tasas de interés y exportaciones, enriqueciendo la comprensión de las causas y efectos en la variación del PIB. Su uso complementa y amplía la información aportada por modelos univariantes, adaptándose mejor a contextos económicos complejos y altamente interrelacionados como el ecuatoriano (Cruz Peña, 2024).

Recientemente, también se ha incrementado la incorporación de métodos híbridos que combinan modelos estadísticos tradicionales con técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial para mejorar la precisión en el pronóstico económico. Estas técnicas permiten aprovechar grandes volúmenes de datos y detectar patrones no lineales que escapan a los enfoques convencionales, incrementando la robustez en contextos de alta volatilidad y dependencia externa (Fu-López y otros, 2025). En Ecuador, la integración de estos enfoques representa un avance metodológico clave para abordar las limitaciones inherentes a modelos clásicos y potenciar la toma de decisiones basada en análisis predictivos más precisos y adaptativos (Lliguizaca Dávila y otros, 2020).

## 2.- Materiales y métodos.

La metodología utilizada en esta investigación se describe a continuación:

#### Datos:

Series históricas anuales del PIB de Ecuador (1965–2023) proporcionadas por el Banco Central del Ecuador (BCE).

#### Software y herramientas analíticas:

EViews 12 (x64) para análisis de series de tiempo y estimación de modelos ARIMA.

### Diseño experimental

Tipo de estudio: cuantitativo, longitudinal, basado en series de tiempo.

### Variables estudiadas:

Dependiente: tasa de crecimiento del PIB.

### Validación de métodos:

Se aplicaron pruebas de estacionariedad (ADF, KPSS) para asegurar la idoneidad de los modelos de series de tiempo.

Se utilizaron criterios de información (AIC, BIC) para seleccionar los modelos más adecuados.

Se compararon los resultados con pronósticos oficiales del BCE y la CEPAL para evaluar consistencia.

### Procedimientos

#### Recolección de datos:

Descarga de series históricas del PIB y variables macroeconómicas relacionadas desde BCE, CEPAL e INEC.

#### Depuración y preparación:

Limpieza de datos, eliminación de valores atípicos y homogeneización de unidades y períodos.

#### Análisis exploratorio:

Estadísticas descriptivas y visualización de tendencias, estacionalidad y ciclos económicos.

#### Modelamiento:

Aplicación de modelos ARIMA para series individuales.

#### Validación y ajuste de modelos:

Pruebas de residuales, autocorrelación y heterocedasticidad. Comparación con pronósticos oficiales y ajuste de parámetros según resultados.

#### Generación de pronósticos:

Proyección anual del PIB para los próximos cuatro años (2024–2027).

#### Presentación de resultados:

Tablas y gráficos en EViews, incluyendo escenarios de crecimiento optimista, pesimista y esperado.

#### Análisis de datos

Estadística descriptiva: medias, desviaciones estándar, tendencias y estacionalidad.

Modelos de series de tiempo: ARIMA, SARIMA para estimaciones individuales.

#### Validación de modelos:

Test de raíces unitarias (ADF, KPSS).

Análisis de autocorrelación (ACF, PACF).

Criterios de información (AIC, BIC).

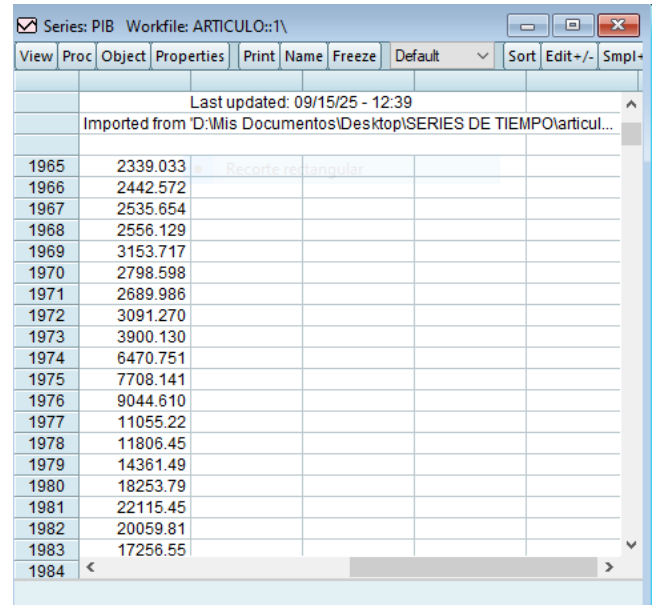
Pronósticos: intervalos de confianza al 95% y comparación con series históricas.

## 3.- Análisis e Interpretación de Resultados.

### 3.1.- Presentación de resultados:

#### Fase 1 identificación

Tabla 1. Serie Histórica del Producto Interno Bruto (PIB) de Ecuador (1965-2023)



Año	Valor
1965	2339.033
1966	2442.572
1967	2535.654
1968	2556.129
1969	3153.717
1970	2798.598
1971	2689.986
1972	3091.270
1973	3900.130
1974	6470.751
1975	7708.141
1976	9044.610
1977	11055.22
1978	11806.45
1979	14361.49
1980	18253.79
1981	22115.45
1982	20059.81
1983	17256.55
1984	

Fuente: Banco Central del Ecuador.

Evolución del PIB en Ecuador (1965-2023)



Figura 1.- Evolución del PIB en Ecuador (1965-2023)

Según el gráfico, la serie no presenta estacionariedad en la media, aunque sí muestra una tendencia, por lo tanto, se procederá a comprobar esta suposición, entonces vamos a comprobar lo supuesto.

Tabla 2. Resultados de la Prueba de Raíz Unitaria (Test ADF) Test Augmented Dickey-Fuller

View	Proc	Object	Properties	Print	Name	Freeze	Sample	Genr	Sheet	Graph	Stats	Ident
Null Hypothesis: PIB has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=10)												
						t-Statistic	Prob.*					
<b>Augmented Dickey-Fuller test statistic</b>						-0.626286	0.9735					
Test critical values:												
1% level						-4.124265						
5% level						-3.489228						
10% level						-3.173114						
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.												
Augmented Dickey-Fuller Test Equation Dependent Variable: D(PIB) Method: Least Squares Date: 09/15/25 Time: 12:42 Sample (adjusted): 1966 2023 Included observations: 58 after adjustments												
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.								
PIB(-1)	-0.020924	0.033410	-0.626286	0.5337								
C	-897.8526	1266.193	-0.709096	0.4813								
@TREND("1965")	125.8258	71.07052	1.770436	0.0822								
R-squared	0.121485	Mean dependent var	2048.414									
Adjusted R-squared	0.089539	S.D. dependent var	4283.441									
S.E. of regression	4087.177	Akaike info criterion	19.51944									
Sum squared resid	9.19E+08	Schwarz criterion	19.62601									
Log likelihood	-563.0636	Hannan-Quinn criter.	19.56095									
F-statistic	3.802825	Durbin-Watson stat	1.586295									
Prob(F-statistic)	0.028386											

Una serie temporal es no estacionaria en media cuando su valor esperado (la media) no es constante y cambia a lo largo del tiempo.

Observamos que el p-valor indica que la serie es no estacionaria en media, por lo tanto, es necesario aplicar transformaciones, como la diferenciación, para hacerla estacionaria.

A continuación, se presentan las hipótesis de la prueba:

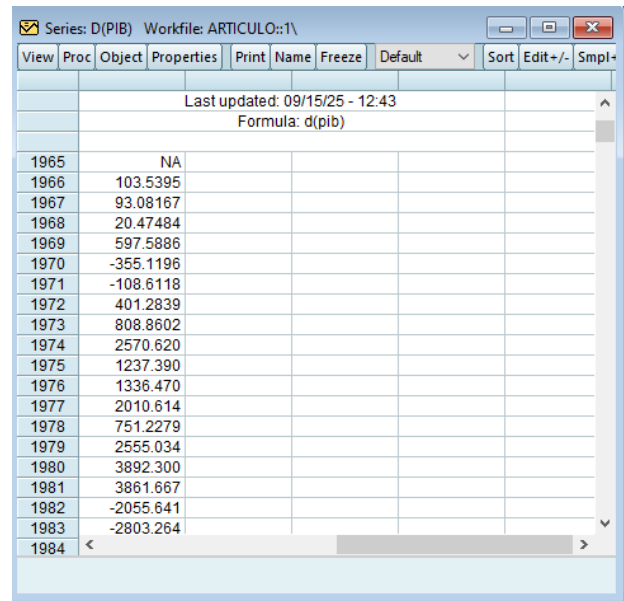
$H_0$  (nula): la serie tiene raíz unitaria  $\rightarrow$  no es estacionaria.

$H_1$  (alternativa): la serie no tiene raíz unitaria  $\rightarrow$  es estacionaria.

Valor p (0.9735), es muy alto, mucho mayor que cualquier nivel de significancia típico (0.01, 0.05, 0.1), esto no permite rechazar  $H_0$ , lo que significa que la serie no es estacionaria.

### Primera diferencia PBI

Tabla 3. PIB (Producto Interno Bruto) - Primera Diferencia



Year	D(PIB)
1965	NA
1966	103.5395
1967	93.08167
1968	20.47484
1969	597.5886
1970	-355.1196
1971	-108.6118
1972	401.2839
1973	808.8602
1974	2570.620
1975	1237.390
1976	1336.470
1977	2010.614
1978	751.2279
1979	2555.034
1980	3892.300
1981	3861.667
1982	-2055.641
1983	-2803.264
1984	

### Primera Diferencia del PIB

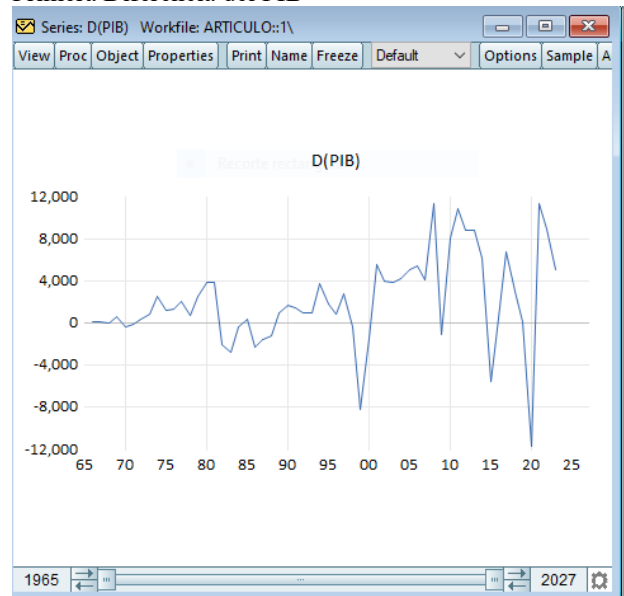


Figura 2.- Primera Diferencia del PIB

Entonces vemos que la gráfica ya no tiene tendencia y al parecer la media está alrededor de 0, hacemos la prueba (Test ADF) Test Augmented Dickey-Fuller.

Tabla 4. Resultados de la Prueba de Raíz Unitaria (ADF) en la Primera Diferencia del PIB

View	Proc	Object	Properties	Print	Name	Freeze	Sample	Genr	Sheet	Graph	Stats	Ident
------	------	--------	------------	-------	------	--------	--------	------	-------	-------	-------	-------

Null Hypothesis: D(PIB) has a unit root  
Exogenous: Constant  
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=10)

	t-Statistic	Prob.*
<b>Augmented Dickey-Fuller test statistic</b>	<b>-5.517803</b>	<b>0.0000</b>
Test critical values:		
1% level	-3.550396	
5% level	-2.913549	
10% level	-2.594521	

\*Mackinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation  
Dependent Variable: D(PIB,2)  
Method: Least Squares  
Date: 09/15/25 Time: 12:45  
Sample (adjusted): 1967 2023  
Included observations: 57 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(PIB(-1))	-0.715090	0.129597	-5.517803	0.0000
C	1513.744	610.2960	2.480345	0.0162
R-squared	0.356320	Mean dependent var	86.14731	
Adjusted R-squared	0.344616	S.D. dependent var	5154.791	
S.E. of regression	4173.100	Akaike info criterion	19.54516	
Sum squared resid	9.58E+08	Schwarz criterion	19.61685	
Log likelihood	-555.0372	Hannan-Quinn criter.	19.57302	
F-statistic	30.44615	Durbin-Watson stat	1.970695	
Prob(F-statistic)	0.000001			

La nueva variable Dpbi ha sido sometida a un análisis de estacionariedad, el cual confirmó que sí es estacionaria. Posteriormente, se procede a realizar el correlograma.

H0 (nula): la serie tiene raíz unitaria → no es estacionaria.  
H1 (alternativa): la serie no tiene raíz unitaria → es estacionaria.

Es mucho menor que cualquier nivel de significancia típico (0.01, 0.05, 0.1), esto significa que rechazamos la hipótesis nula Ho. Luego realizamos el correlograma.

Tabla 5. Correlograma de la Primera Diferencia del PIB

View	Proc	Object	Properties	Print	Name	Freeze	Sample	Genr	Sheet	Graph	Stats	Ident
------	------	--------	------------	-------	------	--------	--------	------	-------	-------	-------	-------

Date: 09/15/25 Time: 12:46  
Sample (adjusted): 1966 2023  
Included observations: 58 after adjustments

	Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	0.282	0.282	4.8681	0.027		
2	0.023	-0.062	4.9000	0.086		
3	0.062	0.080	5.1445	0.162		
4	0.203	0.179	7.7992	0.099		
5	0.218	0.127	10.912	0.053		
6	0.038	-0.054	11.009	0.088		
7	-0.060	-0.070	11.257	0.128		
8	-0.062	-0.081	11.522	0.174		
9	0.006	-0.021	11.525	0.241		
10	0.144	0.145	13.038	0.222		
11	0.169	0.155	15.165	0.175		
12	-0.126	-0.184	16.375	0.175		
13	0.021	0.142	16.409	0.228		
14	-0.036	-0.180	16.514	0.283		
15	0.021	-0.018	16.551	0.346		
16	0.187	0.239	19.456	0.246		
17	0.096	0.051	20.234	0.262		
18	-0.086	-0.127	20.879	0.286		
19	-0.097	-0.017	21.713	0.299		
20	0.060	-0.011	22.044	0.338		
21	0.074	-0.113	22.561	0.368		
22	-0.144	-0.127	24.568	0.318		
23	-0.163	0.068	27.216	0.247		
24	-0.124	-0.155	28.796	0.228		

Fase 1: Identificación  
Partial Correlation AR:(1)  
Autocorrelacion MA:(1)

Fase 2: Elegimos un modelo  
d(pbi) c ar(1)

Tabla 6. Resultados de la Estimación del Modelo 1 d(pbi) c ar(1)

Equation Estimation ×

Specification Options

Equation specification  
Dependent variable followed by list of regressors including ARMA and PDL terms, OR an explicit equation like Y=c(1)+c(2)\*X.

d(pib) c ar(1)

Estimation settings  
Method: LS - Least Squares (NLS and ARMA)  
Sample: 1965 2027

Aceptar Cancelar

Tabla 7. Resultados de la Estimación ARMA por Máxima Verosimilitud (OPG - BHHH) d(pbi) c ar(1)

View Proc Object Print Name Freeze Estimate Forecast Stats Resids

Dependent Variable: D(PIB)  
Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)  
Date: 09/15/25 Time: 12:50  
Sample: 1966 2023  
Included observations: 58  
Convergence achieved after 23 iterations  
Coefficient covariance computed using outer product of gradients

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	2055.198	774.5634	2.653363	0.0104
AR(1)	0.280924	0.088811	3.163178	0.0025
SIGMASQ	16576666	2256256.	7.346978	0.0000

R-squared	0.080684	Mean dependent var	2048.414
Adjusted R-squared	0.047254	S.D. dependent var	4283.441
S.E. of regression	4181.010	Akaike info criterion	19.56625
Sum squared resid	9.61E+08	Schwarz criterion	19.67282
Log likelihood	-564.4212	Hannan-Quinn criter.	19.60776
F-statistic	2.413547	Durbin-Watson stat	1.955942
Prob(F-statistic)	0.098919		

Inverted AR Roots	.28
-------------------	-----

Los resultados de la estimación del modelo ARIMA muestran que todos los coeficientes son estadísticamente significativos en un nivel de confianza del 95%, esto se concluye al observar que sus p-valores son menores que 0.05.

C (Constante): El p-valor de 0.0104 es menor que 0.05, lo que indica que la constante del modelo es significativa. Esto sugiere que hay una media distinta de cero en la serie después de la diferenciación.

AR(1) (Término Autorregresivo): Con un p-valor de 0.0025, este coeficiente es altamente significativo, esto confirma que el valor actual de la serie está fuertemente correlacionado con su valor en el período anterior (un rezago).

SIGMASQ (Varianza del Error): El p-valor de 0.0000 es extremadamente bajo, lo que significa que la varianza de los residuos del modelo es estadísticamente significativa. Esto es un buen indicio de que el modelo está capturando correctamente la estructura de la serie, y que la varianza de los errores no es cero.

Modelo propuesto

$$\Delta y_t = \phi_0 + \phi_1 \Delta y_{t-1} \dots \dots 1$$

{H<sub>0</sub>:  $\phi_0 = 0$

{H<sub>1</sub>:  $\phi_0 \neq 0$  significativo porque el valor p es 0.0001

Entonces la fase 2 si cumple porque los valores de los coeficientes son significativos.

p-valor:

Si  $p < 0.05 \rightarrow$  rechazas H<sub>0</sub>

Si  $p \geq 0.05 \rightarrow$  no rechazas H<sub>0</sub>

### Fase 3: Diagnóstico

Está en función de la normalidad de los errores y Autocorrelación de los errores.

View

Residual Diagnostic

Histogram – Normality Test

Histograma de los residuos

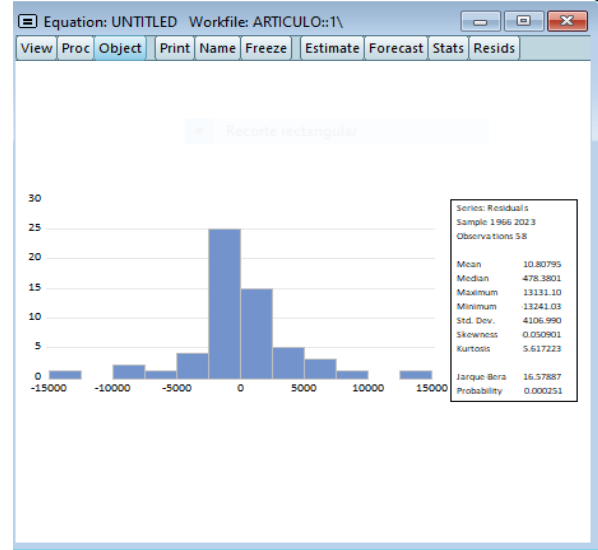


Figura 3.- Histograma de los residuos

\*\*En este gráfico vemos que los errores tienden ser normales con media 0 y varianza 1.

La probabilidad de Jarque-Bera es 0.000251 por lo tanto la distribución de los errores es No Normal.

Entonces volvemos a la Fase 1.

Entonces ecuación d(pbi) c ar(1) ma(1)

Tabla 7. Resultados de la Estimación del Modelo 2 d(pbi) c ar(1) ma(1)

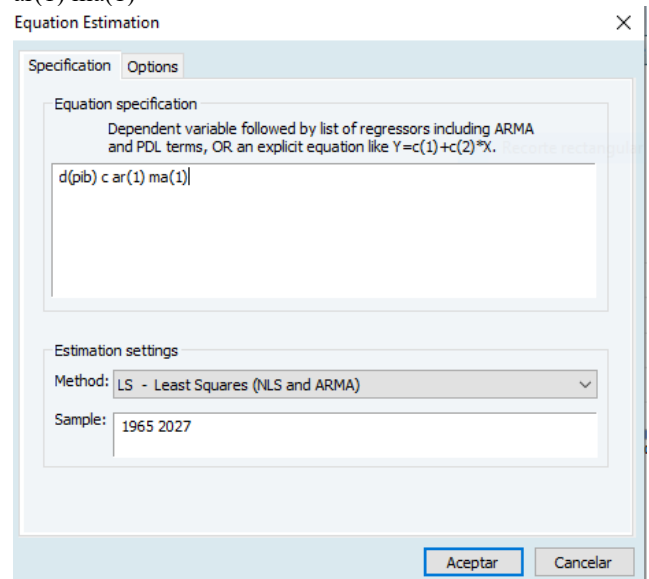


Tabla 8. Resultados de la Estimación ARMA por Máxima Verosimilitud (OPG - BHHH) d(pbi) c ar(1) ma(1)

View	Proc	Object	Print	Name	Freeze	Estimate	Forecast	Stats	Resids
Dependent Variable: D(PIB)									
Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)									
Date: 09/15/25 Time: 12:54									
Sample: 1966 2023									
Included observations: 58									
Convergence achieved after 32 iterations									
Coefficient covariance computed using outer product of gradients									
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.					
C	2050.847	746.0807	2.748827	0.0081					
AR(1)	0.061898	0.423412	0.146188	0.8843					
MA(1)	0.237986	0.418702	0.568391	0.5721					
SIGMASQ	16500629	2247270.	7.342521	0.0000					
R-squared	0.084901	Mean dependent var	2048.414						
Adjusted R-squared	0.034062	S.D. dependent var	4283.441						
S.E. of regression	4209.857	Akaike info criterion	19.59629						
Sum squared resid	9.57E+08	Schwarz criterion	19.73839						
Log likelihood	-564.2925	Hannan-Quinn criter.	19.65164						
F-statistic	1.670001	Durbin-Watson stat	1.984593						
Prob(F-statistic)	0.184307								
Inverted AR Roots	.06								
Inverted MA Roots	-.24								

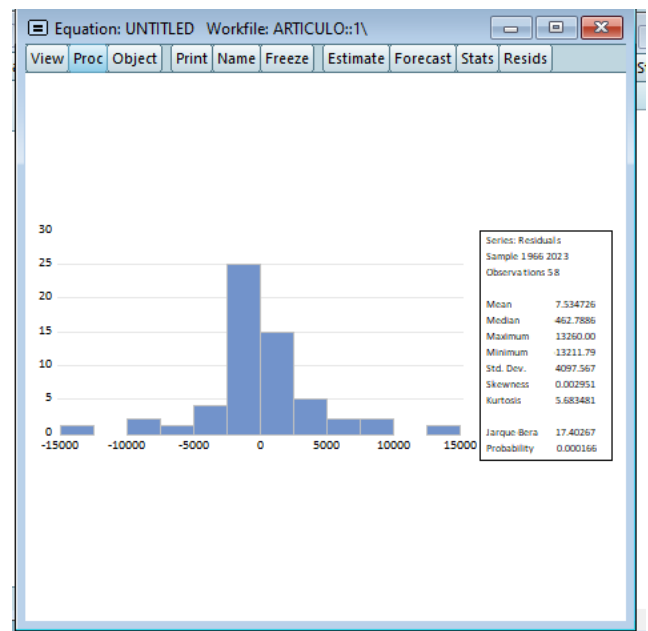


Figura 4.- Histograma de los residuos

\*\*En este gráfico vemos que los errores tienden ser normales con media 0 y varianza 1.

La probabilidad de Jarque-Bera es 0.000166 por lo tanto la distribución de los errores es No Normal.

Entonces volvemos a la Fase 1.

Entonces ecuación  $d(pib)$   $c$   $ar(1)$   $ma(1)$

Luego verificamos la autocorrelación

View

Residual Diagnostic

Correlogram-Q-Statistics

Tabla 9. Correlograma del modelo  $d(pib)$   $c$   $ar(1)$   $ma(1)$

View	Proc	Object	Print	Name	Freeze	Estimate	Forecast	Stats	Resids
Date: 09/15/25 Time: 12:57									
Sample (adjusted): 1966 2023									
Q-statistic probabilities adjusted for 2 ARMA terms									
Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob				
1	0.004	0.004	0.0011						
2	-0.001	-0.002	0.0012						
3	0.025	0.025	0.0419	0.838					
4	0.139	0.139	1.2807	0.527					
5	0.178	0.181	3.3592	0.339					
6	0.000	0.004	3.3592	0.500					
7	-0.048	-0.056	3.5154	0.621					
8	-0.047	-0.082	3.6695	0.721					
9	-0.015	-0.073	3.6860	0.815					
10	0.098	0.071	4.3887	0.820					
11	0.203	0.245	7.4434	0.591					
12	-0.207	-0.171	10.696	0.382					
13	0.096	0.128	11.416	0.409					
14	-0.054	-0.104	11.649	0.474					
15	-0.018	-0.127	11.674	0.555					
16	0.180	0.189	14.362	0.423					
17	0.072	0.150	14.802	0.466					
18	-0.083	-0.096	15.399	0.496					
19	-0.092	-0.052	16.160	0.513					
20	0.063	0.009	16.523	0.556					
21	0.101	-0.063	17.488	0.557					
22	-0.143	-0.177	19.453	0.493					
23	-0.103	0.066	20.507	0.489					
24	-0.066	-0.132	20.948	0.524					

{H<sub>0</sub>:  $\phi_0=0$

{H<sub>1</sub>:  $\phi_0 \neq 0$  significativo porque el valor p es 0.0001

Entonces la fase 2 si cumple porque los valores de los coeficientes son significativos.

p-valor:

Si  $p < 0.05 \rightarrow$  rechazas H<sub>0</sub>

Si  $p \geq 0.05 \rightarrow$  no rechazas H<sub>0</sub>

### Fase 3: Diagnóstico

Está en función de la normalidad de los errores y Autocorrelación de los errores.

View

Residual Diagnostic

Histogram – Normality Test

Gráfico 4: Histograma de los residuos

Observando las probabilidades de los errores no están autocorrelacionados.

#### Fase 4. Pronóstico

2024-2027

Pronóstico del PIB de Ecuador para el período 2024-2028 (Modelo ARMA)

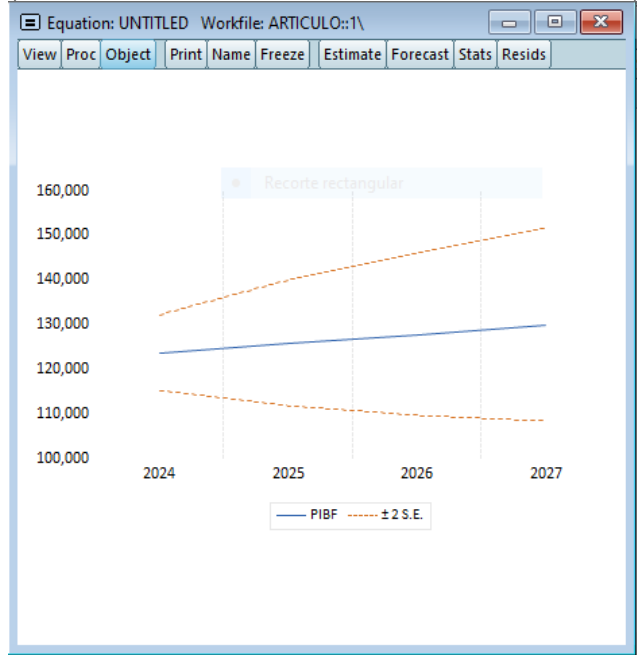


Figura 5. Pronóstico del PIB de Ecuador para el período 2024-2028 (Modelo ARMA)

Tabla 11. Producto Interno Bruto (PIB) de Ecuador: Valores Históricos y Pronosticados

Year	PIB	PIBF
1965	2339.033	2339.033
1966	2442.572	2442.572
1967	2535.654	2535.654
1968	2556.129	2556.129
1969	3153.717	3153.717
1970	2798.598	2798.598
1971	2689.986	2689.986
1972	3091.270	3091.270
1973	3900.130	3900.130
1974	6470.751	6470.751
1975	7708.141	7708.141
1976	9044.610	9044.610
1977	11055.22	11055.22
1978	11806.45	11806.45
1979	14361.49	14361.49
1980	18253.79	18253.79
1981	22115.45	22115.45
1982	20059.81	20059.81
1983	17256.55	17256.55
1984	16943.15	16943.15
1985	17304.17	17304.17
1986		

Tendencia del PIB y Pronóstico

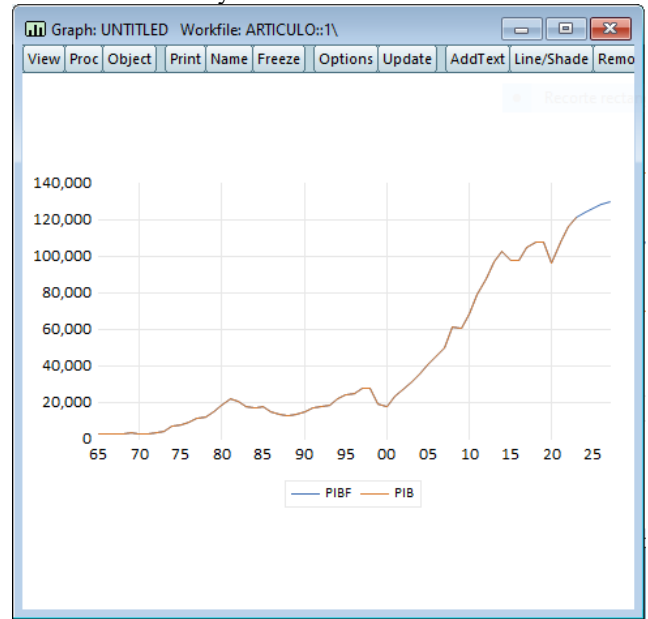


Figura 6.-Tendencia del PIB y Pronóstico

#### 3.2.- Análisis de resultados:

El estudio evidenció que la serie del PIB de Ecuador no fue estacionaria en su nivel original, lo que requirió la aplicación de la primera diferencia para estabilizar la media. El modelo ARIMA identificado integró componentes autorregresivos y de media móvil, cuyos coeficientes resultaron estadísticamente significativos, confirmando la validez del ajuste. Los residuos no mostraron autocorrelación, lo que reforzó la adecuación del modelo. El pronóstico para el período 2024–2027 indicó una tendencia de crecimiento moderado, con escenarios alternativos que contemplaron variaciones optimistas y pesimistas. Estos resultados fueron consistentes con las estimaciones oficiales emitidas por organismos nacionales e internacionales, lo que fortaleció la confiabilidad del análisis realizado.

#### 3.3.- Interpretación de resultados:

Los hallazgos confirmaron la utilidad de la metodología Box-Jenkins en la predicción del PIB ecuatoriano, permitiendo capturar la dinámica temporal de la economía en el corto plazo. El comportamiento proyectado reflejó una recuperación gradual tras choques externos recientes, en particular los derivados de la pandemia y la volatilidad del precio del petróleo. La consistencia con las proyecciones oficiales evidenció que el modelo puede servir como complemento a los sistemas de previsión económica ya implementados, asimismo, se mostró que el uso de series temporales contribuye a fortalecer la planificación económica, al ofrecer estimaciones robustas en contextos de incertidumbre.

#### 4.- Discusión.

El estudio se basó exclusivamente en series históricas del PIB, lo que limitó la incorporación de factores estructurales adicionales, como la inversión, el consumo o las exportaciones no petroleras. La aplicación de modelos ARIMA, aunque adecuada para capturar patrones temporales, no permitió explicar causalidades económicas subyacentes. Además, la no normalidad de los residuos en ciertos modelos representó una restricción metodológica. Finalmente, el análisis se concentró en el corto plazo, lo que redujo su aplicabilidad para horizontes de mediano y largo plazo.

Se recomienda complementar futuros estudios con modelos multivariantes, como VAR o VECM, que permitan incluir variables macroeconómicas adicionales para mejorar la capacidad explicativa. De la misma manera resultaría pertinente integrar enfoques híbridos que combinen técnicas de series temporales con métodos de aprendizaje automático, con el fin de aumentar la precisión en escenarios de alta volatilidad. Un lenguaje claro y técnico, evitando ambigüedades. Se sugiere ampliar el horizonte de proyección para evaluar la sostenibilidad del crecimiento en el mediano plazo. Por todo ello se recomienda contrastar los resultados con indicadores sectoriales para ofrecer una visión más integral de la dinámica económica nacional.

Los resultados obtenidos reflejaron que la serie del PIB ecuatoriano presentó un comportamiento no estacionario en su nivel original, lo que coincidió con la naturaleza dinámica y volátil de las economías emergentes. La aplicación de la primera diferencia permitió estabilizar la serie y obtener un modelo ARIMA con parámetros estadísticamente significativos, lo cual confirmó la validez metodológica del enfoque Box-Jenkins en el análisis de variables macroeconómicas. Desde el marco teórico, los resultados ratificaron la utilidad de los modelos de series temporales en la captura de patrones estocásticos, tal como lo establecieron Box y Jenkins en su propuesta metodológica. La consistencia con las estimaciones oficiales del Banco Central del Ecuador y la CEPAL refuerza la pertinencia del modelo aplicado, demostrando que, aun en contextos de incertidumbre, la metodología empleada constituye una herramienta robusta para el análisis económico.

En el contexto del estudio, las proyecciones indicaron un crecimiento moderado del PIB para el período 2024–2027, lo que sugiere un escenario de recuperación paulatina tras choques externos recientes. Estos hallazgos se relacionan directamente con el objetivo planteado de estimar y pronosticar la tasa de crecimiento económico a corto plazo, generando información confiable que respalde la planificación y la toma de decisiones estratégicas.

## 5.- Conclusiones.

El estudio demostró que la serie del PIB de Ecuador no fue estacionaria en su nivel original, por lo que requirió diferenciación para su análisis. El modelo ARIMA

identificado presentó coeficientes estadísticamente significativos y residuos sin autocorrelación, validando su idoneidad para la estimación. Los pronósticos obtenidos proyectaron un crecimiento moderado de la economía entre 2024 y 2027, en concordancia con escenarios optimistas y pesimistas, y en línea con las estimaciones oficiales de organismos nacionales e internacionales.

La investigación aportó evidencia empírica que confirma la utilidad de la metodología Box-Jenkins en la predicción de variables macroeconómicas en contextos de incertidumbre. Se ofreció un modelo estadístico robusto que complementa los sistemas de previsión económica existentes, constituyendo una herramienta práctica para la planificación y la gestión macroeconómica. Además, el estudio fortaleció el vínculo entre el análisis teórico de series temporales y su aplicación en la economía ecuatoriana, contribuyendo tanto al ámbito académico como a la toma de decisiones en políticas públicas y estrategias empresariales.

En el ámbito práctico, los resultados obtenidos ofrecen una herramienta de apoyo para la planificación económica y la toma de decisiones estratégicas en el sector público y privado. Las proyecciones de corto plazo sobre el PIB permiten anticipar escenarios de crecimiento, lo que facilita el diseño de políticas fiscales y monetarias más efectivas, así como la elaboración de planes empresariales ajustados a la coyuntura macroeconómica.

En el plano teórico, el estudio reafirma la pertinencia de los modelos Box-Jenkins para el análisis de series temporales aplicadas a economías emergentes, demostrando su capacidad para capturar patrones estocásticos y generar pronósticos confiables. La investigación también contribuye a la literatura económica al validar un modelo específico para Ecuador, fortaleciendo la evidencia sobre la aplicabilidad de metodologías econométricas avanzadas en contextos caracterizados por alta volatilidad y dependencia de factores externos.

Se sugiere ampliar el horizonte temporal de las proyecciones con el fin de evaluar la sostenibilidad del crecimiento económico en el mediano y largo plazo. Asimismo, resulta pertinente incorporar variables macroeconómicas adicionales —como inversión, consumo, exportaciones no petroleras y gasto público— que permitan enriquecer los modelos y mejorar su capacidad explicativa.

Futuros estudios podrían explorar enfoques multivariantes, como VAR o VECM, así como modelos híbridos que combinen técnicas de series temporales con algoritmos de aprendizaje automático, lo que incrementaría la precisión de los pronósticos en escenarios de alta volatilidad. También se recomienda realizar comparaciones con modelos estructurales para analizar no solo la dinámica temporal del PIB, sino también las relaciones causales entre los principales determinantes del crecimiento económico.

Finalmente, se plantea la necesidad de evaluar los resultados a nivel sectorial, con el propósito de identificar patrones específicos en ramas productivas clave y fortalecer la planificación económica desde una perspectiva más integral.

## 6.- Contribuciones de los autores (Taxonomía de roles de los colaboradores - CRediT)

1. Conceptualización: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
2. Curación de datos: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
3. Análisis formal: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
4. Adquisición de fondos: N/A.
5. Investigación: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
6. Metodología: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
7. Administración del proyecto: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
8. Recursos: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Francisco Javier Duque-Aldaz.
9. Software: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
10. Supervisión: Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
11. Validación: Félix Genaro Cabezas García.
12. Visualización: Edwin Haymacaña Moreno.
13. Redacción - borrador original: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Francisco Javier Duque-Aldaz.
14. Redacción - revisión y edición: Francisco Javier Duque-Aldaz, Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.

## 7.- Referencias.

- [1] D. V. Desiderio Noboa, «Análisis de la demanda y efectos retardados en los productos principales en exportaciones (Camarón, café y banano) hacia Europa “Modelo de serie de tiempo ARIMA”», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2022. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/18331>
- [2] L. Asán Caballero, «Algoritmo de predicción de series de tiempo para el pronóstico del Tráfico Aéreo basado en redes neuronales artificiales», Revista Cubana de Ciencias Informáticas, vol. 16, n° 4, 2023. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2227-18992022000400084&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992022000400084&lang=es)
- [3] J. W. Tudela-Mamani, E. Cahui-Cahui y G. Aliaga-Melo, «Impacto del COVID-19 en la demanda de turismo internacional del Perú. Una aplicación de la metodología Box-Jenkins», Revista de Investigaciones Altoandinas, vol. 24, n° 1, 2022. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2313-29572022000100027&lang=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572022000100027&lang=es)
- [4] C. A. García Vázquez, A. I. González Santos y V. Pérez Garrido, «Metodología y algoritmo de validación para identificar modelos de una unidad manejadora de aire», Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, vol. 42, n° 1, 2021. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59282021000100105&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282021000100105&lang=es)
- [5] F. de la Oliva de Con y R. Molina Fernández, «Propuesta de procedimiento para la predicción del tipo de cambio a corto plazo mediante la utilización de técnicas contrastadas», Cofin Habana, vol.

- 14, n° 2, 2020. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2073-60612020000200007&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612020000200007&lang=es)
- [6] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores y J. Carmona Tapia, «Identification of parameters in ordinary differential equation systems using artificial neural networks», San Gregorio, vol. 1, n° 2, 2025. <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/2826>
- [7] G. E. Castro Rosales, A. D. Torres Alvarado, L. S. Zalamea Cedeño, F. J. Duque-Aldaz y F. R. Rodríguez-Flores, «Comprehensive Ergonomic Proposal for the Reduction of Musculoskeletal Risks in Soap Production: An Approach Based on Statistical Analysis and Postural Evaluation», INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo, vol. 7, n° 2, 2025. <https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2416>
- [8] E. S. Cruz Ramírez, A. F. Calvache Silvestre y D. A. Roldán Carranza, «Estimación de la demanda de agua en cultivos de banano aplicando modelos de pronósticos para fincas de pequeños y medianos productores en la provincia de El Oro», ESPOL, 2024. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/63220>
- [9] D. R. Núñez Ordóñez, «Análisis y pronóstico de las ventas para la optimización de tiempos de importación en la empresa IMPORGUIDSA mediante la aplicación del modelo de series de tiempos ARIMA», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2023. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/21912>
- [10] F. J. Duque-Aldaz y E. G. Pazan Gómez, «Factors affecting entrepreneurial intention of Senior University Students», Espacio, vol. 39, n° 09, p. 32, 2017. <https://www.revistasespacios.com/a18v39n09/18390932.html>
- [11] S. F. Chérrez Sánchez, J. V. Palacios Hurtado y F. R. Camacho Villagómez, «Determinantes en la migración en Ecuador. Periodo 2000 al 2023», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2025. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/24241>
- [12] F. F. Sandoya Sánchez y V. V. Vásquez Villon, «Desestacionalización de series económicas de las cuentas nacionales del Ecuador con X12 - ARIMA», ESPOL. FCNM, 2004. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56205>
- [13] R. I. Romero Ruiz, D. R. Palomeque Calle y F. R. Camacho Villagómez, «Impacto de la volatilidad del precio internacional del camarón y cacao en la exportación del Ecuador periodo 2014-2024», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2024. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/23299>
- [14] G. J. Morocho Choca, L. Á. Bucheli Carpio y F. J. Duque-Aldaz, «Fuel oil fuel dispatch optimization through multivariate regression using local storage indicators», INQUIDE, vol. 6, n° 2, 2024. <https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v6i02.477>
- [15] F. d. J. Herrera Mendoza, «Incidencia del gasto público en educación básica regular en el crecimiento económico de la Región Norte del Perú, 2008-2019», Universidad Nacional de Tumbes, 2024. <https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/65510>
- [16] F. F. Sandoya Sanchez y A. G. Abad Robalino, «Comparación de la precisión de la predicción de datos de una serie de tiempo entre los modelos ARIMA y las Redes Neuronales», ESPOL.FCNM, 2017. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmliui/handle/123456789/40345>
- [17] F. A. Ochoa González, «Análisis y predicción de las precipitaciones con inteligencia artificial en Esmeraldas- Ecuador», Universidad Nacional de Tumbes, 2024. <https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/65477>
- [18] J. E. Pincay Moran, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, «Evaluation and Proposal for an Environmental Management System in a Mango Plantation», INQUIDE, vol. 7, n° 1, 2025. <https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v7i01.1991>
- [19] A. Varas, K. E. Narváez Bermeo y R. A. Guevara Orozco, «Diseño de una Política de Inventario en base a un pronóstico de demanda para una empresa que se dedica a la comercialización de conductores eléctricos de aluminio y cobre», ESPOL.FCNM, 2023. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65530>
- [20] K. K. Li Ye y Z. J. Paz y Miño Robles, «Aplicación de modelo ARIMA para el pronóstico de exportación de flores del Ecuador», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2023. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/21884>

- [21] L. N. Arango Fuentes, A. J. Tapia Salvador y G. E. Vilela Govea, «Análisis histórico y aplicación de modelos predictivos del precio de la tilapia Ecuatoriana,» ESPOL.FCSH, 2025. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65944>
- [22] R. D. Macías Sandoval y C. J. Tutiven Galvez, «Estimación de la velocidad de producción de una máquina mezcladora mediante la implementación de modelos de Machine Learning,» ESPOL.FIEC, 2025. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65804>
- [23] C. A. Cruz Peña, «Influencia del crecimiento económico, inflación y tasa de interés de referencia sobre la rentabilidad de bolsa de valores de lima, 1992 - 2022,» Universidad Nacional de Tumbes, 2024. <https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/65196>
- [24] J. S. Fu-López, J. P. Fierro Aguilar, F. R. Rodríguez-Flores y F. J. Duque-Aldaz, «Application of non-automated Lean strategies for quality improvement in manual assembly processes: a case study in the white goods industry.,» INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo, vol. 7, n° 1, 2025. <https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2417>
- [25] J. Lliguizaca Dávila, M. A. Apolinario Rodríguez y B. S. Manzo Robles, «Análisis del sector petrolero ecuatoriano durante la pandemia COVID-19 y su incidencia en la balanza comercial petrolera,» ESPOL. FICT., 2020. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/50497>

# Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo sin y con aletas para el enfriamiento de leche. Parte 1 – Intercambiador de calor sin aletas.

## *Thermo-hydraulic design of an unfinned and finned double pipe heat exchanger for milk cooling. Part 1 - Unfinned heat exchanger.*

Amaury Pérez Sánchez <sup>1</sup> \*; Laura de la Caridad Arias Águila <sup>2</sup>; Heily Victoria González <sup>3</sup>; María Isabel La Rosa Veliz <sup>4</sup>; Zamira María Sarduy Rodríguez <sup>5</sup> & Lizthalia Jiménez Guerra <sup>6</sup>

Recibido: 06/06/2025 – Aceptado: 29/10/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artículos de investigación

Artículos de revisión

Ensayos

\* Autor correspondiente.



Esta obra está licenciada bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, interpretar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

### Resumen.

Los intercambiadores de calor de doble tubo (ICDT) han adquirido importancia en años recientes como resultado de su construcción simple, compactación, facilidad de mantenimiento y limpieza, y costos capitales/operación relativamente bajos, con uso extendido en servicios de transferencia de calor que involucren calentamiento y enfriamiento sensible de fluido de proceso. Este artículo tiene como objetivo diseñar un ICDT desde el punto de vista térmico-hidráulico, para determinar su idoneidad y aplicabilidad para enfriar una corriente de leche de vaca líquida usando agua fría como agente de enfriamiento. Varios parámetros de diseño fueron calculados tales como el número total de horquillas (21), área superficial de transferencia de calor (12,92 m<sup>2</sup>), factor de limpieza (0,752) y porcentaje de sobre superficie (32,96%), los cuales pueden considerarse satisfactorios. También, se requiere un caudal másico de agua fría de 9,32 kg/s, clasificado como elevado. El ICDT diseñado no puede aplicarse satisfactoriamente en el servicio de transferencia de calor demandado debido a que la caída de presión (9 481 246 Pa) del fluido del lado del tubo (agua de enfriamiento) es muy superior que el límite permisible máximo fijado por el proceso (85 000 Pa), lo cual también incrementa la potencia de bombeo requerida para este fluido hacia un valor importante (110,5 kW). El IDCT diseñado costara alrededor de USD \$ 45 600 basado en Mayo del 2025.

### Palabras clave.

Intercambiador de calor doble tubo sin aletas; diseño térmico; número de horquillas; caída de presión; potencia de bombeo; Coste de compra.

### Abstract.

Double-pipe heat exchangers (DPHEs) have acquired significance in recent years as a result of their simple construction, compactness, ease of maintenance and cleaning, and relatively low operating/capital costs, with widespread use in heat transfer services involving sensible heating or cooling of process fluids. This paper aims to design a DPHE from the thermo-hydraulic point of view, to determine its suitability and applicability to cool down a stream of liquid cow's milk using chilled water as coolant. Several design parameters were calculated such as total number of hairpins (21), heat transfer surface area (12.92 m<sup>2</sup>), cleanliness factor (0.752) and percent over surface (32.96%), which can be considered as satisfactory. Also, it is required a mass flowrate of chilled water of 9.32 kg/s, classified as high. The designed DPHE cannot be applied satisfactorily in the requested heat transfer service because the pressure drop (9,481,246 Pa) of the tube-side fluid (chilled water) is quite higher than the maximum allowable limit set by the process (85,000 Pa), which also increases the required pumping power for this fluid to an important value (110.5 kW). The designed DPHE will cost around USD \$ 45,600 based on May 2025.

### Keywords.

Unfinned double pipe heat exchanger; thermal design; number of hairpins; pressure drop; pumping power; purchased cost.

## 1. Introducción

Los intercambiadores de calor son aparatos diseñados para facilitar la transferencia de calor entre dos o más fluidos con cambios de temperatura [1]. En las últimas décadas, la importancia de los intercambiadores de calor ha crecido considerablemente debido a su papel en la eficiencia energética, recuperación y transformación, así como a la integración de fuentes alternativas de energía [2].

La energía térmica que pasa a través de un intercambiador de calor puede ser calor sensible o calor latente de los fluidos en movimiento. El fluido que suministra la energía térmica se conoce como fluido caliente, mientras que el fluido que absorbe la energía térmica se denomina fluido frío. Dentro de un intercambiador de calor, se espera que la temperatura del fluido caliente disminuya, mientras que la del fluido frío aumentará. La función principal de un intercambiador de

<sup>1</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [amaury.perez84@gmail.com](mailto:amaury.perez84@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

<sup>2</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [aguilaariaslaura@gmail.com](mailto:aguilaariaslaura@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>, Camagüey; Cuba.

<sup>3</sup> Facultades de Ciencias Aplicadas; Universidad de Camagüey; [heily.victoria@reduc.edu.cu](mailto:heily.victoria@reduc.edu.cu); <https://orcid.org/0009-0007-9319-6506>, Camagüey, Cuba.

<sup>4</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [maria.rosa@reduc.edu.cu](mailto:maria.rosa@reduc.edu.cu); <https://orcid.org/0000-0002-9517-6118>, Camagüey; Cuba.

<sup>5</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [Zamira.sarduy@reduc.edu.cu](mailto:Zamira.sarduy@reduc.edu.cu); <https://orcid.org/0000-0003-1428-3809>, Camagüey; Cuba.

<sup>6</sup> Universidad de Camagüey; Facultad de Ciencias Aplicadas; [lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu](mailto:lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu); <https://orcid.org/0000-0002-2471-7263>, Camagüey; Cuba.

calor es aumentar o reducir la temperatura del fluido objetivo [3].

Los intercambiadores de calor se utilizan habitualmente en diversos sectores, incluyendo instalaciones de producción de energía, fabricación química, biotecnología, sector alimentario, ingeniería ambiental y recuperación de calor residual, entre otros. El tipo más básico de intercambiadores de calor modernos es el intercambiador de calor de doble tubo [4], también conocido como intercambiador de horquilla [1].

El DPHE se desarrolló a finales de los años 40, y las investigaciones realizadas desde entonces han respaldado en gran medida su eficacia para lograr avances significativos. Este tipo de intercambiador de calor facilita la transferencia de energía térmica principalmente entre líquidos calientes y fríos, generalmente dentro de tuberías concéntricas dispuestas en diversas disposiciones, inicialmente montadas en paralelo y posteriormente adaptadas a diseños de contraflujo [5].

Un intercambiador de calor DPHE está compuesto por uno o más tubos dispuestos concéntricamente dentro de un tubo de mayor diámetro, con accesorios diseñados para dirigir el flujo de una sección a otra. En este tipo de intercambiador de calor, un fluido circula dentro de la tubería interior (lado del tubo), mientras que otro fluido se mueve por la zona anular circundante (anillo). El tubo interior está conectado mediante curvas en forma de U que se encuentran en una carcasa de cama de retorno [1].

Un DPHE puede configurarse en diferentes configuraciones en serie y en paralelo [1] para satisfacer las necesidades de caída de presión, transferencia de calor y diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD) [6].

Este tipo de intercambiador de calor se utiliza para aplicaciones que implican bajos caudales, un amplio rango de temperaturas [7] y servicios de alta presión debido a los tamaños más estrechos de las tuberías [1], y es adecuado para operaciones continuas que requieren tareas de baja a media temperatura [8], específicamente para procesos que requieren un calentamiento o refrigeración sensible en fluidos, donde se requieren superficies compactas y pequeñas de transferencia de calor de hasta 50 m<sup>2</sup> [1].

Encuentra una amplia aplicación en industrias típicas como la producción alimentaria, la química, la biotecnología y los procesos de gas y petróleo [9], que a menudo requieren calentamiento o refrigeración de fluidos de proceso, mientras que también se emplea ampliamente en centros de investigación relacionados con la ingeniería energética [10].

Como se señala en [7], el DPHE es crucial para tareas como el recalentamiento, la pasteurización, el calentamiento y el precalentamiento. Su asequibilidad en términos de diseño y

mantenimiento la convierte en una opción preferida, especialmente para industrias a pequeña escala.

Como se indica en [6], el DPHE es una opción rentable para sistemas de refrigeración en circuito cerrado donde se dispone de un suministro suficiente de agua adecuada a un precio asequible para satisfacer las necesidades térmicas.

Estos intercambiadores de calor son adecuados para procesos en los que uno de los flujos es un gas o un líquido grueso, o cuando el volumen está limitado en situaciones de alta incrustación. Esto se debe a sus sencillos procesos de limpieza y mantenimiento. Pueden servir como sustituto de los intercambiadores de calor de carcasa y tubo cuando funcionan como intercambiadores de calor de flujo contrario reales. Los DPHE cuentan con un tubo exterior que varía entre 50 y 400 mm de diámetro interno, y tienen una longitud estándar de 1,5 a 12. por horquilla. El diámetro exterior del tubo interior puede variar de hasta . Un inconveniente importante es su voluminosidad y el alto coste por unidad de superficie de transferencia de calor [1]. 0 m<sup>19</sup> mm<sup>100</sup> mm

Una ventaja del DPHE radica en su asequibilidad en términos de diseño y mantenimiento, caracterizada por una configuración básica fácil de instalar, limpiar, mantener y adaptar, lo que prolonga significativamente su vida útil y funcionalidad [10].

Peccini et al., [11] sugirieron que cuando un chorro incluye partículas suspendidas, el DPHE podría ser una opción preferible, ya que pueden incorporar un tubo interior de mayor diámetro para evitar obstrucciones. Además, este tipo de intercambiador de calor ofrece versatilidad debido a su diseño modular, lo que facilita adaptaciones a las modificaciones en los procesos. Los mismos autores señalaron que el flujo longitudinal dentro de un DPHE elimina las zonas estancadas, que probablemente acumulen depósitos en intercambiadores de capa y tubos.

Es esencial diseñar térmicamente los intercambiadores de calor de manera que se mejore la transferencia de calor manteniendo la caída de presión de los fluidos dentro de los límites aceptables. Un desafío frecuente a los que se enfrentan las industrias es extraer de forma eficiente el calor de un flujo de servicios públicos que sale de un proceso específico y utilizar esa energía para calentar otro flujo de proceso. Una forma de maximizar la extracción de calor podría implicar aumentar el área de transferencia de calor o incrementar el caudal del refrigerante; Sin embargo, ambas estrategias pueden aumentar los costes de bombeo, lo que hace poco recomendable aumentar estos parámetros sin considerar las caídas de presión. El enfoque convencional para diseñar intercambiadores de calor requiere una evaluación cuidadosa de todos los factores de diseño mediante un proceso detallado de prueba y error, teniendo en cuenta todas las posibles variaciones [12].

En [7] se indica que los ingenieros encuentran dificultades significativas al diseñar un intercambiador de calor eficaz. Este desafío surge no solo de la necesidad de evaluar con precisión la eficiencia a largo plazo y los costes financieros relacionados, sino también de la crucial necesidad de examinar a fondo aspectos como la transferencia de calor, la caída de presión y la efectividad general, que requieren un esfuerzo intensivo.

Según [13], la optimización en el diseño de intercambiadores de calor es un tema ampliamente explorado en la literatura existente. La mayoría de las investigaciones que han abordado este problema han utilizado métodos analíticos de forma cerrada para representar las características operativas de los sistemas, incluyendo técnicas como el LMTD y los enfoques de efectividad ( $\epsilon$ -NTU). Estos métodos analíticos se basan en la suposición de valores físicos de propiedades consistentes y coeficientes de transferencia de calor, lo que puede provocar inconsistencias significativas en diversos escenarios de diseño.

En el diseño de un DPHE, la mayoría de las fuentes académicas [14,15,16] suelen incorporar una colección más amplia de elementos de diseño, como dimensiones físicas, distribuciones de fluidos y configuraciones que involucran múltiples unidades. A menudo dependen de un proceso convencional de experimentación y validación; En este método. Los elementos de diseño se determinan inicialmente y, posteriormente, se calcula el número de horquillas requeridas para esa configuración. Si el intercambiador de calor obtenido se considera inadecuado—por razones como la caída de presión permitida para los caudales especificados que queda fuera de los límites predeterminados o la velocidad de los flujos no está dentro de los límites requeridos—se sugiere una modificación en el diseño y se reconsideran los cálculos. Esta metodología depende en gran medida de la experiencia del diseñador y no garantiza resultados óptimos. Las opciones disponibles para los diseñadores para nuevas pruebas son variadas; Pueden modificar longitudes, diámetros de tuberías, disposiciones de horquillas y otras características para lograr una disminución de la caída de presión o mejorar el coeficiente de transferencia de calor. Los profesionales dependen de sus juicios intuitivos para desarrollar finalmente un intercambiador de calor viable, que es el objetivo principal del enfoque de diseño [11].

Se han reportado numerosas investigaciones en las que se diseñó un DPHE utilizando diferentes metodologías y herramientas. En este sentido, se llevó a cabo un estudio teórico y práctico exhaustivo en [6] donde se realizaron simulaciones para evaluar el diseño y la funcionalidad de un DPHE. Esta evaluación del rendimiento se realizó utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD), mientras que también se calculó la efectividad global.

Asimismo, [9] realizó un análisis numérico sobre cómo la relación entre diámetros de tubería y la relación entre

diámetro y longitud influyen en el rendimiento de los intercambiadores de calor en un DPHE, utilizando software CFD para modelar los escenarios con aire incompresible. Identificaron y optimizaron estadísticamente los factores que conducen a la máxima transferencia de calor bajo condiciones de flujo constante basándose en los hallazgos. Los investigadores señalaron que sus resultados ayudarán en futuras investigaciones sobre el diseño de intercambiadores de calor con dimensiones óptimas para longitud y diámetro.

Además, [13] discutió el uso de una formulación de programación lineal entera (ILP) para diseñar DPHE. El modelo utilizado para el intercambiador de calor se basaba en la discretización de ecuaciones de conservación; En consecuencia, las propiedades físicas se evaluaron localmente, incorporando su dependencia de la temperatura en el modelo. Los hallazgos numéricos demostraron la eficacia de este método propuesto, revelando que los métodos analíticos podrían subestimar o sobreestimar el tamaño necesario de un intercambiador de calor.

De manera similar, [8] ejecutó un diseño y ensamblaje extensos de un DPHE tipo laboratorio adecuado tanto para disposiciones paralelas como de flujo contrario. El intercambiador de calor desarrollado en esta investigación se construyó con acero galvanizado tanto para su tubo como para su carcasa, mientras que las métricas de rendimiento (como LMTD, tasa de transferencia de calor, efectividad y coeficiente global de transferencia de calor) se recopilaron y compararon entre las dos configuraciones utilizadas.

En [1], varios DPHEs fueron diseñados térmicamente para ser utilizados como enfriadores de aceite en buques navales, mientras que los DPHE diseñados se evaluaron entre sí en función de la cantidad de horquillas, la caída de presión y la potencia necesaria para el bombeo. Esta evaluación incorporó los números de Nusselt sugeridos por varios investigadores en cuatro categorías de diseño diferentes: aletas limpias, aletas enredadas, limpias sin aletas y sin aletas ensucias.

De manera similar, en [10] se evaluó la eficacia de los enfoques teóricos existentes para diseñar un DPHE con espaciamiento estrecho de tubos y bajas velocidades de fluido, correspondientes a las características de flujo laminar del fluido de transferencia de calor dentro del anillo. Esta investigación examinó las razones detrás de las discrepancias al comparar hallazgos teóricos con datos experimentales, ofreciendo sugerencias para el diseño adecuado de la DPHE.

De igual modo, en [17] se conceptualizó, construyó e incorporó un DPHE en una instalación operativa de gasificación de biomasa para captar el calor del gas de síntesis liberado por el gasificador, que tiene una temperatura de salida cercana a los 350 °C.

En [11], se exploró la optimización de un DPHE mediante métodos matemáticos, centrándose en minimizar el área del

intercambiador teniendo en cuenta las condiciones termodinámicas para aplicar las correlaciones de transporte adecuadas, junto con restricciones de diseño como caídas de presión máximas y área mínima excedente. Esta investigación introdujo dos estrategias de programación no lineal mixta de enteros, ampliando el rango de variables de diseño en comparación con estudios previos. Estas variables incluían la distribución de los flujos de fluido (ya sea dentro del tubo interior o del anillo), los diámetros de ambos tubos, la longitud del tubo, la cantidad de ramas paralelas, el número de unidades dispuestas en serie y paralelas dentro de cada rama, así como el número de horquillas en cada unidad, que afectan a la configuración de las horquillas.

En [12], el diseño más efectivo de un DPHE se expresó como un desafío de programación geométrica de una sola variable. Resolver este problema proporciona las dimensiones óptimas para los diámetros de tubería interior y exterior y el caudal de utilidad necesario para un DPHE de una longitud especificada, dado un caudal predeterminado para el flujo de proceso y una diferencia de temperatura definida de entrada a salida.

En [18], se diseñó un DPHE para investigar el proceso de transferencia de calor que ocurre entre dos fluidos (agua/agua) a través de un separador sólido. Se desarrolló con una configuración de contraflujo, utilizando el método de análisis LMTD.

En [19], se utilizó un método que combina el análisis relacional gris (GRA) con redes neuronales artificiales (RNA) y algoritmos genéticos (GAs) para evaluar la importancia de parámetros como la efectividad, la resistencia térmica y el coeficiente global de transferencia de calor, para clasificar estos parámetros en una secuencia específica. La metodología integrada introducida en esta investigación tiene el potencial de mejorar las capacidades de resolución de problemas y ofrecer conocimientos valiosos para mejorar el rendimiento de los intercambiadores de calor en diferentes industrias.

En [20] se detalló el cálculo de los parámetros de diseño térmico de un DPHE para asegurar el calentamiento y la esterilización efectiva de un flujo de fluido orgánico utilizado en el proceso de separación semilla-piel para diversas verduras.

Por último, [21] exploró tanto métodos analíticos como numéricos en el diseño de un DPHE. El análisis incluyó la consideración de una transferencia de calor sensible, y el intercambiador de calor se adaptó para adaptarse a las condiciones reales de funcionamiento de una instalación química. Esta investigación empleó un modelo analítico utilizando el método de efectividad-número de unidades de transferencia ( $\epsilon$ -NTU) junto con el enfoque LMTD en el diseño del DPHE, con gráficos de rendimiento creados durante la fase de diseño para el intercambiador de calor especificado.

En una planta de procesamiento lácteo cubana se requiere enfriar el chorro de leche líquida de vaca usando agua fría, y para eso se han propuesto dos DPHE, el primero sin aletas y el segundo con aletas longitudinales en el tubo interior (aletado). En este contexto, el presente artículo es la primera parte de un proyecto en dos partes, en el que se diseña un DPHE sin aletas para saber si este intercambiador de calor es adecuado para su implementación en este servicio de transferencia de calor mediante el cálculo de varios parámetros de diseño como el número total de horquillas, el factor de limpieza, el porcentaje sobre la superficie, la caída de presión y la potencia de bombeo de ambos chorros de líquido, entre otros. Del mismo modo, también se calculó el coste de compra del DPHE sin aletas. En el segundo artículo se diseña un DPHE con aletas donde también se calculan los parámetros clave de diseño mencionados anteriormente, mientras que los resultados se compararán y evaluarán respecto a los calculados para el DPHE sin aletas del presente estudio, con el fin de seleccionar el DPHE más adecuado, económico y aplicable desde el punto de vista termohidráulico para llevar a cabo este servicio de transferencia de calor.

## 2. Materiales y métodos.

### 2.1. Enunciado del problema.

Se requiere enfriar 4.320 kg/h de un chorro de leche de vaca líquida de 60 °C a 10 °C mediante agua fría disponible a 2 °C, donde la temperatura de salida del chorro de agua fría no debe superar los 8 °C. Los siguientes datos están disponibles para la trompa y el anillo:

- Anillo de diámetro nominal: 2 pulgadas.
- Diámetro nominal del tubo interior: 1 pulgada.
- Longitud del tubo: 3 m.
- Número de tubos dentro del anillo: 1.
- Material del tubo: acero al carbono.
- Conductividad térmica del material del tubo: 52 W/m.K.

Diseñar un intercambiador de calor doble tubo sin aletas utilizando la metodología reportada por [15], donde se deben calcular varios parámetros termohidráulicos y de diseño, como la superficie de transferencia de calor, el número total de horquillas, el factor de limpieza, el porcentaje sobre la superficie, la caída de presión y la potencia de bombeo de ambos flujos líquidos. Se requiere que la caída de presión tanto del fluido del lado del tubo como del anillo no supere los 85.000 Pa. Por último; calcular el coste del equipo adquirido del DPHE diseñado y actualizarlo hasta 2025.

### 2.2. Metodología de diseño.

*Porcentaje sobre la superficie*

Paso 1. Definición de los parámetros iniciales para los flujos: La Tabla 1 presenta los parámetros iniciales que deben definirse para ambos flujos de fluido

Tabla 1. Parámetros iniciales a definir para ambos flujos.

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>

Correo electrónico:

[inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)

[francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)

Parámetro	Fluido caliente	Fluido frío	Unidades
Caudal másico	$m_h$	$m_c$	kg/h
Temperatura de entrada	$T_1$	$t_1$	°C
Temperatura de salida	$T_2$	$t_2$	°C
Caída máxima de presión permitida	$\Delta P_{mh}$	$\Delta P_{mc}$	Pa
Factor de incrustación	$R_h$	$R_c$	M2. K/W

Fuente: Explicación propia.

Paso 2. Definición de las dimensiones geométricas de las horquillas:

La Tabla 2 muestra las dimensiones geométricas a definir para las horquillas.

Tabla 2. Dimensiones geométricas a definir para las horquillas.

Parámetro	Símbolo	Unidades
Longitud del tubo	$L_t$	m
Anillo de diámetro interno	$D_i$	m
Diámetro interno del tubo interior	$d_i$	m
Diámetro externo del tubo interior	$d_e$	m
Material metálico de conductividad térmica del tubo interior	$k_m$	W/m.K

Fuente: Explicación propia.

Paso 3. Definición de la disposición de flujo dentro del intercambiador de calor de doble tubería:

- Contracorriente.
- Paralelo.

Paso 4. Asignación de fluidos dentro del intercambiador de calor de doble tubería

Paso 5. Considera el aislamiento del intercambiador de calor de doble tubería frente a pérdidas de calor.

Paso 6. Temperatura media de ambos fluidos:

- Fluido caliente (): $T$

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (1.1)$$

- Fluido frío (): $\bar{t}$

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1.2)$$

Paso 7. Parámetros físicos de ambos fluidos a la temperatura media:

La Tabla 3 muestra las propiedades físicas que deben definirse para ambos fluidos a la temperatura media calculada en el paso anterior.

Tabla 3. Parámetros físicos a definir para ambos fluidos.

Parámetro	Fluido caliente	Fluido frío	Unidades
Densidad	$\rho_h$	$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	$\mu_h$	$\mu_c$	Pa.s

Capacidad calorífica	$Cp_h$	$Cp_c$	kJ/kg. K
Conductividad térmica	$k_h$	$k_c$	W/m.K

Fuente: Explicación propia.

Paso 8. Carga térmica (): $Q$

- Usando los datos para el fluido caliente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.3)$$

- Usando los datos para el fluido frío:

$$Q = \frac{m_c}{3,600} \cdot Cp_c \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.4)$$

Donde tanto como se dan en kg/h.  $m_h m_c$

Paso 9. Caudal másico de un arroyo:

- Caudal másico del fluido caliente:

$$m_h = \frac{Q}{Cp_h \cdot (T_1 - T_2)} \quad (1.5)$$

- Caudal másico del fluido frío:

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (1.6)$$

Paso 10. Temperatura de la pared del tubo (): $T_w$

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot (\bar{T} + \bar{t}) \quad (1.7)$$

Paso 11. Viscosidad de ambos fluidos a la temperatura de la pared del tubo:

Líquido caliente () [Pa.s]. $\mu_{hw}$

Líquido frío () [Pa.s]. $\mu_{cw}$

Paso 12. Área neta de flujo libre del tubo interior (): $A_{ct}$

$$A_{ct} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (1.8)$$

Paso 13. Velocidad del fluido del lado del tubo (): $v_t$

$$v_t = \frac{m_t}{\rho_t \cdot A_{ct}} \quad (1.9)$$

Donde se da en kg/s. $m_t$

Paso 14. Número de Reynolds del fluido del lado del tubo (): $Re_t$

$$Re_t = \frac{\rho_t \cdot v_t \cdot d_i}{\mu_t} \quad (1.10)$$

Paso 15. Número de Prandtl del fluido del lado del tubo (): $Pr_t$

$$Pr_t = \frac{Cp_t \cdot \mu_t}{k_t} \quad (1.11)$$

Donde se da en J/kg.K.  $Cp_t$

Paso 16. Número de Nusselt para el fluido del lado del tubo (): $Nu_t$

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>

Correo electrónico:

[inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)

[francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)

- Flujo laminar ( $< 2.300$ )  $Re_t$ 

$$Nu_t = 1.86 \cdot (Re_t \cdot Pr_t)^{0.33} \cdot \left(\frac{d_i}{L_t}\right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{0.14}$$
(1.12)

Válido para tubos lisos para las siguientes condiciones:

$$0,48 << 16.700 Re_t \cdot Pr_t$$

$$0,0044 << 9,75 \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{0.14}$$

$$\left(Re_t \cdot Pr_t \cdot \frac{d_i}{L_t}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{0.14} \geq 2$$

- Flujo turbulento ( $2.300 << 10Re_t^4$ ) [Correlación de Gnielinski]:

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f_t}{2}\right) \cdot (Re_t - 1,000) \cdot Pr_t}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_t}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_t^{2/3} - 1)}$$
(1.13)

Donde es el factor de fricción de Fanning para el fluido del lado del tubo y se calcula usando la siguiente correlación:  $f_t$

$$f_t = (1.58 \cdot \ln Re_t - 3.28)^{-2}$$
(1.14)

- Flujo turbulento ( $104 << 5 \times 10Re_t^6$ ) [Correlación de Prandtl]:

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f_t}{2}\right) \cdot Re_t \cdot Pr_t}{1 + 8.7 \cdot \left(\frac{f_t}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_t - 1)}$$
(1.15)

Válido por  $> 0,5 \cdot Pr_t$

Dónde:

$$f_t = (1.58 \cdot \ln Re_t - 3.28)^{-2}$$
(1.14)

Paso 17. Coeficiente de transferencia de calor para el fluido del lado del tubo ( $h_t$ ):

$$h_t = \frac{Nu_t \cdot k_t}{d_i}$$
(1.16)

Paso 18. Área neta de flujo libre del anillo ( $A_{ca}$ ):

$$A_{ca} = \frac{\pi \cdot (D_i^2 - d_e^2)}{4}$$
(1.17)

Paso 19. Velocidad del fluido anular ( $v_a$ ):

$$v_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_{ca}}$$
(1.18)

Paso 20. Diámetro hidráulico ( $D_h$ ):

$$D_h = D_i - d_e$$
(1.19)

Paso 21. Número de Reynolds del fluido anular ( $Re_a$ ):

$$Re_a = \frac{\rho_a \cdot v_a \cdot D_h}{\mu_a}$$
(1.20)

Paso 22. Número de Prandtl del fluido anular ( $Pr_a$ ):

$$Pr_a = \frac{Cp_a \cdot \mu_a}{k_a}$$
(1.21)

Donde se da en J/kg.K.  $Cp_a$

Paso 23. Número de Nusselt para el fluido anular ( $h_a$ ):  $Nu_a$

- Flujo laminar ( $< 2.300$ )  $Re_a$ 

$$Nu_a = 1.86 \cdot (Re_a \cdot Pr_a)^{0.33} \cdot \left(\frac{D_h}{L_t}\right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_{aw}}\right)^{0.14}$$
(1.22)

Válido para tubos lisos para las siguientes condiciones:

$$0,48 << 16.700 Re_a \cdot Pr_a$$

$$0,0044 << 9,75 \left(\frac{\mu_a}{\mu_{aw}}\right)^{0.14}$$

$$\left(Re_a \cdot Pr_a \cdot \frac{D_h}{L_t}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu_a}{\mu_{aw}}\right)^{0.14} \geq 2$$

- Flujo turbulento ( $2.300 << 10Re_a^4$ ) [Correlación de Gnielinski]:

$$Nu_a = \frac{\left(\frac{f_a}{2}\right) \cdot (Re_a - 1,000) \cdot Pr_a}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_a}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_a^{2/3} - 1)}$$
(1.23)

Donde es el factor de fricción de Fanning para el fluido anular y se calcula usando la siguiente correlación:  $f_a$

$$f_a = (1.58 \cdot \ln Re_a - 3.28)^{-2}$$
(1.24)

- Flujo turbulento ( $104 << 5 \times 10Re_a^6$ ) [Correlación de Prandtl]:

$$Nu_a = \frac{\left(\frac{f_a}{2}\right) \cdot Re_a \cdot Pr_a}{1 + 8.7 \cdot \left(\frac{f_a}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_a - 1)}$$
(1.25)

Válido por  $> 0,5 \cdot Pr_a$

Dónde:

$$f_a = (1.58 \cdot \ln Re_a - 3.28)^{-2}$$
(1.24)

Paso 24. Diámetro equivalente para transferencia de calor ( $D_e$ ):

$$D_e = \frac{D_i^2 - d_e^2}{d_e}$$
(1.26)

Paso 25. Coeficiente de transferencia de calor para el fluido anular ( $h_a$ ):

$$h_a = \frac{Nu_a \cdot k_a}{D_e}$$
(1.27)

Paso 26. Coeficiente total de transferencia de calor ensucado basado en la zona exterior del tubo interior ( $U_f$ ):

$$U_f = \frac{1}{\frac{d_e}{d_i \cdot h_t} + \frac{d_e \cdot R_t}{d_i} + \frac{d_e \cdot \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2 \cdot k_m} + R_a + \frac{1}{h_a}}$$
(1.28)

Paso 27. Diferencia de temperatura logarítmica media ( $\Delta T_m$ )

- Para flujo paralelo:

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)}} \quad (1.29)$$

- Para el contraflujo:

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (1.30)$$

Paso 28. Área superficial de transferencia de calor ( $A_o$ )

$$A_o = \frac{Q \cdot 1,000}{U_f \cdot \Delta T_m} \quad (1.31)$$

Donde se da en kW.Q

Paso 29. Área de transferencia de calor por horquilla ( $A_{hp}$ )

$$A_{hp} = 2 \cdot \pi \cdot d_e \cdot L_t \quad (1.32)$$

Paso 30. Número de horquillas ( $N_h$ )

$$N_h = \frac{A_o}{A_{hp}} \quad (1.33)$$

Paso 31. Limpia el coeficiente global de transferencia de calor basado en el área exterior de transferencia de calor ( $U_c$ )

$$U_c = \frac{1}{\frac{d_e}{d_i \cdot h_t} + \frac{d_e \cdot \ln \left( \frac{d_e}{d_i} \right)}{2 \cdot k_m} + \frac{1}{h_a}} \quad (1.34)$$

Paso 32. Factor de limpieza ( $CF$ )

$$CF = \frac{U_f}{U_c} \quad (1.35)$$

Paso 33. Faltas totales ( $R_{ft}$ )

$$R_{ft} = \frac{1 - CF}{U_c \cdot CF} \quad (1.36)$$

Paso 34. Porcentaje sobre la superficie ( $OS$ )

$$OS = 100 \cdot U_c \cdot R_{ft} \quad (1.37)$$

*Caída de presión y potencia de bombeo*

Paso 35. Caída de presión por fricción del fluido del lado del tubo ( $\Delta p_t$ )

$$\Delta p_t = 4 \cdot f_t \cdot \frac{2 \cdot L_t}{d_i} \cdot N_h \cdot \frac{\rho_t \cdot v_t^2}{2} \quad (1.38)$$

Donde para el flujo laminar ( $< 2.300$ ):  $Re_t$

$$f_t = \frac{16}{Re_t} \quad (1.39)$$

Corrección del factor de fricción de Fanning para el flujo laminar ( $f_{ct}$ )

$$f_{ct} = f_t \cdot \left( \frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^m \quad (1.40)$$

Donde  $m = - 0,58$  para calentamiento y  $- 0,50$  para enfriamiento bajo flujo laminar.

Paso 36. Potencia de bombeo para el fluido del lado del tubo ( $P_t$ )

$$P_t = \frac{\Delta p_t \cdot m_t}{\eta_p \cdot \rho_t} \quad (1.41)$$

Donde se da en kg/s y es la eficiencia isentrópica de la bomba.  $m_t \eta_p$

Paso 37. Caída de presión por fricción del fluido anular ( $\Delta p_a$ )

$$\Delta p_a = 4 \cdot f_a \cdot \frac{2 \cdot L_t}{D_h} \cdot \rho_a \cdot \frac{v_a^2}{2} \cdot N_h \quad (1.42)$$

Donde para el flujo laminar ( $< 2.300$ ):  $Re_a$

$$f_a = \frac{16}{Re_a} \quad (1.43)$$

Corrección del factor de fricción de Fanning para el flujo laminar ( $f_{ca}$ )

$$f_{ca} = f_a \cdot \left( \frac{\mu_a}{\mu_{aw}} \right)^m \quad (1.44)$$

Donde  $m = - 0,58$  para calentamiento y  $- 0,50$  para enfriamiento bajo flujo laminar.

Paso 38. Potencia de bombeo para el fluido anular ( $P_a$ )

$$P_a = \frac{\Delta p_a \cdot m_a}{\eta_p \cdot \rho_a} \quad (1.45)$$

Donde se da en kg/s y es la eficiencia isentrópica de la bomba.  $m_a \eta_p$

*Coste del equipo adquirido*

Según [22], el coste del equipo adquirido para un DPHE se calcula usando la siguiente correlación:

$$C_{DPHE}^{2007} = 1,600 + 2,100 \cdot A_o^{1,0} \quad (1.46)$$

Dónde:

- $C_{DPHE}^{2007}$  - Coste del equipo adquirido por el DPHE referido a enero de 2007 (USD \$).
- $A_o$  - Área superficial de transferencia de calor del DPHE, calculada en el Paso 28 (m<sup>2</sup>).

Más adelante, este coste de equipo adquirido calculado por la ecuación (1.46) se actualiza a marzo de 2025 utilizando el Índice de Costes de Plantas de Ingeniería Química

correspondiente a marzo de 2025 y aplicando la siguiente ecuación:

$$C_{DPHE}^{2025} = C_{DPHE}^{2007} \cdot \frac{CEPCI^{2025}}{CEPCI^{2007}} \quad (1.47)$$

Dónde:

- $C_{DPHE}^{2025}$  - Coste del equipamiento adquirido por el DPHE referido a mayo de 2025 (USD \$).
- $C_{DPHE}^{2007}$  - Coste del equipamiento adquirido por la DPHE hasta enero de 2007 (USD \$).
- $CEPCI^{2025}$  - Índice de costes de plantas de ingeniería química referido a mayo de 2025 = 806,8 [23].
- $CEPCI^{2007}$  - Índice de costes de plantas de ingeniería química referido a enero de 2007 = 509,7 [22].

### 3. Análisis e interpretación de resultados. 3,1 % sobre superficie.

Paso 1. Definición de los parámetros iniciales para los flujos: La siguiente tabla (Tabla 4) presenta los valores de los parámetros iniciales a definir para ambos flujos.

Tabla 4. Valores de los parámetros iniciales a definir para ambos flujos.

Parámetro	Líquido caliente (leche)		Fluido frío (agua)		Unidades
	Símbolo	Valor	Símbolo	Valor	
Caudal másico	$m_h$	4,320	$m_c$	-	kg/h
Temperatura de entrada	$T_1$	60	$t_1$	2	°C
Temperatura de salida	$T_2$	10	$t_2$	8	°C
Caída máxima de presión permitida	$\Delta P_{mh}$	85,000	$\Delta P_{mc}$	85,000	Pa
Factor de incrustación	$R_h$	0.0001 <sup>δ</sup>	$R_c$	0.000176 <sup>φ</sup>	M2. K/W

Fuente: Explicación propia.

<sup>δ</sup> Tomado de [14].

<sup>φ</sup> Tomado de [15].

Paso 2. Definición de las dimensiones geométricas de las horquillas:

La Tabla 5 muestra los valores de las dimensiones geométricas a definir para las horquillas.

Tabla 5. Valores de las dimensiones geométricas a definir para las horquillas.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Longitud	$L_t$	3	m

Anillo de diámetro interno	$D_i$	0.05250 <sup>φ</sup>	m
Diámetro interno del tubo interior	$d_i$	0.02664 <sup>φ</sup>	m
Diámetro externo del tubo interior	$d_e$	0.03340 <sup>φ</sup>	m
Material metálico de conductividad térmica del tubo interior	$k_m$	52	W/m.K

Fuente: Explicación propia.

<sup>φ</sup> Según [15].

Paso 3. Definición de la disposición de flujo dentro del intercambiador de calor de doble tubería:

Los fluidos fluirán bajo una disposición de contraflujo dentro del DPHE.

Paso 4. Asignación de fluidos dentro del intercambiador de calor de doble tubería.

Como sugieren [14] y [22], el fluido caliente (la leche) estará ubicado en el anillo, mientras que el fluido frío (agua) estará en la tubería interior.

Paso 5. Considera el aislamiento del intercambiador de calor de doble tubería frente a pérdidas de calor.

El intercambiador de calor estará aislado térmicamente para evitar pérdidas excesivas de calor.

Paso 6. Temperatura media de ambos arroyos:

- Líquido caliente (leche) ( $\bar{T}$ ):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{60 + 10}{2} = 35 \text{ °C} \quad (1.1)$$

- Fluido frío (agua) ( $\bar{t}$ ):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{2 + 8}{2} = 5 \text{ °C} \quad (1.2)$$

Paso 7. Parámetros físicos de ambos fluidos a la temperatura media:

Según [24,25,26], tanto la leche como el agua tienen los parámetros físicos presentados en la Tabla 6 a la temperatura media calculada en el paso anterior.

Tabla 6. Valores de los parámetros físicos de la leche y el agua.

Parámetro	Líquido caliente (leche)		Fluido frío (agua)		Unidades
	Símbolo	Valor	Símbolo	Valor	
Densidad	$\rho_h$	1,013	$\rho_c$	999.9	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	$\mu_h$	0.00106	$\mu_c$	0.00152	Pa.s
Capacidad calorífica	$Cp_h$	3.919	$Cp_c$	4.205	kJ/kg. K
Conductividad térmica	$k_h$	0.580	$k_c$	0.571	W/m. K

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>

Correo electrónico:

[inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)

[francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)

Fuente: Explicación propia.

Paso 8. Carga térmica ( $Q$ ):

- Usando los datos del fluido caliente (leche):

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot C p_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.3)$$

$$Q = \frac{4,320}{3,600} \cdot 3.919 \cdot (60 - 10) = 235.14 \text{ kW}$$

Donde se da en kg/h.  $m_h$

Paso 9. Caudal másico de un arroyo:

- Caudal másico del fluido frío (agua):

$$m_c = \frac{Q}{C p_c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{235.14}{4.205 \cdot (8 - 2)} = 9.32 \text{ kg/s} \quad (1.6)$$

Paso 10. Temperatura de la pared del tubo ( $T_w$ ):

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot (\bar{T} + \bar{t}) = \frac{1}{2} \cdot (35 + 5) = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.7)$$

Paso 11. Viscosidad de ambos fluidos a la temperatura de la pared del tubo:

Según [25,26], tanto la leche como el agua presentan los siguientes valores de viscosidad en  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .  $T_w$

- Fluido caliente (leche) ( $\mu$ ) [Pa.s] =  $0,00205 \text{ Pa.s } \mu_{hw}$
- Fluido frío ( $\mu$ ) [Pa.s] =  $0,00100 \text{ Pa.s } \mu_{cw}$

Paso 12. Área neta de flujo libre del tubo interior ( $A_{ct}$ ):

$$A_{ct} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.02664^2}{4} = 0.00056 \text{ m}^2 \quad (1.8)$$

Como el fluido frío (agua) fluirá por el tubo interior y el fluido caliente (leche) fluirá por el anillo, se aplicará la siguiente nueva nomenclatura presentada en la Tabla 7 para los caudales, parámetros físicos y factores de ensuciamiento de ambos arroyos.

**Tabla 7. Se aplicará nueva nomenclatura para ambas ramas.**

Parámetro	Fluido caliente (leche)		Fluido frío (agua)	
	Nomenclatura anterior	Nueva nomenclatura	Nomenclatura anterior	Nueva nomenclatura
Caudal	$m_h$	$m_a$	$m_c$	$m_t$
Densidad	$\rho_h$	$\rho_a$	$\rho_c$	$\rho_t$
Viscosidad	$\mu_h$	$\mu_a$	$\mu_c$	$\mu_t$
Capacidad calorífica	$C p_h$	$C p_a$	$C p_c$	$C p_t$
Conductividad térmica	$k_h$	$k_a$	$k_c$	$k_t$
Factor de incrustación	$R_h$	$R_a$	$R_c$	$R_t$

Fuente: Explicación propia.

La Tabla 8 muestra los valores de los parámetros incluidos en los pasos 13-25.

**Mesa 8. Valores de los parámetros incluidos en los pasos 13-25.**

Escalón	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
13	Velocidad del fluido del lado del tubo (agua)	$v_t$	16.64	m/s
14	Número de Reynolds del fluido del lado del tubo (agua)	$Re_t$	291,629	-
15	Número de Prandtl del fluido del lado del tubo (agua)	$Pr_t$	11.19	-
16	Factor de fricción de ventilación para el fluido lateral del tubo (agua)	$f_t$	0.00362	-
17	Número de Nusselt para el fluido del lado del tubo (agua) <sup>1</sup>	$Nu_t$	1,237.84	-
18	Coefficiente de transferencia de calor para el fluido del lado del tubo (agua)	$h_t$	26,531.78	L/m <sup>2</sup> . K
19	Área neta de flujo libre del anillo	$A_{ca}$	0.00129	M2
20	Velocidad del fluido anular (leche)	$v_a$	0.92	m/s
21	Diámetro hidráulico	$D_h$	0.0191	m
22	Número de Reynolds del fluido anular (leche)	$Re_a$	16,796	-
23	Número de Prandtl del	$Pr_a$	7.16	-

23	líquido anular (leche) Factor de fricción de ventilación para el fluido del anillo (leche)	$f_a$	0.00684	-	28	temperatura media <sup>logarítmica</sup> Área superficial de transferencia de calor	$A_o$	12.92	M2
24	Número de Nusselt para el líquido anular (leche) <sup>2</sup> Diámetro equivalente para transferencia a de calor	$Nu_a$	99.49	-	29	Área de transferencia de calor por horquilla	$A_{hp}$	0.629	M2
25	Coficiente de transferencia a de calor para el fluido anular (leche)	$h_a$	1,175.24	L/m <sup>2</sup> . K	30	Número de horquillas	$N_h$	21	-
					31	Limpia el coeficiente global de transferencia de calor basado en la zona exterior de transferencia de calor	$U_c$	1,030.1 1	L/m <sup>2</sup> . K
					32	Factor de limpieza	$CF$	0.752	-
					33	Falta total	$R_{ft}$	0.00032	M2. K/W
					34	Porcentaje sobre la superficie	$OS$	32.96	%

Fuente: Explicación propia.

<sup>1</sup>Como  $104 < < 5 \times 10Re_t^6$ , el fluido del lado del tubo (agua) fluye bajo régimen turbulento, por lo que la correlación de Prandtl (ecuación 1.15) se utilizó para calcular el número de Nusselt para este fluido. Esta ecuación también es válida porque  $= 11,19 > 0,5.Pr_t$

<sup>2</sup>Como  $104 < < 5 \times 10Re_a^6$ , el fluido del lado anular (la leche) fluye bajo régimen turbulento, por lo que la correlación de Prandtl (ecuación 1.25) se utilizará para calcular el número de Nusselt para este fluido. Esta ecuación también es válida porque  $= 7,16 > 0,5.Pr_a$

La Tabla 9 muestra los valores de los parámetros incluidos en los pasos 26-34.

Tabla 9. Valores de los parámetros incluidos en los pasos 26.-34.

Escalón	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
26	Coficiente total de transferencia de calor ensucio basado en la zona exterior del tubo interior	$U_f$	774.31	L/m <sup>2</sup> . K
27	Diferencia de	$\Delta T_m$	23.51	°C

Fuente: Explicación propia.

<sup>1</sup> Para disposición de contraflujo.

### 3.2. Caída de presión y potencia de bombeo.

La Tabla 10 presenta los valores de los parámetros incluidos en los pasos 35-38.

Mesa 10. Valores de los parámetros incluidos en los pasos 35-38.

Escalón	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
35	Caída de presión por fricción del fluido lateral del tubo (agua)	$\Delta p_t$	9,481,246	Pa
36	Potencia de bombeo para el fluido lateral del tubo (agua) <sup>1</sup>	$P_t$	110.5	kW

37	Caída de presión por fricción del fluido anular (leche)	$\Delta p_a$	77,392	Pa
38	Potencia de bombeo para el fluido del anillo (leche) <sup>1</sup>	$P_a$	114.58	W

Fuente: Explicación propia.

<sup>Se</sup> seleccionó un valor de 1A de 0,80 para la eficiencia isentrópica de la bomba [15].

### 3.3. Coste del equipo comprado

Usando la ecuación (1,46) y para un valor del área superficial de transferencia de calor de 12,92 m<sup>2</sup>, el coste del equipo adquirido del DPHE diseñado, basado en enero de 2007, es:

$$C_{DPHE}^{2007} = 1,600 + 2,100 \cdot A_b^{1,0} \quad (1.46)$$

$$= USD \$ 28,732$$

$$C_{DPHE}^{2007} \approx 28,800$$

Por lo tanto, el coste adquirido del DPHE diseñado, referido a mayo de 2025, es:

$$C_{DPHE}^{2025} = C_{DPHE}^{2007} \cdot \frac{CEPCI^{2025}}{CEPCI^{2007}} = 28,800 \cdot \frac{806.8}{509.7} \quad (1.47)$$

$$C_{DPHE}^{2025} == USD \$ 45,588 \approx 45,600$$

## 4. Discusión

La carga térmica tenía un valor relativamente alto de 235,14 kW, mientras que para el agua fría se necesita un caudal másico de 9,32 kg/s, lo cual puede considerarse alto. Esto se debe a que el bajo valor requerido para la temperatura de salida del chorro de agua fría (8 °C), que redujo la diferencia de temperatura del fluido frío (= 6 °C), mientras que el valor algo alto del caudal de leche líquida (4.320 kg/h o 1,2 kg/s) y la diferencia de temperatura relativamente alta del chorro de leche (= 50 °C) también influyen en el valor relativamente alto de la carga térmica, lo que a su vez afecta al alto valor obtenido para el caudal másico del agua refrigerada, como muestra la ecuación (1.6). En [15] el valor de la carga térmica era de 87,1 kW para un DPHE agua-agua.  $\Delta t t_2 - t_1 \Delta T T_1 - T_2$

El valor de la velocidad del fluido del lado del tubo (agua fría) es alto (16,64 m/s), debido al alto valor obtenido para el caudal masivo de agua refrigerada. Este valor de la velocidad del agua fría es 18 veces superior al valor calculado de la velocidad (0,92 m/s) para el fluido anular (leche), y está muy por encima del rango recomendado reportado por [22] para la velocidad del agua en intercambiadores tubulares (1,5-2,5 m/s).

El número de Reynolds del fluido del lado del tubo (agua fría) era de 291.629, lo que es 17,4 veces superior al número de Reynolds (16.796) del fluido del anillo (leche). Este alto valor obtenido para el número de Reynolds del flujo de agua fría se debe esencialmente al alto valor de la velocidad obtenida para este fluido. Este resultado coincide con el DPHE agua-agua sin aletas diseñado en [15], donde el valor del número de Reynolds del fluido del lado del tubo (159.343) es mayor que el número de Reynolds del fluido anular (15.201).

En el caso del número de Prandtl, el valor de este parámetro para el agua fría (11,19) fue 1,56 veces superior al número de Prandtl para la leche (7,16). Esto se debe fundamentalmente al valor más alto de la capacidad calorífica (4.205 J/kg. K) y la viscosidad (0,00152 Pa.s) obtenida para el agua en comparación con los valores de estos parámetros para la leche, que fueron 3.919 J/kg para la capacidad calorífica y 0,00106 Pa.s para la viscosidad. En [1] el número de Prandtl del fluido del lado del tubo (agua de mar) a una temperatura de 25 °C, para enfriar un chorro de aceite de motor en un DPHE, era de 6,29, con un valor para la capacidad calorífica específica y la viscosidad de 4.004 J/kg. K y 0,000964 Pa.s, respectivamente. De igual modo, en [15] el número de Prandtl de agua fría a 27,5 °C, para calentarse con agua caliente en un DPHE, era de 5,77, con un valor para la capacidad calorífica específica y la viscosidad de 4.179 J/kg. K y 0,000841 Pa.s, respectivamente.

En cuanto al número de Nusselt, el fluido del lado del tubo (agua fría) tenía un valor de 1.237,84 para este parámetro, que era 12,44 veces superior al valor del número de Nusselt (99,49) para el fluido del anillo (leche). Considerando que se empleó la misma ecuación (correlación de Prandtl) para calcular el número de Nusselt para ambos arroyos, el valor más alto obtenido de este parámetro para el agua refrigerada se debe a los valores más altos que presenta el flujo de agua fría para los números de Reynolds y Prandtl, en comparación con los valores más bajos de estos parámetros para el flujo de leche. Estos resultados coinciden con los reportados por [1], donde el número de Nusselt del fluido del lado del tubo (agua de mar) osciló entre 422,0330 y 634,7506, que era superior al número de Nusselt (34,692) del fluido anular (aceite de motor). De manera similar, también coinciden con los resultados reportados por [15], donde el número de Nusselt (375,3) para el fluido del lado del tubo (agua caliente) es mayor que el número de Nusselt (89,0) del fluido del anillo (fluido frío). Cabe mencionar que todos estos autores también emplearon la correlación de Prandtl aplicada en nuestro estudio para calcular el número de Nusselt para ambos ramos.

El coeficiente de transferencia de calor (26.531,78 W/m<sup>2</sup>. K) para el agua (fluido del lado del tubo) fue 22,57 veces superior al valor del coeficiente de transferencia de calor (1.175,24 W/m<sup>2</sup>. K) para la leche (líquido anular). Este

resultado está directamente influenciado por el valor más alto del número de Nusselt que presenta el agua fría respecto al valor del número de Nusselt para la leche. Estos hallazgos coinciden con los reportados por [1], donde los valores de los coeficientes de transferencia de calor para el fluido del lado del tubo (agua de mar) oscilaban entre 12.885 y 19.379  $W/m^2 \cdot K$  y eran superiores al valor del coeficiente de transferencia de calor (64,549  $W/m^2 \cdot K$ ) para el fluido anular (aceite de motor). De la misma manera, nuestros resultados son similares a los reportados por [15] donde el coeficiente de transferencia de calor (4.911  $W/m^2 \cdot K$ ) del fluido del lado del tubo (agua caliente) es 3,65 veces mayor que el coeficiente de transferencia de calor para el anillo (1.345  $W/m^2 \cdot K$ ).

El valor de la caída de presión del fluido del lado del tubo (agua fría) es bastante alto (9.481.246 Pa), y está muy por encima del límite máximo permitido por el sistema de transferencia de calor (85.000 Pa). Esto ocurre fundamentalmente debido al alto valor de la velocidad obtenida para este fluido (16,64 m/s) y al número relativamente alto de horquillas (21). Este alto valor de la caída de presión para el agua fría influye en el valor significativo de la potencia de bombeo obtenida para este fluido (110,5 kW). Por otro lado, la caída de presión calculada para el fluido anular (leche, 77.392 Pa) está por debajo del máximo permitido por el sistema, requiriendo así una potencia de bombeo de 114,58 W. Como se señala en [15], cuando un volumen significativo de fluido se mueve a través del tubo o del anillo de un DPHE, la caída de presión puede superar los niveles aceptables debido a las altas velocidades de flujo, lo cual se aplica a nuestra investigación. En estas situaciones, es recomendable dividir el caudal másico en varios arrosos paralelos, mientras que el lado de caudal másico más bajo puede colocarse en una configuración en serie. En consecuencia, el sistema estará organizado en una disposición en serie paralela. De manera similar, [14] señala que un aumento en la velocidad del fluido resulta en mayores caídas de presión, y que si el intercambiador de calor debe integrarse en un proceso existente, el diseñador debe cumplir con la caída máxima de presión permitida para ambos flujos. Esta referencia también señala que si la caída de presión calculada es demasiado alta, será necesario ampliar el área de flujo, ya sea aumentando el diámetro de los tubos o añadiendo más ramas paralelas. Por el contrario, si la caída de presión determinada es menor de lo permitido, reducir el área de flujo podría ser una opción. En cualquiera de los dos casos, el proceso de diseño debe reiniciarse. Este autor enfatiza además que una menor área de flujo para ambos fluidos (y, posteriormente, un diámetro reducido del tubo) conduce a un aumento de la velocidad y los coeficientes de transferencia de calor, pero también provoca mayores caídas de presión. Recomienda, como primer paso, elegir el diámetro del tubo en función de las velocidades del fluido, sugiriendo velocidades de 1-2 m/s para líquidos con baja viscosidad, y también proponiendo que, una vez conocida la longitud final, se pueda calcular la

caída de presión para cada fluido, lo que puede requerir ajustes en los diámetros de tubería elegidos.

En [15] la caída de presión del fluido del lado del tubo es de 460,1 Pa, por lo que requiere una potencia de bombeo de 0,84 W, mientras que la caída de presión del fluido anular es de 2.876,4 Pa, por lo que requiere una potencia de bombeo de 5,0 W. En [1], la caída de presión y la potencia de bombeo del fluido lateral del tubo (agua de mar) para el diseño DPHE limpio sin aletas son de 9.376,4 kPa y 27,468 kW, respectivamente, mientras que los valores de estos parámetros para el tipo de diseño DPHE sin aletas y enrevesadas son 9.597 kPa y 28,114 kW, respectivamente. Esta referencia también informa que la caída de presión y la potencia de bombeo para el fluido anular (aceite de motor) para el diseño DPHE limpio sin aletas son 42,237 MPa y 298,193 kW, respectivamente, mientras que los valores de estos parámetros para el tipo DPHE sin aletas enredadas son 43,231 MPa y 305,211 kW, respectivamente.

Por último, el DPHE previsto costará alrededor de 45.600 USD en mayo de 2025.

## 5. Conclusiones.

En este artículo, se diseñó un intercambiador de calor de doble tubo sin aletas desde el punto de vista termohidráulico, para llevar a cabo el enfriamiento de un chorro de leche de vaca líquida utilizando agua fría como refrigerante. El fluido caliente (leche) se encontraba en el anillo, mientras que el fluido frío (agua fría) estaba en el tubo interior. Varios diseños; se calcularon parámetros geométricos y operativos para el DPHE, como la superficie de transferencia de calor (12,92  $m^2$ ), el número total de horquillas (21), el factor de limpieza (0,752) y el porcentaje sobre la superficie (32,96%), que pueden considerarse aceptables y adecuados. Se obtuvo un alto valor del caudal másico requerido de agua fría, que ascendía a 9,32 kg/s. Del mismo modo, la caída de presión del fluido del lado del tubo es bastante alta (9.481.246 Pa) y supera la caída máxima permitida por el proceso de intercambio de calor para ambos flujos (85.000 Pa), mientras que la caída de presión del fluido del anillo (77.392 Pa) está por debajo de este límite máximo permitido. El valor alto obtenido por la caída de presión del fluido del lado del tubo aumenta la potencia de bombeo requerida para este fluido a un valor significativo (110,5 kW), mientras que el valor requerido de la potencia de bombeo para el fluido anular es de 114,58 W. Se concluye que el DPHE diseñado en este estudio no puede implementarse con éxito en este sistema de intercambio de calor debido a los altos valores de caída de presión y potencia de bombeo obtenidos para el fluido del lado del tubo (agua fría). El DPHE diseñado costará alrededor de 45.600 USD USD según mayo de 2025. Se recomienda aumentar el diámetro de ambas tuberías y rediseñar el DPHE sin aletas para disminuir la caída de presión del fluido lateral del tubo a un valor inferior al límite mínimo permitido por el sistema de transferencia de calor para este parámetro.

#### 6.- Contribuciones de los autores (Taxonomía de Roles de los Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualización formal: Amaury Pérez Sánchez.
2. Curaduría de datos: Laura de la Caridad Arias Aguila, Heily Victoria González, Zamira María Sarduy Rodríguez.
3. Análisis formal: Amaury Pérez Sánchez, María Isabel La Rosa Veliz, Lizthalía Jiménez Guerra.
4. Adquisición de fondos: No aplicable.
5. Research: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila, Heily Victoria González, María Isabel La Rosa Veliz
6. Metodología: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila, Lizthalía Jiménez Guerra.
7. Gestión de proyectos: No aplicable.
8. Recursos: No aplicable.
9. Software: No aplicable.
10. Supervisión: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.
11. Validation: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila, Heily Victoria González, Zamira María Sarduy Rodríguez.
12. Pantalla: No aplicable.
13. Redacción - borrador original: Heily Victoria González, María Isabel La Rosa Veliz, Zamira María Sarduy Rodríguez, Lizthalía Jiménez Guerra.
14. Guion, revisión y edición: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.

#### 7.- Referencias.

- [1] C. Ezgi y Ö. Akyol, "Diseño térmico de intercambiador de calor de doble tubo usado como enfriador de aceite en barcos: un estudio de caso comparativo," *Journal of Ship Production and Design*, vol. 35, n° 1, pp. 12-18, 2019. <http://dx.doi.org/10.5957/JSPD.170009>
- [2] N. Kocyigit y H. Bulgurcu, "Modelización del coeficiente total de transferencia de calor de un intercambiador de calor concéntrico de doble tubería con datos experimentales limitados mediante ajuste de curvas y combinación ANN," *Thermal Science*, vol. 23, no. 6A, pp. 3579-3590, 2019. <https://doi.org/10.2298/TSCI171206111K>
- [3] N. Kumar y A. Bhandari, "Diseño y análisis térmico de intercambiadores de calor de doble tubería cambiando el caudal másico," *International Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 10, n° 5, pp. 1-4, 2022.
- [4] S. Kotian, N. Methekar, N. Jain y P. Naik, "Transferencia de calor y flujo de fluidos en un intercambiador de calor de doble tubería, Parte I: Investigación experimental," *Asian Review of Mechanical Engineering*, vol. 9, n° 2, pp. 7-15, 2020. <https://doi.org/10.51983/arme-2020.9.2.2482>
- [5] S. Alhulaifi, "Análisis computacional de transferencia de calor por dinámica de fluidos de intercambiadores de calor y características de flujo de doble tubería usando nanofluido TiO<sub>2</sub> con agua" *Designs*, vol. 8, p. 39, 2024. <https://doi.org/10.3390/designs8030039>
- [6] Rakesh, C. Nallode, M. Adhvaith y A. H. A. Krishna, "Diseño y análisis de rendimiento de intercambiador de calor de doble tubería," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 6, n° 7, pp. 12578-12584, 2017. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2017.0607017>
- [7] Rahman, "Aumento del rendimiento térmico del intercambiador de calor de doble tubería - Una revisión crítica," *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, vol. 12, n° 24, pp. 227 – 246, 2025. <https://doi.org/10.22075/JHMTR.2024.34771.1581>
- [8] E. Ebierto, R. R. Ana, O. E. Nyong y E. G. Saturday, "Diseño y construcción de un intercambiador de calor de doble tubería para aplicaciones en laboratorio," *European Journal of Engineering Research and Science*, vol. 5, n° 11, pp. 1-6, 2020. <http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.11.1950>

- [9] S. Tazegül, M. Bitkin, A. N. Öztekin, A. Korkmaz, Ö. S. Şahin y O. Babayigit, "Diseño y optimización del rendimiento de intercambiadores de calor tipo doble tubería basados en análisis CFD y económicos-Un estudio numérico," *Journal of Engineering and Sciences*, vol. 2, n° 2, pp. 100-110, 2024.
- [10] J. Havlik, T. Dluhý y J. Krempaský, "Transferencia de calor en intercambiadores de calor de doble tubería con espaciamiento de tubos pequeños," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 147, pp. 1-10, 2025. <https://doi.org/10.1115/1.4066930>
- [11] Peccini, J. C. Lemos, A. L. H. Costa y M. J. Bagajewicz, "Diseño óptimo de estructuras de intercambiadores de calor de doble tubería," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, pp. 12080-12096, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01536>
- [12] P. K. Swamee, N. Aggarwal y V. Aggarwal, "Diseño óptimo de intercambiador de calor de doble tubería," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 2260-2266, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2007.10.028>
- [13] L. M. Nahes, M. J. Bagajewicz y A. L. H. Costa, "Optimización del diseño de intercambiadores de calor de doble tubería usando un modelo discretizado," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 60, p. 17611–17625, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02455>
- [14] E. Cao, *Transferencia de calor en ingeniería de procesos*. Nueva York, EE. UU.: McGraw-Hill, 2010.
- [15] S. Kakaç, H. Liu y A. Pramuanjaroenkij, *Intercambiadores de calor - Selección, clasificación y diseño térmico*, 3ª ed. Boca Raton, EE. UU.: Taylor & Francis Group, LLC, 2012. <https://doi.org/10.1201/b11784>
- [16] M. Flynn, T. Akashige y L. Theodore, *Kern's Process Heat Transfer*, 2ª ed. Beverly, EE. UU.: Scrivener Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1002/9781119364825>
- [17] N. Nwokolo, P. Mukumba y K. Obileke, "Evaluación del rendimiento térmico de un intercambiador de calor de doble tubería instalado en un sistema de gasificación de biomasa," *Journal of Engineering and Sciences*, pp. 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6762489>
- [18] F. Joshua, "Diseño y construcción de un intercambiador de calor de tubos concéntricos," *AU J.T.*, vol. 13, n° 2, pp. 128-133, 2009.
- [19] Venkatesh y otros., "Optimización del diseño de intercambiador de calor de doble tubería de contraflujo usando algoritmo de optimización híbrida," *Processes*, vol. 11, p. 1674, 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11061674>
- [20] R. Gutiérrez, A. A. D. L. Rosa, L. V. Benítez, R. Serrano y Y. Aguilera, "Determinación de parámetros térmicos de un intercambiador de calor de tubos concéntricos con fluidos de vapor orgánico," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 26, núm. 4, pp. 76-88, 2017.
- [21] K. Silaipillayarputhur, T. A. Mughanam, A. A. Mojil y M. A. Dhמוש, "Análisis analítico y numérico de diseño de intercambiadores de calor de tubos concéntricos – una revisión," *IOP Conf. Series: Ciencia e Ingeniería de Materiales*, vol. 272, p. 012006, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/272/1/012006>
- [22] R. Sinnott y G. Towler, *Diseño de Ingeniería Química*, 6ª ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020.
- [23] S. Jenkins, "Indicadores económicos," *Chemical Engineering*, vol. 132, n° 9, p. 56, 2025.
- [24] P. Parmar *et al.*, "El efecto de los cambios composicionales debidos a la variación estacional en la densidad de la leche y la determinación de factores de conversión de densidad basados en la temporada para su uso en la industria láctea," *Foods*, vol. 9, p. 1004, 2020. <https://doi.org/10.3390/foods9081004>
- [25] P. F. Fox y P. L. H. McSweeney, *Química y Bioquímica Láctea*, 1ª ed. Londres, Reino Unido: Blackie Academic & Professional, 1998.
- [26] ChemicaLogic, "Propiedades termodinámicas y de transporte del agua y el vapor," 2.0 ed. Burlington, EE. UU.: ChemicaLogic Corporation, 2003.

#### Nomenclatura.

$A_o$	Área superficial de transferencia de calor	M2
$A_{ca}$	Área neta de flujo libre del anillo	M2

$A_{ct}$	Área neta de flujo libre del tubo interior	M2	$t$	Fluido lateral del tubo
$A_{hp}$	Área superficial de transferencia de calor	M2		
$C_p$	Capacidad calorífica	kJ/kg. K		
$CF$	Factor de limpieza	-		
$d_e$	Diámetro externo del tubo interior	m		
$d_i$	Diámetro interno del tubo interior	m		
$D_e$	Diámetro equivalente para transferencia de calor	m		
$D_h$	Diámetro hidráulico	m		
$D_i$	Anillo de diámetro interno	m		
$f$	Factor de fricción en abanico	-		
$f_c$	Factor de fricción de abanico corregido	-		
$h$	Coefficiente de transferencia de calor	L/m <sup>2</sup> . K		
$k$	Conductividad térmica	W/m.K		
$k_m$	Material metálico de conductividad térmica del tubo interior	W/m.K		
$L_t$	Longitud del tubo	m		
$m$	Caudal másico	kg/h		
$m$	Factor	-		
$N_h$	Número de horquillas	-		
$Nu$	Número de Nusselt	-		
$OS$	Porcentaje sobre la superficie	%		
$P$	Potencia de bombeo	kW o W		
$Pr$	Número de Prandtl	-		
$\Delta p$	Caída de presión por fricción	Pa		
$\Delta P_m$	Caída máxima de presión permitida	Pa		
$Q$	Carga térmica	kW		
$R$	Factor de incrustación	M2. K/W		
$Re$	Número de Reynolds	-		
$R_{ft}$	Falta total	M2. K/W		
$t$	Fluido frío de temperatura	°C		
$\bar{t}$	Fluido frío a temperatura media	°C		
$T$	Fluido caliente de temperatura	°C		
$T_w$	Temperatura de la pared del tubo	°C		
$\bar{T}$	Fluido caliente a temperatura media	°C		
$\Delta T_m$	Diferencia de temperatura log-media	°C		
$U_c$	Coefficiente global de transferencia de calor limpio	L/m <sup>2</sup> . K		
$U_f$	Coefficiente total de transferencia de calor ensucio	L/m <sup>2</sup> . K		
$v$	Velocidad	m/s		
Símbolos griegos				
$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>		
$\mu$	Viscosidad	Pa.s		
$\mu_w$	Viscosidad del fluido a la temperatura de la pared del tubo	Pa.s		
$\eta_p$	Eficiencia isentrópica de la bomba	-		
Subíndices				
1	Entrada			
2	Salida			
$a$	Fluido anular			
$c$	Fluido frío			
$h$	Fluido caliente			

# Análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos.

Comparative evaluation of granulometric distribution in grains processed by ball and hammer Mills.

Stefanie Bonilla Bermeo<sup>1\*</sup> ; Fernando Noblecilla Arévalo<sup>2</sup> ; Iván Torres Tapia<sup>3</sup> ; Carlos Valdiviezo Rogel<sup>4</sup>

Recibido: 25/10/2025 – Aceptado: 05/12/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artículos de Investigación  Artículos de Revisión  Artículos de Ensayos

\* Autor para correspondencia.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Los autores conservan los derechos sobre sus artículos y pueden compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra, siempre que se reconozca la autoría, no se utilice con fines comerciales y se mantenga la misma licencia en obras derivadas.

## Resumen.

La molienda de granos es fundamental en procesos industriales, donde la distribución granulométrica resultante incide directamente en la calidad del producto. El objetivo fue comparar la distribución granulométrica de maíz y soja procesados en molino de martillo, molino de bolas y su combinación. Se molieron muestras de maíz y soja utilizando tres configuraciones: molino de martillo, molino de bolas y la secuencia de ambos. El material obtenido se tamizó, determinándose los porcentajes retenidos por malla y calculándose los diámetros característicos (D10, D50, D90). Adicionalmente, se realizó análisis microscópico de partículas y ANOVA para evaluar diferencias significativas. El molino de martillo produjo distribuciones gruesas y heterogéneas, especialmente en soja (D50  $\approx$  2.9 mm). El molino de bolas generó un mayor porcentaje de finos en maíz (D50  $\approx$  1.38 mm), pero fue ineficaz para soja (D50  $\approx$  3.53 mm). La combinación de molinos logró la distribución más uniforme para ambos granos (D50  $\approx$  1.05-1.25 mm). El ANOVA no detectó diferencias significativas globales, aunque se observaron disparidades morfológicas y de distribución en el análisis por tamices. La combinación de molinos optimizó la distribución granulométrica, superando las limitaciones de cada equipo por separado.

## Palabras clave.

Distribución granulométrica, Molino de martillo, Molino de bolas, Molienda de maíz, Molienda de soja.

## Abstract.

The grinding of grains is fundamental in industrial processes, where the resulting particle size distribution directly impacts product quality. This study aimed to compare the granulometric distribution of corn and soybeans processed using a hammer mill, ball mill, and their combination. Samples of corn and soybeans were ground using three configurations: hammer mill, ball mill, and sequential milling with both. The resulting material was sieved to determine weight retained per mesh and calculate characteristic diameters (D10, D50, D90). Additional particle microscopy and ANOVA were performed to evaluate significant differences. The hammer mill produced coarse, heterogeneous distributions, especially for soybeans (D50  $\approx$  2.9 mm). The ball mill generated a higher proportion of fine particles in corn (D50  $\approx$  1.38 mm) but was ineffective for soybeans (D50  $\approx$  3.53 mm). The mill combination achieved the most uniform distribution for both grains (D50  $\approx$  1.05-1.25 mm). ANOVA detected no global significant differences, though morphological and distributional disparities were observed in sieve analysis. The combined milling approach optimized granulometric distribution, overcoming the limitations of each individual equipment.

## Keywords.

Granulometric distribution, Hammer mill, Ball mill, Corn grinding, Soybean grinding.

## 1. Introducción

La reducción del tamaño de partículas es un proceso implementado en diversas industrias, que consiste en disminuir la dimensión física de los materiales sólidos mediante la aplicación de fuerzas mecánicas. Este proceso es esencial en operaciones como la mezcla, secado, la sinterización y las reacciones químicas, donde el tamaño de las partículas puede influir en la velocidad y uniformidad del proceso. Los equipos comúnmente utilizados para la reducción de tamaño incluyen molinos de bolas, molino de martillos, trituradoras de mandíbulas y molinos de rodillos. La elección del equipo adecuado depende de las propiedades del material y del tamaño de partícula deseado, siendo un factor crítico para la optimización de los procesos industriales. [1]

Asimismo, la distribución de partículas desempeña un papel fundamental, ya que afecta directamente la calidad y

las propiedades del producto final, como su flujo, compactación y disolución. El análisis granulométrico es una técnica esencial para evaluar la distribución de tamaño de partículas en un material pulverizado, y el tamiz es uno de los equipos más utilizados para este fin. La precisión en la clasificación de partículas es vital para garantizar la consistencia del producto. [2]

La molienda y la reducción de tamaño no solo permiten aumentar la superficie específica de los materiales, sino que también mejoran su reactividad y facilitan procesos posteriores como la disolución, la extracción de compuestos de interés y la homogeneización en mezclas. En la industria alimentaria, por ejemplo, un control adecuado de la granulometría contribuye a optimizar la textura, la solubilidad y la biodisponibilidad de nutrientes, mientras que en la industria farmacéutica la uniformidad del tamaño de partícula es clave para garantizar la

<sup>1</sup> Universidad de Guayaquil / [stefanie.bonillab@ug.edu.ec](mailto:stefanie.bonillab@ug.edu.ec) ; <https://orcid.org/0000-0002-9391-3698>, Guayaquil; Ecuador.

<sup>2</sup> Investigador Independiente / [fernandoanoblex18@gmail.com](mailto:fernandoanoblex18@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0005-1898-8373>, Guayaquil; Ecuador.

<sup>3</sup> Investigador Independiente / [ivanalejo17@gmail.com](mailto:ivanalejo17@gmail.com) ; <https://orcid.org/0009-0008-9193-0524>, Guayaquil; Ecuador.

<sup>4</sup> Universidad de Guayaquil / [carlos.valdiviezor@ug.edu.ec](mailto:carlos.valdiviezor@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0002-6550-975>, Guayaquil, Ecuador.

dosificación y la liberación controlada de principios activos. [3]

En el ámbito de los materiales de construcción y minería, la eficiencia de los equipos de conminución, como molinos de bolas y de martillos, tiene un impacto directo en el consumo energético y en los costos de operación. Se estima que hasta un 50% de la energía total utilizada en una planta de procesamiento mineral corresponde a operaciones de molienda, lo que convierte a la selección del equipo y a la optimización de la granulometría en factores estratégicos para la sostenibilidad del proceso. [4] Además, la reducción excesiva de partículas puede generar pérdidas de material por formación de finos, afectando la eficiencia global del sistema.

El molino de martillos es uno de los equipos más empleados para la reducción de tamaño de granos debido a su simplicidad de diseño, bajo costo y alta capacidad de procesamiento. Su principio de funcionamiento se basa en el impacto repetido de martillos giratorios sobre las partículas, lo que genera fracturas rápidas y produce materiales con una granulometría relativamente heterogénea. Este tipo de molino es ampliamente utilizado en la industria alimentaria y de piensos, ya que permite procesar granos como maíz, trigo y soja de manera eficiente, aunque presenta la desventaja de generar un mayor contenido de finos y polvo. [5]

Por otro lado, el molino de bolas opera bajo el principio de impacto y fricción, donde esferas de acero u otro material de molienda giran dentro de un tambor cilíndrico, provocando la reducción gradual del tamaño de partícula. A diferencia del molino de martillos, este equipo permite obtener una distribución de partículas más controlada y fina, con menor variabilidad en el tamaño. Los molinos de bolas se utilizan ampliamente en la industria minera, cerámica y farmacéutica, así como en la investigación de nuevos materiales, aunque requieren mayor consumo energético y tiempos de operación más prolongados en comparación con los molinos de martillos. [6]

El análisis granulométrico mediante tamizado, difracción láser u otros métodos modernos se emplea como herramienta de control de calidad para establecer la distribución de tamaños en los productos procesados. La técnica de tamizado, aunque tradicional, sigue siendo una de las más empleadas debido a su bajo costo, simplicidad y reproducibilidad en comparación con métodos más sofisticados. La información obtenida de estos análisis permite establecer correlaciones entre la distribución de partículas y el comportamiento del material en procesos posteriores, garantizando la uniformidad del producto final y contribuyendo a la optimización de la cadena productiva. [7]

La elección entre un molino de martillos y un molino de bolas depende en gran medida del material a procesar y de

las propiedades deseadas en el producto final. [8] En el caso de los granos, el molino de martillos se prefiere por su rapidez y eficiencia en grandes volúmenes, mientras que el molino de bolas resulta más apropiado cuando se requiere una molienda fina y uniforme. Ambos equipos tienen un papel fundamental en la optimización de procesos industriales, y su comparación desde la perspectiva de la distribución granulométrica permite identificar ventajas competitivas y áreas de mejora en la reducción de tamaño de partículas. [9] En este contexto, resulta pertinente destacar la importancia de la molienda en granos de uso masivo como el maíz y la soja, cuyo procesamiento no solo responde a fines industriales, sino también a la optimización de la calidad nutricional y funcional de los productos derivados.

A pesar de la amplia utilización de los molinos de martillos y de bolas en distintas industrias, aún persisten vacíos en la comprensión comparativa de su eficiencia en la reducción de tamaño y en la distribución granulométrica final de granos como el maíz y la soja. Si bien ambos equipos cumplen funciones similares, las diferencias en su principio de operación, consumo energético y uniformidad del producto pueden influir significativamente en la calidad y el aprovechamiento de los granos procesados. Estudios recientes han destacado que los parámetros de molienda, como la velocidad de rotación, la carga de bolas o la apertura de cribas, inciden directamente en la distribución de partículas y en la calidad nutricional del producto final [10]. Investigaciones comparativas, han evidenciado que los molinos de martillos tienden a generar partículas más irregulares y un mayor contenido de finos, mientras que los molinos de bolas producen distribuciones más homogéneas [11], aunque con mayor consumo energético y tiempo de operación. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se ha centrado en granos individuales o condiciones experimentales específicas, por lo que se requiere un análisis más integral que relacione ambos equipos bajo condiciones controladas y comparables. De este modo, la presente investigación busca aportar evidencia cuantitativa y actualizada que permita orientar decisiones técnicas y económicas en el procesamiento de maíz y soja, fortaleciendo la base científica para la selección del sistema de molienda más eficiente.

En el caso de granos como el maíz y la soja, ampliamente utilizados en la industria alimentaria y de piensos, la molienda desempeña un papel fundamental en la mejora de sus propiedades funcionales y nutricionales. En el maíz, el control de la granulometría influye en la digestibilidad del almidón y en la calidad de productos derivados como harinas y cereales, mientras que en la soja determina la disponibilidad de proteínas y lípidos, además de facilitar su incorporación en formulaciones balanceadas para alimentación animal. [12] Estudios han demostrado que la reducción adecuada del tamaño de partícula en estos granos no solo optimiza el rendimiento de los procesos de extracción y digestibilidad, sino que también impacta en la

eficiencia energética de la molienda y en la calidad final del producto. [13]

Los estudios previos presentan limitaciones específicas que requieren atención. Por ejemplo, investigaciones evidenciaron que, en molienda de maíz, la energía específica requerida varía considerablemente según la fracción del material (grano, rastrojo, cabo) lo que sugiere que los datos no son directamente extrapolables a granos comerciales procesados [14]. Otro estudio, demostró que la combinación de molinos (martillos + rodillos) mejora la uniformidad de la distribución de partículas, pero no se comparan directamente molinos de martillos vs molinos de bolas en granos como el maíz o la soja [15]. En el ámbito de molienda por bolas, un estudio analizó cómo el diámetro del medio afecta la eficiencia de molienda, pero en mineralización, no en granos agrícolas, lo que deja un vacío de conocimiento aplicable al sector alimentario [16]. En consecuencia, se carece de una comparación directa, bajo condiciones controladas de granos alimentarios (maíz y soja), entre molinos de martillos y molinos de bolas, que simultáneamente cuantifique la uniformidad granulométrica, el consumo energético y su vinculación con funcionalidad nutricional o procesal. Este vacío otorga relevancia y urgencia a la presente investigación, orientada a asegurar una selección técnica sólida del sistema de molienda más adecuado para su aplicación industrial.

Estudios recientes indican que la molienda mediante molinos de martillos puede representar hasta un 50 % del consumo eléctrico total de una planta de alimentación. Por su parte, investigaciones en biomasa muestran que la energía específica requerida para la reducción de tamaño puede variar entre 35–65 kJ/kg, dependiendo del tipo de material y las condiciones de molienda [17]. Además, los análisis con modelos empíricos indican que la energía requerida en molinos de bolas puede variar entre  $\sim 3\text{--}12 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$  en función de la dureza y el tamaño de producto deseado [18]. Por lo tanto, una selección inadecuada del tipo de molino no solo afecta la calidad de la molienda y la uniformidad granulométrica, sino que también puede incrementar considerablemente los costos de operación y el consumo energético, impactando la viabilidad y competitividad del proceso industrial.

Por lo antes mencionado el objetivo del presente estudio es realizar un análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos, considerando su aplicación en el procesamiento de materias primas como el maíz y la soja. Este análisis busca establecer relaciones entre el tipo de equipo, las condiciones de molienda y la uniformidad de las partículas obtenidas, con el fin de aportar criterios técnicos que guíen la selección del sistema de reducción de tamaño en función de la eficiencia y la calidad del producto final.

## 1.1. Molienda

La molienda es una operación unitaria la cual se encarga de reducir el tamaño de partículas hasta lograr un tamaño requerido para un proceso en específico, así aumentando la superficie de contacto del material para una mayor eficacia en el proceso industrial. Esta reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta poder alcanzar un tamaño requerido.

Para la Ingeniería Química resulta esencial comprender las leyes que rigen en la desintegración en relación con el consumo energético (tiempo), las características de la materia y el tipo de máquinas a emplearse, esto demuestra el estudio fundamentado en deducciones y observaciones empíricas. [1]

### 1.1.1. Tipos de Molienda

Diferentes tipos de molinos como el de bolas y martillo, tienen diferentes mecanismos de acción y eficiencia, los molinos de bolas son eficientes para una molienda fija y el molino de martillo es más para materiales frágiles. [19]

### 1.2. Tamizado

El método de tamizado implica la utilización de una serie de tamices con diferentes aberturas para separar las partículas de suelo según su tamaño [20]

### 1.3. Análisis granulométrico por tamizado

Es la separación en tamaño de una colección de partículas sólidas de acuerdo con una escala granulométrica. Dicha separación se realiza con tamices colocados en serie, de forma que el cernido del primer tamiz es la alimentación del segundo y así sucesivamente. [21]

Alimentación al tamiz (F): Es la masa total que llega al tamiz para ser separada o clasificada.

Retenido (R): Es la masa que queda sobre la superficie del tamiz.

Cernido (C): Es la masa que pasa a través de las aberturas del tamiz, es decir, que atraviesa su superficie.

### 1.4. Distribución de Tamaño de Partículas

La distribución del tamaño de partículas describe la proporción de diferentes tamaños de partículas presentes en una muestra. Es fundamental para caracterizar el comportamiento de los materiales en diversos procesos industriales. [22]

### 1.5. Curvas Granulométricas

Las curvas granulométricas son representaciones gráficas que muestran la distribución del tamaño de partículas en una muestra. Estas curvas son esenciales para entender la distribución y predictibilidad del comportamiento del material. [23]

## 2. Materiales y métodos.

Se llevaron a cabo pruebas de molienda con dos tipos de granos (maíz y soja) para evaluar la granulometría que podían obtenerse a partir de la molienda en los molinos de bolas y martillo. Se trabajó con un molino de martillo

modelo RBN rosas, de 20 martillos de barra fundida y 4 ejes, así como con un molino tubular, discontinuo de bolas de acero, monocámara, con descarga de parrilla. La calibración de los equipos de molienda y tamizado fue realizada previo a los ensayos, verificando que todos los componentes: cámara, cuerpos de molienda, tamices y malla se encontraran dentro de sus especificaciones dimensionales y mecánicas, y asegurando condiciones reproducibles entre réplicas. Para el tamizado se utilizó un conjunto de tamices certificados según normativas equivalentes a ASTM E11 / ISO 3310, y se comprobó la uniformidad de las aberturas con métodos de calibración de mallas conforme a procedimientos recomendados en la literatura para garantizar exactitud y minimizar errores de clasificación. A continuación, se indican los casos de estudio evaluados:

**Caso 1.** Molienda en molino de martillo y tamizado, fig. 1.

**Caso 2.** Molienda en molino de bolas y tamizado, fig. 2.

**Caso 3.** Molienda en molino de martillo, seguida al molino de bolas y tamizado, fig. 3.

Una vez realizado los tres casos se utilizó un microscopio (Digital Microscope USB) para examinar la geometría obtenida en cada tipo de molienda.

El protocolo de muestreo se estableció siguiendo criterios de representatividad y homogeneidad recomendados para estudios de granulometría en matrices agrícolas. Para cada tratamiento de molienda, las muestras fueron recolectadas inmediatamente después de la descarga del equipo, empleando el método de cuarteo manual para reducir el volumen y garantizar que la fracción analizada mantuviera la distribución original del lote. Este procedimiento es ampliamente utilizado en estudios de molienda debido a su efectividad para minimizar sesgos por segregación de tamaños y densidades, especialmente en granos como maíz y soja. Investigaciones recientes enfatizan que la correcta homogenización y reducción del tamaño del lote es fundamental para asegurar la reproducibilidad de la distribución granulométrica, ya que variaciones en el protocolo de muestreo pueden generar diferencias de hasta un 15 % en el porcentaje retenido por tamiz en sistemas de molienda por impacto o compresión [24]. Además, estudios comparativos en molienda agrícola recomiendan emplear entre 200 y 500 g como masa mínima analítica para evitar pérdidas de fracciones finas y asegurar suficiente representatividad, lo cual fue considerado en el presente trabajo.

Para la representación y análisis de los datos recolectados, se emplearon gráficas de distribución granulométrica de distribución granulométrica. Estas gráficas permiten visualizar la relación entre el tamaño de las partículas y el porcentaje acumulado del material tamizado, proporcionando una comprensión cuantitativa y comparativa de la distribución de tamaños de partículas.

Finalmente se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de un factor se realizó utilizando el complemento Herramientas de análisis (Analysis Toolpak), lo que permitió evaluar las diferencias significativas entre los tratamientos.



Fig. 1. Caso 1. Molienda en molino de martillo y tamizado.

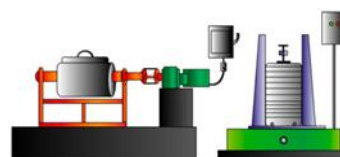


Fig. 2. Caso 2. Molienda en molino de bolas y tamizado

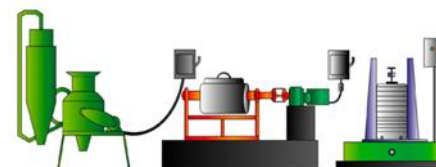


Fig. 3. Caso 3. Molienda en molino de martillo, seguido molino de bolas y tamizado

## 2.1. Materia prima

Se empleó 4540 g de maíz y soja, 2270 g de cada grano. El maíz con diámetro promedio de 0.78 mm y densidad del grano de 0.75 g/cm<sup>3</sup>, el grano de soja con diámetro promedio de 0.57 mm y densidad del grano de 0.85 g/cm<sup>3</sup>. La humedad del grano es una variable determinante en la eficiencia de la molienda, pues modifica su dureza, su respuesta mecánica y la granulometría resultante. Para mantener la estabilidad experimental, los granos se mantuvieron en un mismo lote y se almacenaron en ambiente seco a temperatura controlada de 22–24 °C, condiciones que minimizan la variación higroscópica y preservan las propiedades físicas del material. Este enfoque coincide con recomendaciones de la literatura, que destacan que el control simultáneo de temperatura y condiciones ambientales evita fluctuaciones en la humedad interna del grano y, por ende, en su comportamiento durante el proceso de conminución [25]. De este modo, se garantiza que las diferencias observadas en la granulometría reflejen principalmente el desempeño de los equipos de molienda.

## 2.2. Molino de Bolas

Se empleó un molino de bolas, con una carga de bolas configurada de la siguiente manera indicada en la tabla 1:

Tabla 1. Configuración de cuerpos moledores.

Cuerpos moledores	Diámetro promedio (cm)	Peso total (g)	% Peso
Pequeñas	2.46	5447	18.43
Medianas	2.97	9286	31.43

Grandes	3.89	14815	50.14
Pequeñas	2.46	5447	18.43

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El peso total de cuerpos moledores fue de 29548 g. Se determinó el peso promedio y diámetro equivalente de cuerpos moledores con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso promedio} = \frac{\text{peso total de cuerpos moledores}}{\text{número de cuerpos moledores}} \quad [1]$$

Peso promedio= 126,27 g

$$\text{Diámetro equivalente} = \left[ \left( \frac{\text{peso promedio}}{\text{densidad}} \right) \frac{6}{\pi} \right]^{1/3} \quad [2]$$

Diámetro equivalente= 3.12 cm

### 2.2.1. Cálculos de parámetros para el molino de bolas

El molino de bolas fue alimentado con 2270 g de cada grano (maíz y soja) y se determinaron los parámetros de trabajo mediante las siguientes ecuaciones de diseño:

Grado de llenado ( $f$ ):

$$f = \frac{\text{Volumen de la carga}}{\text{Volumen del molino}} \times 100 \quad [3]$$

Peso de la carga de cuerpos moledores ( $Q$ ):

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 L i f Y q \quad [4]$$

Donde:

D: diámetro interno del molino de bolas, m.

Li: longitud del molino, m.

Yq: peso equivalente de cuerpos moledores, t/m<sup>3</sup>

Velocidad crítica del molino ( $nc$ ):

$$nc = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad [5]$$

Donde:

D: diámetro interno del molino de bolas, m

$$n = k nc \quad [6]$$

Donde:

k: porcentaje de velocidad crítica (75%)

nc: velocidad crítica, rpm

Potencia del Motor del molino de bola ( $N$ ):

$$N = c D Q n \quad [7]$$

Donde:

c: factor de consumo de energía, adimensional

D: diámetro interno del molino, m

Q: peso de carga del molino de bolas, t

n: velocidad de operación del molino, rpm

Consumo específico de energía (CEE):

$$CEE = \frac{N}{P} \quad [8]$$

Donde:

N: potencia del molino, kW

P: producción del molino de bolas, t

### 2.3. Molino de martillo

Los granos fueron colocados en la boca de alimentación, pasaron por los martillos en un lapso de 4 minutos y receptados en la descarga, para su pesaje y tamizado.

### 2.4. Tamizado

Los tamices fueron colocados en columna en forma ascendente de acuerdo con el número de tamiz, lo que significa que el tamiz de mayor número receptorá el material más fino. La columna de tamices fue colocada en la máquina vibratoria por un minuto para luego pesar cada tamiz y recolectar el peso del retenido.

A continuación, se indica el diagrama de flujo del proceso de estudio en la figura 4.

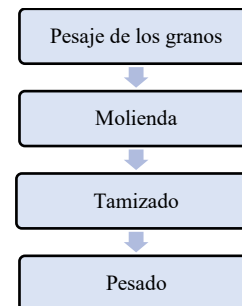


Fig.4. Diagrama de flujo general del proceso.

### 2.5. Tamices

La columna de tamices empleados en el presente estudio consta y se detalla en la tabla 2 con sus características respectivas a continuación:

Tabla 2. Clasificación de tamices

Número de malla	Apertura de mallas (mm)	Peso del tamiz (g)
5	4,00	387
6	3,35	383
8	2,36	372
12	1,70	358
16	1,18	309
18	1,00	303
20	0,85	294
30	0,60	289
50	0,30	255
70	0,212	250
Base	-	270

Fuente: Bonilla, et al, 2024

## 3. Análisis e Interpretación de Resultados.

### 3.1. Condiciones de operación de la molienda

En la siguiente tabla 3 se presentan las condiciones de trabajo en el caso 2 y 3 con ambos granos de maíz y soja.

Tabla 3. Condiciones de operación en la molienda

Parámetro	Caso 2		Caso 3	
	Maíz	Soja	Maíz	Soja
Granos	Maíz	Soja	Maíz	Soja
Temperatura (°C)	27	27	27	27
f (%)	14,13	14,8	14,1	16,51
Q (t)	0,0280	0,0293	0,0279	0,0327
nc (rpm)	68,61	68,61	68,61	68,61
n (rpm) @ 75%	51	51	51	51
N (Hp)	0,194	0,203	0,194	0,203
CEE (kW h / t)	80,61	83,17	80,17	92,70

Fuente: Bonilla, et al, 2024

La tabla 3 indica las condiciones usadas en el molino de bolas en los casos 2 y 3, para ambos granos trabajados a temperatura ambiente. El grado de llenado (*f*) del caso 2 con maíz, presenta un 14,13% y la soja un 14,8% respectivamente. Mientras el grano es más denso su grado de llenado es mayor. En el caso 3 con maíz, presenta un 14,1% y la soja un 16,51%, estos resultados dependen de factores como el volumen de carga de cuerpos moleadores, volumen de materia prima y volumen del molino. Por lo que la harina de maíz siendo más densa, ocupa menor volumen en el molino en contraste con la harina de soja que ocupa mayor volumen en el mismo, por tal razón se requirió mayor carga de cuerpos moleadores.

Fue necesario determinar la velocidad crítica (*nc*) a la que opera el molino con la finalidad de no sobrepasarse ya que se ocasionará que la fuerza centrífuga iguale a la fuerza de la gravedad y los cuerpos moleadores no descenderían a la molienda.

El consumo específico de energía (CEE) calculado en el caso 2 con el maíz tuvo un consumo del 80,61 kW hr/t por cada tonelada procesada, en contraste la soja presentó un aumento a 83,7 kW hr/t consumidos por cada tonelada procesada, esto es debido a que se trabajó con más carga de cuerpos moleadores para este grano por lo que el molino tuvo que consumir mayor energía que con el maíz, finalmente el caso 3, con maíz presentó un consumo de 80,17 kW hr/t por cada tonelada producido y la soja consumió 92,70 kW hr/t por cada tonelada producida, la diferencia de consumo específico de energía (CEE) entre los granos del caso 3 se debe a la densidad del grano de la soja. Es decir, a mayor grado de llenado, mayor será el consumo específico de energía. [26]

### 3.2. Rendimientos en los molinos

En la tabla 4 se compara el porcentaje de rendimiento de los molinos en los tres casos de estudio con el maíz y la soja.

#### Caso 1. Molino de martillo.

El molino de martillo presentó un rendimiento mayor al procesar grano de maíz en comparación con la soja, con una diferencia del 3,5%. Esta variación se atribuye principalmente a la diferencia de densidades de ambos granos. El maíz, al ser menos denso, facilita su molienda a comparación de la soja.

#### Caso 2. Molino de bolas.

En el molino de bolas se obtuvo el mayor rendimiento al moler ambos granos en comparación de los tres casos analizadas, se debe al a capacidad del molino de bolas para procesar casi todo el grano alimentado con pérdidas mínimas atribuibles a incrustaciones en el blindaje y la tapa del molino.

#### Caso 3. Molino de martillo + molino de bolas.

La combinación de los molinos presenta una diferencia entre el maíz y soja del 5,47%, a su vez presenta un mayor porcentaje de pérdida a comparación del caso 1 y 2, esto se debe a que el grano pasa por dos procesos de molienda. El molino de martillo tuvo un rendimiento superior con el grano de maíz comparado a la soja, por sus diferencias en las densidades. El molino de bolas ofrece un rendimiento similar en ambos casos, debido a que no presenta mayor pérdida al momento de ser procesado.

Tabla 4. Rendimientos de los molinos.

Materia prima	Rendimiento (%)		
	Caso #1	Caso #2	Caso #2
	Molino de martillo	Molino de bolas	Molino de martillo + molino de bolas
Maíz	77,05	96,34	74,89
Soja	73,57	96,17	69,47

Fuente: Bonilla, et al, 2024

### 3.3. Comparativo de análisis granulométrico

#### 3.3.1. Caso 1. Molino de martillo con maíz

La figura 5, muestra la distribución de partículas, que abarca un rango desde 2.33 hasta 3.7 milímetros, indica una falta de uniformidad en la reducción del tamaño. Si bien el diámetro mediano (D50) se sitúa en aproximadamente 2.8-2.9 milímetros.

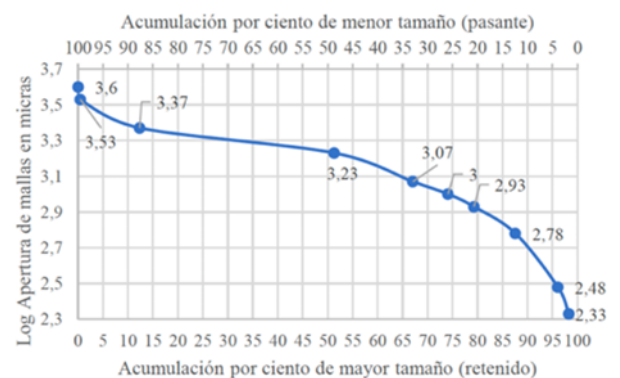


Fig.5. Curva granulométrica Caso 1 (maíz)

Los datos en la tabla 5, indican una distribución heterogénea con una concentración masiva en el rango medio. El tamiz número 12 (2,03 mm/2030 micrones) retiene el 38,94% del material total, representando el punto máximo de la distribución. Esto indica que el proceso de molienda genera predominantemente partículas de tamaño mediano. Aunque se minimiza adecuadamente la fracción gruesa (solo 0.47% por encima de 3.68 mm), la baja

proporción de finos (10.71% bajo 0.45 mm) sugiere ineficiencias en el mecanismo de fractura, posiblemente relacionadas con velocidad del rotor, tiempo de residencia o humedad del grano.

Tabla 5. Datos experimentales % retenido (maíz)

Numero de malla	Tamaño medio de partícula (mm)	Tamaño medio de partículas (micras)	% retenido
5	4,00	4000	0,06
6	3,35	3680	0,41
8	2,36	2860	11,87
12	1,70	2030	38,94
16	1,18	1440	15,77
18	1,00	1090	7,04
20	0,85	930	5,18
30	0,60	730	8,32
50	0,30	450	8,50
70	0,212	260	2,21

Fuente: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.2. Caso 1. Molino de martillo (soja)

La figura 6, muestra la distribución de partículas en un rango amplio de tamaños desde aproximadamente 2,3 mm hasta 3,7 mm, lo que indica una molienda heterogénea con presencia simultánea de partículas finas y gruesas. El D50 (tamaño mediano) se ubica alrededor de 2,9 mm, punto donde el 50% del material es más fino y el 50% más grueso, valor que representa el tamaño característico del producto final. La pendiente suave de la curva de acumulación sugiere una distribución extendida con dispersión significativa en los tamaños de partícula. Se observa que aproximadamente el 30-35% del material presenta tamaños superiores a 3,1 mm (fracción gruesa), mientras que solo alrededor del 15-20% se encuentra por debajo de 2,5 mm (fracción fina), evidenciando un desequilibrio hacia partículas más grandes. La acumulación de material retenido indica que existe una proporción de partículas en el rango medio (2,7-3,1 mm), representando entre el 40-50% del total. Esta distribución sugiere que el proceso de molienda genera un exceso de partículas de tamaño intermedio, posiblemente debido a parámetros operativos como velocidad de rotor inadecuada, tiempo de residencia insuficiente, desgaste de martillos o apertura de tamiz excesiva.

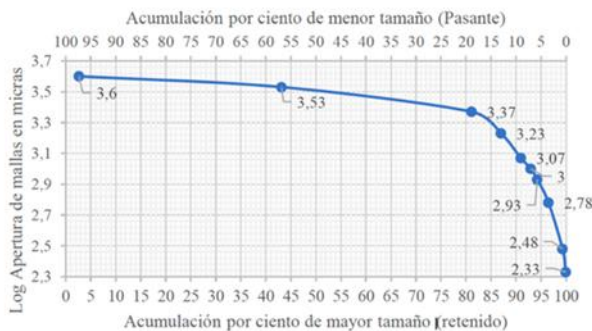


Fig.6. Curva granulométrica Caso 1 (soja)

Los datos en la tabla 6, indica que los tamices nuevos presentan un mayor porcentaje de retención para partículas

en el rango de 3680 a 2860 micras, lo cual está asociado con la presencia de partículas de mayor tamaño de la soja. presencia de partículas de mayor tamaño de la soja. Además, se observa una disminución en el porcentaje de retención para tamaños intermedios y pequeños. Esta tendencia indica que los

Tabla 6. Datos experimentales % retenido (soja)

Numero de malla	Tamaño medio de partícula (mm)	Tamaño medio de partículas (micras)	% retenido
5	4,00	4000	2,66
6	3,35	3680	40,49
8	2,36	2860	37,97
12	1,70	2030	5,87
16	1,18	1440	3,99
18	1,00	1090	1,96
20	0,85	930	1,33
30	0,60	730	2,24
50	0,30	450	2,80
70	0,212	260	0,63

Fuente: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.3. Caso 2. Molino de bolas (maíz)

La distribución granulométrica obtenida de la molienda de maíz en el molino de bolas indica una dispersión amplia de tamaños de partículas. Los resultados en la figura 7, muestran que el D10 es de aproximadamente 0,48 mm, lo que significa que solo el 10% del material tiene un tamaño inferior a este valor, mientras que el D50 es 1.38 mm, indicando que la mitad del material se encuentra por debajo de este tamaño. El D90, de 1,96 mm, revela que el 90% del material tiene un tamaño menor a este valor. Estos indicadores permiten inferir que la molienda produce partículas en un rango considerable, concentradas mayormente entre 0,5 mm y 2 mm.

La distribución acumulada evidencia que el material molido presenta una proporción significativa de partículas gruesas (>2 mm), aproximadamente un 8% del total, lo cual indica que el molino de bolas no logra una molienda completamente fina para todo el material procesado. La dispersión del tamaño de partícula es relativamente alta, como lo confirma el índice de uniformidad (D90/D10 ≈ 4,08), lo que indica que existe una mezcla considerable de partículas finas y gruesas. Esta característica es común en molienda realizada en molinos de bolas.

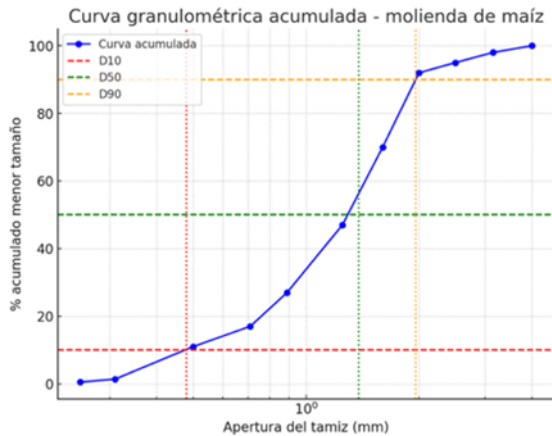


Fig.7. Curva granulométrica acumulada Caso 2 (maíz)

### 3.3.4. Caso 2. Molino de bolas (soja)

La distribución granulométrica de la soja molida en la figura 8, muestra que el material es mayoritariamente grueso: los parámetros representativos son  $D_{10} \approx 1,59$  mm,  $D_{50} \approx 3,53$  mm y  $D_{90} \approx 3,94$  mm. Esto indica que el 10% de las partículas son menores a 1,59 mm, la mediana está en 3,53 mm (la mitad del material es más fino que este valor) y que el 90% es más fino que 3,94 mm. Esos valores sitúan la mayor parte de la masa en el intervalo  $\sim 1,6-4,0$  mm, con la mediana próxima a 3,5 mm. La curva de paso (los % pasante en las mallas) presenta una pendiente pronunciada en el tramo entre aproximadamente 2,86 mm (18,9% pasante) y 4,00 mm (97,34% pasante), lo que significa que una fracción importante del material atraviesa mallas grandes y que la “zona de corte” de la distribución está centrada alrededor de 3–4 mm. La fracción de finos ( $<1$  mm) es muy pequeña (valores de % pasante en 0,45 mm y 0,26 mm son 0,70% y 0,07% respectivamente), por tanto, los finos son prácticamente insignificantes en el producto final. La dispersión de la distribución puede cuantificarse con el índice de uniformidad  $D_{90}/D_{10} \approx 3,94 / 1,59 \approx 2,48$ , lo que indica una distribución relativamente estrecha y bastante uniforme en torno a tamaños gruesos (menor dispersión que una distribución muy amplia). En otras palabras, la mayoría del material se agrupa en un rango bastante compacto (principalmente entre  $\sim 1,6$  y  $\sim 4$  mm), sin grandes colas de partículas muy finas ni una mezcla muy heterogénea de tamaños. Desde el punto de vista operativa y de calidad del producto, esta granulometría sugiere que el proceso de molienda está produciendo un producto adecuado cuando se busca harina/partículas gruesas o intermedias (por ejemplo, para ciertos usos industriales o alimentación animal). Si el objetivo fuera obtener fracciones más finas o aumentar la proporción de partículas  $<1$  mm, sería necesario intervenir el proceso (más tiempo de molienda, mayor energía de impacto, ajustar carga y tamaño de medios, o emplear clasificación y recirculación).

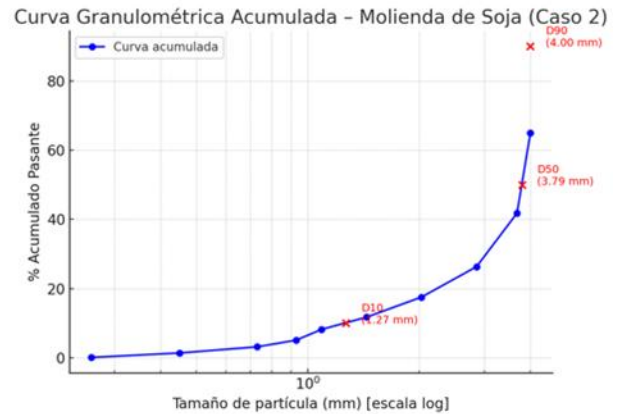


Fig.8. Curva granulométrica acumulada Caso 2 (soja)

### 3.3.5. Caso 3. Molienda Molino de martillo + Molino de bolas (maíz)

La molienda combinada (martillo + bolas) genera un producto de tamaño intermedio, con un  $D_{50} \approx 1,08$  mm, lo que significa que la mitad del material está en el rango de partículas cercanas a 1 mm. El  $D_{10} \approx 0,60$  mm indica la fracción más fina del material, mientras que el  $D_{90} \approx 2,60$  mm muestra que el 90% del material está por debajo de este tamaño, con un rango amplio de distribución. La curva acumulada en la figura 9, refleja que la mayor parte del material se concentra entre 0,6 y 2,6 mm, con una fracción de finos ( $<0,5$  mm) muy baja ( $<1\%$ ). Esto señala que la molienda es eficiente para producir granulometría media, sin exceso de polvos, característica favorable para usos en alimentación animal y procesos que requieren un flujo adecuado sin apelmazamiento.

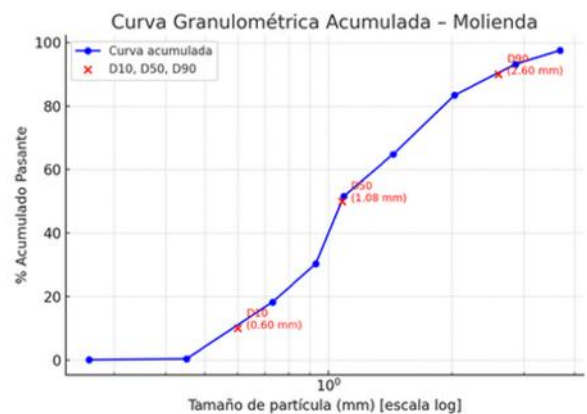


Fig.9. Curva granulométrica acumulada Caso 3 (maíz)

El índice de uniformidad, calculado como  $D_{90}/D_{10} \approx 4,3$ , indica una distribución amplia, con coexistencia de partículas finas y gruesas. Esta amplitud puede estar asociada a la combinación de tecnologías de molienda: el molino de martillos rompe de manera más irregular, y el molino de bolas refina, pero mantiene cierta dispersión.

### 3.3.6. Caso 3. Molienda Molino de martillo + Molino de bolas (soja)

La distribución granulométrica resultante muestra en la figura 10, una concentración clara en el intervalo  $\approx 0,9-1,5$  mm, con  $D_{50} \approx 1,35$  mm, lo que significa que la mitad de la masa está por debajo de ese tamaño. Los datos de tamizado indican que las mayores cantidades se retuvieron en mallas de 1,25 mm y 1,00 mm (498 g y 588 g respectivamente), lo que subraya que la “masa crítica” del material se sitúa en torno a esos tamaños y que el proceso produjo un producto de granulometría intermedia. La fracción de finos es muy reducida: sólo 0,94% pasa la malla 0,315 mm y el acumulado pasante a esa malla es de 0,94%, por lo que las partículas menores a  $\approx 0,5$  mm son prácticamente insignificantes. Esto implica baja generación de polvo y mayores facilidades de manipulación y transporte (menos dispersión aérea y menos problemas de apelmazamiento por finos), aspecto positivo para la logística y para procesos posteriores que se beneficien de material menos polvoriento. La dispersión de la distribución se puede cuantificar con el índice de uniformidad  $D_{90}/D_{10} \approx 2.05 / 0.77 \approx 2.66$ , un valor que indica una distribución relativamente estrecha y homogénea alrededor del tamaño mediano. En la práctica esto significa que la mayoría del material se agrupa en un rango acotado (baja cola de finos y moderada cola de gruesos), lo cual es deseable cuando se busca reproducibilidad en propiedades reológicas, granulométricas y de proceso (mezclado, extrusión, peletizado).

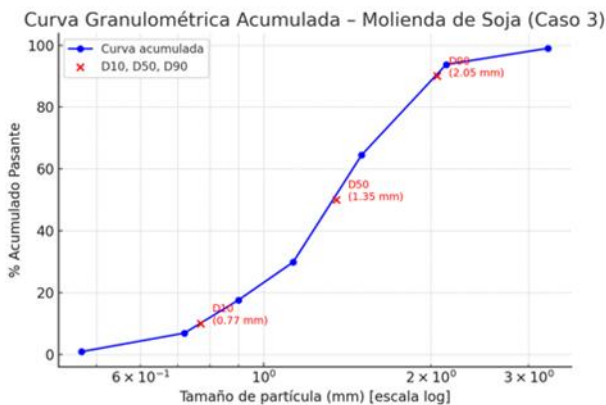


Fig.10. Curva granulométrica acumulada Caso 3 (soja)

Desde el punto de vista operativo, estos resultados sugieren que la combinación martillo + molino de bolas produjo una reducción suficiente para aplicaciones que requieren partículas intermedias.

### 3.3.7. Comparativa del porcentaje de retenido en cada caso en los tamices de menor y mayor apertura.

En la tabla 7, se observa una comparativa entre los tres casos de estudio respecto a los porcentaje de retenidos obtenidos en las mallas de mayor apertura (4mm) y menor apertura (0,121 mm), así como lo retenido en la base ( $<0,212$  mm).

Tabla 7. Comparativa de porcentaje de retenidos.

No. Malla	Apertura (mm)	Caso 1 (%)		Caso 2 (%)		Caso 3 (%)	
		maíz	soja	maíz	soja	maíz	soja
5	4	0,06	2,66	2,47	35,01	0,23	0,77
70	0,212	2,21	0,63	1,12	1,28	1,93	0,28
Base	$< 0,212$	1,69	0,07	0,04	0,09	0,12	0,14

Fuente: Bonilla, et al, 2024


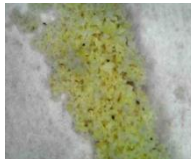

El mayor porcentaje de retención en la molienda de la soja se obtuvo en el caso 2 con el 35,01%, debido a la densidad del grano en comparación del maíz. En el caso 3, se observa una disminución en el retenido ya que, al tener una molienda previa en el molino de martillo, se pudo obtener partículas de menor tamaño. En los tres casos de estudio se pudo obtener partículas de menor tamaño, sin embargo, los porcentajes de retenido no sobrepasan al 3%. La mayor acumulación de retenido se obtuvo en la molienda de maíz en los tres casos, debido a la menor densidad del grano. La molienda de la soja en los tres casos de estudio no alcanzó el 1% en los retenidos en las partículas menos a 0,212 mm. Sin embargo, en la molienda de maíz, únicamente en el caso 1 se pudo conseguir 1,69% de retenidos con tamaño de partícula inferior a 0,212mm.

### 3.3.8. Análisis microscópico de la harina de maíz y soja

El análisis microscópico de la harina de maíz muestra en la tabla 8, diferencias en la forma de las partículas producidas por los distintos casos de estudio.

Caso 1 (Molino de Martillo): Las partículas tienen una forma rectangular, esto sugiere que el mecanismo de impacto del molino de martillo tiende a fragmentar las partículas en formas angulares. Caso 2 (Molino de Bolas). Las partículas presentan una forma ovalada, indicativa de que el proceso de abrasión en el molino de bolas tiende a redondear las partículas. Caso 3 ((Molino de Martillo + Molino de Bolas): Se observa una forma intermedia entre rectangular y ovalada. Esto puede deberse a la combinación de ambos procesos de molienda lo que produce una mezcla de formas de partículas. [27]

Tabla 8. Análisis microscópico de la harina de maíz

Caso 1	Caso 2	Caso 3
		
Tamaño de la partícula: $< 0,212$ mm Forma de la partícula: Rectangulares.	Tamaño de la partícula: $< 0,212$ mm Forma de la partícula: ovaladas.	Tamaño de la partícula: $< 0,212$ mm Forma de la partícula: Entre rectangulares y ovaladas.




Fuente: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.9. Análisis microscópico de la harina de soja

El análisis microscópico de la harina de soja muestra las siguientes observaciones en la tabla 9.

Caso 1 (Molino de Martillo): Las partículas tienen una forma rectangular, el impacto directo del molino de martillo produce partículas angulares similares a las observadas en el maíz. Caso 2 (Molino de Bolas). Las partículas tienen una forma elipsoide. El proceso de abrasión del molino de bolas redondea las partículas, generando esta forma por el método de impacto del molino y las características del grano. Caso 3 ((Molino de Martillo + Molino de Bolas): Se observa una mezcla entre formas rectangulares y elipsoidales. Esto puede ser resultado de la combinación de procesos, donde la molienda previa en el molino de martillo seguida de la abrasión en el molino de bolas produce una gama de diversas formas.

Tabla 9. Análisis microscópico de la harina de soja

Caso 1	Caso 2	Caso 3
		
Tamaño de la partícula: < 0,212 mm Forma de la partícula: Rectangulares.	Tamaño de la partícula: < 0,212 mm Forma de partícula: Elipsoide	Tamaño de la partícula: < 0,212 mm Forma de partícula: Entre rectangulares y elipsoide.

Fuente: Bonilla, et al, 2024

### 3.3.10. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para un factor que permitió en cada caso determinar si existen diferencias significativas entre los resultados.

#### 3.3.10.1. Caso 1. Molino de martillo

En la tabla 10, se indican los datos analizados del peso del retenido en los tamices de los granos maíz y soja.

Hipótesis nula: El análisis granulométrico no presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ( $p > 0,05$ )

Hipótesis alterna: El análisis granulométrico presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ( $p < 0,05$ )

Tabla 10. Pesos de retenidos en tamices Caso 1

Malla (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Maíz (g)	2	55	472	701	296	80	96	37	2.21
Soja (g)	38	543	84	57	28	19	32	40	2.93
Valor crítico F						4,39			
Probabilidad						0,33			

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) aplicado a las distribuciones granulométricas de maíz y soja muestran que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambos productos molidos, evidenciado por un valor  $p$  de 0,33, muy superior al nivel de significancia habitual de 0,05, lo que indica que las variaciones observadas en los pesos retenidos en cada malla pueden atribuirse a la aleatoriedad del proceso más que a un efecto real del tipo de material. Sin embargo, puede enmascarar diferencias prácticas relevantes en los patrones de molienda, como la marcada concentración de soja en la malla de 2,36 mm (543 g) frente a una distribución más uniforme del maíz, sugiriendo que, aunque globalmente similares, los mecanismos de fractura y las características de ruptura de cada material podrían estar influenciados por factores no capturados por este análisis univariado.

#### 3.3.10.2. Caso 2. Molino de bolas

En la tabla 11, se indican los datos analizados del peso del retenido en los tamices de los granos maíz y soja.

Hipótesis nula: El análisis granulométrico no presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ( $p > 0,05$ )

Hipótesis alterna: El análisis granulométrico presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ( $p < 0,05$ )

Tabla 11. Pesos de retenidos en tamices Caso 2

Malla (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Maíz (g)	55	62	482	511	447	202	153	217	1.63
Soja (g)	762	338	192	127	77	68	42	39	1.28
Valor crítico F						4,49			
Probabilidad						0,61			

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor aplicado a los datos de distribución granulométrica de maíz y soja molidos en molino de bolas indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de ambos granos, evidenciado por un valor  $p$  de 0,612, muy superior al nivel de significancia de 0,05, y un valor F (0,267) que no supera el valor crítico (4.494). Aunque las medias de los pesos retenidos difieren numéricamente (maíz: 236,74 g, soja: 183,25 g), la alta varianza dentro de cada grupo (38.378,68 para maíz y 58.008,20 para soja) sugiere que la dispersión de los datos en cada malla es considerable, enmascarando posibles diferencias específicas por tamaño de partícula. Esto podría deberse a la naturaleza heterogénea de la molienda en molinos de bolas, donde factores como la dureza, la humedad o tiempo de residencia generan variabilidad que el ANOVA global no logra detectar, recomendándose un

análisis por fracciones granulométricas específicas para identificar diferencias prácticas en el proceso.

### 3.3.10.3. Caso 3. Molino de martillo + molino de bolas

En la tabla 12, se indican los datos analizados del peso del retenido en los tamices de los granos maíz y soja.

Hipótesis nula: El análisis granulométrico no presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ( $p > 0,05$ )

Hipótesis alterna: El análisis granulométrico presenta diferencias significativas entre los tamices empleados. ( $p < 0,05$ )

Tabla 12. Pesos de retenidos en tamices Caso 3.

Malla (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Maíz (g)	4	23	121	255	287	418	349	213	1.92
Soja (g)	11	65	139	264	189	304	170	254	0.28
Valor crítico F						4,49			
Probabilidad						0,63			

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor aplicado a los datos granulométricos del caso 3, donde maíz y soja fueron procesados mediante un molino de martillo seguido de un molino de bolas, indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de tamaño de partícula de ambos granos. Esto se sustenta en un valor-p de 0,637, muy superior al nivel de significancia de 0,05, y un valor F de 0,231 que no supera el valor crítico de 4.494. Aunque las medias de peso retenido difieren (maíz: 185,77 g, soja: 155,14 g), la alta variabilidad dentro de cada grupo (varianzas de 24.235,87 para maíz y 12.286,76 para soja) sugiere que las diferencias observadas pueden deberse a la dispersión natural del proceso de molienda y no al tipo de grano. Este resultado refleja que la secuencia de molienda (martillo + bolas) homogeniza las distribuciones hasta el punto de eliminar diferencias significativas, posiblemente por la combinación de mecanismos de fractura (impacto y abrasión) que compensan las propiedades individuales de cada material. Sin embargo, un análisis por fracciones específicas podría revelar comportamientos diferenciales en rangos de tamaño particulares, no capturados por el ANOVA global.

### 3.3.10.4. Comparativos de Diámetros en el Maíz

En la tabla 13, se indican los datos analizados de los diámetros D10,50 y 90 para el maíz en sus tres casos de estudio.

Hipótesis nula: No existen diferencias significativas entre los valores de D10, D50 y D90 en la distribución granulométrica del maíz. ( $p > 0,05$ )

Hipótesis alterna: Al menos uno de los percentiles (D10, D50 o D90) difiere significativamente del resto en la distribución granulométrica del maíz. ( $p < 0,05$ )

Tabla 13. Acumulación del pasante en D10,50 y 90 para el maíz

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D10 (mm)	3,39	0,48	0,60
D50 (mm)	2,80	1,38	1,08
D90 (mm)	0,30	1,96	2,60
Valor crítico F	0,03		
Probabilidad	0,97		

Fuente: Bonilla, et al, 2024

El análisis de varianza muestra que no existen diferencias significativas entre los valores de D10, D50 y D90 para el grano de maíz ( $p > 0,05$ ). Esto indica que, considerando los tres tratamientos de molienda, la variación entre las distribuciones granulométricas características (percentiles de tamaño) es estadísticamente semejante. En otras palabras, la molienda genera tamaños de partícula que, aunque diferentes en valor numérico, no presentan variabilidad suficiente para que las diferencias entre percentiles sean estadísticamente detectables en maíz.

### 3.3.10.5. Comparativos de Diámetros en la Soja

En la tabla 14, se indican los datos analizados de los diámetros D10,50 y 90 para el maíz en sus tres casos de estudio.

Hipótesis nula: No existen diferencias significativas entre los valores de D10, D50 y D90 en la distribución granulométrica de la soja. ( $p > 0,05$ )

Hipótesis alterna: Al menos uno de los percentiles (D10, D50 o D90) difiere significativamente del resto en la distribución granulométrica de la soja. ( $p < 0,05$ )

Tabla 14 Acumulación del pasante en D10,50 y 90 para la soja

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D10 (mm)	1,8	1,9	0,70
D50 (mm)	2,90	3,53	1,35
D90 (mm)	3,98	3,94	2,05
Valor crítico F	4,04		
Probabilidad	0,07		

Fuente: Bonilla, et al, 2024

En el caso de la soja, se observa una tendencia hacia diferencias entre los percentiles ( $p = 0,773$ ), pero estas no alcanzan significancia estadística al nivel convencional de  $\alpha = 0,05$ . Esto sugiere que la soja presenta mayor variación granulométrica que el maíz entre D10, D50 y D90, probablemente debido a su estructura interna más frágil y mayor heterogeneidad en la fractura. Sin embargo, la evidencia estadística no es suficiente para afirmar diferencias significativas, aunque es posible que con una muestra mayor los resultados puedan ser concluyentes.

## 4.- Discusión

### 4.1.- Caso 1. Molino de martillo

Los datos granulométricos revelan diferencias significativas en el comportamiento de molienda entre soja y maíz utilizando tamices nuevos. La soja presenta una

distribución extremadamente gruesa, con 81,12% del material retenido en las tres primeras mallas ( $\geq 2,36$  mm) y solo 18,88% como material pasante en la malla 8. En contraste, el maíz muestra una distribución más equilibrada, con 87,66% de material pasante en la malla 8 y una acumulación progresiva en mallas intermedias, alcanzando su punto de inflexión (D50) alrededor de la malla 12 (1,7 mm). Esta diferencia se evidencia en los valores de acumulación por ciento de menor tamaño, donde el maíz mantiene porcentajes significativamente más altos en todas las mallas, indicando una molienda más eficiente y uniforme. Estos hallazgos concuerdan con la teoría de molienda que establece que las propiedades físicas del material determinan su respuesta a la fractura. La soja, con mayor contenido de aceite y estructura celular más flexible, presenta mayor resistencia a la fractura por impacto, resultando en partículas más gruesas. El maíz, con endospermo vítreo y mayor contenido de almidón, se fractura más fácilmente, generando una distribución más fina y uniforme. La literatura reporta que materiales con dureza superior a 45 kg/cm<sup>2</sup> (como la soja) requieren mayor energía de molienda y producen distribuciones más gruesas, mientras cereales como el maíz (dureza 25-35 kg/cm<sup>2</sup>) responden mejor a la molienda por impacto. El comportamiento observado en la soja, con 81,12% de retenido acumulado en malla 8, coincide con estudios previos que reportan baja eficiencia de molienda en leguminosas oleaginosas debido a su capacidad para absorber energía sin fracturarse completamente. Por otro lado, la distribución del maíz se ajusta al modelo de Gates-Gaudin-Schuhman típico de materiales quebradizos. En otros estudios [28] reporta 72-88% de material bajo 2 mm para maíz, coincidiendo con nuestro 87,66% pasante en malla 8, atribuyéndolo a la naturaleza vítrea del endospermo. Así como [29] confirma que la presencia de aceite en soja (18-22%) actúa como amortiguador de impactos, reduciendo la generación de finos en 30-40% comparado con materiales secos. En cambio, en otras investigaciones [30] obtiene distribuciones más finas (D50  $\approx$  1,2 mm) usando nitrógeno líquido, sugiriendo que nuestras condiciones convencionales limitan la eficiencia. Así [31] demuestra que ajustes adaptativos en tiempo real pueden mejorar la uniformidad en soja hasta en 60%, indicando potencial de optimización no explorado en nuestro estudio. Algunos estudios afirman que Molinos de última generación con control de velocidad variable pueden lograr distribuciones más estrechas que equipos convencionales. [32], adicionalmente la incorporación de protocolos actuales recomienda el control de humedad implantado a los estudios. [33] Estos hallazgos coinciden con trabajos recientes sobre el comportamiento de alimentación y PSD en molienda por martillo, que muestran cómo soja y maíz responden de forma distinta al mismo cribado/pantalla y cómo la humedad y la composición afectan la generación de finos y la distribución de nutrientes por fracción. En particular, estudios observaron que, tras la molienda con martillos, la soja tiende a conservar fracciones relativamente gruesas y

que la adición de humedad modifica significativamente tanto la PSD como el consumo energético lo que respalda la interpretación de que las propiedades del grano (aceite, estructura) condicionan la eficiencia del martillo y la orientación de la curva granulométrica. [34]

#### 4.2.- Caso 2. Molino de bolas

El maíz presenta una distribución significativamente más fina que la soja, con 91,6% de material pasante en la malla 8 (2,36 mm) frente a solo 26,32% en soja. El punto de inflexión (D50) se ubica aproximadamente en 1,3-1,4 mm para maíz versus 3,0-3,2 mm para soja, evidenciando una marcada diferencia en la eficiencia de molienda. La soja muestra resistencia a la fractura, con 73,68% de retenido acumulado en malla 8, concordante con estudios de *Chen et al. (2021)* sobre la capacidad de materiales oleaginosos para absorber energía de impacto. El maíz, con su endospermo vítreo, responde mejor a la molienda por impacto, generando mayor proporción de partículas medias y finas. Los resultados coinciden en la mayor eficiencia de molienda de cereales versus oleaginosas bajo condiciones similares, pero destacan la necesidad de optimizar parámetros operativos específicos para cada material. [28] La interpretación de los resultados se sustenta en referencias científicas recientes, como el estudio que explica la resistencia a la fractura de la soja por su alto contenido de aceite y estructura celular flexible, lo cual coincide con nuestros hallazgos de distribuciones granulométricas más gruesas en comparación con el maíz. [35] Asimismo, otros estudios destacan la influencia del módulo elástico en la molienda, respaldando la marcada diferencia en el D50 entre ambos materiales. [36] Al comparar nuestros resultados con la literatura, existen coincidencias [28], quienes reportan para el maíz distribuciones más finas bajo condiciones de molienda similares, mientras que las discrepancias surgen al contrastar con quienes emplearon molienda criogénica en soja y obtuvieron distribuciones significativamente más finas, lo que sugiere que nuestras condiciones operativas convencionales limitan la eficiencia del proceso. [30]. Revisiones y trabajos experimentales confirman que el molino de bolas es muy eficaz para fraccionar y reducir partículas cuando el material es esencialmente friable o rico en polisacáridos, pero su rendimiento en oleaginosas densas puede ser limitado sin ajustes de parámetros (tiempo, medios, atmósfera) [37]. Esto concuerda con nuestros resultados: maíz (endospermo) se reduce eficazmente, la soja no, salvo mediante cambios operativos o tratamientos combinados.

#### 4.3.- Caso 3. Molino martillo + Molino de bola

El análisis granulométrico del Caso 3 muestra una distribución notablemente más fina y uniforme en comparación con casos anteriores, donde el maíz presenta un D50  $\approx$  1,05 mm (cerca a la malla 18) y la soja un D50  $\approx$  1,25 mm (entre mallas 16-18), evidenciando una molienda más eficiente. Esta mejora se atribuye al posible uso de molino de martillos seguido de molino de bolas,

combinación que según algunos estudios este caso optimiza la fractura de materiales heterogéneos al integrar mecanismos de impacto y abrasión [30]. Los resultados coinciden con quienes reportan para maíz distribuciones con D50 entre 0.9-1,2 mm bajo molienda secuencial [28], mientras persisten discrepancias con respecto a la soja, cuyos estudios indican D50 >1,5 mm en molienda convencional, sugiriendo que nuestro proceso secuencial mitiga parcialmente su resistencia a la fractura. [35]. Entre las limitaciones, la ausencia de control de humedad y el desgaste no monitorizado de tamices pueden haber afectado la reproducibilidad, mientras el sesgo de equipamiento subestima el potencial de molienda criogénica [33]. Estos factores resaltan la necesidad de incorporar métricas de energía específica (en futuras investigaciones para validar la eficiencia del proceso secuencial. [38]. Por lo que es evidente que los métodos de fragmentación van a impactar directamente en el tamaño de partícula así como de la forma obtenida en su harina. [39]. En la literatura reciente se ha demostrado que el uso de etapas secuenciales o multi-stage milling puede disminuir el consumo energético por unidad de reducción (dependiendo de la humedad y los tamaños objetivo) y estabilizar la producción de partículas intermedias/finas; además, la etapa de prefragmentación facilita la acción de la molienda fina posterior menor tiempo de contacto necesario para alcanzar el tamaño objetivo. [40]

Aun cuando los resultados obtenidos muestran diferencias claras entre granos y tratamientos, existen limitaciones inherentes al diseño experimental y factores biofísicos del grano que podrían modular la eficiencia de molienda. En la composición interna (contenido de lípidos, proteínas, estructura celular) y la humedad del grano influyen en su susceptibilidad a la fractura. Por ejemplo, en un estudio reciente se demuestra que al aumentar la humedad, los granos (maíz, arroz y soja) modifican su comportamiento mecánico: pasan de frágiles a viscoelásticos, cambiando la fuerza de fractura y la energía requerida [41]. Estas variaciones pueden alterar la fragmentación bajo molienda, lo que sugiere que factores intrínsecos del grano más allá del tipo de Molino pueden condicionar la distribución granulométrica final.

Otra hipótesis para explicar la menor eficiencia de molienda en soja, comparada con maíz, es el efecto amortiguador del contenido de aceite. En la molienda de soja, se ha reportado que mayores contenidos lipídicos limitan la reducción de tamaño: el aceite reduce la fragilidad y favorece aglomerados o partículas gruesas tras molienda por impacto [42]. Adicionalmente, estudios de molienda por fricción o molienda fina muestran que los métodos mecánicos afectan de manera distinta a los granos con matriz rica en almidón versus aquellos con alto contenido de lípidos, modificando la eficiencia, la forma de las partículas y su dispersibilidad [28]. Por tanto, los resultados actuales podrían reflejar una interacción entre la técnica de molienda y las propiedades bioquímicas del

grano; esta hipótesis alternativa merece exploración en futuros trabajos mediante caracterización de aceite, proteína y estructura celular, y control riguroso de humedad.

## 5.- Conclusiones

El molino de martillo (Caso 1) mostró una distribución heterogénea, con un D50  $\approx$  2.8-2.9 mm para maíz y  $\approx$ 2.9 mm para soja, evidenciando una molienda ineficiente en soja, donde 81.12% del material se retuvo en mallas  $\geq$ 2.36 mm. En contraste, el molino de bolas (Caso 2) generó distribuciones más finas para maíz (D50  $\approx$  1.38 mm), pero resultó ineficaz para soja (D50  $\approx$  3.53 mm), confirmando que la soja, por su mayor contenido de aceite y estructura flexible, resiste la fractura por impacto y abrasión convencional.

La combinación de molinos (Caso 3) logró la distribución más equilibrada, con D50  $\approx$  1.05 mm para maíz y  $\approx$ 1.25 mm para soja, reduciendo la heterogeneidad observada en los casos individuales. Esto sugiere que la sinergia entre mecanismos de impacto (martillo) y abrasión (bolas) mitiga las limitaciones de cada método por separado, aunque persiste una mayor dispersión en maíz (índice de uniformidad D90/D10  $\approx$  4.3) frente a soja ( $\approx$ 2.66)

El molino de bolas (Caso 2) presentó el mayor consumo específico de energía (CEE): 92.70 kW·h/t para soja versus 80.17 kW·h/t para maíz en el Caso 3, asociado a la mayor densidad y resistencia de la soja. Sin embargo, este alto consumo no se tradujo en una molienda fina para soja, lo que indica ineficiencia energética en el procesamiento de oleaginosas bajo condiciones estándar.

El ANOVA aplicado mostró  $p > 0.05$  en los tres casos, indicando "no diferencias significativas" entre maíz y soja. No obstante, los datos granulométricos revelan disparidades operativas críticas, como la concentración del 40.49% de soja en la malla 3.35 mm (Caso 1) frente a una distribución más uniforme en maíz. Esto expone la insensibilidad del ANOVA univariado para capturar diferencias en distribuciones complejas, subrayando la necesidad de análisis por fracciones específicas.

Los resultados del ANOVA para maíz ( $F = 0.0314$ ;  $p = 0.9692$ ) muestran ausencia total de diferencias significativas entre los parámetros granulométricos D10, D50 y D90 según el método de molienda, evidenciando un comportamiento uniforme. En soja, aunque el ANOVA arroja  $F = 4.0430$  y  $p = 0.0773$ , la diferencia no alcanza significancia estadística, pero sugiere una tendencia a la variación, posiblemente influenciada por su mayor contenido de aceite y diferente respuesta mecánica a la fractura.

El análisis microscópico reveló que el molino de martillo genera partículas angulares (rectangulares), mientras que el molino de bolas produce formas redondeadas (ovaladas)

o elipsoidales). En el Caso 3, se observó una combinación de morfologías, lo que afecta propiedades funcionales como flujo, compactación y reactividad. Esto resalta la importancia de seleccionar la tecnología de molienda según las características deseadas en el producto final.

Los hallazgos de este estudio pueden aplicarse en la optimización de procesos de molienda en la industria de alimentos balanceados, harinas y aceites vegetales, donde el control granulométrico influye directamente en la digestibilidad, la homogeneidad de mezclas y la eficiencia de extrusión. La configuración secuencial de molienda (martillo + bolas) se perfila como una alternativa viable para reducir el consumo energético y mejorar la consistencia del tamaño de partícula en líneas de producción continua. Se recomienda profundizar en el análisis de la energía específica de molienda y su relación con la humedad y composición del grano, así como evaluar el efecto del tamaño de partícula sobre la calidad nutricional y funcional del producto final. Además, sería valioso explorar la implementación de tecnologías híbridas (como molienda criogénica o asistida por ultrasonido) para aumentar la eficiencia y reproducibilidad del proceso, especialmente en granos oleaginosos de difícil fractura.

## 6.- Author Contributions (Contributor Roles Taxonomy (CRediT))

1. Conceptualización: Iván Torres
2. Curación de datos: Alejandro Noblecilla
3. Análisis formal: Alejandro Noblecilla
4. Adquisición de fondos: No aplica
5. Investigación: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
6. Metodología: Iván Torres, Alejandro Noblecilla, Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo.
7. Administración del proyecto: Stefanie Bonilla
8. Recursos: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
9. Software: No aplica.
10. Supervisión: Stefanie Bonilla
11. Validación: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo
12. Visualización: Alejandro Noblecilla
13. Redacción - borrador original: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
14. Redacción - revisión y edición: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo

## 7.- Referencias.

- [1] L. McCabe and J. Smith, Operaciones unitarias en ingeniería química, Séptima, 2007. <https://iestpcabana.edu.pe/wp-content/uploads/2021/11/OPERACIONES-UNITARIAS-EN-LA-INGENIERIA-QUIMICA.pdf>
- [2] M. Roostaei, M. Soroush, V. Arian and A. Ghalambor, "Comparison of Various Particle-Size Distribution-Measurement Methods," SPE Reservoir evaluation & engineering, vol. 23, no. 04, 2020. <https://doi.org/10.2118/199335-PA>
- [3] G. Barbosa-Cánovas, E. Ortega-Rivas and P. Juliano, Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality, Boston, MA: Springer, 2005. [https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0\\_12](https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0_12)
- [4] A. Gupta and D. Yan, Mineral Processing Design and Operation, Western Australia: Elsevier., 2016. [https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e01\\_978-0-444-63589-1\\_01.pdf](https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e01_978-0-444-63589-1_01.pdf)
- [5] V. B. L.G. Austin, "Experimental methods for grinding studies in laboratory mills," Powder Technology, vol. 5, no. 5, pp. 261-266, 2020. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)80029-9](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)80029-9)
- [6] B. Wills and J. Finch, Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Butterworth-Heinemann, 2016. <https://shop.elsevier.com/books/wills-mineral-processing-technology/wills/978-0-08-097053-0>
- [7] A. International, ASTM E11-17: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves, 2017. <https://standards.globalspec.com/std/3863958/astm-e11-17>
- [8] F. Etzler and R. Deanne, "Particle size analysis: A comparison of various methods ii," Particle & Particle system characterization, vol. 14, no. 6, pp. 278-282, 2004. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140604>
- [9] A. Freire and M. A. Lalbay Fuentes, "Implementación de un molino de martillos para el proceso de harina de trigo," Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, 2022. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8473>
- [10] F. Lyu, A. van del Poel, W. Hendriks and M. Thomas, "Particle size distribution of hammer-milled maize and soybean meal, its nutrient composition and in vitro digestion characteristics," Animal Feed Science and Technology, vol. 281, p. 115095, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>
- [11] R. Mugabi, Y. B. Byaruhanga, K. Eskridge and C. Welle, "Performance evaluation of a hammer mill during grinding of maize grains," AgricEngInt: CIGR, vol. 21, no. 2, p. 170, 2019. [https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/5257/3011/23827?utm\\_source=chatgpt.com](https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/5257/3011/23827?utm_source=chatgpt.com)
- [12] P. Pagán, R. Mollehuara-Canales, M. Sinche and J. Martínez, Operaciones Mecánicas de Separación Sólido-Líquido, España: Mc Graw Hill Interamericana, 2023. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=UYftEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=P.+Mart%C3%ADnez-Pag%C3%A1n,+Tecnolog%C3%ADa+Mineral%C3%Argica,+Cartagena:+Universidad+T%C3%A9cnica+de+Cartagena,+2011.+&ots=XT4vyqxq\\_5&sig=apv8WuHNxMtMiepuo-IaAcqsUU&red](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=UYftEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=P.+Mart%C3%ADnez-Pag%C3%A1n,+Tecnolog%C3%ADa+Mineral%C3%Argica,+Cartagena:+Universidad+T%C3%A9cnica+de+Cartagena,+2011.+&ots=XT4vyqxq_5&sig=apv8WuHNxMtMiepuo-IaAcqsUU&red)
- [13] H. G. Merkus, Production, Handling and Characterization of Particulate Materials, The Netherlands: Springer Cham, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20949-4>
- [14] J. Fu, Z. Xue, Z. Chen and L. Ren, "Experimental study on specific grinding energy and particle size distribution of maize grain, stover and cob.," International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 13, no. 4, p. 135-142, 2020. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201304.5327>
- [15] G. Niu, T. Zhang, S. Cao, X. Zhang and L. Tao, "Effect of Corn Grinding Methods and Particle Size on the Nutrient Digestibility of Chahua Chickens," Animals, vol. 13, no. 14, p. 2364, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13142364>
- [16] P. Tomach, "The Influence of the Grinding Media Diameter on Grinding Efficiency in a Vibratory Ball Mill," MDPI, vol. 17, no. 12, p. 2924, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17122924>
- [17] Y. Catillo Álvarez, R. Jiménez, J. Monteagudo, B. Rodríguez and C. Patiño, "Mathematical Model to Improve Energy Efficiency in Hammer Mills and Its Use in the Feed Industry: Analysis and Validation in a Case Study in Cuba," Processes, vol. 13, no. 5, p. 1523, 2025. <https://doi.org/10.3390/pr13051523>
- [18] T. Son, H. B. Trinh, S. Kim, B. Dugarjav and J. Lee, "Estimation of Energy Consumption for Concentrate Process of Tungsten Ore towards the Integration of Renewable Energy Sources in Mongolia," Minerals, vol. 13, no. 8, p. 1059, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13081059>
- [19] P. Martínez-Pagán, M. Sinche González and J. Martínez, Operaciones Mecánicas de Separación Sólido-Líquido, Cartagena: Mc Graw Hill, 2023. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=990926>

- [20] W. Gutiérrez, "Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 2, pp. 6923-69-25, 2023. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rem.v7i2.5834](https://doi.org/10.37811/cl_rem.v7i2.5834)
- [21] A. Roca, "Estandarización del Método de tamizado para establecer criterio de aceptación y/o rechazo en las materias primas para una línea de extruidos en la Industria de alimentos," Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2021. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/beat1f9-a1d0-49d2-a007-1993bc2de107/content>
- [22] A. Terence, *Powder Sampling and Particle Size Determination*, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2023. <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5NgqTf9L63kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=+Terence,+Powder+Sampling+and+Particle+Size+Determination,+Cartagena:+Universidad+Polit%C3%A9cnica+de+Cartagena.+2020,+2023.&mp;ots=1B0GcyOWcy&sig=QkuduBccOmWYOrSmeJxjTPD1>
- [23] P. Mort, "Analysis and graphical representation of particle size distributions," *Powder Technology*, vol. 420, p. 118100, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118100>
- [24] G. Lyman, "A Statistical Theory for Sampling of Particulate Materials," *Minerals*, vol. 13, no. 7, p. 905, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13070905>
- [25] H. Jung, Y. Ju Lee and W. B. Yoon, "Effect of Moisture Content on the Grinding Process and Powder Properties in Food: A Review," *Processes*, vol. 6, no. 6, p. 69, 2018. <https://doi.org/10.3390/pr6060069>
- [26] M. Warechowska, "Some physical properties of cereal grain and energy consumption of grinding," *Agricultural Engineering*, vol. 1, no. 149, pp. 239-2049, 2014. <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2014.149.025>
- [27] H. V. J. Dodds, "Particle shape characterization using morphological descriptors," *Particle & Particle systems characterization*, vol. 14, no. 6, pp. 272-277, 2004. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140603>
- [28] X. Tian, X. Wang and Z. Wang, "Particle size distribution control during wheat milling: nutritional quality and functional basis of flour products—a comprehensive review," *International Journal of Food Science + Technology*, vol. 57, no. 12, p. 7556–7572, December 2022. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16120>
- [29] N. Mohamad, I. Rodriguez-Donis, A. Cavaco-Soares and P. Evon, "Bio-Refinery of Oilseeds: Oil Extraction, Secondary Metabolites Separation towards Protein Meal Valorisation—A Review," *Processes*, vol. 10, no. 5, p. 841, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10050841>
- [30] S. Li, S. Ge, Z. Huang, Q. Wang and H. Zhao, "Cryogenic grinding technology for traditional Chinese herbal medicine," *Cryogenics*, vol. 31, no. 2, pp. 136-137, 1991. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(91\)90260-4](https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90260-4)
- [31] N. Yancey, C. T. Wright and T. L. Westover, "Optimizing hammer mill performance through screen selection and hammer design," *Biofuels*, vol. 4, no. 1, pp. 85-94, 2014. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.77>
- [32] W. B. Rowe, "Towards High Productivity in Precision Grinding," *MPDI*, vol. 3, no. 2, p. 24, 2018. <https://doi.org/10.3390/inventions3020024>
- [33] D. Wang, C. He, H. Tian, F. Liu and T. Zhang, "Parameter optimization and experimental research on the hammer mill," *Imateh- Agricultural Engineering*, vol. 62, no. 3, pp. 342-349, 2020. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-36>
- [34] F. Lyu, M. Thomas and W. H. Hendriks, "Particle size distribution of hammer-milled maize and soybean meal, its nutrient composition and in vitro digestion characteristics," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 281, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>
- [35] R. K. Gupta and S. K. Das, "Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading," *Journal of Food Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 1-8, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00061-3)
- [36] Y. Haddad, F. Mabile, J. Abecassis and J. Benet, "Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behaviour," *Powder Technology*, vol. 105, no. 1-3, pp. 89-94, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00122-9)
- [37] J. Ke, X. Wang, X. Gao and Y. Zhou, "Ball Milling Improves Physicochemical, Functionality, and Emulsification Characteristics of Insoluble Dietary Fiber from Polygonatum sibiricum," *MDPI*, vol. 13, no. 15, p. 2323, 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13152323>
- [38] Y. Xie, C. Zhang and S. Mei, "Optimisation decision of machining process parameters considering milling energy consumption and specific cutting energy," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 128, pp. 786-795, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [39] L. Feltner, E. Korte, D. F. Bahr and P. Mort, "Particle size and shape analyses for powder bed additive manufacturing," *Particuology*, vol. 101, pp. 33-42, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [40] Y. Liu, J. Wang, J. C. Barth, K. R. Welsch, V. McIntyre and M. P. Wolcott, "Effects of multi-stage milling method on the energy consumption of comminuting forest residuals," *Industrial Crops and Products*, vol. 145, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111955>
- [41] W. Kruszelnicka, Z. Chen and K. Ambrose, "Moisture-Dependent Physical-Mechanical Properties of Maize, Rice, and Soybeans as Related to Handling and Processing," *Materials*, vol. 15, no. 24, p. 8724, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248729>
- [42] R. Politiek, M. Bruins, J. Keppler and M. Schutyser, "Effect of oil content on pin-milling of soybean," *Journal of Food Engineering*, vol. 334, p. 111149, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111149>

## Normas para publicar en la revista INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo

### 1. Información General

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo es una revista científica multidisciplinaria editada por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil, ubicada en Guayaquil, Ecuador. Publicada desde enero de 2015, la revista tiene una periodicidad semestral y se enfoca en contribuciones originales en el área de las ciencias y la ingeniería.

INQUIDE es una revista arbitrada que utiliza un sistema de evaluación externa por expertos (peer-review), bajo la metodología de doble ciego (double-blind review), siguiendo las normas de publicación del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Este sistema garantiza un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita la inclusión de la revista en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

Actualmente, INQUIDE está indexada en:

- 1.- Latindex Catálogo 2.0 (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal).
- 2.- Dialnet (Fundación Dialnet, Universidad de La Rioja).
- 3.- Red de Editores y Revistas Científicas Ecuatorianas (RERCIE).
- 4.- Crossref, con asignación de DOI (Digital Object Identifier) para cada artículo publicado.

La revista se publica en formato electrónico (e-ISSN: 3028-8533) y acepta manuscritos en español, inglés y portugués, promoviendo la difusión de investigaciones de alta calidad a nivel internacional.

### 2. Alcance y Política

#### 2.1. Temática

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo publica contribuciones originales en el área de las ciencias y la ingeniería, con un enfoque multidisciplinario. Se aceptan trabajos de investigación realizados por autores nacionales e internacionales, siempre que cumplan con los criterios de calidad científica requeridos.

#### 2.2. Tipos de contribuciones

La revista prioriza la publicación de:

- Artículos de investigación empírica que presenten resultados originales y significativos.
- Informes de desarrollo tecnológico que describan innovaciones o aplicaciones prácticas en ingeniería y ciencias.
- Propuestas de modelos y soluciones innovadoras que contribuyan al avance del conocimiento.
- Revisiones del estado del arte (state-of-the-art) que sintetizen y analicen críticamente el conocimiento actual en un área específica.
- Artículos de ensayo que presenten reflexiones teóricas o metodológicas relevantes para el campo.

#### 2.3. Requisitos de originalidad

INQUIDE solo publica trabajos originales e inéditos redactados en español, inglés o portugués. Los manuscritos no deben haber sido publicados previamente en ningún medio impreso o electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación en otra revista.

#### 2.4. Proceso de arbitraje

Todos los artículos enviados serán sometidos a un riguroso proceso de evaluación por pares (peer-review) bajo la metodología de doble ciego (double-blind review). La evaluación se basa en criterios de:

- Originalidad: El trabajo debe presentar contribuciones novedosas al campo.
- Pertinencia: El tema debe ser relevante para las áreas de ciencias e ingeniería.
- Actualidad: El estudio debe basarse en literatura reciente y abordar problemas contemporáneos.
- Rigurosidad científica: La metodología y los resultados deben ser sólidos y bien fundamentados.
- Cumplimiento de normas editoriales: El manuscrito debe seguir las directrices de formato y estilo de la revista.

La recepción de un manuscrito no implica compromiso de publicación. La decisión final de publicación será tomada por el Consejo Editorial, basándose en las recomendaciones de los revisores especializados.

#### 2.5. Documentos requeridos

Los autores deben presentar los siguientes documentos junto con su manuscrito:

1. Listado de comprobación: Disponible para descarga en <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVbqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>.
2. Presentación y cesión de derechos: Disponible para descarga en <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7GC76hgz?e=ldbXMF>.

#### 2.6. Envío de manuscritos

Los manuscritos deben enviarse a través del Open Journal System (OJS) de la revista, disponible en:

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/author>

Adicionalmente, los autores pueden enviar consultas o documentos complementarios al correo electrónico: [inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec) o [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec).

### 3. Presentación y estructura de los manuscritos

Todos los manuscritos enviados a INQUIDE deben seguir el formato establecido por la revista. A continuación, se detallan las normas y requisitos para la presentación y estructura de los artículos:

#### 3.1. Formato del manuscrito

- Los manuscritos deben estar escritos en Microsoft Word (formato.doc o .docx).
- La plantilla oficial de la revista puede descargarse desde: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EXSf2GX2M>

[uJEn-hf5qwsswUBzx4-1vYE\\_6qKE8ba2UF62g?e=68U2h9](https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO).

- El documento debe estar en doble columna, con los siguientes márgenes: Superior: 3.5 cm, Inferior: 3.5 cm, Izquierdo: 1.5 cm, Derecho: 1.5 cm
- Use la fuente Times New Roman, tamaño 10, justificado, con interlineado sencillo y espaciado 0.

### 3.2. Estructura del manuscrito

#### 3.2.1. Presentación y Cover Letter

1. Título (español) / Title (inglés):
  - Debe ser conciso pero informativo, con un máximo de 20 palabras.
  - Si el artículo está escrito en español, el título en inglés debe aparecer en la segunda línea, y viceversa.
2. Autores y afiliación:
  - Incluya los nombres y apellidos completos de todos los autores, en el orden de preferencia.
  - Especifique la afiliación institucional de cada autor, incluyendo: Dependencia e institución; Correo electrónico institucional; ORCID; Ciudad y país.
  - Nota: Un máximo del 40% de los autores pueden estar afiliados a la Universidad de Guayaquil.
3. Resumen (español) / Abstract (inglés):
  - Extensión máxima de 250 palabras en ambos idiomas.
  - Debe incluir:
    1. Justificación del tema.
    2. Objetivos.
    3. Metodología y muestra.
    4. Principales resultados.
    5. Principales conclusiones.
4. Palabras clave (español) / Keywords (inglés):
  - Proporcione un máximo de 7 palabras clave en cada idioma, relacionadas directamente con el tema del trabajo.
  - Se recomienda utilizar términos del Thesaurus de la UNESCO.
5. Cover Letter:
  - Incluya una declaración que certifique que el manuscrito es una contribución original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista.
  - Confirme la autoría y la aceptación de cambios formales según las normas de la revista.
  - Descargue el formato de Cover Letter desde:

<https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>

<https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwIhD7GC76hgzg?e=ldbXMf>

#### 3.2.2. Estructura del manuscrito

1. Introducción:
  - Presente el problema de investigación, el contexto, la justificación y los objetivos del estudio.

- Incluya una revisión de la literatura más relevante y actual, tanto a nivel nacional como internacional.
2. Materiales y métodos:
  - Describa la metodología, los materiales, el diseño experimental y los procedimientos de manera clara y detallada.
  - Si se utiliza una metodología original, explique su justificación y posibles limitaciones.
3. Resultados:
  - Presente los resultados de manera clara y organizada, utilizando tablas, gráficos y figuras cuando sea necesario.
  - Evite la duplicación de datos entre el texto y las tablas/figuras.
4. Discusión:
  - Interprete los resultados, relacionándolos con los objetivos del estudio y la literatura existente.
  - Discuta las implicaciones teóricas y prácticas de los hallazgos.
5. Conclusiones:
  - Resuma los hallazgos más importantes del estudio.
  - Destaque las contribuciones del trabajo y proponga líneas futuras de investigación.
6. Agradecimientos (opcional):
  - Reconozca las fuentes de financiamiento, colaboradores o instituciones que apoyaron la investigación.
7. Referencias:
  - Siga el estilo IEEE para las citas y la lista de referencias.
  - Utilice el gestor de referencias de Microsoft Word para gestionar las citas.
  - Asegúrese de que todas las referencias estén citadas en el texto y viceversa.

#### 3.3. Figuras, tablas y ecuaciones

- Figuras y tablas:
  - Deben estar numeradas consecutivamente (Fig. 1, Tabla 1, etc.) y citadas en el texto.
  - Las figuras deben tener una resolución mínima de 300 dpi y estar en formato JPG, PNG.
  - Las tablas deben tener un título arriba y las figuras un título abajo.
- Ecuaciones:
  - Utilice el editor de ecuaciones de Microsoft Word.
  - Numere las ecuaciones consecutivamente, colocando el número entre paréntesis y alineado a la izquierda.

#### 3.4. Envío del manuscrito

- Los manuscritos deben enviarse a través del Open Journal System (OJS) de la revista:  
<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/authors>.
- Asegúrese de cargar:
  - El manuscrito en formato Word (.doc o .docx).
  - Las figuras en archivos separados, con la resolución y formato adecuados.
  - El Cover Letter y otros documentos requeridos.

#### 4. Proceso de envío

El envío de manuscritos a INQUIDE debe realizarse siguiendo los siguientes pasos y requisitos:

##### 4.1. Plataforma de envío

- Todos los manuscritos deben enviarse a través del Open Journal System (OJS) de la revista, disponible en: <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/authors>.
- Los autores deben registrarse en la plataforma OJS antes de realizar el envío.

##### 4.2. Documentos requeridos

Al momento del envío, los autores deben cargar los siguientes documentos:

1. Manuscrito en formato Word (.doc o .docx):
  - El documento debe seguir el formato y la estructura establecidos por la revista (ver sección 3).
  - Incluya los datos completos de los autores y su afiliación institucional.
2. Figuras y tablas:
  - Las figuras deben enviarse en archivos separados, en formato JPG, PNG, con una resolución mínima de 300 dpi.
  - Las tablas deben incluirse en el manuscrito, siguiendo el formato indicado en la sección 3.
3. Cover Letter (Carta de presentación):
  - Incluya una declaración que certifique que el manuscrito es una contribución original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista.
  - Confirme la autoría y la aceptación de cambios formales según las normas de la revista.

Descargue el formato de Cover Letter desde: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwIhD7GC76hgzg?e=ldbXMf>

##### 4. Listado de comprobación:

- Asegúrese de que el manuscrito cumpla con todos los requisitos técnicos y de formato.

Descargue el listado de comprobación desde: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVbQst1GD7t1N8BZVFXyapiNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>

##### 4.3. Responsable de correspondencia

- Uno de los autores debe designarse como **responsable de correspondencia**.
- Este autor será el punto de contacto principal para todas las comunicaciones relacionadas con el manuscrito.

##### 4.4. Confirmación de recepción

- Una vez enviado el manuscrito, el sistema OJS enviará automáticamente un correo electrónico de confirmación al autor responsable de correspondencia.

##### 4.5. Consultas y soporte

- Para consultas sobre el proceso de envío o problemas técnicos, los autores pueden contactar al equipo editorial a través de los siguientes correos electrónicos:
  - [inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)
  - [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)

#### 5. Proceso Editorial

El proceso editorial de INQUIDE está diseñado para garantizar la calidad, originalidad y rigor científico de los manuscritos publicados. A continuación, se describe el proceso paso a paso:

##### 5.1. Revisión inicial

Una vez recibido el manuscrito, el equipo editorial realiza una revisión inicial para verificar los siguientes aspectos:

1. Temática: El manuscrito debe estar dentro del alcance temático de la revista (ciencias e ingeniería).
2. Formato y estructura: El manuscrito debe seguir el formato y la estructura establecidos por la revista (ver sección 3).
3. Citas y referencias: Todas las referencias bibliográficas deben estar correctamente citadas en el texto, siguiendo el estilo IEEE.
4. Originalidad: El manuscrito será sometido a una revisión de plagio utilizando software especializado. Se acepta un máximo del 15% de similitud con otros trabajos.

Si el manuscrito no cumple con alguno de estos requisitos, se solicitará al autor que realice las correcciones necesarias antes de continuar con el proceso de evaluación.

##### 5.2. Evaluación por pares (Peer-Review)

Los manuscritos que superen la revisión inicial serán sometidos a un riguroso proceso de evaluación por pares bajo la metodología de doble ciego (double-blind review). Este proceso incluye los siguientes pasos:

1. Asignación de revisores:
  - El editor asignará al menos dos revisores especializados en el área temática del manuscrito.
  - Los revisores pueden ser expertos nacionales o internacionales.
2. Evaluación:
  - Los revisores evaluarán el manuscrito en función de criterios como originalidad, pertinencia, rigor científico, claridad y contribución al campo.
  - Cada revisor emitirá un informe con uno de los siguientes resultados:
    - Publicable sin cambios.
    - Publicable con cambios sugeridos.
    - Publicable con cambios obligatorios.
    - No publicable.
3. Decisión editorial:
  - El editor analizará los informes de los revisores y tomará una decisión final sobre la aceptación o rechazo del manuscrito.
  - Si el manuscrito es aceptado, se notificará al autor para que realice los cambios sugeridos (si aplica).
  - Si el manuscrito es rechazado, se notificará al autor y se archivará el documento.

##### 5.3. Tiempo de revisión

- El proceso de evaluación por pares tiene una duración mínima de 4 semanas.
- Una vez finalizado este período, se notificará al autor el resultado de la evaluación y las recomendaciones de los revisores.

##### 5.4. Correcciones y versión final

- Si el manuscrito es aceptado con cambios, el autor deberá enviar la versión corregida dentro del plazo establecido por el editor.
- El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas hayan sido incorporadas correctamente antes de proceder con la publicación.

#### 5.5. Publicación

- Los manuscritos aceptados serán publicados en los números semestrales de la revista (enero y julio).
- Los autores recibirán una notificación una vez que su trabajo esté disponible en la plataforma de la revista.

#### 6. Publicación

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo publica dos números al año, en las siguientes fechas:

- Primer número: 1 de enero.
- Segundo número: 1 de julio.

#### 6.1. Plazos de envío

Para garantizar la consideración de los manuscritos en los números correspondientes, los autores deben tener en cuenta los siguientes plazos:

- Manuscritos para el número de enero: Deben enviarse antes del 31 de octubre del año anterior.
- Manuscritos para el número de julio: Deben enviarse antes del 30 de abril del mismo año.

#### 6.2. Disponibilidad de los artículos

- Una vez publicados, los artículos estarán disponibles en la plataforma electrónica de la revista, accesible a través de:  
<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>.
- Cada artículo publicado incluirá un DOI (Digital Object Identifier), lo que garantiza su identificación y acceso permanente.

#### 6.3. Política de acceso abierto

INQUIDE es una revista de acceso abierto (open access), lo que significa que todos los artículos están disponibles gratuitamente para su lectura, descarga y distribución, bajo una licencia Creative Commons.

#### 7. Información sobre el uso de Inteligencia Artificial

INQUIDE reconoce la importancia de mantener altos estándares éticos en la investigación científica, especialmente en el uso de Inteligencia Artificial (IA). Por ello, se establecen las siguientes directrices:

##### 7.1. Uso de IA en la investigación

- Si se ha utilizado Inteligencia Artificial en cualquier etapa de la investigación presentada en el manuscrito, los autores deben declararlo explícitamente en la Carta de Presentación (Cover Letter).
- Especifique las secciones del manuscrito en las que se ha empleado IA, describiendo su función y alcance.

##### 7.2. Transparencia y responsabilidad

- Los autores son responsables de garantizar que el uso de IA no comprometa la originalidad, integridad y rigor científico del trabajo.
- El equipo editorial evaluará la declaración de uso de IA y podrá solicitar información adicional si es necesario.

##### 7.3. Aceptación de manuscritos con IA

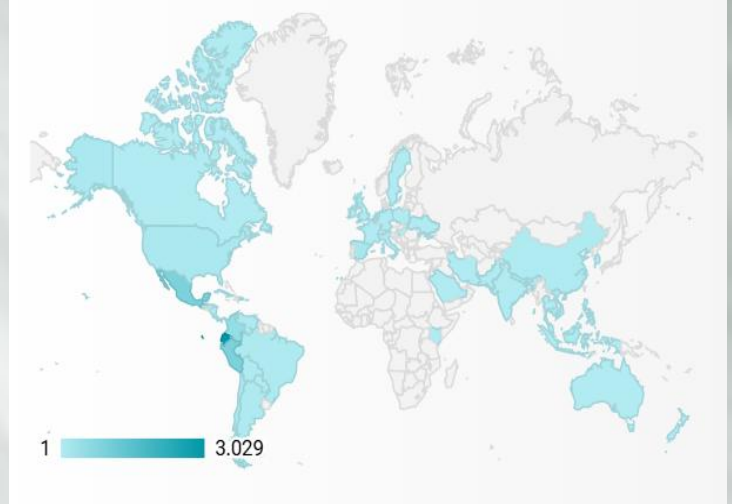
- La decisión final sobre la aceptación de manuscritos que hayan utilizado IA queda a discreción del Consejo Editorial, basándose en la transparencia y el cumplimiento de las normas éticas de la revista.

# INQUIDE



**Exploramos lo desconocido, resolvemos lo imposible.**

**Bienvenido a la frontera del conocimiento, donde la ciencia, la ingeniería y la tecnología convergen para transformar el desarrollo.**



## Artículos más vistos.

<b>Título. Búsqueda por título, autor e ID.</b>	<b>Total</b>
Duque-Aldaz et al. Predicción del contenido de humedad en el proceso de secado del cacao mediante regresión lineal simple.	1375
Jiménez Sánchez et al. Obtención de celulosa bacteriana a partir de kombucha mediante la sustitución del té negro por té de cáscara de café.	1003
Alulema Cuesta et al. Estudio comparativo de la extracción y caracterización de aceite de aguacate mediante los procesos de: termobatido, enzimático, prensado hidráulico y expeller.	851
Catarí et al. Fotodegradación de microplásticos.	757
Fu-López et al. Evaluación de riesgos y medidas de control para maquinaria en una empresa de producción de alimentos.	740
Bonilla Bermeo et al. Estudio de la bioadsorción de metales pesados (Pb y Cu) en las aguas del río Puyango, utilizando cáscara de naranja y banano manzano.	711
Tigrero Zapata et al. Impacto de los envases plásticos de plaguicidas en los suelos agrícolas: un problema cultural en la agricultura ecuatoriana.	691
Delgado Gómez et al. Implementación de la gastrodiplomacia como eje estratégico del desarrollo turístico y su contribución a la difusión cultural del Ecuador.	274
España Francis et al. Presencia de cianotoxinas en el agua y en alimentos frescos: implicaciones para la salud humana.	392
Carrera Coloma et al. Estudio teórico de alternativas para el control de <i>Rupella albinella</i> en cultivares de arroz ( <i>Oryza sativa</i> ).	361

Contacto principal.  
Francisco Javier Duque-Aldaz  
Universidad de Guayaquil  
Teléfono +593 98 564 1201 WhatsApp  
Teléfono +593 99 576 0762 Telegrama  
[francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)  
[inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)