REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA

# PAKAMUROS

Julio – Setiembre 2025

Volumen 13 – N° 3



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-9805

Una publicación de la Universidad Nacional de Jaén
Setiembre 2025 | Vol. 13. Número 3 | E-ISSN: 2522-3240 | ISSN: 2306-9805
DOI: https://doi.org/10.37787/03z6hc48

***Comité Científico***

**Director**
Dra. Mary Flor Césare Coral

**Editor**
Dr. Ernesto Hernández Martínez

**Miembros**
Dr. Julio Mauricio Vidaurre Ruiz, Universidad Nacional Agraria La Molina
Dr. Eli Morales Rojas, Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua
Dr. Jorge Díaz Dumont, Universidad Nacional de Tayacaja, Perú.
Dr. Ernesto Alonso Paiva Peredo, Universidad Tecnológica Del Perú S.A.C
Dr. García Cedrón David Carmelo, Universidad Privada César Vallejo - Trujillo
Dr. Enedia Vieyra Peña, Universidad Nacional de Tumbes, Perú.
Dr. Edwin Adolfo Díaz Ortiz, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas

***Equipo de edición y diseño***

**Responsable del Proceso Editorial**
Mg. Káren Faviola Pérez Rimarachín, Universidad Nacional de Jaén

**Diseño de portada**
Lic. Lina Lesli Ruiz Navarrete, Universidad Nacional de Jaén

**Tópicos aceptados por la revista**
Ingeniería
Salud

Descargo de responsabilidad: El Director, los Editores y la Universidad Nacional de Jaén no se hacen responsables de los errores, omisiones, inconsistencias involuntarias por parte de los autores o de las consecuencias derivadas del uso de la información contenida en esta revista; los puntos de vista y las opiniones expresadas no reflejan necesariamente los del El Director, los Editores y la Universidad Nacional de Jaén, y la publicación de anuncios no constituye ninguna aprobación por parte del Director, los Editores y la Universidad Nacional de Jaén de los productos anunciados. Los autores asumen la responsabilidad legal y moral de las ideas expresadas en los artículos. El editor no será legalmente responsable en caso de reclamaciones de indemnización.
Página web de la revista: Para las instrucciones de envío, suscripción y demás información, visite: https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-6805

# CONTENIDO

## ARTÍCULOS ORIGINALES

Evaluación de mezclas de soja, maíz y almidón de papa para la obtención de panes libres de gluten …….. 4

Bacterias potencialmente patógenas multirresistentes en estetoscopios utilizados por médicos, enfermeros y obstetras en el Hospital Jorge Reátegui Delgado, Piura…… 18

Staphylococcus aureus resistente a meticilina en teléfonos de médicos y enfermeras en un hospital piurano.……..... 27

Enfoque de bioingeniería para la evaluación de la relación suelo-planta en un contexto de cambio climático en el río Chancay-Lambayeque: Un caso particular en Perú……... 37

Efecto de la adición de cáscara de manzana deshidratada en polvo (Malus domestica, ´Red Delicious´) y la temperatura de almacenamiento sobre las propiedades reológicas del yogurt bebible..... 51

## ARTÍCULOS DE REVISIÓN

Revisión de la implementación de Lean Construction y BIM para la reducción de desperdicios de encofrado……..... 63

Tecnologías de la información de la cadena de suministro empresarial: Una revisión sistemática. 81

Evaluación del daño y recuperación de la capacidad portante del concreto tras la exposición al fuego..... 91

Algas de agua dulce: propiedades funcionales y usos en la industria alimentaria..... 104

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 4 al 17
DOI: https://doi.org/10.37787/0ytz1888

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-6805

**ARTÍCULO ORIGINAL**

# Evaluación de mezclas de soja, maíz y almidón de papa para la obtención de panes libres de gluten

# Evaluation of Soy, Corn, and Potato Starch Blends for the Development of Gluten-Free Bread

Neiser Mejía [1], Hermes Rodrigo [2], Giancarlo Pérez [3]*, Andrea Velarde [4] y Jover Pérez [5]

## RESUMEN

En respuesta a la celiaquía, la panificación libre de gluten se ha convertido en un campo de investigación orientado al empleo de harinas y almidones alternativos. Esta investigación evaluó el impacto de la combinación entre las harinas de soja, maíz y almidón de papa en las propiedades sensoriales del pan. El método empleado albergó la elaboración habitual del pan con variaciones en harina de soja (HS), harina de maíz (HM) y almidón de papa (AP), empleando cuatro formulaciones: F1(HS10%, M30%, AP15%), F2(HS20%, HM25%, AP10%),), F3(HS25%, M10%, AP20%), y F4(HS15%, M15%, AP25%). El resultado óptimo se evidencia en el tratamiento F2, constituido por 20% de harina de soja, 25% de harina de maíz y 10% de almidón de papa, destacando tanto en sus propiedades fisicoquímicas con 19% de Humedad, 16% de proteínas, 9% de lípidos, 71% de carbohidratos, 55.5% de retención de gas y 0.48 g/ml de densidad aparente; así como en la evaluación organoléptica, obteniendo un puntaje sobresaliente de 7.7 para el color, 7.2 para el olor, 7.8 para el sabor y 6.7 para la textura, manteniendo una aceptación superior al 60 % del gusto del consumidor.

**Palabras clave:** Pan, harina de soja, maíz, almidón de papa, celíacos.

## ABSTRACT

In response to celiac disease, gluten-free baking has become a field of research focused on the use of alternative flour and starches. This study evaluated the impact of combining soybean, corn, and potato starch flour on the sensory properties of bread. The method employed included typical breadmaking with variations in soybean flour (SF), corn flour (CF), and potato starch (PS), using four formulations: F1 (SF10%, M30%, AP15%), F2 (SF20%, M25%, AP10%), F3 (SF25%, M10%, AP20%), and F4 (SF15%, M15%, AP25%). The optimal result is evident in treatment F2, consisting of 20% soybean flour, 25% corn flour and 10% potato starch, standing out both in its physicochemical properties with 19% humidity, 16% proteins, 9% lipids, 71% carbohydrates, 55.5% gas retention and 0.48 g / ml apparent density; as well as in the organoleptic evaluation, obtaining an outstanding score of 7.7 for color, 7.2 for smell, 7.8 for flavor and 6.7 for texture, maintaining an acceptance higher than 60% of consumer taste.

**Keywords:** Bread, soy flour, corn, potato starch, celiac.

* Autor para correspondencia

[4] Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Perú. Email: neismh_316@hotmail.com, rodrigos.hermes@gmail.com, giancarlo.perez@unj.edu.pe, andrea.velarde@unj.edu.pe, jperezmej@unprg.edu.pe

## INTRODUCCIÓN

La tendencia dentro de la industria alimentaria ha ido evolucionando desde un enfoque en la nutrición y la tecnología hacia una búsqueda de productos que vayan más allá de una simple nutrición (Gamero, 2021).

El hábito de comer pan u otros derivados del trigo no siempre es adecuado, pues en determinados individuos con sensibilidad a ciertas proteínas de este cereal y de granos relacionados, puede desencadenarse la enfermedad celíaca, el trastorno en mención se reconoce por provocar una respuesta negativa en el aparato digestivo, generando como consecuencia un déficit en la absorción de nutrientes clave (De La Calle et al., 2020).

Este estudio permite explorar el uso de harinas de maíz, soja y almidón de papa, creando un pan apto para personas con intolerancia al gluten. A nivel mundial, la enfermedad celíaca presenta una prevalencia cercana al 1,4% cuando se mide mediante marcadores serológicos y alrededor del 0,7% en diagnósticos confirmados por biopsia intestinal (Mohta etal., 2021). En Perú se reporta una frecuencia del 1,2% en jóvenes entre 18 y 29 años, lo que equivale a 341 783 casos en el país (Delgado et al., 2020).

Riaz (2019), indica que la industria panadera ha considerado la harina de maíz como un insumo valioso por su perfil nutricional y sabor distintivo. No obstante, su deficiencia radica en el bajo contenido de proteínas, en especial de aminoácidos esenciales como la lisina (Zhang et al., 2023). En este sentido, la harina de soja emerge como un complemento idóneo, dada su riqueza en proteínas y su capacidad para aportar lisina, aunque su perfil aminoacídico se ve limitado por la escasez de metionina y triptófanos, componentes que, por otra parte, se encuentran abundantemente en otros cereales (Kudełka et al., 2021). Así mismo, otro de los componentes de suma importancia es el almidón, ya que desempeña un papel fundamental al no solo contribuir con azúcares que son fermentables en el proceso de leudado, sino que también aporta funcionalmente en el aspecto fisicoquímico y sensorial dentro de la industria panadera. Dicho aporte, son propiedades cruciales para la mejora de textura, estructura y calidad general en los panes. Por otro lado, el almidón de papa tiende a ser empleado por su función de retención y absorción de agua, cuya capacidad influye en la suavidad de los panes, proporcionándole frescura y extendiendo su vida útil (Buitrón, 2021).

El desarrollo de este estudio compromete los efectos que conllevan las concentraciones de las harinas en mención dentro las propiedades del pan, albergando análisis proximales, tales como retención de gas y densidad aparente, así como también el análisis organoléptico para la aceptabilidad del producto. Cabe mencionar que, es relevante tomar en cuenta las demandas del consumidor, porque las innovaciones en la elaboración del pan, ya sea en su composición o en sus cualidades sensoriales y nutritivas, pueden generar distintas percepciones. El grado de aceptación está condicionado por elementos como los hábitos

de alimentación y las sensibilidades nutricionales (López y Arias, 2021). De esta manera, se incentiva al consumo, no solo de nuevos productos sino de alimentos esenciales saludables con bondades en su aplicación dentro de la industria alimentaria.

A través de esta investigación se evaluó las concentraciones de harina de soja, maíz y almidón de papa en la producción de panes libres de gluten, de la misma forma, describe proximalmente las harinas en mención, analiza su capacidad de retención de gases y efectúa un análisis sensorial del producto terminado con el fin de establecer el nivel de aceptación de la propuesta.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los análisis proximales y sensoriales se llevaron a cabo en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, en la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias, empleando los laboratorios de Fisicoquímica y Control de Calidad, así como también el laboratorio de bromatología de la Facultad de Biología.

### Insumos, materiales, equipos y reactivos

La materia prima empleada fue harina de soja, maíz y almidón de papa, así como agua, levadura y los materiales de laboratorio para cálculos y análisis con mayor precisión.

Los equipos utilizados fueron una Amasadora GPaniz modelo AE-60L, un Horno eléctrico marca NOVA MAX 750, una Selladora manual marca BOXA. Modelo PFS-450, Balanza Electrónica, y una Estufa marca Memmeret de 0-200 °C.

Los reactivos empleados fueron Almidón soluble, Azul de metileno en polvo, Fenolftaleína al 1%, Ácido acético, Ácido sulfúrico Q.P, Alcohol Etílitico al 96% de pureza, Bisulfito de sodio, Buffer acetato de Sodio 0,1 M (pH 4,5), Glucosa anhidra grado reactivo, Tiosulfato de Sodio 5 $H_2O$ Q.P, Solución Yodo 1%. Estos elementos se emplean con el fin de mejorar características y propiedades de la estructura del producto, los mejoradores del pan pueden incluir agentes oxidantes o reductores que alteran las propiedades del gluten.

### Elaboración del pan

Para esta producción se llevó a cabo el proceso referenciado en Jamanca et al. (2023).

**Tabla 1.**

*Composición para cada formulación*

| Composición | Formulaciones | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **F1** | **F2** | **F3** | **F4** |
| Harina de Soja (%) | 10 | 20 | 25 | 15 |
| Harina de Maíz (%) | 30 | 25 | 10 | 15 |
| Almidón de papa (%) | 15 | 10 | 20 | 25 |
| Levadura (%) | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| Agua (%) | 27,5 | 27,5 | 27,5 | 27,5 |
| Goma xantana (%) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Sal (%) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Azúcar (%) | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 |
| Margarina (%) | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Huevo (%) | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Leche en polvo (%) | 2 | 2 | 2 | 2 |

## Proceso de elaboración de pan libre de gluten

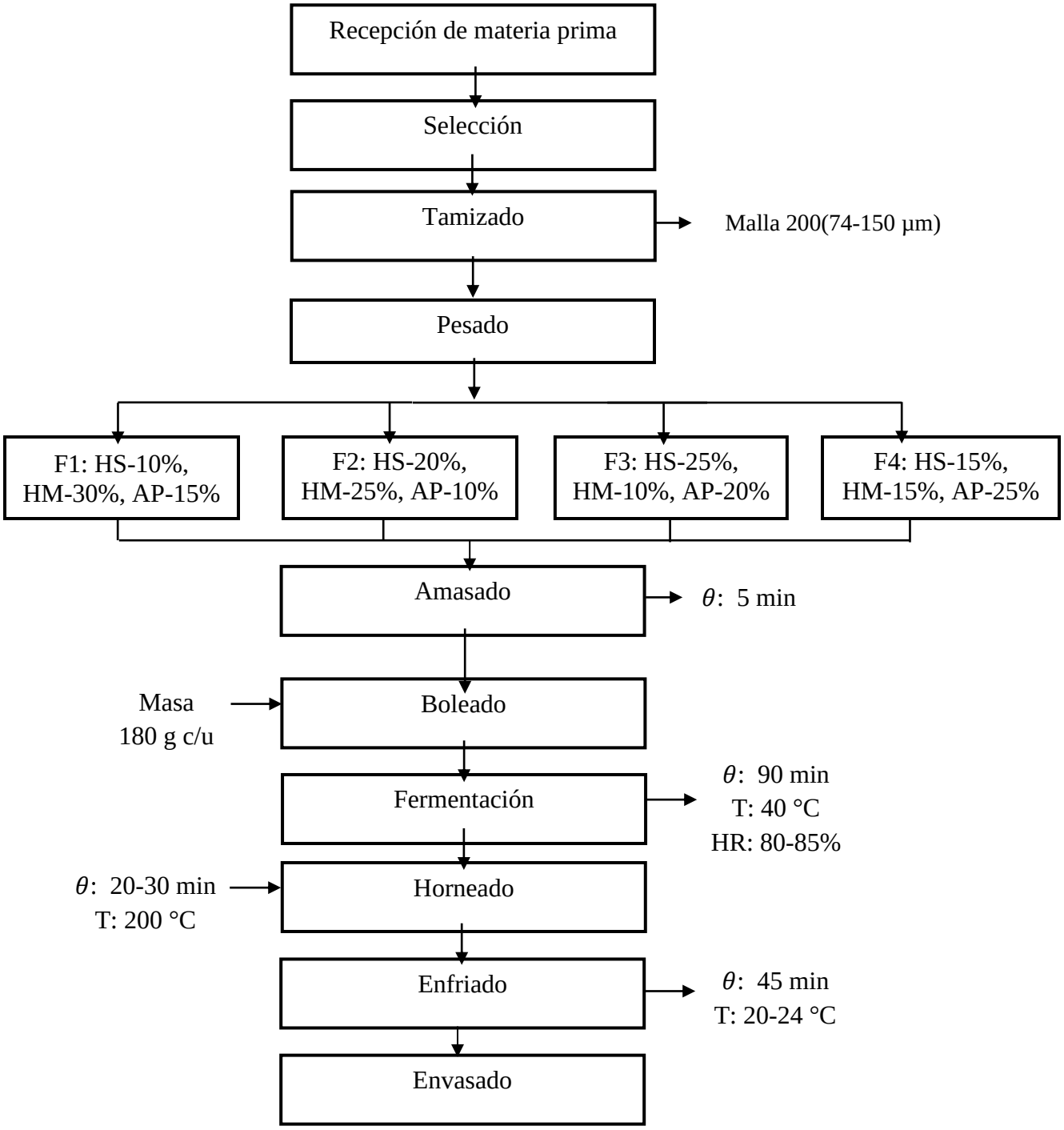
Primero se seleccionaron y pesaron con suma precisión los ingredientes a emplear para cada uno de los tratamientos. Luego se procedió a tamizar las harinas en malla 200 (74-150 µm), para proceder con la integración de los ingredientes, comenzando con la activación de la levadura en 50 ml de agua, la cual fue mezclada con la margarina y los componentes secos ya tamizados, obteniendo de esta manera una combinación homogénea. La activación de la levadura se utilizó agua entre los 37 °C – 43 °C, puesto que un exceso de temperatura tendría una consecuencia negativa afectando la panificación.

Debido al empleo de insumos con gran porcentaje de almidón, se amasó durante cinco minutos. Pasado este tiempo, se procedió a dividir las masas en piezas de 180 g cada una, donde se le realizó el boleado, para así ser fermentadas dentro de la cámara por un período de 90 min a 40 °C, HR-80-85%.

Finalmente, se realizó el horneado a 200 °C entre 20 y 30 min, luego de ello se procedió a enfriar durante 45 min a temperatura ambiente. El envasado fue realizado en bolsas de polietileno.

**Figura 1.**

*Diagrama de flujo para la elaboración de panes libre de gluten*



**Análisis para la composición química proximal del pan**

Se realizaron la determinación de humedad, grasas, proteína, cenizas totales, fibra cruda, y carbohidratos, teniendo como referencia los métodos AOAC 394.06, AOAC 920.85, AOAC 984.13A, AOAC 935.39.B, AOAC 985.29, AOAC y AOAC 1990, respectivamente.

**Determinación de retención de gas**

Para el examen de retención de gases, se empleó 200 g de cada una de las 4 formulaciones (F1, F2, F3 y F4), las cuales fueron colocadas por separado en matraces de 500 ml. A continuación, se controló el incremento de volumen en intervalos de 5 min durante un período de 120 min, manteniendo las muestras a 24 °C. El porcentaje fue determinado a través de la fórmula:

**Fórmula 1.**

*Fórmula para cálculo del porcentaje de gas retenido*

$$\%\ gas\ retenido = \left(\frac{Volumen\ final - Volumen\ inicial}{Volumen\ final}\right) x\ 100$$

**Determinación de densidad aparente**

Para hallar la densidad aparente se inició por calcular el volumen del pan, añadiendo semillas de hortalizas en un recipiente graduado y verificando el llenado de este totalmente nivelado. Luego de ello, se procedió a vaciar el recipiente en mención, para de esta manera colocar el pan, rellenándolo nuevamente con las semillas. Posteriormente se calcula el volumen de las semillas sobrantes, dicho volumen será el mismo que el del pan, el cual será usado para el cálculo de la densidad aparente a través de la fórmula:

**Fórmula 2.**

*Fórmula para cálculo de la densidad aparente*

$$Da\ (Densidad\ Aparente) = \frac{Peso\ (g)}{Volumen\ (ml)}$$

La densidad aparente hallada constituye un parámetro crítico en la evaluación de su calidad textural, ya que siendo baja suele tener un aspecto más aireado y esponjoso.

Cabe mencionar que, cada uno de los análisis realizados fueron ejecutados por triplicado.

### Evaluación organoléptica del pan

La evaluación se realizó de acuerdo con el proceso referenciado en Arias y López (2021). El panel que realizó las valoraciones fueron estudiantes universitarios con edades que fluctúan entre los 20 a 24 años. El puntaje estuvo constituido por "me gusta muchísimo = 9, me gusta mucho = 8, me gusta bastante = 7, me gusta ligeramente = 6, ni me gusta ni me disgusta = 5, me disgusta ligeramente = 4, me disgusta bastante = 3, me disgusta mucho = 2, me disgusta muchísimo = 1".

### Gestión y evaluación de datos

Cada uno de los análisis mencionados se realizó por triplicado para garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los datos experimentales reduciendo posibles errores aleatorios en la toma de muestras.

Para analizar estadísticamente los datos se utilizó un DCA (Modelo Completamente Aleatorizado), el cual es fundamental para minimizar sesgos, asegurando que las comparaciones entre tratamientos sean justas y válidas. Para la evaluación de atributos sensoriales se empleó ANOVA valiéndose también de una prueba Tukey, una Prueba de Comparación Múltiple y un test de Friedman para hallar alguna diferencia significativa entre ellos con un nivel de confianza de 95%.

Por otro lado, para los atributos sensoriales se pusieron en marcha los exámenes no-paramétricos de Friedman, los cuales contribuyeron con la búsqueda de diferencias entre tratamientos en cuanto a la percepción sensorial de sabores, aromas y apariencias. El uso combinado de ANOVA y Friedman permiten analizar datos desde perspectivas complementarias, mientras que ANOVA se adecúa en los supuestos de normalidad y homogeneidad, la prueba de Friedman ofrece una alternativa no paramétrica para variables ordinales o distribuciones no normales.

Para el procesamiento de resultados de las pruebas realizadas se utilizó el software estadístico SPSS versión 23.

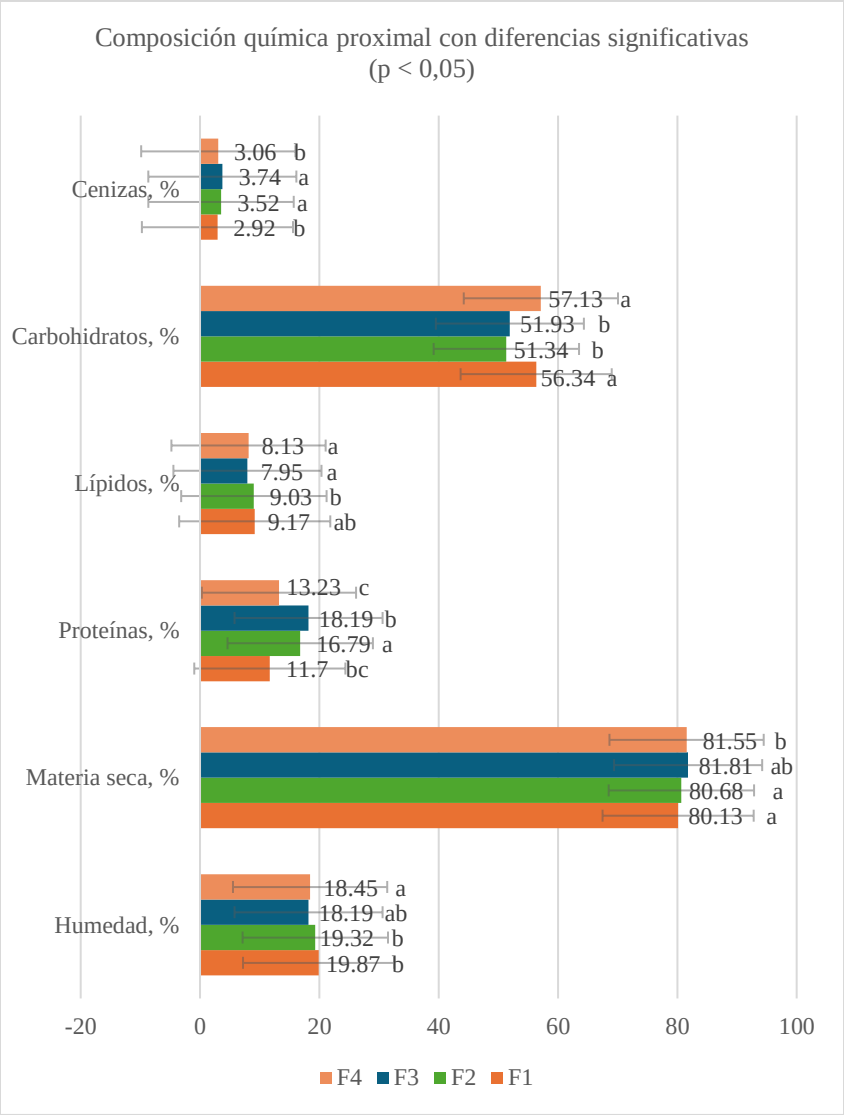
## RESULTADOS

### Análisis para la composición química proximal del pan

La Figura 2 presenta la cantidad porcentual por tratamiento ejecutado para la producción de pan. En primer lugar, los porcentajes obtenidos de cenizas, lípidos, materia seca y humedad no muestran una marcada diferencia; sin embargo, el porcentaje obtenido de proteínas aumenta cada que se eleva la proporción de harina de soja, teniendo así, en la formulación con mayor proporción de dicha harina (25%) un total de 18.19% de proteínas.

**Figura 2.**

*Representación porcentual de los promedios para cada una de las formulaciones respecto a componentes fisicoquímicos*

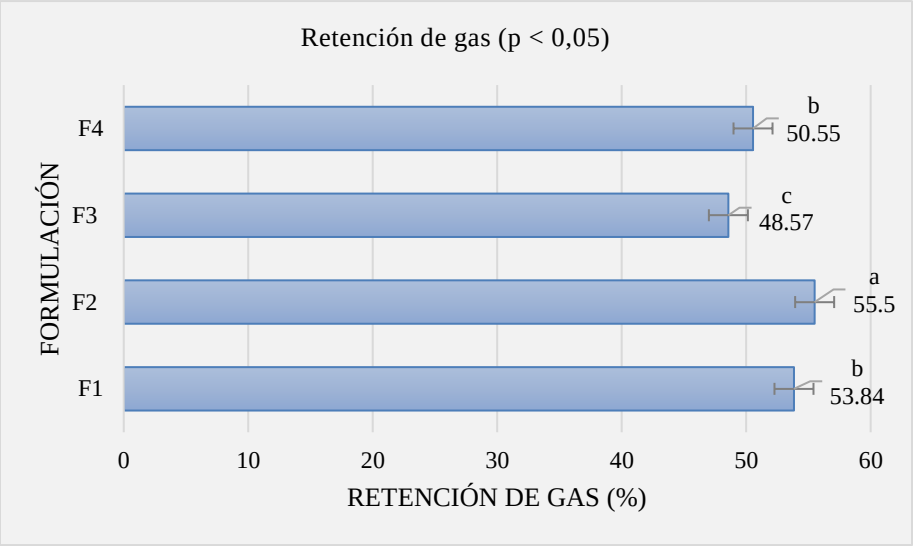



## Determinación de retención de gas

En la evaluación de retención de gas se evidenció que existe una diferencia significativa en relación con las formulaciones de las masas. La Figura 3 muestra que la formulación compuesta por 25% de harina de soja y el 10% de harina de maíz obtuvo una menor cantidad de retención de gas (48.57%), sin embargo, las formulaciones restantes fluctuaron entre 50% - 55.5%.

**Figura 3.**

*Representación gráfica de los promedios en porcentaje de retención de gas para cada una de las formulaciones*

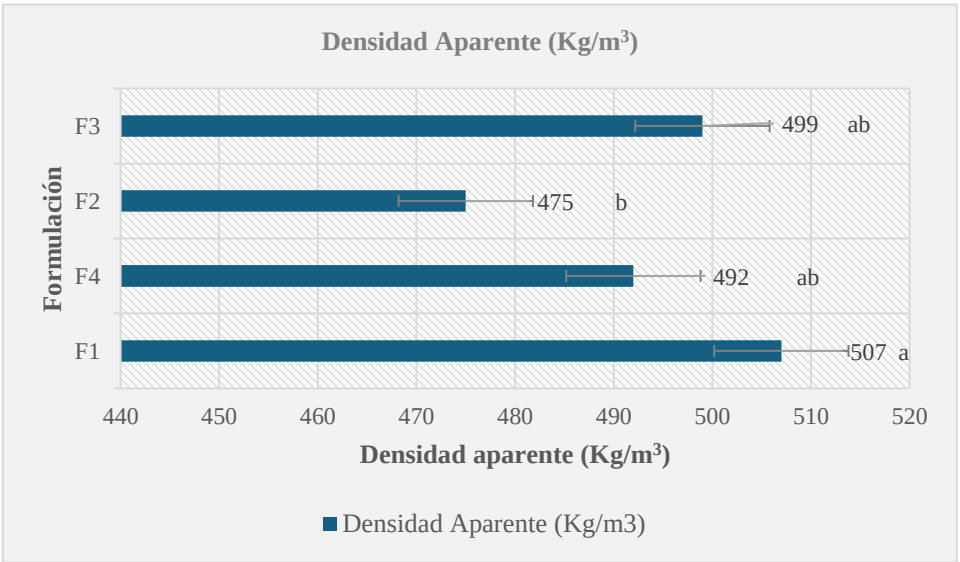



## Determinación de densidad aparente

Para los resultados de la densidad aparente contrastados mediante la Figura 4, se registran ciertas diferencias significativas. Por otro lado, se evidencia que, al disminuir la proporción de harina de soja, la densidad aparente tiende a incrementar, siendo la mayor 507 Kg/m$^3$, hallada en la formulación que contiene 10% de harina de soja.

**Figura 4.**

*Representación porcentual de los promedios respecto a la densidad aparente*



## Análisis sensorial

La Tabla 2 presenta los resultados de la prueba de Friedman con un nivel de significancia de 0.05, la cual muestra que no existe diferencia significativa para el olor, mientras que, para el resto de las cualidades organolépticas como lo son el sabor, la textura y el color, sí la hay. Estas tres características, las cuales poseen diferencia significativa, las podemos evidenciar en la Prueba de Comparación Múltiple, reflejada en la Tabla 3, donde se observa el sombreado para los resultados de las formulaciones estadísticamente significativas.

**Tabla 2**
*Prueba de Friedman*

| Atributo | Formulaciones | Estudio dúo-dimensional de varianza especificada por rangos para muestras relacionadas | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Rango medio | Significancia | Determinación |
| Color | F1 | 2.57 | 0,000 | Rechace la hipótesis nula |
| | F2 | 2.68 | | |
| | F3 | 1.55 | | |
| | F4 | 3.20 | | |
| Olor | F1 | 2.87 | 0,1080 | Acepta hipótesis nula |
| | F2 | 2.38 | | |
| | F3 | 2.15 | | |
| | F4 | 2.60 | | |
| Sabor | F1 | 2.05 | 0,000 | Rechace la hipótesis nula |
| | F2 | 3.12 | | |
| | F3 | 1.85 | | |
| | F4 | 2.98 | | |
| Textura | F1 | 2.92 | 0,0350 | Rechace la hipótesis nula |
| | F2 | 2.58 | | |
| | F3 | 2.33 | | |
| | F4 | 2.17 | | |

**Tabla 3.**
*Evaluación Comparativa múltiple para cada atributo*

| Atributo | Formulaciones | Significancia |
|---|---|---|
| Color | F3, F1 | 0.014 |
| | F3, F2 | 0.004 |
| | F3, F4 | 0.000 |
| | F1, F2 | 1.000 |
| | F1, F4 | 0.345 |
| | F2, F4 | 0.727 |
| Sabor | F3, F1 | 1.000 |
| | F3, F4 | 0.004 |
| | F3, F2 | 0.001 |
| | F1, F4 | 0.031 |
| | F1, F2 | 0.008 |
| | F4, F2 | 1.000 |
| Textura | F4, F3 | 1.000 |
| | F4, F2 | 1.000 |
| | F4, F1 | 0.147 |
| | F3, F2 | 1.000 |
| | F3, F1 | 0.481 |
| | F2, F1 | 1.000 |

## DISCUSIÓN

La caracterización química del producto final no reflejó diferencias amplias entre las formulaciones; sin embargo, el porcentaje de proteínas mostró un aumento progresivo (F1: 11,7% – F3: 18,19%) conforme se incrementó la proporción de harina de soja. Este hallazgo concuerda con lo reportado por Arturo y Rolando (2023), quienes señalan que la proteína aislada de soja presenta un contenido proteico que varía 35% y 40%, lo que justifica su aporte al valor nutricional. De manera similar, Bugarín (2022) indica que la adición de este insumo representa una estrategia efectiva para potenciar el contenido proteico en productos panificados.

Por otro lado, en cuanto a retención de gas, esta se evidenció en menor porcentaje en la formulación F3, donde se evidenció la mayor cantidad de harina de soja con un 25%. Este comportamiento coincide con lo reportado por Bourekoua et al. (2021), quiénes señalan que, a concentraciones elevadas, la harina de soja puede alterar la hidratación de la matriz, reduciendo la capacidad del almidón de gelatinizar y formando redes menos estables para atrapar dióxido de carbono. A diferencia de los aislados proteicos, la harina de soja contiene fracciones fibrosas y lipídicas que interfieren en la película que recubre las burbujas de gas, favoreciendo la coalescencia el escape durante la fermentación y el horneado (Masure et al., 2023). Por lo tanto, aunque la soja representa una fuente proteica valiosa para la población celiaca es necesario optimizar su nivel de inclusión.

En cuanto a los resultados que involucra a la densidad aparente, se muestra que, esta incrementa a medida que disminuye la concentración de harina de soja. Dicho comportamiento puede deberse a la luz de la dualidad funcional de las proteínas de soja en matrices sin gluten. A niveles moderados, las proteínas de soja actúan como agentes emulsionantes que ayudan a estabilizar la espuma de la masa favoreciendo mayor porosidad y menor densidad aparente del pan libre de gluten (Zhang et al., 2023). Por tanto, una reducción en la proporción de soja puede traducirse en una pérdida de esa capacidad tensioactiva/filmogénica, provocando masas con menor retención de gas, y, por ende, mayor densidad aparente (Mir et al., 2023). Por otro lado, también se enfatiza que el papel de enzimas (transglutaminasa) y emulsionantes han demostrado sinergias con proteínas que bajan la densidad aparente y mejoran el volumen y la textura (Ronda et al., 2023).

Para los resultados de las características sensoriales se evidenció una notable influencia en cuanto a la harina de soja, donde Riaz (2019) manifiesta que la adición de la harina mencionada en la elaboración de productos de panadería puede modificar sustancialmente tanto el proceso como la calidad final de los productos. Esto se debe a las propiedades únicas de los componentes de la soja, los cuales impactan en los atributos sensoriales, tales como el aspecto visual, la pigmentación, la textura y el perfil del sabor, donde el perfil aromático y gustativo de los ingredientes de la soja, son fundamentales para decidir el uso adecuado y la proporción óptima para su incorporación.

## CONCLUSIONES

La formulación F2, compuesta por un 20% de harina de soja, un 25% de harina de maíz y un 10% de almidón de papa demostró ser la más efectiva frente a los análisis realizados, constituye una alternativa prometedora para la industria de panificación libre de gluten, al equilibrar valor nutricional y aceptabilidad sensorial, lo cual representa un beneficio directo para la población celíaca o con sensibilidad al gluten. Asimismo, su moderado contenido de grasa (9 %) y aporte proteico (16%) permiten posicionar este producto como una opción saludable dentro de las formulaciones libres de gluten, generalmente deficitarias en proteína. Por otro lado, esta mezcla particular incluyó 475 $kg/m^3$ de densidad aparente, un 55.5% de retención de gas y un considerable liderazgo en la prueba no paramétrica de Friedman, obteniendo un puntaje sobresaliente de 7.7 para el color, 7.2 para el olor, 7.8 para el sabor y 6.7 para la textura. No obstante, el estudio presenta limitaciones, entre ellas el tamaño reducido del panel sensorial, la ausencia de análisis de vida útil y la falta de pruebas de escalado industrial, lo que restringe la generalización de los resultados.

De cara al futuro, se recomienda realizar investigaciones que incluyan evaluaciones de almacenamiento y vida útil, ensayos con consumidores en contextos reales de compra, así como el análisis del comportamiento de esta formulación en procesos industriales de mayor escala. Además, sería pertinente

explorar la incorporación de aditivos tecnológicos (hidrocoloides, enzimas o emulsionantes) para potenciar la textura y mejorar la estabilidad del producto sin sacrificar su perfil nutricional.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arturo, P., & Rolando, J. (2023). Elaboración de pan sin gluten con almidón de maíz y mezcla de hidrocoloides; enriquecido con proteína aislada de soja. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_de3ffa27f1279000267222e1a1e3b9b8

Bourekoua, H., Benatallah, L., Zidoune, N., Rokni, Y., Rosell, M., & Boudries, N. (2021). Effects of legume flours incorporation on the technological properties and sensory quality of gluten-free bread. LWT - Food Science and Technology, 150, 111932. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S073352101200094X

Bugarín, R. (2022). Desarrollo de panes sin gluten con elevado contenido en fibra. Universidad de Valladolid; M. Gómez Pallarés, Ed. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/55767/TFML580.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Buitrón, F. (2021). Evaluación de vida útil del pan elaborado con harina de trigo (triticum aestivum) y papa nativa (solanum tuberosum) envasado en bolsas de polietileno y papel kraft. https://repositorio.unajma.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14168/644/Froilan_Tesis_Bachiller_2021.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y

De La Calle, I., Ros, G., Miras, R. P., & Nieto, G. (2020). Celiac disease: causes, pathology, and nutritional assessment of gluten-free diet. A review. *Nutrición Hospitalaria*. https://doi.org/10.20960/nh.0291

Delgado, J., & Tarqui, C. (2020). Seroprevalencia de enfermedad celíaca en jóvenes peruanos de 18 a 29 años. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública, 37(1), 63–66. https://www.scielosp.org/article/rpmesp/2020.v37n1/63-66

Gamero, A., Fernández, T., Pérez, A., Valera, D., Petermann, F., Baladia, E., Lozano-Lorca, M., Nava-González, E. J., & Navarrete-Muñoz, E. M. (2021). La influencia de la nutrición en la industria alimentaria. *Revista Española De Nutrición Humana Y Dietética*, *25*(2), 125–127. https://doi.org/10.14306/renhyd.25.2.1321

Jaime, S. H. C. (2016). *Elaboración de Pan con Harina de trigo, enriquecido con Harina de Soya y Fibra soluble para mejorar su valor nutritivo.* https://repositorio.ug.edu.ec/items/5e22288f-7d66-40b4-9cd7-3131b6689cfe

Jamanca, C., Ocrospoma, W., Quintana, B., Jimenez, N., Huaman, H., & Silva, J. (2023). Physicochemical and Sensory Parameters of "Petipan" Enriched with Heme Iron and Andean Grain Flours. Molecules, 28(7), 3073. https://www.mdpi.com/1420-3049/28/7/3073

Kudełka, W., Kowalska, M., & Popis, M. (2021). Quality of soybean products in terms of essential amino acids composition. *Molecules*, *26*(16), 5071. https://doi.org/10.3390/molecules26165071

López, M., & Arias, S. (2021). Usos, propiedades nutricionales y evaluación sensorial del amaranto, quinua y subproductos de uva y café. *Ingeniería Y Competitividad*, *24*(1). https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.11000

Masure, G., Fierens, E., & Delcour, A. (2023). Impact of soybean protein isolate on the quality of gluten-free rice-based bread. *Food Hydrocolloids*, *134*, 108069. https://www.researchgate.net/publication/374987914_Impact_of_soybean_protein_isolate_on_gluten-free_bread_a_comprehensive_study_of_physicochemical_properties_of_gluten-free_dough_and_bread_matrix_properties#:~:text=The%20results%20suggested%20that%20adding,the%20mixed%20rice%20powder%20system

Mir, A., Shah, A., & Naik, R. (2022). Role of hydrocolloids in improving quality of gluten-free bakery products: A review. Food Hydrocolloids, 124, 107255. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X21006718

Mohta, S., Rajput, M., Ahuja, V., Makharia, G. (2021). Emergence of Celiac disease and Gluten-related disorders in Asia. Clinical Gastroenterology and Hepatology, 16(6), 823–836. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33967028/

Riaz, M. (2019). Soy and corn flours in baking. Journal of Food Science and Technology, 56(3), 1152-1163 https://www.researchgate.net/publication/337403804_The_Functional_Properties_of_Foods_and_Flours

Ronda, F., Pérez, S., & Angioloni, A. (2023). Technological aids to improve gluten-free bread: Hydrocolloids, enzymes, and emulsifiers. Trends in Food Science & Technology, 134, 148–160. https://www.researchgate.net/publication/351335567_The_recent_development_of_gluten-free_bread_quality_using_hydrocolloids

Zhang, J., Mu, T., & Sun, H. (2023). *Influence of soybean protein isolate on dough rheology and quality of gluten-free bread*. Journal of Cereal Science, 110, 103544. https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ijfs.16799

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 18 al 26
DOI: https://doi.org/10.37787/ntnet394

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-9805

**ARTÍCULO ORIGINAL**

# Bacterias potencialmente patógenas multirresistentes en estetoscopios utilizados por médicos, enfermeros y obstetras en el Hospital Jorge Reátegui Delgado, Piura.

# Detection of potentially pathogenic multidrug-resistant bacteria in stethoscopes used by physicians, nurses, and obstetricians at the Jorge Reátegui Delgado Hospital.Piura.

Jonathan Aranda[1]

## RESUMEN

El estudio tuvo como propósito detectar bacterias multirresistentes en estetoscopios del Hospital Jorge Reátegui Delgado, Piura. Entre diciembre de 2022 y marzo de 2023 se realizó un estudio transversal con 229 estetoscopios muestreados en seis áreas hospitalarias. Las muestras se cultivaron en agar MacConkey y agar sangre, y la identificación bacteriana se efectuó mediante el sistema MicroScan Walkaway 96 Plus. Se aislaron 27 bacterias, siendo *Pseudomonas stutzeri* la más frecuente (55.6%, 15/27). La mayor contaminación se registró en la Sala de Operaciones (33.3%). En cuanto a los perfiles de resistencia, el 55.6% de las cepas fueron sensibles, el 7.4% resistentes y el 37.0% presentaron sensibilidad variable. Estos hallazgos confirman que los estetoscopios constituyen reservorios de bacterias multirresistentes, lo que refleja prácticas de desinfección inadecuadas, especialmente en áreas críticas. Se recomienda establecer protocolos estrictos de desinfección, implementar un monitoreo microbiológico periódico y fortalecer la capacitación continua del personal para reducir el riesgo de infecciones nosocomiales.

**Palabras clave:** estetoscopios, multirresistencia, infección nosocomial, bioseguridad.

## ABSTRACT

The purpose of the study was to detect multidrug-resistant bacteria on stethoscopes at Jorge Reátegui Delgado Hospital in Piura. Between December 2022 and March 2023, a cross-sectional study was conducted with 229 stethoscopes sampled in six hospital areas. The samples were cultured on MacConkey agar and blood agar, and bacterial identification was performed using the MicroScan Walkaway 96 Plus system. Twenty-seven bacteria were isolated, with *Pseudomonas stutzeri* being the most frequent (55.6%, 15/27). The highest contamination was recorded in the operating room (33.3%). In terms of resistance profiles, 55.6% of the strains were sensitive, 7.4% were resistant, and 37.0% showed variable sensitivity. These findings confirm that stethoscopes are reservoirs of multidrug-resistant bacteria, reflecting inadequate disinfection practices, especially in critical areas. It is recommended that strict disinfection protocols be established, periodic microbiological monitoring be implemented, and ongoing staff training be strengthened to reduce the risk of nosocomial infections.

**Keywords:** stethoscopes, multidrug-resistance, cross infection, infection control.

[1] Universidad Nacional de Piura, Perú, Email: jhonar.93@hotmail.com

## INTRODUCCIÓN

El estetoscopio, creado por el médico francés René Laënnec (1781-1826), es un aparato de amplificación de sonidos corporales que facilita la exploración de órganos como el corazón, los pulmones y el abdomen. A pesar de seguir siendo esencial en el diagnóstico clínico, en las últimas décadas se ha reconocido como un posible fómite de infecciones vinculadas a la asistencia sanitaria. Las investigaciones internacionales demuestran que los estetoscopios son frecuentemente contaminados por bacterias patógenas, incluyendo cepas con resistencia antimicrobiana multidrogo (MDR). Estudios confirman que elementos como el diafragma, la campana y las olivas albergan patógenos críticos como *Staphylococcus aureus* (incluyendo MRSA) y enterobacterias, transformando estos instrumentos en potenciales vectores de transmisión de infecciones asociadas a la atención en salud (Longtin et al., 2014). Esto resulta alarmante debido a su uso continuo en pruebas físicas, en las que, además de ser un instrumento de diagnóstico económico y no invasivo, representa la relación entre médico y paciente (OMS, 2020). A pesar de que se han establecido protocolos para la limpieza de las manos, el papel del estetoscopio en la diseminación de microorganismos continúa siendo infravalorado (Brady et al., 2009; Uneke et al., 2010)

Estudios a nivel internacional, nacional han reportado consistentemente esta problemática. Trabajos realizados en otros contextos, como Francia (Bernard et al., 1999), identificaron en estetoscopios bacterias como *Staphylococcus aureus* y bacilos gramnegativos como *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli*. De manera similar, en Estados Unidos (Smith et al., 1996), se detectaron *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus* spp. y bacilos gramnegativos como *Klebsiella pneumoniae* en unidades de cuidado intensivo.

A nivel nacional, en Perú, investigaciones realizadas en Lima (Oliva-Menacho et al., 2017) lograron aislar bacterias patógenas multidrogorresistentes en estos dispositivos. Asimismo, un estudio en Puno (Charca Chua, 2019) identificó específicamente la presencia de *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae* en los estetoscopios del personal de salud, confirmando que esta problemática también está presente y documentada en el contexto peruano.

Esta investigación tiene como objetivo detectar bacterias potencialmente patógenas multirresistentes en estetoscopios utilizados por médicos, enfermeros y obstetras en el Hospital Jorge Reátegui Delgado de Piura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño

Se realizó un estudio observacional, transversal y descriptivo para evaluar bacterias potencialmente patógenas multirresistentes en estetoscopios utilizados por personal de salud en el Hospital Jorge Reátegui Delgado. El estudio contó con la aprobación del comité de ética institucional y se obtuvo el consentimiento informado de todos los participantes. El diseño incluyó muestreo sistemático en seis áreas hospitalarias (Cirugía, Consultorios Externos, Neonatología, Pediatría, Sala de Operaciones y UVI), con análisis microbiológico estandarizado y evaluación automatizada de resistencia antimicrobiana.

### Población de estudio y muestra

La población comprendió 561 profesionales (226 médicos, 289 enfermeras, 46 obstetras). Mediante muestreo proporcional, se seleccionaron 229 participantes (92 médicos, 118 enfermeras, 19 obstetras). Los estetoscopios muestreados (n=229) pertenecían a personal clínico activo, enfocándose en superficies de contacto directo (diafragma y olivas).

### Procedimiento

El protocolo del estudio fue revisado y aprobado por el comité de ética de la Universidad Nacional de Piura N°006-FCC-UNP-2022 posteriormente entregado al Hospital Jorge Reátegui Delgado. Se solicitó el consentimiento informado por escrito a cada participante, explicando los objetivos y procedimientos del estudio, y garantizando la confidencialidad de sus datos bajo los principios de la Declaración de Helsinki. El estudio fue clasificado como de riesgo mínimo.

### Muestreo

Se hisopó un área de 1 $cm^2$ del diafragma y olivas con hisopos estériles humedecidos en caldo infusión cerebro corazón (BHI, Brain Heart Infusion) (Smith et al., 1996; Uneke et al., 2010). Las muestras se transportaron a 4°C al laboratorio dentro de las 2 horas posteriores a la recolección para preservar la viabilidad bacteriana (Clinical and Laboratory Standards Institute (Lewis et al., 2024)

### Procesamiento microbiológico

Las muestras se sembraron en agar MacConkey y agar sangre al 5%, y se incubaron a 37°C por 24-48 horas en atmósfera aeróbica (Brady et al., 2009). La identificación bacteriana se realizó mediante tinción de Gram, pruebas bioquímicas convencionales (oxidasa, catalasa) y se confirmó con el sistema automatizado MicroScan Walkaway 96 Plus (Beckman Coulter) (Lewis et al., 2024).

**Análisis de resistencia**

Se utilizaron paneles MicroScan® Combo 66 para determinar los perfiles de sensibilidad a los antimicrobianos (CLSI, 2015).(Lewis et al., 2024). La interpretación de la Concentración Inhibitoria Mínima (CIM) se realizó de forma automatizada y se clasificó según los puntos de corte establecidos por el Clinical and Laboratory Standards Institute (Lewis et al., 2024).

## RESULTADOS

En el estudio se identificaron 27 aislamientos de bacterias multirresistentes en estetoscopios clínicos. El microorganismo más frecuente fue *Pseudomonas stutzeri* (55.6%, 15/27), seguido por *Burkholderia cepacia complex* (11.1%, 3/27), *Burkholderia gladioli* (7.4%, 2/27), *Shewanella putrefaciens* (7.4%, 2/27) y *Vibrio fluvialis/furnissii* (7.4%, 2/27). Otras bacterias de relevancia clínica, aunque menos frecuentes, incluyeron *Pseudomonas aeruginosa* (3.7%, 1/27), *Acinetobacter baumannii complex* (3.7%, 1/27) y *Acinetobacter lwoffii* (3.7%, 1/27).

**Tabla 1**

*Bacterias potencialmente multirresistentes encontradas en estetoscopios clínicos.*

| **Bacterias potencialmente patógenas multirresistentes** | **n°** | **%** |
|---|---|---|
| Pseudomonas stutzeri | 15 | 55.6% |
| Burkholderia cepacia complex | 03 | 11.1% |
| Burkholderia gladioli | 02 | 7.4% |
| Vibrio fluviales/furnissi | 02 | 7.4% |
| Shewanella putrefaciens | 02 | 7.4% |
| Pseudomonas aeruginosa | 01 | 3.7% |
| Acinetobacter baumannii complex | 01 | 3.7% |
| Acinetobacter lwoffii | 01 | 3.7% |
| **TOTAL** | **27** | **100%** |

*Nota:* Los porcentajes fueron 27 aislamientos totales. P. stutzeri representa 55.6% (15/27)

La Sala de Operaciones presentó la mayor contaminación (33.3%, 9/27), seguida de Pediatría (25.9%, 7/27) y Consultorios Externos (22.2%, 6/27). Áreas como Neonatología y Cirugía registraron 2 aislamientos cada una (7.4%), mientras que la Unidad de Vigilancia Intensiva (UVI) tuvo solo un caso (3.8%).

**Tabla 2**

*Bacterias potencialmente multirresistentes encontradas en estetoscopios clínicos, según área.*

| **Bacterias potencialmente patógenas multirresistentes** | **A** | **B** | **C** | **D** | **E** | **F** | **TOTAL** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Pseudomonas aeruginosa* | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| *Pseudomonas stutzeri* | 1 | 3 | 0 | 3 | 7 | 1 | 15 |
| *Burkholderia cepacia complex* | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| *Vibrio fluviales/furnissi* | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| *Burkholderia gladioli* | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| *Shewanella putrefaciens* | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| *Acinetobacter baumannii complex* | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| *Acinetobacter lwoffii* | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| ***TOTAL*** | **2** | **6** | **2** | **7** | **9** | **1** | **27** |

| ÁREAS | % |
|---|---|
| | |
| **A** | 7.4% |
| **B** | 22.2% |
| **C** | 7.4% |
| **D** | 25.9% |
| **E** | 33.3% |
| **F** | 3.8% |
| **TOTAL** | 100% |

*Nota:* Las áreas hospitalarias se codificaron como: A = Cirugía; B = Consultorios Externos; C = Neonatología; D = Pediatría; E = Sala de Operaciones; F = Unidad de Vigilancia Intensiva (UVI).

Finalmente, se registraron tres microorganismos con características variadas de sensibilidad: Cada uno de los microorganismos, *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter lwoffii* y *Vibrio fluvialis/furnissii*, fueron aislados. La Sala de Operaciones volvió a ser la zona que mostraba la mayor cantidad de bacterias que podrían ser patógenas, según esta categorización.

Se identificaron 27 aislamientos de bacterias multirresistentes. El 55.6% (15/27) correspondió a cepas sensibles, predominantemente *Pseudomonas stutzeri*. El 7.4% (2/27) mostró resistencia completa, incluyendo *Acinetobacter baumannii complex* y *Burkholderia gladioli.* El 37.0% (10/27) presentó patrones de sensibilidad variable, distribuidos entre *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter lwoffii* y *Vibrio fluvialis/furnissii.*

**Tabla 3**

*Resumen de bacterias potencialmente clasificadas en sensibles, resistentes e intermedio encontradas en estetoscopios clínicos.*

| Categoría | Bacterias potencialmente patógenas | n° | % |
|---|---|---|---|
| Sensibles | *Pseudomonas stutzeri* | 15 | 57.6% |
| | *Burkholderia gladioli* | 02 | 7.4% |
| | *Shewanella putrefaciens* | 02 | 7.4% |
| | Subtotal Sensibles | 19 | 70.4% |
| Resistentes | *Acinetobacter baumannii complex* | 1 | 3.7% |
| | *Burkholderia gladioli* | 1 | 3.7% |
| | Subtotal Resistentes | 2 | 7.4% |
| Intermedio | *Pseudomonas aeruginosa* | 1 | 3.7% |
| | *Acinetobacter lwoffii* | 1 | 3.7% |
| | *Vibrio fluviales/furnissi* | 2 | 7.4% |
| | Subtotal Sensible-Resistente | 4 | 22.2% |
| Total | | 27 | 100% |

*Nota:*Clasificación de bacterias según perfil de susceptibilidad

Las cepas sensibles (55.6%) mostraron susceptibilidad a los principales grupos antimicrobianos evaluados, incluyendo aminoglucósidos (amikacina, gentamicina), fluoroquinolonas (ciprofloxacina), cefalosporinas de tercera generación (ceftazidima) y carbapenémicos (imipenem).

**Tabla 4**

*Antimicrobianos sensibles evaluados: grupo terapéutico y generación correspondiente.*

| Antibiótico | Grupo/Familia |
|---|---|
| Amikacina | Aminoglucósido |
| Gentamicina | Aminoglucósido |
| Tobramicina | Aminoglucósido |
| Ciprofloxacina | Fluoroquinolona |
| Levofloxacina | Fluoroquinolona |
| Ceftazidima | Cefalosporina (3ra generación) |
| Cefepima | Cefalosporina (4ta generación) |
| Imipenem | Carbapenémico |
| Meropenem | Carbapenémico |
| Ampicilina/Sulbactam | Penicilina + Inhibidor β-lactamasa |
| Piperacilina/Tazobactam | Ureidopenicilina + Inhibidor |

Las cepas resistentes (7.4%) demostraron resistencia completa a todos los antimicrobianos evaluados, incluyendo betalactámicos con inhibidores (ampicilina/sulbactam), cefalosporinas de tercera generación (ceftazidima), carbapenémicos (meropenem), fluoroquinolonas (ciprofloxacina) y aminoglucósidos (amikacina).

**Tabla 5**

*Antimicrobianos resistentes evaluados: grupo terapéutico y generación correspondiente.*

| Antibiótico | Grupo/Familia |
|---|---|
| Amikacina | Aminoglucósido |
| Gentamicina | Aminoglucósido |
| Tobramicina | Aminoglucósido |
| Ciprofloxacina | Fluoroquinolona |
| Levofloxacina | Fluoroquinolona |
| Ceftazidima | Cefalosporina (3ra generación) |
| Cefepima | Cefalosporina (4ta generación) |
| Imipenem | Carbapenémico |
| Meropenem | Carbapenémico |
| Ampicilina/Sulbactam | Penicilina + Inhibidor β-lactamasa |

Las cepas con sensibilidad variable (37.0%) mostraron patrones heterogéneos de resistencia, con susceptibilidad mantenida a carbapenémicos (imipenem) y aminoglucósidos (amikacina), pero resistencia variable a betalactámicos/inhibidores (piperacilina/tazobactam), cefalosporinas (ceftazidima) y fluoroquinolonas (ciprofloxacina).

**Tabla 6**

*Antimicrobianos intermedios evaluados: grupo terapéutico y generación correspondiente.*

| Antibiótico | Grupo/Familia |
|---|---|
| Amikacina | Aminoglucósido |
| Gentamicina | Aminoglucósido |
| Ciprofloxacina | Fluoroquinolona |
| Ceftazidima | Cefalosporina (3ra generación) |
| Imipenem | Carbapenémico |
| Piperacilina/Tazobactam | Ureidopenicilina + Inhibidor |

## DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio demuestran una elevada contaminación de los estetoscopios (27 aislamientos) con bacterias potencialmente patógenas. El análisis de los perfiles de resistencia (Tabla 3) reveló que el 55.6% de las cepas fueron sensibles, el 7.4% resistentes y el 37.0% presentaron sensibilidad variable. Este escenario complejo, donde coexisten cepas sensibles con cepas resistentes, indica que los estetoscopios pueden actuar como reservorios tanto de variantes ambientales como de cepas clínicamente relevantes portadoras de mecanismos de resistencia.

La distribución por áreas hospitalarias (Tabla 2) reveló que la Sala de Operaciones presentó la mayor contaminación (33.3%, 9/27), seguida de Pediatría (25.9%, 7/27) y Consultorios Externos (22.2%, 6/27). Este patrón es alarmante y sugiere deficiencias críticas en los protocolos de desinfección, especialmente en entornos donde se esperaría una esterilidad más rigurosa, como el quirófano (Longtin et al., 2014). La persistencia de microorganismos en estas áreas a pesar de los protocolos de limpieza indica la necesidad de implementar métodos de desinfección más efectivos.

El predominio de *Pseudomonas stutzeri* (55.6%, 15/27) concuerda con la reconocida capacidad de esta especie para adaptarse a diversos ambientes (Stanier et al., 1966). Su predominio en la Sala de Operaciones (7/15 aislamientos) podría atribuirse a su resistencia a variaciones de temperatura y su capacidad para generar biopelículas en superficies médicas (Halabi et al., 2019; Lalucat et al., 2006). La identificación de cepas sensibles difiere de informes sobre resistencia plasmídica (Toleman et al., 2007), lo que sugiere que los estetoscopios podrían estar colonizados principalmente por variantes ambientales.

La presencia de *Burkholderia cepacia complex* (11.1%) y *B. gladioli* (7.4%) en áreas de Neonatología y Pediatría resulta particularmente preocupante, concordando con investigaciones acerca de su persistencia en entornos húmedos y su asociación con infecciones nosocomiales (Berg et al., 1999). La resistencia detectada en uno de los aislamientos de *B. gladioli* subraya la necesidad de una vigilancia continua. Aunque menos frecuentes, *Acinetobacter baumannii complex* y *A. lwoffii* presentan una relevancia clínica significativa. La resistencia completa de *A. baumannii* refleja los patrones epidemiológicos

actuales (Peleg et al., 2008), mientras que el perfil variable de *A. lwoffii* evidencia la complejidad de los patrones de resistencia en bacterias hospitalarias.

Estos hallazgos respaldan la necesidad de clasificar los estetoscopios como fómites de alto riesgo, requiriendo intervenciones inmediatas que incluyan desinfección obligatoria entre pacientes, monitoreo microbiológico periódico y capacitación continua sobre control de infecciones (Brady et al., 2009; Uneke et al., 2010), especialmente en áreas quirúrgicas y de cuidados intensivos.

## CONCLUSIONES

El estudio identificó una elevada contaminación de estetoscopios (27 aislamientos), siendo *Pseudomonas stutzeri* el patógeno más frecuente (55.6%). La Sala de Operaciones presentó la mayor contaminación (33.3%), evidenciando fallas críticas en los protocolos de desinfección. Los perfiles de resistencia mostraron 55.6% de cepas sensibles, 7.4% multirresistentes (*A. baumannii*, *B. gladioli*) y 37.0% con sensibilidad variable. Los estetoscopios actúan como reservorios de bacterias multirresistentes, especialmente en áreas de alto riesgo como Sala de Operaciones, Pediatría y Consultorios Externos. Se recomienda implementar urgentemente: 1) desinfección obligatoria entre pacientes, 2) monitoreo microbiológico periódico, y 3) capacitación continua en control de infecciones. Estos hallazgos respaldan clasificar los estetoscopios como fómites de alto riesgo que requieren intervenciones inmediatas en bioseguridad hospitalaria.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berg, G., Roskot, N., & Smalla, K. (1999). Genotypic and phenotypic relationships between clinical and environmental isolates of stenotrophomonas maltophilia. *Journal of Clinical Microbiology*, *37*(11), 3594. https://doi.org/10.1128/JCM.37.11.3594-3600.1999

Bernard, L., Kereveur, A., Durand, D., Gonot, J., Goldstein, F., Mainardi, J. L., Acar, J., & Carlet, J. (1999). Bacterial contamination of hospital physicians' stethoscopes. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, *20*(9), 626–628. https://doi.org/10.1086/501686

Brady, R. R. W., Verran, J., Damani, N. N., & Gibb, A. P. (2009). Review of mobile communication devices as potential reservoirs of nosocomial pathogens. *Journal of Hospital Infection*, *71*(4), 295–300. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2008.12.009

Charca, L. (2019). Staphylococcus aureus, Escherichia coli y Klebsiella pneumoniae en estetoscopios del personal asistencial y en los ambientes de medicina general del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón - Puno. *Universidad Nacional Del Altiplano*. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11069

Halabi, Z., Mocadie, M., El Zein, S., & Kanj, S. S. (2019). Pseudomonas stutzeri prosthetic valve endocarditis: A case report and review of the literature. *Journal of Infection and Public Health*, *12*(3), 434–437. https://doi.org/10.1016/J.JIPH.2018.07.004

Lalucat, J., Bennasar, A., Bosch, R., García-Valdés, E., & Palleroni, N. J. (2006). Biology of pseudomonas stutzeri . *Microbiology and molecular biology reviews*, *70*(2). https://doi.org/10.1128/mmbr.00047-05

Lewis, J. S., Mathers, A. J., Bobenchik, A. M., Bryson, A. L., Campeau, S., Cullen, S. K., & Dingle, T. (2024). M100Ed34 | Performance standards for antimicrobial susceptibility testing, 34th Edition. *A CLSI Supplement for Global Application.*

Longtin, Y., Schneider, A., Tschopp, C., Renzi, G., Gayet-Ageron, A., Schrenzel, J., & Pittet, D. (2014). Contamination of stethoscopes and physicians' hands after a physical examination. *Mayo Clinic Proceedings*, *89*(3). https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2013.11.016

Oliva-Menacho, J., Oliva-Candela, J., & Garcia-Hjarles, M. (2017). Bacterias patógenas multidrogoresistentes aisladas en estetoscopios de médicos en un hospital de nivel III. *Revista Médica Herediana*, *28*(4). https://doi.org/10.20453/rmh.v28i4.3224

Organización Mundial de la Salud. (2020). Limpieza y desinfección de las superficies del entorno inmediato en el marco de la COVID-19. *Organizacion Mundial de La Salud*, *1*.

Peleg, A. Y., Seifert, H., & Paterson, D. L. (2008). Acinetobacter baumannii: Emergence of a successful pathogen. In *Clinical Microbiology Reviews* (Vol. 21, Issue 3). https://doi.org/10.1128/CMR.00058-07

Smith, M. A., Mathewson, J. J., Ulert, I. A., Scerpella, E. G., & Ericsson, C. D. (1996). Contaminated stethoscopes revisited. *Archives of Internal Medicine*, *156*(1). https://doi.org/10.1001/archinte.156.1.82

Stanier, R. Y., Palleroni, N. J., & Doudoroff, M. (1966). The aerobic pseudomonads: a taxonomic study. *Journal of General Microbiology*, *43*(2). https://doi.org/10.1099/00221287-43-2-159

Toleman, M. A., Vinodh, H., Sekar, U., Kamat, V., & Walsh, T. R. (2007). blaVIM-2-harboring integrons isolated in India, Russia, and the United States arise from an ancestral class 1 integron predating the formation of the 3′ conserved sequence. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *51*(7). https://doi.org/10.1128/AAC.01043-06

Uneke, C. J., Ogbonna, A., Oyibo, P. G., & Onu, C. M. (2010). Bacterial contamination of stethoscopes used by health workers: Public health implications. *Journal of Infection in Developing Countries*, *4*(7). https://doi.org/10.3855/jidc.701

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 27 al 36
DOI: https://doi.org/10.37787/df7ver23

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-9805

## ARTÍCULO ORIGINAL

# *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina en teléfonos de médicos y enfermeras en un hospital piurano.

# Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* contamination of the telephones of doctors and nurses in a Piura hospital.

Jonathan Aranda 1,*

## RESUMEN

Determinar la prevalencia de contaminación por *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (SARM) en teléfonos móviles del personal de salud de un hospital de Piura, Perú. Estudio transversal que analizó 210 teléfonos móviles (92 de médicos y 118 de enfermeras). Las muestras se recolectaron mediante hisopado de superficie, sembrándose en agar manitol salado. La identificación bacteriana incluyó tinción de Gram, pruebas bioquímicas y confirmación mediante sistema automatizado. La resistencia a meticilina se determinó según guidelines CLSI 2023. El análisis estadístico incluyó pruebas de chi-cuadrado con significancia de $p < 0.05$. La prevalencia global de contaminación por SARM fue de 27.1%. El personal de enfermería presentó mayor prevalencia (30.5%) compared to médicos (22.8%), aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa ($p = 0.195$). Solo el 21.4% de los participantes reportó realizar limpieza diaria de sus dispositivos. Los teléfonos móviles constituyen un reservorio importante de SARM en el ambiente hospitalario, especialmente entre el personal de enfermería. Los resultados destacan la necesidad crítica de implementar protocolos de desinfección periódica y reforzar las medidas de higiene de manos, particularmente en grupos de mayor exposición. Se recomienda la implementación de programas educativos continuos y futuras investigaciones con caracterización molecular de cepas.

**Palabras clave:** SARM; teléfonos; personal salud; hospital.

## ABSTRACT

To determine the prevalence of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) contamination on mobile phones belonging to healthcare personnel at a hospital in Piura, Peru. A cross-sectional study analyzed 210 mobile phones (92 belonging to physicians and 118 belonging to nurses). Samples were collected by surface swabbing and inoculation on mannitol salt agar. Bacterial identification included Gram staining, biochemical testing, and confirmation using an automated system. Methicillin resistance was determined according to CLSI 2023 guidelines. Statistical analysis included chi-square tests with significance at $p < 0.05$. The overall prevalence of MRSA contamination was 27.1%. Nursing personnel had a higher prevalence (30.5%) compared to physicians (22.8%), although this difference was not statistically significant ($p = 0.195$). Only 21.4% of participants reported cleaning their devices daily. Mobile phones constitute a significant reservoir of MRSA in the hospital setting, especially among nursing staff. The results highlight the critical need to implement periodic disinfection protocols and strengthen hand hygiene measures, particularly in high-exposure groups. The implementation of ongoing educational programs and future research with molecular characterization of strains are recommended.

**Keywords:** MRSA; phones; medical staff; hospital.

.

* Autor para correspondencia

[1] Universidad Nacional de Piura, Perú. Email: jhonar.93@hotmail.com

## INTRODUCCIÓN

*Staphylococcus aureus* es un patógeno Gram positivo de gran relevancia clínica debido a su capacidad para causar infecciones que van desde leves, como las infecciones cutáneas, hasta enfermedades graves como la sepsis y la endocarditis, especialmente en entornos hospitalarios donde la resistencia a los antibióticos complica su manejo terapéutico (Brady et al., 2009; Weterings et al., 2020).

Este microorganismo, que forma parte del microbiota humano en aproximadamente el 25 % al 50 % de la población sana, puede convertirse en un patógeno oportunista cuando el sistema inmunológico del huésped se debilita, facilitando así su propagación y transmisión (Selim & Abaza, 2015)

Una de las mayores preocupaciones en salud pública es la emergencia de *S. aureus* resistente a meticilina (SARM), cuya resistencia está mediada por el gen mecA, el cual codifica una proteína de unión a penicilina (PBP2a) con baja afinidad por los antibióticos β-lactámicos, lo que limita significativamente las opciones terapéuticas (Adhikari et al., 2023)

La resistencia antimicrobiana constituye un fenómeno global en aumento, particularmente en entornos hospitalarios donde la presión selectiva derivada del uso intensivo de antibióticos favorece la selección de cepas resistentes (Mouahid et al., 2024).

Este problema se agrava por el uso inadecuado de antibióticos en la agricultura y ganadería, donde grandes cantidades de estos fármacos son liberadas al medio ambiente, aumentando la presión selectiva sobre los microorganismos y favoreciendo la transferencia de genes de resistencia (Chang et al., 2014)

En este contexto, los teléfonos móviles han sido identificados como posibles reservorios de microorganismos patógenos, incluyendo *S. aureus*, debido a su uso frecuente por parte del personal sanitario y a la falta de prácticas adecuadas de desinfección (Ulger et al., 2015).

Estudios recientes han demostrado que aproximadamente el 79 % de los teléfonos móviles del personal de salud están contaminados, y entre ellos, *S. aureus* está presente en un 24,5 % de los casos, con un 25 % de dichos aislamientos resistentes a meticilina (Ulger et al., 2015).

En Perú, si bien los datos específicos en teléfonos móviles en hospitales de Piura no están disponibles, la contaminación hospitalaria es una preocupación latente. Se reportó una prevalencia del 3,9 % de infecciones intrahospitalarias en 2015 en las unidades de cuidados intensivos, aunque este dato sería reforzado con fuentes locales específicas. La falta de recursos y la deficiente infraestructura en los hospitales del Ministerio de Salud agravan esta situación, lo que subraya la necesidad de implementar medidas preventivas efectivas (Tamayo-Contreras et al., 2021)

Asimismo, la contaminación de dispositivos móviles representa un desafío adicional, ya que son usados constantemente por el personal de salud sin una adecuada desinfección, convirtiéndose en fómites que pueden facilitar la transmisión de microorganismos resistentes (Brady et al., 2009).

Por ejemplo, estudios sugieren que la limpieza con alcohol isopropílico al 70 % podría reducir significativamente la carga bacteriana en los teléfonos móviles, lo que sugiere que medidas simples podrían tener un impacto importante en la prevención de infecciones (Lompo et al., 2023)

La identificación de *S. aureus* resistente a meticilina en teléfonos móviles del personal sanitario resalta la importancia de protocolos de bioseguridad más estrictos, así como la necesidad de sensibilizar a los profesionales sobre los riesgos asociados al uso de estos dispositivos en contextos clínicos (Adhikari et al., 2023).

Además, la detección temprana de cepas resistentes mediante técnicas moleculares, como la PCR, es fundamental para prevenir brotes nosocomiales y optimizar el manejo terapéutico de las infecciones causadas por este patógeno (Adhikari et al., 2023)

Este estudio tiene como objetivo determinar *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (SARM) en teléfonos de médicos y enfermeras en un hospital piurano. La hipótesis planteada fue que la prevalencia de SARM sería mayor al 20% y que existiría una diferencia significativa entre las categorías profesionales, con una mayor contaminación en el personal de enfermería.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño y ámbito de estudios:

Se llevó a cabo un estudio de corte transversal en el Hospital de Apoyo II Santa Rosa, Piura, Perú, entre agosto y noviembre de 2024.

### Población, muestra y muestreo:

La población de estudio estuvo conformada por 226 médicos y 289 enfermeras en servicio activo. El tamaño muestral se calculó utilizando la fórmula para estimar una proporción poblacional, con un nivel de confianza del 95% (Z=1.96), una prevalencia esperada de 24.5% (Ulger et al., 2015), y un margen de error del 5%. El cálculo resultó en un mínimo de 185 participantes. Se ajustó por un posible 15% de no respuesta, obteniendo una muestra final de 210 participantes (92 médicos y 118 enfermeras), seleccionados mediante muestreo aleatorio simple desde listas proporcionadas por la oficina de recursos humanos.

### Criterios de inclusión y exclusión:

Se incluyó al personal que aceptó participar firmando el consentimiento informado y que utilizaba el mismo teléfono móvil durante su jornada laboral. Se excluyó a aquellos que habían limpiado su dispositivo con agentes antibacterianos en las 4 horas previas al muestreo.

### Recolección de muestras y procesamiento microbiológico:

Se recolectaron muestras de una superficie de 1 $cm^2$ en la pantalla del teléfono mediante hisopos estériles humedecidos con caldo cerebro corazón (BHI)(Smith et al., 1996). Los hisopos se transportaron al

laboratorio a 4°C y se procesaron en un plazo máximo de 2 horas. Cada hisopo se inoculó en agar manitol salado (AMS) y se incubó a 37°C durante 24-48 horas. Las colonias presumibles de *S. aureus* (amarillas en AMS) se sometieron a tinción de Gram y pruebas de catalasa y coagulasa. La identificación final y la prueba de susceptibilidad antimicrobiana se realizaron utilizando el sistema automatizado Microscan Walkaway 96 plus (Beckman Coulter, USA). En paneles que solo contienen oxacilina, los estafilococos deben reportarse como resistentes, independientemente de la CIM, a ampicilina, amoxicilina/ácido clavulánico, ampicilina/sulbactam, ertapenem, imipenem, meropenem, penicilina, piperacilina/tazobactam, ticarcilina/ácido clavulánico y cefalosporinas (excepto ceftarolina) cuando la CIM de oxacilina sea mayor de 2 μg/mL para *S. aureus* y *S. lugdunensis*, o mayor o igual a 0,5 μg/mL para estafilococos coagulasa negativos que no sean *S. lugdunensis*. Cuando el panel incluye tanto oxacilina como el pocillo de detección de cefoxitina (CfxS), los estafilococos deben informarse como resistentes a los mismos antimicrobianos si CfxS es mayor de 4 μg/mL para cualquier estafilococo, o si la CIM de oxacilina supera 2 μg/mL en *S. aureus* y *S. lugdunensis*, o es mayor o igual a 0,5 μg/mL en los demás estafilococos coagulasa negativos; además, para estos últimos, si CfxS es ≤ 4 μg/mL y la CIM de oxacilina es exactamente 0,5 μg/mL y mecA resulta negativo, la oxacilina se reporta como sensible (S*), mientras que si la CIM es 1 o 2 μg/mL y CfxS sigue ≤ 4 μg/mL, el estado de mecA es variable y debe confirmarse antes de informar sensibilidad.. En cada lote de pruebas se incluyeron las cepas control ATCC 29213 (*S. aureus sensible*) y ATCC 43300 (SARM).(Lewis et al., 2024)

**Consideraciones éticas:**

El estudio fue aprobado por el Comité de Ética en Investigación del Hospital de Apoyo II Santa Rosa (N°34-2024). Se obtuvo el consentimiento informado por escrito de cada participante, explicándose los objetivos del estudio y el anonimato de los datos.

**Análisis estadístico:**

Los datos se analizaron con el software Stata v.18.0. Las variables categóricas se expresaron como frecuencias y proporciones. La comparación de proporciones entre grupos se realizó mediante la prueba de Chi-cuadrado de Pearson. La fuerza de la asociación se estimó mediante la razón de prevalencias (RP) con su correspondiente intervalo de confianza del 95% (IC 95%). Un valor de $p < 0,05$ se consideró estadísticamente significativo.

**RESULTADOS**

Se analizaron un total de 210 teléfonos móviles. La tasa de contaminación global con SARM fue del 27,1% (57/210; IC 95%: 21,3% - 33,7%). Al estratificar por profesión, se observó una prevalencia del 22,8% (21/92; IC 95%: 14,8% - 32,9%) en médicos y del 30,5% (36/118; IC 95%: 22,5% - 39,6%) en enfermeras. Aunque numéricamente mayor en enfermeras, esta diferencia no fue estadísticamente

significativa ($\chi^2$ = 1,68; gl=1; valor p = 0,195). La razón de prevalencias (RP) de contaminación para enfermeras versus médicos fue de 1,34 (IC 95%: 0,84 - 2,14).

**Tabla 1**

*Distribución de la población y muestra por categoría profesional*

| Variable | Población total (n) | Muestra recogida (n) | Porcentaje muestreado (%) |
|---|---|---|---|
| Médicos | 226 | 92 | 40.7% |
| Enfermeras | 298 | 118 | 40.8% |
| **Total** | **515** | **210** | **40.8%** |

*Nota:* La muestra se seleccionó mediante un muestreo aleatorio simple.

El análisis de las características de los dispositivos móviles mostró que la gran mayoría (190/210; 90.5%) correspondían a smartphones, con una distribución similar entre médicos (92.4%) y enfermeras (89.0%). Respecto al uso de fundas protectoras, se observó que 160 dispositivos (76.2%) contaban con este accesorio, presentando porcentajes casi idénticos entre ambos grupos profesionales (76.1% en médicos vs 76.3% en enfermeras).

En cuanto a las prácticas de limpieza, solo 45 participantes (21.4%) reportaron realizar limpieza diaria de sus dispositivos, sin diferencias significativas entre médicos (21.7%) y enfermeras (21.2%). Estos resultados indican que, aunque existe una alta penetración de smartphones y uso de fundas protectoras entre el personal de salud, las prácticas de limpieza regular son notablemente bajas en ambos grupos profesionales, lo que podría contribuir a la persistencia de contaminación microbiana observada en el estudio.

**Tabla 2**

*Características de los dispositivos móviles y prácticas de limpieza según categoría profesional*

| Característica | Médicos (n=92) | Enfermeras (n=118) | Total (n=210) |
|---|---|---|---|
| **Smartphone (%)** | 85 (92.4%) | 105 (89.0%) | 190 (90.5%) |
| **Uso de funda (%)** | 70 (76.1%) | 90 (76.3%) | 160 (76.2%) |
| **Limpieza diaria (%)** | 20 (21.7%) | 25 (21.2%) | 45 (21.4%) |

Nota: Los valores representan frecuencia absoluta (n) y porcentaje (%).

El análisis microbiológico reveló que 57 muestras (27.1%; IC 95%: 21.3% - 33.7%) fueron positivas para SARM. Al estratificar por profesión, se observó que: 21 casos positivos (36.8% del total de SARM) correspondieron a médicos (prevalencia: 22.8%; IC 95%: 14.8% - 32.9%) y 36 casos positivos (63.2% del total de SARM) se identificaron en enfermeras (prevalencia: 30.5%; IC 95%: 22.5% - 39.6%).

**Tabla 3**

*Prevalencia de SARM por categoría profesional*

| Profesional | Dispositivos analizados (n) | Dispositivos positivos a SARM (n) | Prevalencia (IC 95%) | Distribución del total de SARM (%) |
|---|---|---|---|---|
| Médicos | 92 | 21 | 22.8 (14.8 - 32.9) | 36.8% |
| Enfermeras | 118 | 36 | 30.5 (22.5 - 39.6) | 63.8% |
| **Total** | **210** | **57** | **27.1 (21.3 - 33.7)** | **100%** |

*Nota:* La prevalencia se calculó como (dispositivos positivos / dispositivos analizados) × 100. El IC 95% se estimó mediante el método de Wilson. La distribución porcentual representa la proporción de aislamientos positivos atribuibles a cada grupo profesional.

La comparación estadística mostró una mayor prevalencia de contaminación en enfermeras, aunque esta diferencia no alcanzó significancia estadística ($\chi^2 = 1.68$; gl = 1; p = 0.195, RPC (IC 95%) =1.34).

**Tabla 4**

*Análisis comparativo de la prevalencia de SARM entre grupos profesionales*

| Variable comparada | Médicos % (IC 95%) | Enfermeras % (IC 95%) | $\chi^2$ | gl | Valor p | RP (IC 95%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Contaminación por SARM | 22.8 (14.8 - 32.9) | 30.5 (22.5 - 39.6) | 1.68 | 1 | 0.195 | 1.34 (0.84 - 2.14) |

*Nota:* La comparación se realizó mediante prueba de Chi-cuadrado de Pearson. RP: Razón de Prevalencias (Enfermeras vs. Médicos). Un valor $p < 0.05$ se consideró estadísticamente significativo. El IC 95% para RP se calculó utilizando el método de Mantel-Haenszel.

Entre los casos negativos para SARM (n = 153), el 46.4% (71/153) correspondió a médicos y el 53.6% (82/153) a enfermeras.

**Tabla 5**

*Distribución de dispositivos negativos para SARM por categoría profesional*

| Categoría profesional | Dispositivos negativos (n) | Distribución de negativos (%) |
|---|---|---|
| Médicos | 71 | 46.4 |
| Enfermeras | 82 | 53.6 |
| **Total** | **153** | **100.0** |

*Nota:* Los dispositivos negativos corresponden a muestras donde no se aisló SARM. Los porcentajes representan la proporción de dispositivos negativos dentro de cada categoría profesional en relación al total de dispositivos negativos (n=153).

## DISCUSIÓN

Nuestro estudio realizado en el Hospital de Apoyo II Santa Rosa de Piura durante 2024 reveló una prevalencia global de contaminación por MRSA en teléfonos móviles del 27,1% (57/210; IC 95%: 21,3% - 33,7%) (Tabla 3), un hallazgo que debe interpretarse con cautela debido a limitaciones metodológicas. Si bien este porcentaje supera lo reportado en otros contextos hospitalarios donde se han documentado

tasas alrededor del 10% (Smith et al., 1996), las comparaciones deben considerarse dentro del contexto de las diferencias metodológicas.

El MRSA debe su resistencia a la presencia del gen mecA, que codifica la proteína PBP2a con baja afinidad por antibióticos β-lactámicos (Lakhundi & Zhang, 2018). Esta resistencia le confiere una notable capacidad de supervivencia en superficies inanimadas. Estudios controlados han demostrado que MRSA puede permanecer viable en teléfonos móviles hasta por 28 días (Kramer & Assadian, 2014), lo que explicaría en parte nuestros hallazgos de contaminación persistente.

Al estratificar por grupos profesionales (Tabla 3), encontramos que las enfermeras presentaron una mayor prevalencia (36/118; 30,5%; IC 95%: 22,5% - 39,6%) en comparación con los médicos (21/92; 22,8%; IC 95%: 14,8% - 32,9%)(Kopp et al., 2023). Aunque esta diferencia no alcanzó significancia estadística ($\chi^2 = 1,68$; gl = 1; p = 0,195; RP = 1,34; IC 95%: 0,84 - 2,14) (Tabla 4), sigue un patrón consistentemente reportado en la literatura (Brady et al., 2009), posiblemente relacionado con el mayor contacto directo con pacientes durante los cuidados rutinarios, lo que incrementa las oportunidades de transferencia bacteriana.

El análisis de las características de los dispositivos (Tabla 2) mostró que, si bien la mayoría (90,5%) eran smartphones y contaban con fundas protectoras (76,2%), solo el 21,4% de los participantes reportó realizar limpieza diaria de sus dispositivos(Albastaki et al., 2023). Esta baja frecuencia de limpieza, similar en ambos grupos profesionales, podría ser un factor crucial que contribuye a la alta contaminación observada.(Halatoko et al., 2023; Kopp et al., 2023)

La distribución de dispositivos negativos (Tabla 5) mostró que el 53,6% correspondió a enfermeras y el 46,4% a médicos, lo que refuerza el patrón de mayor contaminación en el grupo de enfermeras.

Entre las limitaciones metodológicas más relevantes, debemos destacar la ausencia de controles de calidad microbiológica durante el procesamiento de muestras, lo que podría afectar la validez de nuestros resultados. Asimismo, el uso de agar manitol salado como medio primario, sin confirmación molecular sistemática de portadores del gen mecA, impide descartar completamente falsos positivos. El diseño transversal impide establecer causalidad, y no podemos descartar sesgos de selección o información. Tampoco se controlaron potenciales factores de confusión como el tiempo de uso de los dispositivos, las áreas hospitalarias de trabajo o el cumplimiento real de protocolos de higiene de manos.(Hamdan-Partida et al., 2022; Lakhundi & Zhang, 2018)

Estos hallazgos, aunque preliminares, resaltan la necesidad de implementar protocolos estandarizados de desinfección de dispositivos móviles y reforzar las prácticas de higiene de manos, particularmente en el personal con mayor exposición a pacientes. Sin embargo, nuestras recomendaciones deben circunscribirse a los hallazgos reales del estudio, evitando extrapolaciones no evaluadas directamente.

Futuros estudios deberían incorporar: 1) controles de calidad microbiológica rigurosos, 2) confirmación molecular de cepas MRSA, 3) ajuste por factores de confusión relevantes, y 4) evaluación de intervenciones específicas de desinfección antes de hacer recomendaciones concretas para la práctica clínica.

## CONCLUSIONES

Los resultados del estudio revelan que los teléfonos móviles del personal de salud constituyen un importante reservorio de SARM en el ambiente hospitalario, con una prevalencia global del 27.1%. Se observó una mayor tendencia de contaminación en el personal de enfermería (30.5%) en comparación con los médicos (22.8%), representando las enfermeras casi dos tercios del total de aislamientos positivos. Si bien esta diferencia no alcanzó significancia estadística, el patrón observado justifica la implementación de medidas preventivas específicas para este grupo. El análisis de características de los dispositivos revela que, aunque existe una alta penetración de smartphones y uso de fundas protectoras, solo una minoría de los participantes reporta realizar limpieza diaria de sus dispositivos, identificándose esta práctica insuficiente como un factor crucial modificable. La distribución de dispositivos no contaminados corrobora el gradiente de contaminación, mostrando proporcionalmente más cultivos negativos entre médicos que entre enfermeras. Estos resultados subrayan la necesidad urgente de establecer protocolos estandarizados de desinfección periódica de dispositivos móviles, complementados con programas educativos continuos sobre bioseguridad e higiene de manos, especialmente dirigidos al personal de enfermería. Se recomienda profundizar la investigación mediante caracterización molecular de las cepas aisladas y evaluación de métodos de descontaminación considerando las características específicas de los dispositivos. La implementación de estas medidas, basadas en la evidencia encontrada, contribuirá significativamente a reducir la diseminación de SARM y a fortalecer las prácticas de prevención de infecciones asociadas a la atención en salud en nuestro contexto hospitalario.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adhikari, P., Basyal, D., Rai, J. R., Bharati, L., Budthapa, A., Gharti, K. P., & Sah, S. K. (2023). Prevalence, antimicrobial susceptibility pattern and multidrug resistance of methicillin-resistant Staphylococcus aureus isolated from clinical samples at a tertiary care teaching hospital: an observational, cross-sectional study from the Himalayan country, Nepal. *BMJ Open*, *13*(5), e067384. https://doi.org/10.1136/BMJOPEN-2022-067384

Albastaki, A., Olsen, M., Almulla, H., Nassar, R., Boucherabine, S., Mohamed, L., Almheiri, R., Kachigunda, B., McKirdy, S., Alghafri, R., Tajouri, L., & Senok, A. (2023). Mobile phones as fomites for pathogenic microbes: A cross-sectional survey of perceptions and sanitization habits of health care workers in Dubai, United Arab Emirates. *Infection, Disease & Health*, *28*(1), 19–26. https://doi.org/10.1016/J.IDH.2022.07.001

Brady, R. R. W., Verran, J., Damani, N. N., & Gibb, A. P. (2009). Review of mobile communication devices as potential reservoirs of nosocomial pathogens. *Journal of Hospital Infection*, *71*(4), 295–300. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2008.12.009

Chang, Q., Wang, W., Regev-Yochay, G., Lipsitch, M., & Hanage, W. P. (2014). Antibiotics in agriculture and the risk to human health: how worried should we be? *Evolutionary Applications*, *8*(3), 240. https://doi.org/10.1111/EVA.12185

Halatoko, W. A., Bidjada, B., Sopoh, G. E., Kpaïkpaï, P., Bara, F. D., Akpanta, K., Issa, Z., Akolly, K., Sadji, Y. A., Katawa, G., Salou, M., Karou, S. D., Ouendo, E. M., Halatoko, W. A., Bidjada, B., Sopoh, G. E., Kpaïkpaï, P., Bara, F. D., Akpanta, K., … Ouendo, E. M. (2023). Effectiveness of Disinfection in Bacteriology Laboratories in Togo, 2021. *Open Journal of Preventive Medicine*, *13*(7), 213–226. https://doi.org/10.4236/OJPM.2023.137014

Hamdan-Partida, A., González-García, S., Martínez-Ruíz, F. J., Zavala-Sánchez, M. Á., Bustos-Hamdan, A., & Bustos-Martínez, J. (2022). Molecular Characterization of Staphylococcus aureus Strains Isolated from Mobile Phones. *Microorganisms*, *10*(3). https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10030669,

Kopp, J., Cawcutt, K. A., Musil, L., Huang, X., Minard, C. G., & Hetland, B. (2023). Efficacy of a bioburden reduction intervention on mobile phones of critical care nurses. *American Journal of Infection Control*, *51*(1), 35–40. https://doi.org/10.1016/J.AJIC.2022.04.013

Kramer, A., & Assadian, O. (2014). Survival of Microorganisms on Inanimate Surfaces. *Use of Biocidal Surfaces for Reduction of Healthcare Acquired Infections*, *9783319080574*, 7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08057-4_2

Lakhundi, S., & Zhang, K. (2018). Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus: Molecular Characterization, Evolution, and Epidemiology. *Clinical Microbiology Reviews*, *31*(4). https://doi.org/10.1128/CMR.00020-18,

Lewis, J. S., Mathers, A. J., Bobenchik, A. M., Bryson, A. L., Campeau, S., Cullen, S. K., & Dingle, T. (2024). M100Ed34 | Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing, 34th Edition. *A CLSI Supplement for Global Application.*

Lompo, P., Heroes, A. S., Agbobli, E., Kühne, V., Tinto, H., Affolabi, D., & Jacobs, J. (2023). Bacterial Contamination of Antiseptics, Disinfectants and Hand Hygiene Products in Healthcare Facilities in High-Income Countries: A Scoping Review. *Hygiene*, *3*(2), 136–175. https://doi.org/10.3390/HYGIENE3020012/S1

Mouahid, S. El, El Mouahid, S., Echchakery, M., Tounsi, A., & Boussaa, S. (2024). Prevalence and Inherent factors in the bacterial contamination of the mobile phones of health workers: Literature review. *Microbes and Infectious Diseases*, *0*(0), 0–0. https://doi.org/10.21608/MID.2024.262303.1756

Selim, H. S., & Abaza, A. F. (2015). Microbial contamination of mobile phones in a health care setting in Alexandria, Egypt. *GMS Hygiene and Infection Control*, *10*, Doc03. https://doi.org/10.3205/DGKH000246

Smith, M. A., Mathewson, J. J., Ulert, I. A., Scerpella, E. G., & Ericsson, C. D. (1996). Contaminated stethoscopes revisited. *Archives of Internal Medicine*, *156*(1). https://doi.org/10.1001/archinte.156.1.82

Tamayo-Contreras, H. L., Campos-Altamirano, M. S. L., Baca-Choque, Y. C., Bazán-Tanchiva, L., & Neyra-Rivera, C. D. (2021). Multirresistencia en Escherichia coli asociada a Betalactamasas de Espectro Extendido en urocultivos obtenidos en pacientes de una provincia de la Amazonía Peruana. *Revista Del Cuerpo Médico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, *14*(4). https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.144.1457

Ulger, F., Dilek, A., Esen, S., Sunbul, M., & Leblebicioglu, H. (2015). Are healthcare workers' mobile phones a potential source of nosocomial infections? Review of the literature. *Journal of Infection in Developing Countries*, *9*(10), 1046–1053. https://doi.org/10.3855/JIDC.6104

Weterings, V., Kievits, H., Rijen, M. van, & Kluytmans, J. (2020). Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus Prevalence Among Healthcare Workers in Contact Tracings in a Dutch Hospital. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, *41*(S1), s316–s317. https://doi.org/10.1017/ICE.2020.910

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 37 al 50
DOI: https://doi.org/10.37787/gq9xs443

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-6805

ARTÍCULO ORIGINAL

# Enfoque de bioingeniería para la evaluación de la relación suelo-planta en un contexto de cambio climático en el río Chancay-Lambayeque: Un caso particular en Perú

# Bioengineering approach for assessing soil-plant relationships in the context of climate change in the Chancay-Lambayeque river: A particular case in Peru

Luis Villegas[1]*

## RESUMEN

El cambio climático está modificando los patrones hidrológicos e hidráulicos en todo el mundo, en ese contexto, la bioingeniería se presenta como una estrategia innovadora para mitigar los efectos negativos del cambio climático, usando plantas locales, para estabilizar márgenes ribereñas. En ese sentido, el objetivo de esta investigación fue estudiar la relación suelo-planta bajo un enfoque de bioingeniería considerando el cambio climático a partir de un modelo global, aplicado en el río Chancay-Lambayeque, específicamente en las inmediaciones del puente Saltur, Región Lambayeque, Perú. Como primer objetivo específico, se tuvo la evaluación del caudal máximo del río Chancay-Lambayeque bajo un evento climático extremo. Mediante el segundo objetivo específico, se analizaron los parámetros hidráulicos del río mediante simulación hidráulica y con el tercer objetivo específico se evaluó el crecimiento de la especie vegetal mediante un modelo logístico que relacionó la materia seca, el período de desarrollo y las condiciones de estrés hídrico. La metodología fue tipo aplicada y diseño experimental, cuyos indicadores característicos del cambio climático fueron el caudal y precipitación. Los resultados permitieron establecer un caudal máximo de 798.23 $m^3/s$, obtenido mediante el modelo climático global del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas, usando su modelo hidrológico LISFLOOD y luego validado con un modelo precipitación-escorrentía para la cuenca Chancay-Lambayeque. Además, se determinaron las características hidráulicas del río, obteniéndose una velocidad de 3.50 m/s y tirante normal de 1.83 m, por lo que a esta altura se ubicó la especie vegetal para su desarrollo natural. Se observaron aumentos significativos en la cohesión (38.09%) y el ángulo de fricción interno del suelo (26.42%), para la altura de la planta requerida. Se concluye que, la técnica de bioingeniería aporta en gran medida al mejoramiento del suelo de la ribera del río estudiado, contribuyendo de esta manera a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**Palabras clave:** Bioingeniería; caudal; cohesión; planta; río.

## ABSTRACT

Climate change is modifying hydrological and hydraulic patterns worldwide. In this context, bioengineering is presented as an innovative strategy to mitigate the negative effects of climate change, using local plants to stabilize riparian margins. In this sense, the objective of this research was to study the soil-plant relationship under a bioengineering approach considering climate change from a global model, applied to the Chancay-Lambayeque river, specifically in the vicinity of the Saltur bridge, Lambayeque Region, Peru. The first specific objective was to evaluate the maximum flow of the Chancay-Lambayeque River under an extreme climatic event. Through the second specific objective, the hydraulic parameters of the river were analyzed through hydraulic simulation, and the third specific objective was to evaluate the growth of the plant species using a logistic model that related dry matter, development period, and water stress conditions. The methodology was applied and experimental design, whose characteristic indicators of climate change were flow and precipitation. The results allowed establishing a maximum flow of 798.23 $m^3/s$, obtained through the global climate model of the European Centre for Weather Forecasts, using its LISFLOOD hydrological model and then validated with a precipitation-runoff model for the Chancay-Lambayeque basin. In addition, the hydraulic characteristics of the river were determined, obtaining a velocity of 3.50 m/s and a normal depth of 1.83 m, so at this height the plant species was located for its natural development. Significant increases in cohesion (38.09%) and internal soil friction angle (26.42%) were noted, for

[1] Universidad Nacional del Santa, Perú. Email: 2021812011@uns.edu.pe

the required plant height. It is concluded that the bioengineering technique greatly contributes to the improvement of the soil of the riverbanks studied, thus contributing to the Sustainable Development Goals.

**Keywords:** Bioengineering; flow; cohesion; plant; river.

* Autor para correspondencia

## INTRODUCCIÓN

La intensificación de actividades humanas ha acelerado la degradación del suelo, generando procesos como la erosión, desertificación y alteraciones hidrológicas, que se ven agravados por el cambio climático (Cui et al., 2021). Frente a este escenario, la bioingeniería surge como una alternativa sostenible que combina vegetación nativa y técnicas tradicionales para restaurar ecosistemas y estabilizar suelos (Ng et al., 2022). En cuencas tropicales estacionales como la del río Chancay-Lambayeque, esta problemática se intensifica debido a la ocurrencia de lluvias extremas asociadas a fenómenos como El Niño, que provocan inundaciones y daños a la infraestructura ribereña. En este contexto, la revegetación y las soluciones bioingenieriles pueden desempeñar un papel clave para mitigar dichos impactos, fortaleciendo la estabilidad del terreno (Maxwald et al., 2020; Tardio & Mickovski, 2023).

Sin embargo, persisten vacíos de conocimiento sobre la eficacia de estas soluciones bajo escenarios climáticos extremos (Mickovski, 2021). Además, la mayoría de estudios no considera integralmente la interacción entre eventos hidrometeorológicos severos y el comportamiento de especies vegetales bajo condiciones naturales. Investigaciones como la de Antônio et al. (2021) destacan que la bioingeniería, al emplear recursos locales, permite reducir costos y minimizar impactos ambientales, pero se requiere mayor evidencia sobre su aplicación en regiones áridas o semiáridas.

Diversos estudios han demostrado la efectividad de estas prácticas; en Brasil, Maffra & Sutili (2020) reportaron una mejora del 15% al 20% en la resistencia del terreno mediante técnicas vegetativas combinadas con elementos inertes. Vallarino et al. (2021) documentaron mejoras en el factor de seguridad del 0.25% y un aumento del 12% en cohesión mediante especies arbóreas nativas en taludes tropicales. También la investigación de Von-der-Thannen et al. (2021), destacaron una reducción del 30-40% en huella de carbono frente a métodos tradicionales.

En el Perú, Carrasco et al. (2023) mostraron que técnicas como muros krainer y vetiver pueden aumentar hasta 35% el factor de seguridad. Propuestas integradas desarrolladas por Tardío & Mickovski (2023) y estudios en climas estacionales similares al de río Chancay-Lambayeque, evidencian incrementos del 53-86% en resistencia a tracción usando especies como Elephant Grass (Keybondori et al., 2025).

Esta investigación busca evaluar el caudal máximo del río Chancay-Lambayeque ante eventos extremos, los parámetros hidráulicos para implementar bioingeniería con Gynerium sagittatum (Aubl.) P. Beauv. (Poaceae) (GSABP), denominación de acuerdo con Díaz et al. (2021) y el crecimiento de esta especie en

la estabilización del talud. Aunque existen estudios sobre bioingeniería aplicada a la estabilización de suelos, persisten vacíos en su aplicación frente a eventos climáticos extremos en cuencas del Pacífico del norte peruano como la del río Chancay-Lambayeque. Es por ello que el objetivo central de la presente investigación fue estudiar la relación suelo-planta bajo un enfoque de bioingeniería considerando el cambio climático a partir de un modelo global, aplicado en el río Chancay-Lambayeque, específicamente en las inmediaciones del puente Saltur, Región Lambayeque, Perú. Como primer objetivo específico, se tuvo la evaluación del caudal máximo del río Chancay-Lambayeque bajo un evento climático extremo utilizando el Global Flood Awareness System (GloFAS) del Copernicus Emergency Management Service (CEMS). Posteriormente, en el segundo objetivo específico, se analizaron los parámetros hidráulicos del río mediante simulación hidráulica mediante el software HEC-GeoRAS, considerando un caudal de diseño con un período de retorno de 140 años. Finalmente, en el tercer objetivo específico, se evaluó el crecimiento de la especie vegetal GSABP mediante un modelo logístico que relacionó la materia seca, el período de desarrollo y las condiciones de estrés hídrico. Por lo señalado anteriormente, se espera aportar con un sistema replicable para restauración fluvial, criterios técnicos para la selección de especies vegetales y fundamentos para políticas de adaptación climática.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología fue tipo aplicada y diseño experimental, cuyos indicadores característicos del cambio climático fueron el caudal y precipitación. Para lograr el buen desarrollo de esta investigación, en primer lugar, se evaluó el caudal máximo del río Chancay-Lambayeque bajo eventos climáticos extremos, utilizando el GloFAS del CEMS. Este sistema integra datos satelitales, modelos hidrometeorológicos y mediciones in situ para generar pronósticos de inundaciones a corto y largo plazo, considerando escenarios de cambio climático. GloFAS emplea el modelo del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) junto con el modelo hidrológico LISFLOOD para simular caudales en diferentes escalas temporales. Los resultados se validaron mediante el software HEC-HMS, que permitió modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca hasta el sector del puente Saltur, utilizando métricas estadísticas, tales como el coeficiente de correlación (r), el criterio de Shultz (D), el criterio de Nash-Sutcliffe (E), el error de balance de masas (m), la eficiencia Kling-Gupta (KGE) y la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales (p), para garantizar la precisión de las simulaciones.

Posteriormente, se analizaron los parámetros hidráulicos del río mediante el software HEC-GeoRAS, considerando un caudal de diseño con un período de retorno de 140 años. Este análisis determinó niveles de agua, distribución de velocidades, áreas hidráulicas y tipo de flujo en el tramo de estudio. Con estos datos, se estableció la altura óptima para la implementación de GSABP como parte de las estrategias de bioingeniería. Además, se evaluó el crecimiento de esta especie mediante un modelo logístico que

relaciona materia seca, período de desarrollo y condiciones de estrés hídrico, permitiendo cuantificar su influencia en la estabilidad del talud a través de parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo.

## RESULTADOS

Para el primer objetivo específico, orientado a la evaluación del caudal máximo asociado a eventos climáticos extremos en el río Chancay-Lambayeque, se realizó un análisis de datos hidrometeorológicos. La fase inicial consistió en un inventario detallado de la red de estaciones de monitoreo disponible en la cuenca, mediante la recopilación sistemática de información de las bases de datos oficiales del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Este proceso permitió identificar y georreferenciar 12 estaciones climáticas y 1 estación hidrométrica operativas (Figura 1 y Tabla 1), cuyos registros históricos constituyeron la base para los análisis posteriores.

La selección de estas estaciones se fundamentó en criterios técnicos que incluyeron: en primer lugar la cobertura temporal suficiente para caracterizar eventos extremos, en segundo lugar la distribución espacial representativa de la variabilidad climática de la cuenca, y tercer lugar la accesibilidad de datos primarios para el período de estudio. Estas etapas fueron cruciales para garantizar la calidad de la información hidrológica requerida en las modelaciones subsiguientes, particularmente en el contexto de alta variabilidad pluviométrica, que es una de las principales características de las cuencas del Pacífico norte peruano.

**Figura 1**

*Ubicación de estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque*

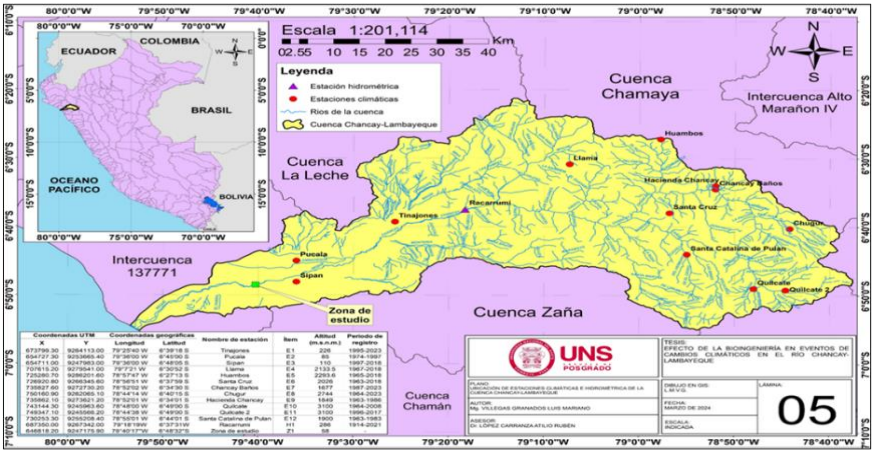


**Tabla 1**

*Estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque*

| Ítem | Longitud | Latitud | Altitud (m.s.n.m.) | Periodo de registro |
|---|---|---|---|---|
| E1 | 79°25'40 W | 6°39'18 S | Tinajones | 226 |
| E2 | 79°36'00 W | 6°45'00 S | Pucala | 85 |
| E3 | 79°36'00 W | 6°48'05 S | Sipan | 110 |
| E4 | 79°7'21 W | 6°30'52 S | Llama | 2133.5 |
| E5 | 78°57'47 W | 6°27'13 S | Huambos | 2293.6 |
| E6 | 78°56'51 W | 6°37'59 S | Santa Cruz | 2026 |
| E7 | 78°52'02 W | 6°34'30 S | Chancay Baños | 1677 |
| E8 | 78°44'14 W | 6°40'15 S | Chugur | 2744 |
| E9 | 78°52'01 W | 6°34'01 S | Hacienda Chancay | 1849 |
| E10 | 78°48'00 W | 6°49'00 S | Quilcate | 3100 |
| E11 | 78°44'38 W | 6°49'00 S | Quilcate 2 | 3100 |
| E12 | 78°55'01 W | 6°44'01 S | Santa Catalina de Pulan | 1900 |
| E14 | 79°18'19W | 6°37'31W | Racarrumi | 286 |

Cabe destacar que, conforme a las recomendaciones del SENAMHI y de estudios previos desarrollados por Arriola et al. (2020) y Arriola et al. (2023) sobre el comportamiento hidrológico en las regiones del Pacífico peruano, únicamente se seleccionaron estaciones meteorológicas con un período de registro igual o superior a 15 años. Este criterio fue adoptado como protocolo para asegurar la confiabilidad de los datos utilizados en el análisis. Una vez recopilada la información climática (precipitaciones) e hidrométrica correspondiente, se procedió a localizar la estación hidrométrica Racarrumi en el portal GloFAS (Figura 2), con el fin de evaluar el comportamiento del caudal fluvial en condiciones de cambio climático. Para ello, se empleó la simulación hidrológica basada en el modelo LISFLOOD (Figura 3), el cual permite estimar caudales máximos mediante escenarios proyectados que integran características climáticas estacionales y su impacto sobre el régimen hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque.

**Figura 2**

*Vista general de la extracción de datos del portal electrónico GloFAS*

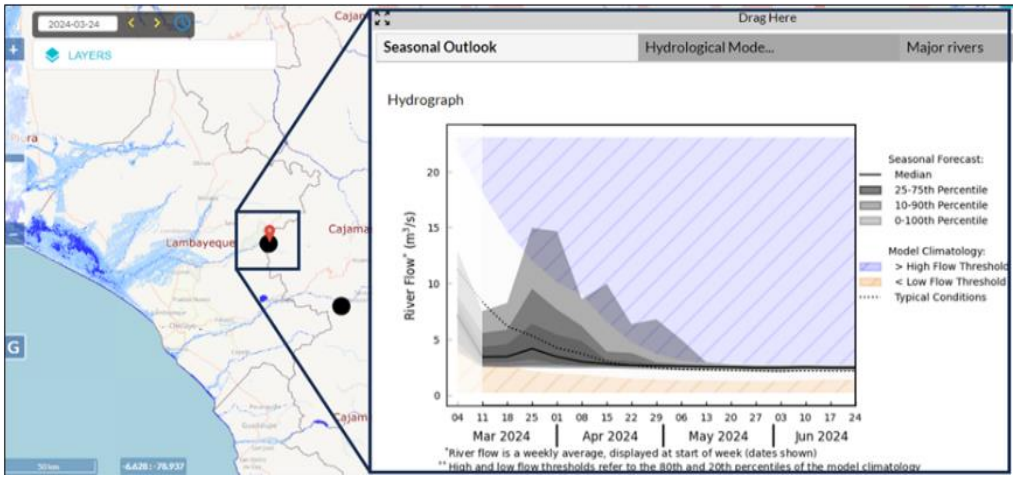
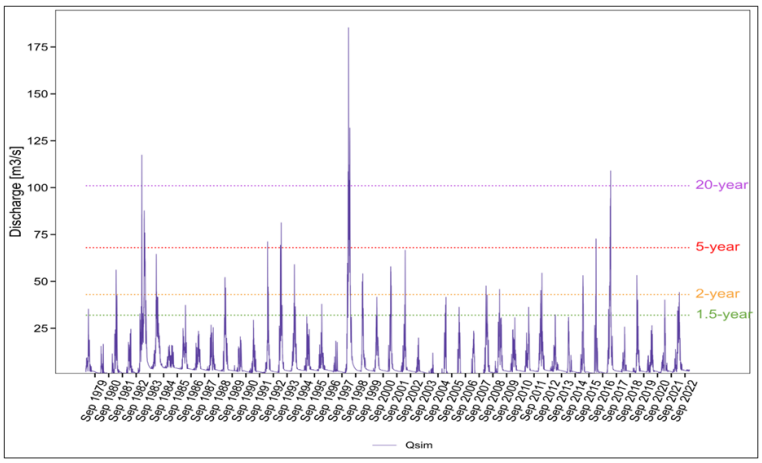


**Figura 3**

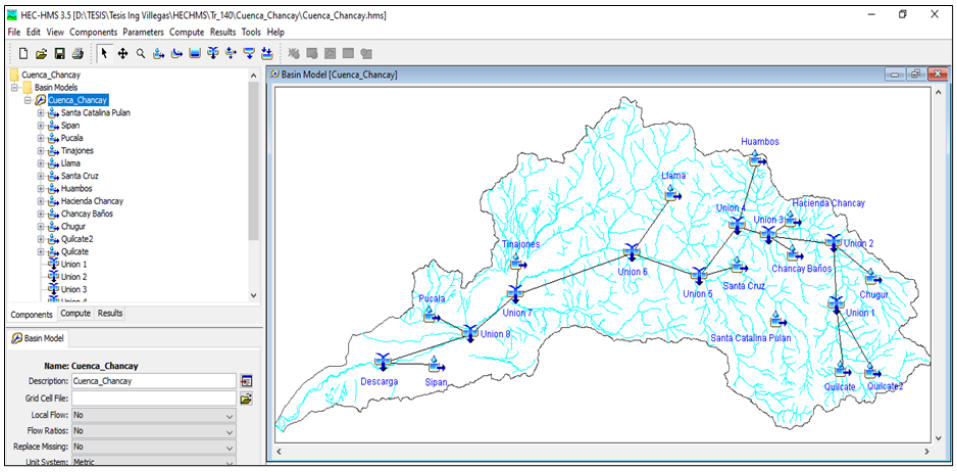
*Caudales máximos obtenidos mediante simulación en LISFLOOD de GloFAS*




Posteriormente, con el objetivo de correlacionar adecuadamente los caudales máximos estimados mediante el modelo LISFLOOD en la plataforma GloFAS, se desarrolló un modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque utilizando el software HEC-HMS. Este modelo fue configurado hasta el punto de control correspondiente al sector del puente Saltur, ubicado en la zona de estudio, tal como se ilustra en la Figura 4.

**Figura 4**

*Modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque con HEC-HMS*




Para garantizar la confiabilidad de las simulaciones, se realizó una validación cruzada entre los caudales modelados con LISFLOOD y HEC-HMS, contrastando sus resultados mediante análisis gráfico y evaluación cuantitativa con métricas estadísticas estandarizadas (Tabla 2). Estas métricas, son ampliamente reconocidas en la literatura hidrológica (Onyutha, 2022; Caicedo et al., 2022; Lujano et al., 2025), entre las que destacan, el coeficiente de correlación (r): Que evalúa la correlación entre ambas series de datos. El criterio de Nash-Sutcliffe (E): Para medir la eficiencia predictiva del modelo. La

eficiencia de Kling-Gupta (KGE): indicador de bondad de ajuste ampliamente utilizado para comparar simulaciones versus observaciones de diversas variables hidrológicas.

En la Tabla 2 demostraron un ajuste satisfactorio entre ambos modelos, lo que valida su consistencia para simular caudales extremos en la cuenca. Esta concordancia refuerza la robustez metodológica del estudio y respalda el uso combinado de LISFLOOD (para proyecciones climáticas) y HEC-HMS (para respuestas hidrológicas detalladas) en cuencas áridas con alta variabilidad pluviométrica.

**Tabla 2**

*Métricas estadísticas de comparación de los modelos hidrológicos*

| Ítem | Parámetros | Valor | Valor óptimo |
|---|---|---|---|
| Coeficiente de correlación | r | 0.980 | 1 |
| Criterio de Schultz | D | 0.523 | 0 |
| Criterio de Nash-Sutcliffe | E | 0.951 | 1 |
| Error de balance de masas | m | 0.006 | 0 |
| Eficiencia Kling-Gupta | KGE | 0.865 | 1 |
| Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales | p | 0.994 | 1 |

En relación con el segundo objetivo específico, se procedió a la evaluación de los parámetros hidráulicos del río Chancay-Lambayeque con fines de aplicación de técnicas de bioingeniería, considerando la especie vegetal GSABP. Esta evaluación partió de la estimación previa del caudal máximo, obtenida mediante el modelo climático ECMWF, a través del portal GloFAS, utilizando el modelo hidrológico LISFLOOD para un período de retorno de 140 años. Adicionalmente, se empleó el software HEC-GeoRAS para definir los parámetros hidráulicos correspondientes a la sección transversal del tramo de estudio (Figura 5), cuyos valores finales se presentan en la Tabla 3.

**Figura 5**

*Vista de la sección transversal típica en HEC-GeoRAS del tramo de estudio*

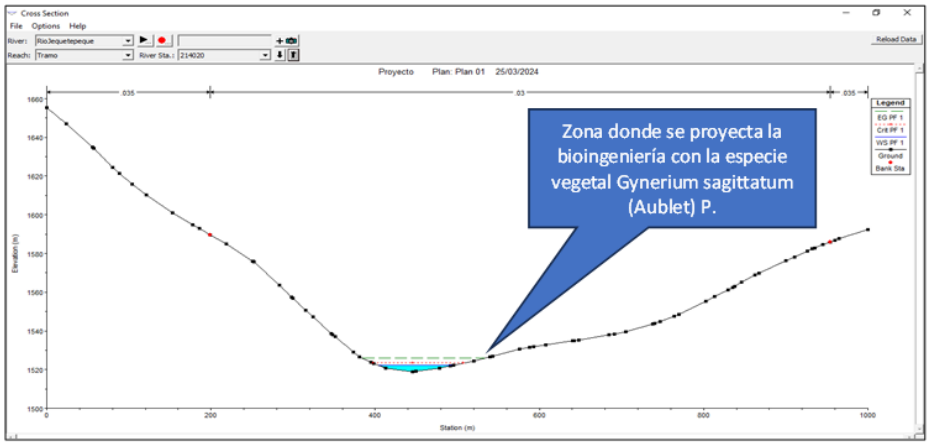


**Tabla 3**

*Parámetros hidráulicos obtenidos del tramo de estudio*

| Ítem | Unidad | Valor |
|---|---|---|
| Caudal | m3/s | 798.53 |
| Coeficiente de rugosidad | Adimensional | 0.05 |
| Tirante normal | m | 1.85 |
| Área hidráulica | m2 | 253.69 |
| Perímetro mojado | m | 174.15 |
| Radio hidráulico | m | 1.46 |
| Espejo de agua | m | 174.05 |
| Velocidad | m/s | 3.15 |
| Número de Froude | Adimensional | 0.83 |

Con los hallazgos previamente obtenidos, se procedió al desarrollo del tercer objetivo específico, el cual consistió en evaluar el crecimiento de la especie vegetal GSABP y su influencia en la estabilización del talud del río Chancay-Lambayeque. Para comprender adecuadamente el desarrollo de esta especie bajo condiciones naturales, se implementó un modelo matemático basado en una ecuación logística, con el fin de predecir su crecimiento y rendimiento. Esta especie fue sembrada en el talud de la sección del río, con un total de 13 muestras, con el objetivo de contribuir a la estabilización del terreno (Figura 6).

Cabe señalar que el rendimiento del follaje obtenido por planta presentó variabilidad, con un rango de 0.032 kg a 5.25 kg para diámetros basales comprendidos entre 0.85 cm y 27.65 cm. En condiciones secas, los rendimientos oscilaron entre 0.022 kg y 4.23 kg, como se observa en las características de crecimiento mostradas en la Figura 6.

**Figura 6**

*Condiciones actuales del crecimiento y rendimiento de la especie vegetal GSABP*



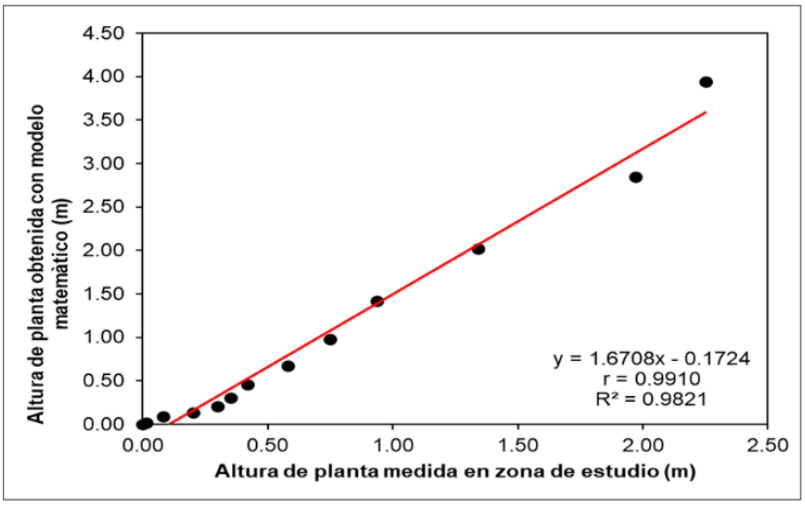
El modelo matemático utilizado para estimar el crecimiento de la planta se fundamentó en las ecuaciones propuestas por Cao et al. (2019) y Mancilla-Morales et al. (2019). De dichas formulaciones, se determinó que la Ecuación (1), de tipo logístico, presenta el mejor ajuste para representar adecuadamente el comportamiento de crecimiento de la especie bajo estudio.

$$Altura = \frac{DMP_i * d}{d + (d + DMP_i) * e^{(-m*t)}} \qquad (1)$$

Los análisis de regresión no lineal aplicados al modelo de crecimiento logístico permitieron determinar los coeficientes característicos para GSABP, obteniéndose valores de 4.50 para el parámetro de crecimiento máximo (d) y 0.02 para la tasa intrínseca de crecimiento (m). Estos parámetros, fundamentales en la modelización del desarrollo vegetal, reflejan la capacidad adaptativa de la especie bajo las condiciones ambientales del área de estudio. Complementariamente, la Figura 7 muestra las relaciones de estas variables, mediante análisis de correlación, donde se evidencia una fuerte dependencia ($R^2 > 0.95$) entre las variables de crecimiento evaluadas.

**Figura 7**

*Correlación de la altura de crecimiento del cultivo*




## Análisis estadístico

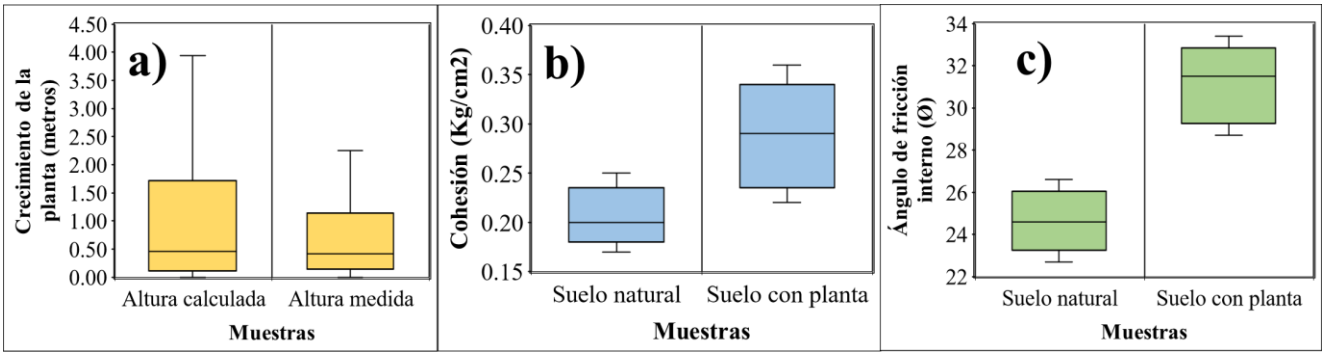
La validación del modelo de crecimiento (Ecuación 1) para GSABP mostró una alta correlación entre alturas calculadas y medidas ($r=0.99$; $R^2=0.98$), tal como se indica en la Figura 7 y mediante el análisis ANOVA, se confirmó que no existen diferencias significativas de las 13 muestras ($p=0.456$; $F=0.456 <$ Fcrítico$=4.259$), validando la precisión del modelo (Figura 8a). En cuanto a la estabilización del suelo, los ensayos de corte directo revelaron que el enraizamiento incrementa significativamente las propiedades mecánicas: la cohesión (Figura 8b), presentó diferencias estadísticas ($p=0.019$; $F=8.405 >$

Fcrítico=5.318), al igual que el ángulo de fricción interna (p=0.0003; F=36.136 > Fcrítico=5.318) en la Figura 8c. Estos resultados demuestran que la presencia de la planta mejora la resistencia del suelo, coincidiendo con hallazgos previos por Karimzadeh et al. (2022). Cabe indicar que el valor medio de la cohesión del suelo natural fue de 0.21 Kg/cm$^2$, mientras que la cohesión del suelo con la planta GSABP fue de 0.29 Kg/cm$^2$. En tanto, el ángulo de fricción del suelo normal alcanzó 24.60º, sin embargo, dicho ángulo de fricción con la especie GSABP logró un valor medio de 31.10º. Por lo tanto, la variación de la cohesión, aumentó en un 38.09% y el ángulo de fricción interno del suelo en un 26.42%, lo que evidencia un impacto significativo positivo de la relación suelo-planta.

Así mismo, los datos obtenidos, detallan que el análisis de varianza para los valores de altura del cultivo mostró que no existen diferencias significativas entre grupos (p = 0.456 > 0.05), con un valor F de 0.574 inferior al valor crítico F de 4.259. El análisis de varianza para los valores de cohesión mostró diferencias estadísticamente significativas entre grupos, con un valor F de 8.405, superior al valor crítico F de 5.318, y una probabilidad p de 0.019, menor a 0.05. Asimismo, para el ángulo de fricción interna, el análisis evidenció diferencias altamente significativas, con un valor F de 36.136 y una probabilidad p de 0.0003, ambas muy por debajo del valor crítico F de 5.318. Estos resultados indican que los tratamientos aplicados influyeron significativamente en ambas propiedades del suelo (Figuras 8), evidenciando tanto la confiabilidad del modelo de crecimiento como el efecto bioestabilizador de la GSABP en taludes fluviales.

**Figura 8**

*Diagrama de cajas: (a) Distribución de crecimiento de la planta, (b) cohesión y (c) ángulo de fricción.*




## DISCUSIÓN

De acuerdo con los hallazgos obtenidos, el caudal máximo determinado a partir de los procedimientos expuestos en la sección de resultados consideró la influencia directa de las precipitaciones asociadas a eventos de cambio climático. Si bien existen estudios relevantes en la cuenca Chancay-Lambayeque, como los realizados por Arriola et al. (2020), Vásquez et al. (2021) y Arriola et al. (2022), estos se han centrado únicamente en estimaciones de caudales extremos sin incorporar eventos climáticos específicos

en sus análisis. Por esta razón, se resalta la necesidad de integrar los efectos combinados del cambio climático en los estudios hidrológicos, particularmente en escenarios donde las actividades de infraestructura y expansión urbana continúan intensificándose, lo cual incrementa el riesgo de inestabilidad de taludes e inundaciones (Cui et al., 2021; Qin et al., 2022). En este contexto, la aplicación del modelo climático ECMWF a través de GloFAS y su integración con el modelo hidrológico LISFLOOD resulta adecuada y metodológicamente sólida para la estimación de caudales máximos y de diseño.

En cuanto a los resultados obtenidos mediante este enfoque, se logró caracterizar con precisión las condiciones geométricas e hidráulicas del tramo de estudio, lo que permitió evaluar la factibilidad de implementar soluciones de bioingeniería con especies vegetales. Tal como lo afirman Ni et al. (2024), las técnicas de bioingeniería promueven una ingeniería sostenible basada en la interacción dinámica entre el suelo, las plantas y el entorno climático, aspecto clave para el éxito de proyectos de estabilización fluvial.

De manera complementaria, Yazdani et al. (2024) destacan que una correcta caracterización del sitio y la adecuada selección de parámetros de diseño son determinantes para optimizar el desempeño estructural y geomecánico de la vegetación utilizada. En línea con estos planteamientos, investigaciones recientes subrayan la necesidad de comprender este sistema como una red integrada, donde las propiedades del suelo, el tipo y profundidad del sistema radicular, la especie vegetal seleccionada y la precipitación condicionan directamente la efectividad de las soluciones bioingenieriles (Ng et al., 2022; Zhang et al., 2025).

Respecto al rendimiento del cultivo de GSABP, el modelo matemático empleado mostró una alta correlación con las alturas reales registradas en campo, lo que respalda su idoneidad para condiciones climáticas extremas y un período de retorno de 140 años. No obstante, como lo sugieren Maffra & Sutili (2020) y Holanda et al. (2021), es imprescindible implementar un sistema de monitoreo continuo que permita ajustar parámetros frente a variaciones hidrológicas, geomorfológicas, térmicas y climáticas. A pesar de su potencial, la bioingeniería sigue siendo una tecnología emergente cuya consolidación requiere integrar conocimientos ecológicos y validar sus efectos mediante ensayos físicos y pruebas in situ (Ni et al., 2024).

## CONCLUSIONES

Se concluye que la integración de modelos climáticos e hidrológicos (ECMWF/GloFAS, LISFLOOD y HEC-HMS) permitieron estimar con precisión el caudal máximo el cual fue de 798.23 $m^3/s$, asociado a eventos extremos de cambio climático en la cuenca del río Chancay-Lambayeque.

Asimismo, se identificaron condiciones hidráulicas subcríticas (v = 3.50 m/s; h = 1.83 m) adecuadas para la implementación de soluciones de bioingeniería con GSABP, lo que facilita su establecimiento en taludes fluviales.

El crecimiento de dicha especie sigue un modelo logístico, y su incorporación mejora significativamente la cohesión del suelo y el ángulo de fricción interna, fortaleciendo la estabilidad del talud.

Se propone un modelo integral y replicable que vincula hidrología, hidráulica y vegetación para implementar estrategias de bioingeniería adaptadas a cuencas áridas del Pacífico sur, con potencial de ser adoptado en políticas de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático.

Los resultados pueden ser utilizados por autoridades locales y regionales para diseñar soluciones basadas en la naturaleza en zonas vulnerables a inundaciones, optimizando la selección de especies vegetales y reduciendo procesos erosivos en ríos estacionales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antônio, G., Holanda, F., Santos, L., Mendonça, B., de-Jesus, R., & Silva, P. (2021). Evaluation of efficiency of the implementation of soil bioengineering technique. *Revista Brasileira de Geografia Fisica, 14*(6), 3422-3436. doi:10.26848/RBGF.V14.6.P3417-3432

Arriola, G., Villegas, L., & Sotomayor, G. (2020). Análisis de las curvas de infiltración para determinar caudales máximos en zonas de escasa información ante eventos extremos. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación, 7*(1). doi:10.26495/icti.v7i1.1352

Arriola, G., Villegas, L., Fernandez, J., Vallejos, J., & Idrogo, C. (2023). Assessment of parameters of the generalized extreme value distribution in rainfall of the Peruvian North. *Revista Politecnica, 52*(2), 99-112. doi:10.33333/rp.vol52n2.10

Arriola, G., Villegas, L., Marín, N., Idrogo, C., Piedra, J., & Arbulú, J. (2022). Assessment of climatic aggressiveness and precipitation concentration in the Chancay-Lambayeque basin, Peru. *Revista Politecnica, 50*(2), 15-22. doi:10.33333/rp.vol50n2.02

Caicedo, M., Villegas, L., Arriola, G. C., García, J., & Marín, N. (2024). Generation of flows applying a simple method of flood routing to monthly level in La Leche basin, Peru. *Revista Politecnica, 53*(1), 99-110. doi:10.33333/rp.vol53n1.09

Cao, L., Shi, P., Li, L., & Chen, G. (2019). A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry, 11*(2). doi:10.3390/sym11020204

Carrasco, G., Vargas, M., & Vargas, E. (2023). "¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica? *Perfiles de Ingeniería, 19*(20), 73-92. doi:10.31381/perfilesingenieria.v19i20.6313

Cui, P., Peng, J., Shi, P., Tang, H., Ouyang, C., Zou, Q., & Lei, Y. (2021). Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. *Geography and Sustainability, 2*(3), 216-223. doi:10.1016/j.geosus.2021.09.001

Díaz, C., Padrón, E., & Alvarez, A. (2021). Micropropagation of arrow cane, Gynerium sagittatum (Aubl.) P. Beauv. Cv. Criolla, Criolla 1, and Martinera, in a double-phase medium. *Ciencia Tecnologia Agropecuaria, 22*(2). doi:10.21930/RCTA.VOL22_NUM2_ART:1821

Holanda, F., Filho, R., Pedrotti, A., Wilcox, B., Marino, R., & Santos, L. (2021). Soil bioengineering in northeastern Brazil: An overview. *Revista Ambiente e Agua, 16*(4). doi:10.4136/ambi-agua.2650

Karimzadeh, A., Leung, A., & Gao, Z. (2022). Shear strength anisotropy of rooted soils. *Geotechnique, 74*(10), 1033-1046. doi:10.1680/jgeot.22.00103

Keybondori, S., Abdi, E., Deljouei, A., Cislaghi, A., Shakeri, Z., & Etemad, V. (2025). Soil-bioengineering to stabilize gravel roadside slopes in the steep Hyrcanian Forests of Northern Iran. *Ecological Engineering, 214*. doi:10.1016/j.ecoleng.2025.107569

Lujano, E., Diaz, R., Lujano, R., Sanchez-Delgado, M., & Lujano, A. (2025). Hydrological performance of gridded meteorological products in Peruvian Altiplano basins. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos, 30*. doi:10.1590/2318-0331.302520240068

Maffra, C., & Sutili, F. (2020). The use of soil bioengineering to overcome erosion problems in a pipeline river crossing in South America. *Innovative Infrastructure Solutions, 5*(1). doi:10.1007/s41062-020-0273-5

Mancilla-Morales, J., Tornero-Campante, M., & López-Cruz, I. (2019). Evaluation of a mathematical model to predict growth and nitrogen content in tomatoes (Solanum lycopersicum L.) under greenhouse conditions. *Ingeniería agrícola y biosistemas, 11*(2), 111-125. doi:10.5154/r.inagbi.2018.06.013

Maxwald, M., Crocetti, C., Ferrari, R., Petrone, A., Rauch, H., & Preti, F. (2020). Soil and water bioengineering applications in central and South America: A transferability analysis. *Sustainability (Switzerland), 12*(24), 1-31. doi:10.3390/su122410505

Mickovski, S. (2021). Re-thinking soil bioengineering to address climate change challenges. *Sustainability (Switzerland), 13*(6). doi:10.3390/su13063338

Ng, C., Zhang, Q., Zhou, C., & Ni, J. (2022). Eco-geotechnics for human sustainability. *Science China Technological Sciences, 65*(12), 2809-2845. doi:10.1007/s11431-022-2174-9

Ni, J., Xiao, Y., Shi, J., & He, J. (2024). Soil bioengineering using vegetation under climate change. *Biogeotechnics, 2*(1). doi:10.1016/j.bgtech.2023.100067

Onyutha, C. (2022). A hydrological model skill score and revised R-squared. *Hydrology Research, 53*(1), 51-64. doi:10.2166/NH.2021.071

Qin, M., Cui, P., Jiang, Y., Guo, J., Zhang, G., & Ramzan, M. (2022). Occurrence of shallow landslides triggered by increased hydraulic conductivity due to tree roots. *Landslides, 19*(11), 2593–2604. doi:10.1007/s10346-022-01921-8

Tardio, G., & Mickovski, S. (2023). A novel integrated design methodology for nature-based solutions and soil and water bioengineering interventions: The Tardio&Mickovski methodology. *Sustainability (Switzerland), 15*(4). doi:10.3390/su15043044

Vallarino, R., Mejía, G., Centella, D., & Grajales, F. (2021). Bioingeniería de taludes: Evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica, 7*(2), 26-38. doi:10.33412/rev-ric.v7.2.3336

Vásquez, A., Vasquez, A., Piedra, J., & Arriola, G. (2021). Evaluación de la ecuación general del USBR para el diseño de aliviaderos tipo Creager de descarga libre. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación, 8*(1), 106-120. doi:10.26495/icti.v8i1.1542

Von-der-Thannen, M., Hoerbinger, S., Muellebner, C., Biber, H., & Rauch, H. (2021). Case study of a water bioengineering construction site in Austria. Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment model. *International Journal of Energy and Environmental Engineering, 12*(4), 599-609. doi:10.1007/s40095-021-00419-8

Yazdani, F., Sadeghi, H., AliPanahi, P., Gholami, M., & Leung, A. (2024). Evaluation of plant growth and spacing effects on bioengineered slopes subjected to rainfall. *Biogeotechnics, 2*(2). doi:10.1016/j.bgtech.2024.100080

Zhang, W., Huang, R., Xiang, J., Zhang, N., Ciantia, M., Liu, L., . . . Qin, C. (2025). Role of root morphological and architectural traits: Insights into root-inspired anchorage and foundation systems. *Biogeotechnics, 3*(1). doi:10.1016/j.bgtech.2024.100107

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 51 al 62
DOI: https://doi.org/10.37787/46wym566

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-9805

**ARTÍCULO ORIGINAL**

# Efecto de la adición de cáscara de manzana deshidratada en polvo (*Malus domestica, ´Red Delicious´*) y la temperatura de almacenamiento sobre las propiedades reológicas del yogurt bebible

# Effect of adding dried apple peel powder (*Malus domestica* ´Red Delicious´) and storage temperature on the rheological properties of drinkable yogurt

Perla Bazán[1] y Jimy Oblitas[2] *

## RESUMEN

Este estudio evaluó el efecto de la adición de cáscara de manzana deshidratada en polvo (*Malus domestica, ´* Red Delicious´) y la temperatura de almacenamiento sobre las propiedades reológicas del yogurt bebible. En la primera fase, se caracterizaron los residuos de manzana deshidratada, encontrando una alta cantidad de fibra insoluble y una buena capacidad de retención de agua. Posteriormente, se elaboró yogurt bebible con tres concentraciones de residuos de manzana (1, 1.5 y 2 % p/p) y se almacenaron a temperaturas de 4, 12 y 20 °C. Se realizaron análisis fisicoquímicos y se determinaron las propiedades reológicas utilizando el modelo de Herschel–Bulkley. Los resultados mostraron que la adición de residuos de manzana deshidratada tuvo un efecto positivo sobre las propiedades reológicas del yogurt bebible (índice de consistencia, índice de comportamiento de flujo y límite elástico), mientras que la temperatura de almacenamiento afectó negativamente. Esto resalta la importancia de optimizar los procesos de almacenamiento para la comercialización de yogures enriquecidos con ingredientes funcionales.

**Palabras clave:** *y*ogurt bebible; fibra dietética; propiedades reológicas; índice de consistencia; índice de comportamiento de flujo; límite elástico.

## ABSTRACT

This study investigated the impact of adding dried apple peel powder (*Malus domestica*, ´Red Delicious´) and storage temperature on the rheological properties of drinkable yogurt. The apple pomace, characterized by high insoluble fiber content and water retention capacity, was incorporated into yogurt at three concentrations (1, 1.5, and 2%). The yogurt samples were then stored at temperatures of 4, 12, and 20°C. Rheological properties, including consistency index, flow behavior index, and yield stress, were determined using the Herschel–Bulkley model. Results indicated that the addition of apple pomace positively influenced the rheological properties, enhancing the yogurt's texture and stability. However, higher storage temperatures negatively impacted these properties. These findings emphasize the importance of temperature control during storage to maintain the quality and shelf life of yogurt enriched with functional ingredients.

**Keywords:** drinkable yogurt, dietary fiber, rheological properties, consistency index, flow behavior index, yield stress

* Autor para correspondencia

[1] Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. Email: pbazanc17_1@unc.edu.pe, jimyoblitas@unc.edu.pe

## INTRODUCCIÓN

El consumo de yogurt ha aumentado considerablemente debido a tendencias de mejorar la nutrición y la salud, el consumidor actual busca alimentos con características que estén relacionados a una alimentación sana, por ello el diseño de nuevos alimentos es un tema de importancia para el sector alimentario.

El yogurt bebible es uno de los productos lácteos más consumidos a nivel mundial. Sin embargo, su estabilidad y viscosidad pueden verse comprometidas por variaciones en su estructura durante el proceso de elaboración y las condiciones de almacenamiento, afectando directamente en sus propiedades reológicas (Zang et al., 2023).

Para mejorar estas propiedades, la industria láctea recurre a estabilizantes comerciales como gelatina, almidón, pectina y gomas; sin embargo, la creciente demanda de productos naturales y saludables ha generado un interés creciente en la búsqueda de alternativas más sostenibles y seguras (Ahmed et al., 2023). La fibra dietética ha despertado interés debido a sus numerosos efectos beneficiosos para la salud, como la prevención de la obesidad y el cáncer de colon, y la disminución de los riesgos de asma y enfermedades cardiovasculares (Dong et al., 2022). En este contexto, los residuos agroindustriales, como las cáscaras de manzana, se presentan como una opción.

La fibra dietética contenida en las cáscaras de manzana, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina, tiene la capacidad de interactuar con las proteínas de la leche y retener agua, lo que podría mejorar significativamente las propiedades reológicas del yogurt, como la viscosidad y la estabilidad (Dong et al., 2022). La fibra dietética natural muestra beneficios de mejora de la calidad de los yogures, es decir, mejorando la viscosidad, firmeza, textura y pH, reduciendo la sinéresis y acidez titulable, y dando características sensoriales positivas al consumidor (Ramirez-Santiago et al., 2010). Sin embargo, los estudios que evalúan el efecto de la adición de residuos de manzana deshidratada sobre las propiedades reológicas del yogurt bebible, especialmente en bajas velocidades de corte, como las que ocurren durante el almacenamiento, son aún limitados.

Estudios sugieren que la adición de fibra cambiará el comportamiento reológico en productos como el yogurt, esta hipótesis será probada planteando el objetivo de evaluar el efecto de la adición de diferentes concentraciones de residuos de manzana deshidratada (*Malus domestica*, ´Red Delicious´) y de distintas temperaturas de almacenamiento sobre las propiedades reológicas del yogurt bebible.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Se utilizaron cascaras de manzanas Red Delicious para la obtención de la fibra. La leche se adquirió del Centro Poblado de Otuzco, Cajamarca y la elaboración del yogurt fue con cultivo láctico “Selection Medium 1- CHR” de la marca. Hansen. Los equipos utilizados incluyeron balanza analítica Serie 321

LS, balanza gramera SF-400, centrífuga de mesa ROTOFIX 32A, estufa de secado POL-EKO APARATURA, incubadora de yogurt, horno de mufla BIOBASE MC2.5-12, medidor de actividad de agua AQUALAB 4TE, molino manual, refrigeradora, reómetro Brookfield DV3T-RV con adaptador ULA y aguja de paletas V-71.

## Métodos

### *Obtención de los residuos de manzana deshidratada*

Las manzanas (*Malus domestica, ´Red Delicious´*) fueron seleccionadas, lavadas y desinfectadas, separadas en cáscara y pulpa. Las cáscaras fueron sometidas a tratamiento térmico para inactivar enzimas y posteriormente deshidratadas a 65°C durante 12 horas (Meneses-Peralta, 2021). Una vez deshidratadas, fueron molidas y tamizadas en tamices N° 60, 120 y 230, para obtener un polvo homogéneo, que se almacenó a temperatura ambiente.

### *Caracterización de residuos*

Se determinaron propiedades fisicoquímicas como humedad (AOAC, 930.15), actividad de agua (AQUALAB 4TE), acidez titulable (AOAC, 942.15), cenizas (AOAC, 945.46), y fibra dietaria soluble e insoluble (AOAC. 991.43). Las propiedades funcionales incluyeron capacidad de retención de agua (CRA), hinchamiento, y absorción de moléculas orgánicas.

### *Elaboración de yogurt bebible con adición de residuos de manzana deshidratada*

La leche se pasteurizó (85°C/15 min) e inoculó con un cultivo láctico comercial y se incubó a 42°C por 6 horas hasta alcanzar un pH 4.6. Posteriormente, se refrigeró durante 12 horas, para luego añadir los residuos de manzana deshidratada en concentraciones de 1%, 1.5% y 2%, y finalmente almacenada a 4°C, 12°C y 20°C por 24 horas.

### *Análisis fisicoquímico del yogurt*

Se evaluaron pH, sinéresis y densidad, con tres repeticiones por tratamiento. La sinéresis se determinó mediante centrifugación (Zhou, 2018) y la densidad aplicando la fórmula densidad=masa/volumen (Wang et al., 2019).

### *Análisis reológico*

Las propiedades reológicas se analizaron con un reómetro Brookfield DV3T-RV. Se midieron las curvas de flujo (esfuerzo vs velocidad de corte) en un rango de 0.1 a 1.0 rpm, con adaptador ULA con una

constante de velocidad de corte (SRC) de 1.223. Los datos experimentales se ajustaron al modelo de Herschel–Bulkley, con la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + k(\gamma)^n \quad (1)$$

Donde τ representa el esfuerzo cortante (Pa), τ0 el límite elástico, γ la velocidad de deformación ($s^{-1}$), n el índice de comportamiento de flujo y k el índice de consistencia ($Pa \cdot s^n$) (Sun et al., 2025).

### *Diseño experimental*

Se empleó un diseño completamente al azar con dos factores (concentración: 1.0, 1.5 y 2.0 %; temperatura: 4, 12 y 20 °C), arreglo factorial $3^2$, más un control (0 %). Cada tratamiento en triplicado. ANOVA (α=0.05). Los datos fueron procesados de manera aleatoria. El software utilizado para el análisis fue Statistica 12 (StatSoft, US).

## RESULTADOS

### Obtención y caracterización de la manzana deshidratada en polvo

La manzana deshidratada en polvo se obtuvo con un rendimiento del 23.72% respecto al peso de las manzanas frescas, valor cercano a lo reportado por Pascual-Chagman & Encina-Zelada (2022). Los residuos de manzana mostraron buena capacidad para retener agua y capacidad de absorber otras moléculas orgánicas (Tabla 1), cuyos resultados son similares entre las diferentes granulometrías. Ajila & Prasada, (2013), señalan que, mayor sea la cantidad de fibra dietética insoluble mayor será la capacidad de hinchamiento, influenciada por la forma y tamaño de partícula.

**Tabla 1**

*Propiedades funcionales de los residuos de manzana deshidratada en polvo*

| Tamaño de partícula (mm) | Capacidad de retención de agua ($g_{agua}$ / $g_{muestra\ seca}$) | Capacidad de hinchamiento ($ml_{agua}$ / $g_{muestra}$) | Capacidad de absorción de moléculas orgánicas ($g_{aceite}$ / $g_{muestra\ seca}$) |
|---|---|---|---|
| 0.25 | 3.7 ± 0.46 | 2.65 ± 0.13 | 0.97 ± 0.03 |
| 0.125 | 3.99 ± 0.14 | 2.60 ± 0.01 | 0.91 ± 0.08 |
| 0.063 | 2.97 ± 0.03 | 0.76 ± 0.19 | 0.77 ± 0.10 |

*Nota.* Los valores de la tabla representan las medias de tres ensayos replicados, ± D.E.

El tamaño de partícula de 0.125 mm se seleccionó como óptimo debido a su mayor capacidad de retención de agua (CRA). En la Tabla 2 se muestran las principales características fisicoquímicas. Los residuos de manzana presentaron un bajo contenido de humedad y una alta concentración de fibra dietética, principalmente insoluble, lo cual coincide con estudios previos (Macagnan et al., 2015). Esta composición, junto con la CRA, indican que los residuos de manzana podrían contribuir a mejorar el perfil nutricional de los alimentos y promover efectos beneficiosos a nivel tecnológico.

**Tabla 2**

*Caracterización fisicoquímica de los residuos de manzana deshidratada en polvo*

| Parámetro | Resultado |
|---|---|
| Tamaño de partícula (mm) | 0.125 |
| Humedad (%) base seca | 4.60 ± 0.001 (*) |
| Actividad de agua (20.04 °C) | 0.28 ± 0.001 (+) |
| Acidez titulable (% ácido málico) | 0.17 ± 0.000 |
| Cenizas (%) | 1.75 ± 0.003 |
| Contenido de fibra dietaria insoluble (%) | 15.37 |
| Contenido de fibra dietaria soluble (%) | 7.86 |
| Contenido de fibra dietaria total (%) | 23.23 |

Nota. Los valores de la tabla representan las medias de tres ensayos replicados, ± desviación estándar. (*) Resultado expresado en base seca, (+) Lectura realizada a 20 °C.

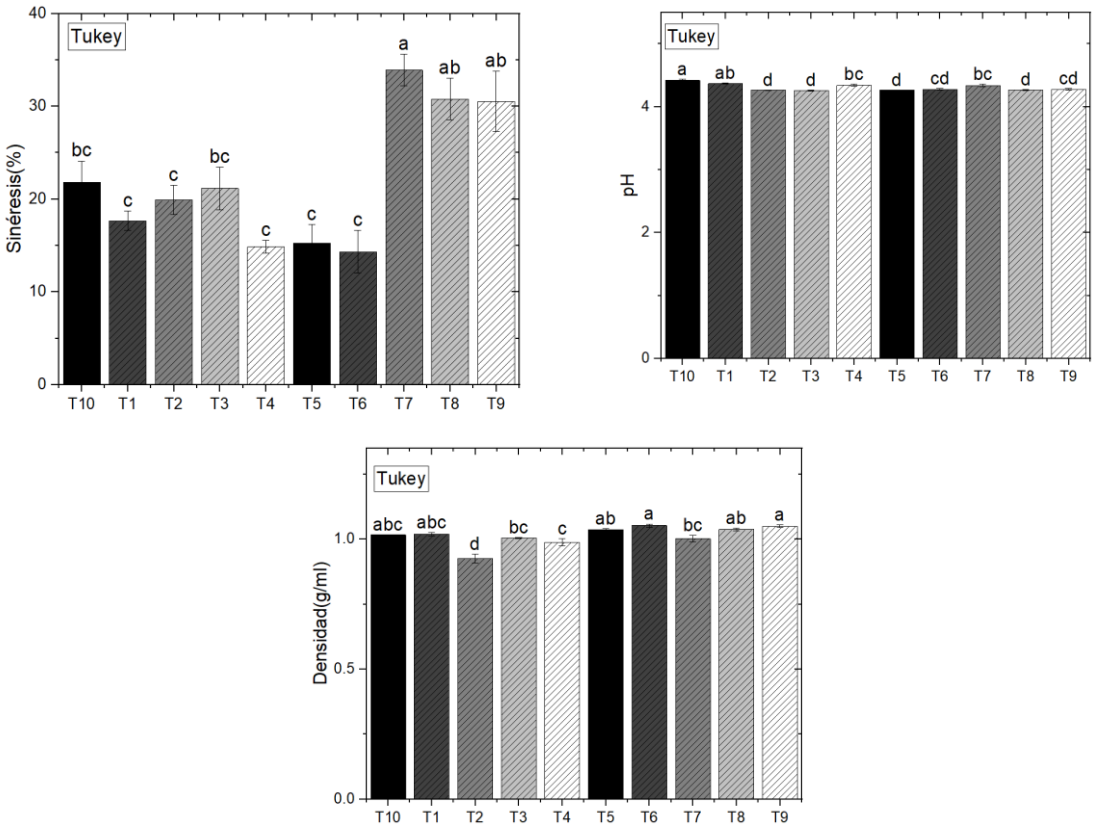
El valor reportado de ceniza en base seca fue 1.75 ± 0.003 %, indicando el contenido total de minerales. Este resultado es superior al encontrado por Popescu et al. (2022), para el orujo de sidra de manzanas Golden Delicious (1.67 ± 0.02) y la cáscara de manzana Granny Smith (1.93 ± 0.02). Sin embargo, el bajo porcentaje de cenizas podría favorecer que las características reológicas del yogurt sean principalmente influenciadas por la fibra dietética y no por el contenido mineral.

**Caracterización fisicoquímica del yogurt con adición de los residuos de manzana deshidratada**

La incorporación de los residuos de manzana deshidratada al yogurt tuvo efecto sobre las propiedades fisicoquímicas (Figura 1). Se observó una ligera disminución del pH, debido a la presencia de ácidos orgánicos naturales en la manzana y a la producción de ácido láctico post fermentación, similar a lo reportado por Popescu et al. (2022). La sinéresis, o separación de suero, se vio afectada por la concentración de residuos y la temperatura de almacenamiento de manera significativa. Los resultados oscilaron entre 14.33% y 33.91%, observándose una disminución en la sinéresis con el aumento de la concentración de residuos, lo que indica una mayor estabilidad del producto. Sin embargo, a temperaturas más elevadas, se registró un incremento en la sinéresis. La densidad de los yogures aumentó significativamente con el incremento en la concentración de residuos de manzana, debido al mayor contenido de sólidos en la mezcla.

**Figura 1**

*Caracterización fisicoquímica del yogurt bebible con residuos de manzana en polvo en diferentes concentraciones y temperaturas de almacenamiento*




## Modelado matemático de las propiedades reológicas del fluido en estudio

Los datos ajustados al modelo de Herschel–Bulkley obtuvieron coeficiente de determinación ($R^2$) entre 0.84 y 0.99. Los yogures con mayor concentración de residuos de manzana y almacenados a temperaturas más bajas presentaron un límite elástico superior y tiempos de medición más prolongados. Esta mayor resistencia al flujo se atribuye a la formación de una red tridimensional más densa y estable. Respecto al efecto de la temperatura se observó una disminución de la viscosidad a temperaturas más altas, relacionado con la desestabilización de la estructura del gel. Los resultados del análisis reológico se presentan en la Tabla 3.

## Efecto de la adición de residuos de manzana deshidratada y temperatura de almacenamiento sobre las propiedades reológicas del yogurt bebible

Los resultados obtenidos muestran que los efectos sobre k, n y $\tau_0$ no fueron significativos ($p > 0.05$). Se observaron tendencias en el comportamiento reológico, donde el incremento en la concentración de residuos de manzana se asoció con un aumento en el índice de consistencia, lo que indica un aumento en la viscosidad del yogurt. Esta tendencia coincide con estudios previos que señalan que un mayor

contenido de sólidos, como los presentes en los residuos de manzana, eleva la viscosidad del producto (Penna et al., 2006). La pectina presente en los residuos de manzana, al hidratarse y formar un gel, contribuye a esta mayor viscosidad, formando una red más densa.

La Figura 2a muestra el gráfico de contorno de respuesta del índice de consistencia, donde se observa una tendencia clara de aumento del índice de consistencia a medida que aumenta la concentración de residuos de manzana y disminuye la temperatura de almacenamiento. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por Zhou (2018) para yogures con cáscara de manzana Granny Smith en polvo (37.87 ± 3.94 y 39.53 ± 4.90)

El índice de comportamiento de flujo (n) es un indicador de pseudoplasticidad o dilatancia. Un valor de n menor a 1 indica un comportamiento pseudoplástico, mientras que un valor mayor a 1 indica un comportamiento dilatante (Sözeri et al., 2024). La Figura 2b muestra el gráfico de contorno del índice de comportamiento de flujo, donde se observa una clara tendencia de aumento de n a medida que aumenta la concentración de residuos de manzana y disminuye la temperatura de almacenamiento. La región roja representa los tratamientos con los valores de n más altos, indicando un comportamiento más dilatante.

**Tabla 3**

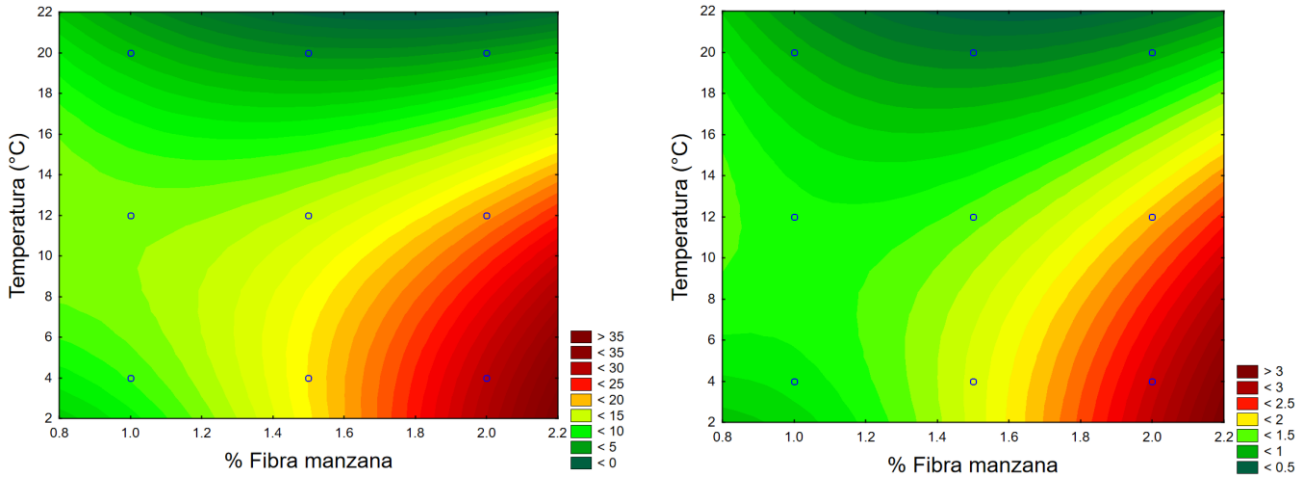
*Parámetros reológicos del modelo Herschel–Bulkley para las muestras evaluadas*

| Tratamiento | % cáscara de manzana deshidratada en polvo | Temperatura (°C) | n | k | $R^2$ | τ0 | Tipo de fluido | Límite elástico (Pa) | Deformación (rad) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T10 | 1 | 4 | 0.761 ± 0.082 | 4.433 ± 0.212 | 0.92 | 0 ± 0.248 | Pseudoplástico | 3.6 ± 0.11 | 0.521 ± 0.05 |
| T1 | 1.5 | 4 | 1.172 ± 0.062 | 10.767 ± 0.161 | 0.982 | 0 ± 0.159 | Dilatante | 3.70 ± 0.17 | 0.204 ± 0.04 |
| T2 | 2 | 4 | 2.168 ± 0.025 | 23.109 ± 0.332 | 0.998 | 0.098 ± 0.024 | Dilatante | 3.80 ± 0.07 | 0.590 ± 0.14 |
| T3 | 1 | 12 | 2.365 ± 0.024 | 24.380 ± 0.340 | 0.999 | 0.447 ± 0.019 | Dilatante | 3.83 ± 0.04 | 0.650 ± 0.09 |
| T4 | 1.5 | 12 | 1.147 ± 0.075 | 10.029 ± 0.176 | 0.972 | 0 ± 0.191 | Dilatante | 3.64 ± 0.01 | 0.424 ± 0.02 |
| T5 | 2 | 12 | 1.254 ± 0.126 | 11.045 ± 0.473 | 0.947 | 0 ± 0.264 | Dilatante | 3.65 ± 0.22 | 0.644 ± 0.04 |
| T6 | 1 | 20 | 2.446 ± 0.017 | 26.574 ± 0.263 | 0.999 | 0.24 ± 0.013 | Dilatante | 4.12 ± 0.20 | 0.693 ± 0.04 |
| T7 | 1.5 | 20 | 1.233 ± 0.130 | 9.543 ± 0.221 | 0.958 | 0 ± 0.306 | Dilatante | 3.66 ± 0.04 | 0.570 ± 0.02 |
| T8 | 2 | 20 | 0.468 ± 0.25 | 1.9831 ± 0.95 | 0.989 | 0 ± 0.961 | Pseudoplástico | 3.8 ± 0.18 | 0.587 ± 0.04 |
| T9 | 0 | 20 | 0.898 ± 0.414 | 3.182 ± 0.295 | 0.839 | 0 ± 0.579 | Pseudoplástico | 3.84 ± 0.23 | 0.864 ± 0.26 |

*Nota.* Los valores de la tabla representan las medias ± desviación estándar.T: Tratamiento; $R^2$: Coeficiente de determinación; n: índice de comportamiento del flujo; K: índice de consistencia, expresado en Pa*sn; $y_0$: límite elástico, expresado en Pa.

**Figura 2**

*Gráfico de contorno de respuesta*




**a** **b**

*Nota. a: índice de consistencia b:índice de comportamiento de flujo*

## DISCUSIÓN

Las temperaturas de almacenamiento más bajas favorecieron una mayor viscosidad, mientras que a temperaturas altas se observó una disminución del índice de consistencia. Este comportamiento se debe al fortalecimiento de las interacciones moleculares a bajas temperaturas, y con ello una estructura más rígida (Jakubowska & Karamucki, 2020). Adicionalmente, Oraç & Akın, 2019 señalan que el enfriamiento afecta directamente la firmeza y consistencia del gel durante el periodo de almacenamiento, debido a la reestructuración de las micelas de caseína. A temperaturas más bajas, el gel es menos propenso a reordenarse, y la presencia de pectina, al gelificar alrededor de las micelas, evita su agregación y estabiliza la estructura. Los resultados mostraron que a medida que aumentaba la concentración de residuos de manzana, también el valor de n, indicando un comportamiento más dilatante. Esto indica que la presencia de fibra en los residuos de manzana, especialmente la pectina y celulosa, contribuye a la formación de una estructura más compleja y resistente al flujo. La pectina, al formar un gel, estabiliza la red de caseína y la celulosa actúa como una barrera física, dificultando el movimiento de las moléculas (Dong et al., 2022). A temperaturas más bajas de almacenamiento (4°C y 12°C), los yogures presentaron un comportamiento dilatante (n > 1), lo que indica que su viscosidad aumentaba al aplicar un esfuerzo cortante. Sin embargo, a 20°C, se observó un comportamiento más pseudoplástico. Este comportamiento puede explicarse por la influencia de la temperatura en las interacciones moleculares.

Los resultados mostraron que un aumento en la concentración de residuos de manzana se asoció con un incremento en el límite elástico, indicando una mayor resistencia del yogurt a la deformación. Esto se debe a la formación de una red tridimensional más densa debido a las interacciones entre la pectina y las proteínas de la leche, lo que dificulta el inicio del flujo (Kauser et al., 2024). Respecto a la temperatura de almacenamiento, se observó un aumento del límite elástico a 12°C, especialmente en los tratamientos con mayor concentración de residuos de manzana. Sin embargo, a 4°C y 20°C, el límite elástico fue menor. Al comparar los resultados obtenidos mediante el modelo de Herschel–Bulkley y las mediciones directas, se observó que los valores con el modelo de Herschel–Bulkley el límite elástico fue nulo en algunos casos, por lo que para fluidos como el yogurt bebible, las mediciones directas pueden proporcionar valores más precisos.

## CONCLUSIONES

Los residuos de manzana deshidratada (0.125 mm) mostraron potencial como ingrediente funcional en yogurt bebible, destacando por su contenido de fibra (7.86% soluble y 15.37% insoluble), especialmente la fibra insoluble; presentando una buena capacidad de retención de agua (3.99 ± 0.14 g agua/g), hinchamiento (2.60 ± 0.01 ml/g) y absorción de compuestos orgánicos (0.91 ± 0.08 g grasa/g). Los yogures evaluados mostraron un comportamiento reológico no newtoniano de carácter dilatante y pseudoplástico, cuyos datos experimentales se ajustaron al modelo reológico de Herschel–Bulkley, con valores de $R^2$>0.84. La adición de residuos de manzana deshidratada (*Malus domestica*, ´Red Delicious´), particularmente por su contenido de fibra insoluble, incidió positivamente en las propiedades reológicas del yogurt bebible, aumentando el índice de consistencia, el índice de comportamiento de flujo y el límite elástico. La temperatura de almacenamiento mostró un efecto negativo en las propiedades reológicas, con una disminución en el índice de consistencia, índice de comportamiento de flujo y límite elástico a temperaturas más altas. Aunque este efecto no fue estadísticamente significativo, señala la importancia de mantener condiciones controladas en el almacenamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, J., Barua, S., & Roy, S. (2023). Chapter 12—Rheology and microstructure of yogurt. En J. Ahmed & S. Basu (Eds.), *Advances in Food Rheology and Its Applications (Second Edition)* (pp. 335-363). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823983-4.00020-0

Ajila, C. M., & Prasada Rao, U. J. S. (2013). Mango peel dietary fibre: Composition and associated bound phenolics. *Journal of Functional Foods*, *5*(1), 444-450. https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.11.017

Dong, R., Liao, W., Xie, J., Chen, Y., Peng, G., Xie, J., Sun, N., Liu, S., Yu, C., & Yu, Q. (2022a). Enrichment of yogurt with carrot soluble dietary fiber prepared by three physical modified

treatments: Microstructure, rheology and storage stability. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *75*, 102901. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102901

Jakubowska, M., & Karamucki, T. (2020). The effect of storage time and temperature on the quality of natural yoghurt. *Acta Scientiarum Polonorum Zootechnica*, *18*(4), 29-38.

Kauser, S., Murtaza, M. A., Hussain, A., Imran, M., Kabir, K., Najam, A., An, Q. U., Akram, S., Fatima, H., Batool, S. A., Shehzad, A., & Yaqub, S. (2024). Apple pomace, a bioresource of functional and nutritional components with potential of utilization in different food formulations: A review. *Food Chemistry Advances*, *4*, 100598. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100598

Macagnan, F. T., Santos, L. R. dos, Roberto, B. S., de Moura, F. A., Bizzani, M., & da Silva, L. P. (2015). Biological properties of apple pomace, orange bagasse and passion fruit peel as alternative sources of dietary fibre. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, *6*(1), 1-6. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2015.04.001

Meneses-Peralta, J. (2021). Valorización biotecnológica a partir de residuos del proceso de elaboración de Sidra de manzana (*Malus domestica*). *REVISTA DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA PRODUCTIVA*, *2*(2), Article 2. https://doi.org/10.54353/ritp.v2i2.e005

Oraç, A., & Akın, N. (2019). How do different cooling temperatures affect the characteristics of set-type yoghurt gel? *International Dairy Journal*, *97*, 49-56. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.06.003

Pascual-Chagman, G. J., & Encina-Zelada, C. R. (2022). Caracterización de las harinas de trigo (Triticum aestivum), y de residuo de naranja (Citrus x aurantium) y de manzana (*Malus domestica*) para su aplicación en alimentos. *Agroindustrial Science*, *12*(3), Article 3. https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.03.06

Penna, A. L. B., Converti, A., & de Oliveira, M. N. (2006). Simultaneous Effects of Total Solids Content, Milk Base, Heat Treatment Temperature and Sample Temperature on the Rheological Properties of Plain Stirred Yogurt.

Simultaneous Effects of Total Solids Content, Milk Base, Heat Treatment Popescu, L., Ceșco, T., Gurev, A., Ghendov-Mosanu, A., Sturza, R., & Tarna, R. (2022). Impact of Apple Pomace Powder on the Bioactivity, and the Sensory and Textural Characteristics of Yogurt. *Foods*, *11*(22), Article 22. https://doi.org/10.3390/foods11223565

Ramirez-Santiago, C., Ramos-Solis, L., Lobato-Calleros, C., Peña-Valdivia, C., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramírez, J. (2010). Enrichment of stirred yogurt with soluble dietary fiber from *Pachyrhizus erosus* L. Urban: Effect on syneresis, microstructure and rheological properties. *Journal of Food Engineering*, *101*(3), 229-235. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.023

Sözeri Atik, D., Öztürk, H. İ., & Akın, N. (2024). Perspectives on the yogurt rheology. *International Journal of Biological Macromolecules*, *263*, 130428. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130428

Sun, Y., Roos, Y. H., & Miao, S. (2025). Impacts of high-methoxyl pectin on structure, composition, and rheological properties of milk fat globule emulsion. *Food Hydrocolloids*, *160*, 110717. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110717

Wang, X., Kristo, E., & LaPointe, G. (2019). The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt. *Food Hydrocolloids, 91*, 83-91. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.004

Zang, J., You, H., Li, S., Zhang, Y., Xu, H., Tang, D., Wu, S., Yao, Y., Tu, Y., & Yin, Z. (2023). Interpreting the "twice gelation" mechanism of a novel egg-based yoghurt through the dynamics of rheology, microstructure, and intermolecular forces. *Food Bioscience*, *56*, 103318. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103318

Zhou, Z. (2018). *Effects of dried apple peel powder on the rheological and sensory properties of drinking yogurt* [University of Guelph]. http://hdl.handle.net/10214/12158

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 63 al 80
DOI: https://doi.org/10.37787/2x6gxx75

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-9805

**ARTÍCULO DE REVISIÓN**

# Revisión de la implementación de Lean Construction y BIM para la reducción de desperdicios de encofrado

# Lean Construction and BIM implementation for the reduction of formwork waste a review

Willian Diaz [1]* y Manuel Laurencio [2]

## RESUMEN

La revisión de la literatura resalta la integración sinérgica de Lean Construction y Building Information Modeling (BIM) como una estrategia integral para incrementar la eficiencia y reducir los desperdicios en la construcción, con especial énfasis en la gestión de encofrados. Los principios Lean enfocados en el valor, el flujo, la atracción y la perfección, combinados con las capacidades de visualización 3D y modelado 4D de BIM, permiten optimizar procesos, fortalecer la colaboración y respaldar decisiones informadas durante todo el ciclo de vida del proyecto. Herramientas como Value Stream Mapping (VSM), Last Planner System (LPS), Kanban y Heijunka contribuyen a mejorar la planificación, reducir actividades no relevantes y elevar la productividad. Asimismo, la incorporación de encofrados innovadores y tecnologías avanzadas refuerza el compromiso con prácticas constructivas sostenibles, disminuyendo tiempos, costes y el impacto ambiental, a la vez que se mejora la calidad. En conjunto, la aplicación coordinada de Lean y BIM no solo responde a los desafíos actuales de la industria, sino que también proyecta un modelo de construcción más eficiente, colaborativo y sostenible.

**Palabras clave:** Gestión de encofrados, Visualización 3D, VSM, Kanban, Heijunka.

## ABSTRACT

The literature review highlights the synergistic integration of Lean Construction and Building Information Modeling (BIM) as a comprehensive strategy to increase efficiency and reduce waste in construction, with a special emphasis on formwork management. Lean principles—focused on value, flow, attraction, and perfection—combined with BIM's 3D visualization and 4D modeling capabilities, enable process optimization, strengthen collaboration, and support informed decisions throughout the project lifecycle. Tools such as Value Stream Mapping (VSM), Last Planner System (LPS), Kanban, and Heijunka contribute to improving planning, reducing irrelevant activities, and increasing productivity. Likewise, the incorporation of innovative formwork and advanced technologies reinforces the commitment to sustainable construction practices, reducing time, costs, and environmental impact, while improving quality. Together, the coordinated application of Lean and BIM not only responds to the current challenges of the industry, but also projects a more efficient, collaborative, and sustainable construction model.

**Keywords:** Formwork management, 3D visualisation, VSM, Kanban, Heijunka.

* Autor para correspondencia

[1] Universidad Católica sede Sapientiae, Perú. Email: 2016200240@ucss.pe, mlaurencio@ucss.edu.pe

## INTRODUCCIÓN

En el sector de la construcción, la eficiencia y la sostenibilidad se han convertido en prioridades fundamentales para enfrentar los desafíos actuales (Tezel et al., 2020). En este contexto, la integración de Lean Construction y Building Information Modeling (BIM) se plantea como una estrategia clave, particularmente en la etapa de encofrado, que demanda un uso considerable de recursos.

Diversos estudios resaltan los beneficios de esta integración. Por ejemplo, Pronk et al. (2022) señalan que la aplicación conjunta de Lean y BIM permite optimizar los procesos y reducir la generación de residuos, aspectos críticos para la gestión eficiente del encofrado. En sintonía, Hoyos y Botero (2018) advierten que una gestión inadecuada de esta fase puede provocar ineficiencias significativas y un aumento del desperdicio de materiales.

La literatura también resalta ciertos desafíos. Mientras Lean Construction se centra en eliminar actividades que no agregan valor y BIM posibilita una planificación precisa y colaborativa, Karaz y Teixeira (2023) sostienen que aún es necesario fortalecer el desarrollo teórico y práctico de su aplicación conjunta para consolidar su aporte a la sostenibilidad. En la misma dirección, Sepasgozar et al. (2021) destacan que la combinación de Lean y BIM, junto con tecnologías emergentes como Digital Twin e IoT, abre nuevas oportunidades para impulsar prácticas sostenibles y reducir desperdicios en la industria.

En este marco, la presente revisión tiene como objetivo analizar cómo la convergencia de Lean Construction y BIM influye en la gestión del encofrado, evaluando su impacto en la reducción de costos, la mejora de la calidad y la promoción de prácticas sostenibles en los proyectos de construcción.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio adoptó un diseño cualitativo de tipo documental, con un enfoque evaluativo orientado a analizar la interrelación entre Lean Construction y Building Information Modeling (BIM) en la industria de la construcción. La primera fase consistió en la planificación y búsqueda sistemática de información en bases de datos especializadas como Scopus y Web of Science, consideradas de alto impacto y calidad, además de repositorios regionales como Dialnet, Redalyc, Scielo, Latindex y Renati, así como repositorios institucionales y sitios web especializados. Para garantizar la actualidad de la información, se incluyeron publicaciones comprendidas entre 2015 y 2025. Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los estudios:

- Criterios de inclusión: investigaciones publicadas en el rango temporal definido; artículos, tesis y documentos con rigor metodológico comprobado; disponibilidad de texto completo; y estudios con un enfoque directo en la integración Lean-BIM.

- Criterios de exclusión: duplicidad de registros en distintas bases de datos; documentos sin relación explícita con el tema; estudios con bajo nivel de calidad metodológica; y publicaciones no arbitradas.

Una vez seleccionados los documentos, se realizó un proceso de lectura crítica e interpretativa, apoyado en una matriz de contenido que permitió organizar la información en categorías temáticas (eficiencia, sostenibilidad, gestión de encofrados, reducción de residuos, entre otros). Para fortalecer el análisis, se utilizó software especializado de análisis cualitativo, lo que facilitó la identificación de patrones y la organización de la información. Con el fin de transparentar el proceso de selección, se elaboró un diagrama de flujo metodológico, que muestra las fases de identificación, filtrado, exclusión y selección final de los estudios. Asimismo, se construyó una tabla de síntesis con el número total de investigaciones analizadas, distribuidas según año de publicación, base de datos y país de origen.

Finalmente, los hallazgos fueron integrados en un manuscrito académico mediante una síntesis crítica sustentada con citas actualizadas y complementada con imágenes de autoría propia, que refuerzan la importancia de los resultados. El período de desarrollo de la investigación se extendió desde el 10 de abril de 2024 hasta el 21 de junio de 2024, considerando literatura publicada hasta el año 2025 para asegurar vigencia y pertinencia de los resultados.

## RESULTADOS

### Revisión de la literatura

#### *Relevancia en la etapa de encofrado.*

**Tabla 1**

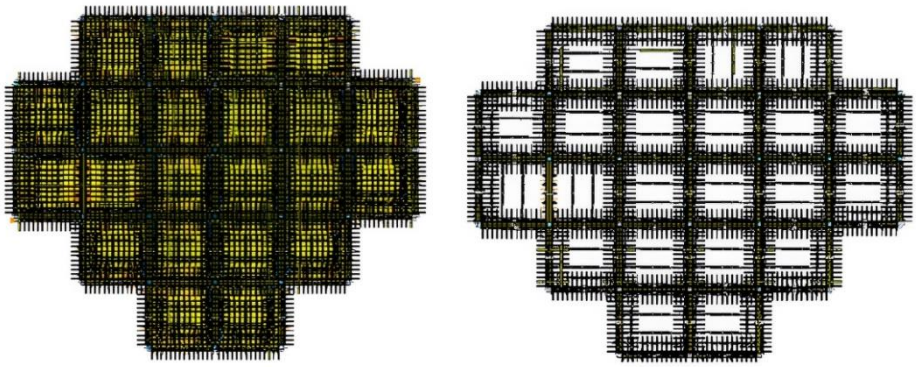
*Autores Claves sobre la Importancia del Encofrado en la Construcción*

| Referencia | Descripción |
|---|---|
| Fabozzi et al. (2021) | El diseño de encofrados es un desafío complejo debido a la variedad de formas y estructuras no rectilíneas en los edificios. Importancia en la optimización de recursos y costos. |
| Mizushima et al. (2023) | La planificación adecuada de la disposición de puntales y encofrados (figura 1) puede reducir costos y duración de la construcción, garantizando seguridad estructural. Métodos matemáticos para optimización continua. |

Nota: Ambos estudios destacan el impacto del encofrado en la eficiencia y costos; Fabozzi resalta la complejidad técnica, mientras que Mizushima propone optimización mediante métodos matemáticos.

**Figura 1**

*Representación Visual de la Información de Encofrados en un Modelado*



Nota: Adaptado de *A Dynamic Model for Effective and Optimal Planning of Formwork in Construction Projects* (p. 12), por A. Tazikova et al., 2023, buildings, 13 (7).

**Tabla 2**

*Referencias sobre la Selección y Uso de Materiales de Encofrado en la Construcción*

| Referencia | Descripción |
|---|---|
| Baskova et al. (2023) | La duración de las etapas constructivas como losas, columnas y vigas depende en gran medida de los materiales de encofrado seleccionados. Importancia crítica en la planificación y velocidad de ejecución del proyecto. |
| Shrivastava et al. (2021) | **Selección** de materiales de encofrado que minimicen costes de mantenimiento, permitan reutilización, sean manejables y ligeros. Optimización del proceso constructivo y economía del proyecto. |

Nota: Ambos estudios subrayan que la elección del material de encofrado influye directamente en el tiempo, costo y eficiencia del proyecto; Baskova enfatiza el impacto en la velocidad de ejecución, mientras que Shrivastava resalta la economía y reutilización de materiales.

**Tabla 3**

*Referencias sobre Costos y Estrategias de Optimización en la Construcción de Encofrados*

| Referencia | Descripción |
|---|---|
| Liebringshausen et al. (2023) | La construcción de encofrados puede representar hasta el 50% del costo total en proyectos de hormigón colado en obra, y hasta el 80% en situaciones con formas complejas. |
| Duan & Li (2016) | Estrategias como la reutilización, optimización de materiales, uso de opciones de bajo costo y gestión eficaz del mantenimiento son cruciales para la sostenibilidad y reducción de costos en la construcción de encofrados. |

Nota: Los hallazgos muestran que los encofrados constituyen uno de los componentes de mayor impacto económico en obra, y que la aplicación de estrategias de optimización permite reducir costos sin comprometer la calidad ni la sostenibilidad del proyecto.

**Figura 2.**

*Evaluación de los encuestados sobre la conformidad del sistema de encofrado convencional con el criterio de sostenibilidad*

| | Elemento Código | Elemento | Min | Max | Media | Desv. Estan |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ECO | ECO 1-1 | Coste Laboral | 2 | 4 | 2.45 | 0.648 |
| | ECO 1-2 | Capacidad de Servicio de Encofrado | 1 | 4 | 2.47 | 1.077 |
| | ECO 2-1 | Costo del Ciclo de Vida | 1 | 3 | 1.62 | 0.639 |
| | ECO 2-2 | Costo de Instalación | 1 | 3 | 1.52 | 0.649 |
| | ECO 3-1 | Simplicidad de uso de la Tecnología | 1 | 4 | 2.12 | 0.980 |
| | ECO 4-1 | Costo de Uso | 1 | 4 | 2.42 | 0.814 |
| | ECO 4-2 | Costo de Materiales y Equipos | 1 | 4 | 1.99 | 0.916 |
| ENV | ENV 1-1 | Consumo de Energía y Recursos | 1 | 3 | 2.18 | 0.776 |
| | ENV 1-2 | Generación de Residuos | 1 | 3 | 1.97 | 0.583 |
| | ENV 2-1 | Encofrado Reutilizable | 1 | 3 | 2.1 | 0.630 |
| | ENV 2-2 | Utilizando Materiales Renovables | 1 | 3 | 1.67 | 0.738 |
| | ENV 3-1 | Impacto en el Medio Ambiente Local | 1 | 3 | 1.89 | 0.700 |
| | ENV 3-2 | Eficiencia de Residuos | 1 | 4 | 2.1 | 1.043 |
| SOC | SOC 1-1 | Seguridad contra Incendios | 1 | 3 | 1.99 | 0.788 |
| | SOC 1-2 | Diseño de Seguridad de Encofrados | 1 | 3 | 2.17 | 0.556 |
| | SOC 2-1 | Medidas de Seguridad | 1 | 3 | 1.55 | 0.697 |

Nota: Los resultados de la Figura 2 revelan baja satisfacción con el rendimiento de sostenibilidad del encofrado convencional, especialmente en coste de instalación y medidas de seguridad. Esto subraya la necesidad urgente de mejorar la eficiencia y seguridad en las actividades de encofrado para reducir residuos y mejorar la sostenibilidad. Adaptado de *Sostenibilidad del sistema de encofrado tradicional* (p. 5), por T. Al-ashwal et al., 2017, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 271.

***Integración Lean y BIM***

**Tabla 4**

*Referencias sobre la Integración de Lean Construction y BIM en la Optimización de Proyectos Constructivos*

| Referencia | Descripción |
|---|---|
| Baskova et al. (2023) | La combinación de Lean Construction (LC) con BIM optimiza los periodos de construcción, reduce costes, acorta plazos de ejecución y mejora la eficiencia en proyectos constructivos. |
| Nguyen & Akhavian (2019) | La colaboración entre Lean, IPD y BIM puede mejorar la eficiencia y calidad en proyectos, aunque los impactos en costos pueden variar. |
| Miettinen & Paavola (2014) | Lean y BIM buscan optimizar procesos constructivos; Lean facilita la adopción de BIM y mejora la gestión de recursos en la construcción. |

Nota: En conjunto, los estudios coinciden en que la integración de Lean y BIM genera beneficios en eficiencia, tiempos y calidad del proyecto, aunque algunos resultados muestran variabilidad en el impacto económico.

**Tabla 5**

*Principales prácticas lean y ejemplos de aplicación en la construcción*

| Referencia | Contexto de la aplicación |
|---|---|
| (Lee et al., 2014) | VSM se utiliza para fortalecer la eficiencia operativa en diversos procesos. |
| (Gao & Low, 2014) | LPS aplicado para obtener compromisos realistas en la planificación de proyectos. |
| (Su & Lucko, 2015) | La línea de equilibrio se implementa para sincronizar la producción en la fabricación. |
| (Kemmer et al., 2016) | Andon se utiliza para mejorar la comunicación y la respuesta en sitios de construcción. |
| (Kumar et al., 2022) | Diversos tipos de Poka Yoke aplicados en la construcción para evitar errores. |
| (Nunes Mariz et al., 2013) | Las células de producción se emplean en actividades específicas de construcción. |
| (Nunes Mariz et al., 2013) y (De Bortoli Saggin et al., 2017) | El trabajo estandarizado se utiliza para mejorar la consistencia y eficiencia en obras. |
| (Dziuba & Almeder, 2023) | Lotes pequeños implementados en proyectos con características únicas. |
| (Lin et al., 2013 y Weflen et al., 2022) | Kanban se emplea para mejorar la gestión de materiales y logística en la construcción. |
| (Fabozzi et al., 2021) | Caja Heijunka utilizada para mantener un flujo constante en la producción de mortero. |
| (Binninger et al., 2017) | Gestión diaria implementada para mejorar la organización y eficiencia diaria. |
| (James et al., 2014) | Eventos Kaizen utilizados para impulsar mejoras continuas en procesos constructivos |

Nota: En la tabla se presentan los principios y las prácticas Lean descritos por diversos autores, junto con una descripción de un ejemplo en el sector de la construcción.

**Tabla 6**

*Autores relevantes que mencionan la fusión de metodologías*

| (Blandín, 2023) | (Nguyen & Akhavian, 2019) | (Miettinen & Paavola, 2014) |
|---|---|---|
| • Optimizar el tiempo y reducir los costes mediante la construcción ajustada | • Colaboración entre LC, IPD y BIM para lograr eficiencia y calidad en los proyectos de construcción. | • Integración de LC y BIM para crear recursos eficientes y mejorar la adopción de BIM. |

Nota: La tabla describe el objetivo descriptivo de cada autor respecto de las dos metodologías: Lean Construction y BIM.

**Tabla 7**

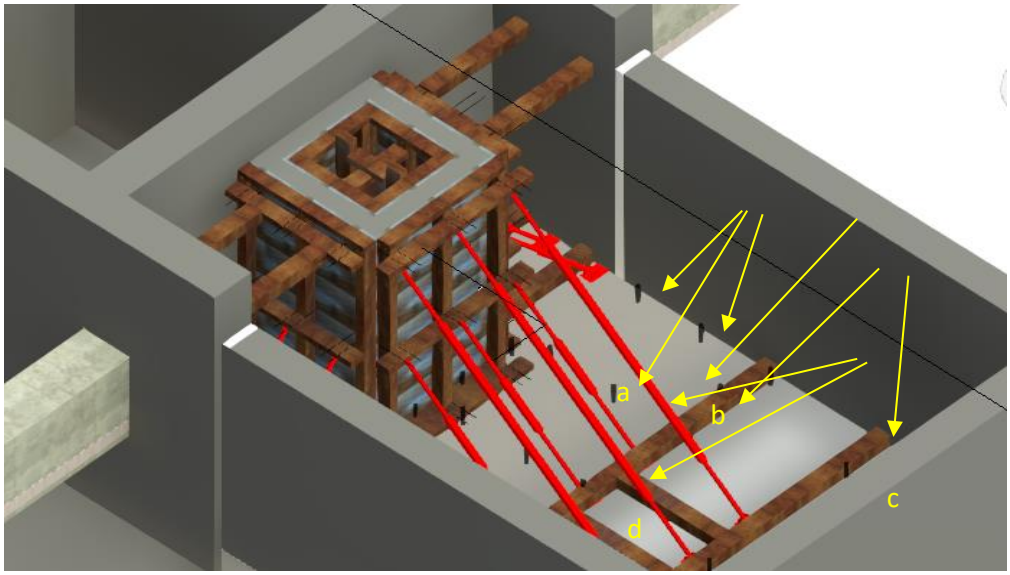
*Referencias sobre las Funcionalidades y Aplicaciones de BIM en la Construcción*

| Referencia | Principales Funcionalidades y Aplicaciones BIM |
|---|---|
| Garcés & Peña (2023) | Integración de principios Lean y BIM para mejorar la productividad en la construcción. |
| Nunes et al. (2021) | Uso de principios Lean como base para eliminar desperdicios y mejorar la calidad en proyectos BIM. |
| De Almeida et al. (2020) | Herramientas digitales de BIM para gestión integral y colaborativa de proyectos de construcción. |
| Sánchez et al. (2017) | Optimización y coordinación efectiva mediante la combinación de Lean y BIM, reduciendo errores y mejorando la eficiencia constructiva. |
| Choi et al. (2024) | Visualización 3D integrando datos de escaneo láser en BIM con Dynamo y Python para inspecciones precisas y eficientes. |
| Sacks et al. (2018) | Modelado 4D que integra el aspecto temporal al 3D para simular el proceso constructivo y planificar paso a paso el avance del proyecto. |
| Dallasega et al. (2020) | Simulación del proceso constructivo con recursos temporales como grúas, integración con realidad virtual y aumentada para mejorar la eficiencia Lean. |
| Lu et al. (2016) | Modelado 5D (5D BIM) para automatizar el flujo de caja y análisis financiero en proyectos de construcción. |
| Yilmaz et al. (2023) | Visualización y evaluación integral de procesos en diseño, construcción y gestión de instalaciones mediante BIM. |
| Sampaio et al. (2023) | Integración disciplinas de construcción en proyectos colaborativos mediante BIM, mejorando la gestión y coordinación. |

Nota: Las investigaciones muestran que BIM ha evolucionado desde funciones básicas de diseño 3D hasta aplicaciones avanzadas como el modelado 4D y 5D, simulaciones con

**Figura 3**

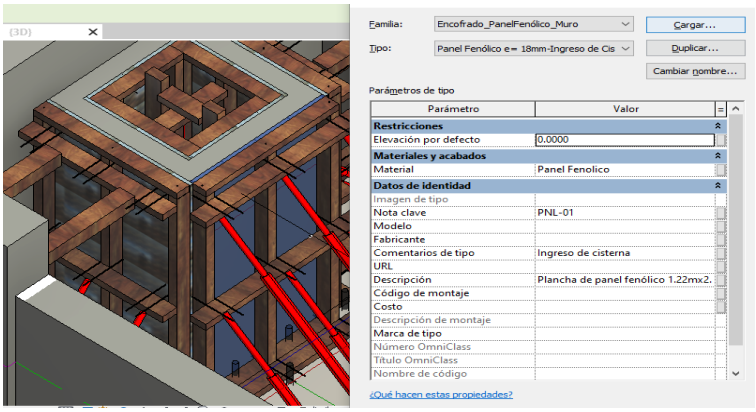
*Interferencias que podrían ocurrir en obra, encontradas en el modelado BIM (a) Estacas de acero de 1' ancladas a la estructura (b) Aplomador (c) Muertos (d) Estructura de concreto endurecido.*




Nota: Durante el proceso de modelado BIM se pueden identificar y visualizar posibles interferencias que podrían surgir durante la construcción del encofrado. Por ejemplo, cuando se trabaja sobre un elemento que ya ha pasado la fase de llenado de hormigón (d) como se muestra en la figura, es fundamental localizar los puntos donde se anclarán los puntales de acero desde el inicio de la etapa de fraguado (a). De esta forma será posible colocar los muertos (c) para soportar los puntales (b) que sustentan efectivamente la estructura del encofrado.

**Figura 4**

*Programación de parámetros del componente "Panel Fenólico".*




Nota: La imagen representa la información de los parámetros del tipo de componente: Panel Fenólico e=18mm-IngresodeCisterna, importante para su agrupación y posteriormente para la extracción de datos.

## *Lean Construction: Eliminación de actividades sin valor añadido*

**Tabla 8**

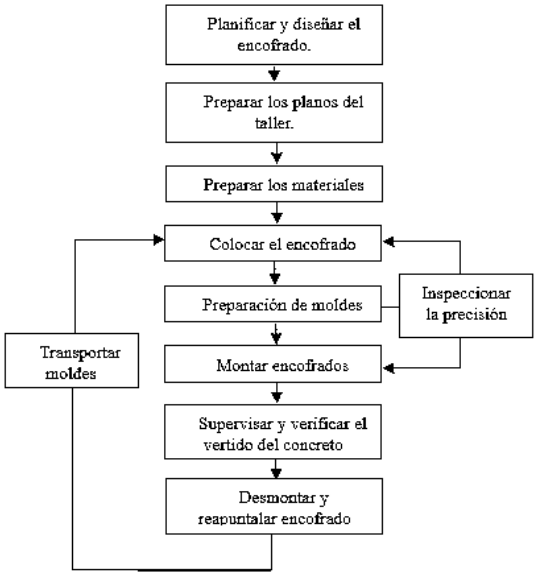
*Referencias sobre Hallazgos Clave en la Implementación de Lean Construction en la Construcción*

| Referencia | Principales Hallazgos |
|---|---|
| Maraqa et al. (2023) | Adaptación de prácticas lean desde la manufactura a la construcción. Desarrollo de enfoques específicos. |
| Karatas & Budak (2023) | Objetivos del Lean Construction: reducción de desperdicios, mejora del flujo, adición de valor, mejora continua. |
| Ko & Kuo (2015) | Problemas en la construcción de encofrados: falta de plan integral, mala coordinación, múltiples residuos. |
| Schlachter et al. (2022) | Aumento de la productividad del encofrado mediante Lean Construction (37%). Mejora en la toma de decisiones. |
| Abebe Wondimu et al. (2016) | Importancia de la participación temprana de las partes interesadas para reducir desperdicios en la cadena de suministro. |
| Terzioglu et al. (2021) | Evaluación de sistemas de coordinación en la construcción de encofrados: beneficios del método VSM y participación temprana del diseñador. |

Nota: Los hallazgos evidencian que la implementación de Lean Construction en proyectos de encofrados no solo optimiza la productividad y reduce desperdicios, sino que también mejora la coordinación y la toma de decisiones al integrar de manera temprana a los actores clave del proyecto.

**Figura 5**

*Flujo operativo del encofrado*




Nota:Adaptado de *Mejora del uso de la ingeniería de encofrados* (p. 446), por Ko & Kuo, 2015, Journal of Civil Engineering and Management, 21(4).

### *BIM: Gestión de proyectos precisa y colaborativa*

Según Fabozzi et al. (2021) BIM, o Building Information Modeling, representa una poderosa herramienta para la gestión precisa y colaborativa de proyectos en el campo de la arquitectura, la ingeniería y la construcción (AEC). De acuerdo a Haronian & Sacks (2020) esta tecnología digital permite una representación detallada de los procesos de construcción y facilita la colaboración entre todos los actores del proyecto.

### *Beneficios en tiempo, coste y calidad en el elemento de encofrado*

**Tabla 9**

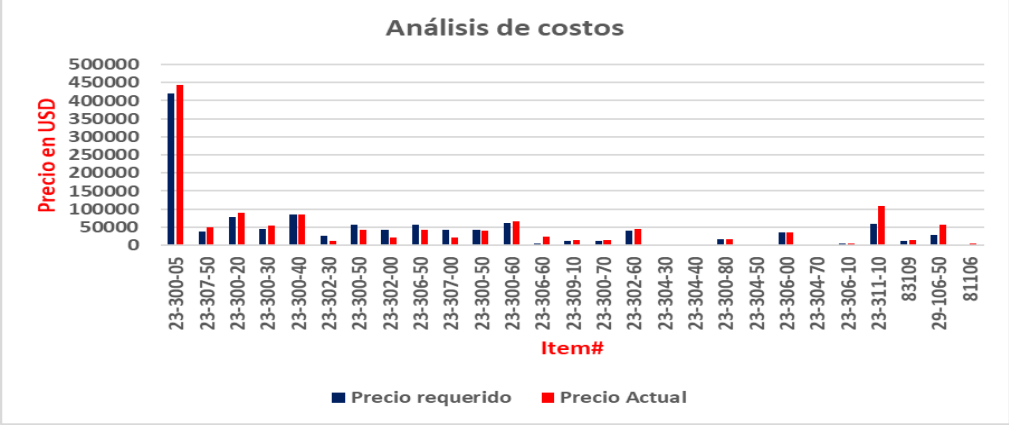
*Referencias sobre el Contexto de Aplicación de Encofrados y BIM en la Construcción*

| Referencia | Contexto de la aplicación |
|---|---|
| (Ko et al., 2011) | Importancia económica del encofrado en la construcción de hormigón armado. |
| | Estudio de caso en el Centro de Terapia de Protones, utilizando BIM para mejorar la gestión de recursos de encofrados y comparar datos de modelado con la realidad. |
| (Mansuri, 2016) | Herramienta específica utilizada en el estudio para crear el modelo BIM del proyecto. |
| | Proceso de validación y análisis financiero basado en datos reales del proyecto y la lista de proveedores. |

Nota: Estas referencias muestran que la aplicación de BIM en encofrados no solo contribuye a la gestión y control económico, sino que también facilita la validación de modelos y la comparación con información real del proyecto.

**Figura 6**

*Comparación del coste de los materiales de encofrado tal como era realmente frente al coste estimado*




Nota: Esta investigación optimiza la gestión del encofrado en proyectos de hormigón, destacando su impacto en tiempo, costos y calidad. La herramienta validada sugiere un ahorro del 13% en costos de encofrado, reduciendo horas de trabajo y movimientos de grúa. Es versátil y aplicable, aunque los ahorros pueden variar según la complejidad del proyecto. Adaptado de *Optimization of Formwork Management Using Building Information Modeling (BIM) and Cascading Tool* (p. 72), por D. Mansuri, 2016, [Master's thesis, University of Cincinnati]. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ucin1470743739

## *Promoción de prácticas sostenibles*

**Tabla 10**

*Referencias sobre el Contexto de Aplicación de Prácticas Sostenibles en la Industria de la Construcción*

| Referencia | Contexto de la aplicación |
|---|---|
| Liebringshausen et al., 2023 | Importancia de abordar la sostenibilidad en la construcción globalmente. |
| Duan & Li, 2016 | Desafíos y enfoques hacia la sostenibilidad en la gestión de residuos de construcción. |
| Nilimaa et al., 2023 | Compromiso con prácticas más ecológicas y su impacto en la industria de la construcción. |
| Li et al., 2022 | Avances tecnológicos en encofrados y su aplicación en la industria de la construcción. |
| Valle et al., 2011 | Beneficios ambientales de prácticas de reciclaje y reutilización en la construcción. |

Nota: Estas referencias reflejan cómo la sostenibilidad en la construcción se aborda desde distintos frentes: gestión de residuos, innovación tecnológica, prácticas ecológicas y aprovechamiento de materiales reciclados.

**Figura 7**

*Lista de detalles de piezas a usar*

<Tabla de detalle del Elemento Ingreso de cisterna>

| A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|
| Tipo | Nota clave | Comentarios de tipo | Longitud total | Ancho | Largo |
| Alambre_N°8_INGRESO DE CISTERNA | | | | | |
| Alambre_N°8_ | ALMBR-08 | Ingreso de cisterna | 0.60 | | |
| Alambre_N°8_INGRESO DE CISTERNA: 27 | | | | | |
| APLOMADOR-INGRESO DE CISTERNA | | | | | |
| APLOMADOR- | APLM-01 | Ingreso de cisterna | | | |
| APLOMADOR-INGRESO DE CISTERNA: 12 | | | | | |
| BARROTE 2"x3.5"- INGRESO DE CISTERNA | | | | | |
| BARROTE | BRRT-01 | Ingreso de cisterna | | 0.09 | <varía> |
| BARROTE 2"x3.5"- INGRESO DE CISTERNA: 21 | | | | | |
| Barrote Vertical 4"-INGRESO DE CISTERNA | | | | | |
| Barrote Vertic | BRRT-4 | Ingreso de cisterna | | | 0.10 |
| Barrote Vertical 4"-INGRESO DE CISTERNA: 12 | | | | | |
| BASTIDOR 2"x3"- INGRESO DE CISTERNA | | | | | |
| BASTIDOR 2" | BAST-01 | Ingreso de cisterna | | 0.08 | <varía> |
| BASTIDOR 2"x3"- INGRESO DE CISTERNA: 6 | | | | | |
| Bastidor 2"x3"-Ingreso de Cisterna | | | | | |
| Bastidor 2"x3"- | BSTDR-1 | Ingreso de cisterna | | 0.05 | 1.75 |
| Bastidor 2"x3"-Ingreso de Cisterna: 19 | | | | | |
| Clavo de1"-Ingreso de Cisterna | | | | | |
| Clavo de1"-In | CLV-1 | Ingreso de cisterna | | | |
| Clavo de1"-Ingreso de Cisterna: 237 | | | | | |
| Clavo de 3"-Ingreso de cisterna | | | | | |
| Clavo de 3"-In | CLV-3 | Ingreso de cisterna | | | |
| Clavo de 3"-Ingreso de cisterna: 42 | | | | | |
| Panel Fenólico e= 18mm-Ingreso de Cisterna | | | | | |
| Panel Fenólico | PNL-01 | Ingreso de cisterna | | <varía> | 1.85 |
| Panel Fenólico e= 18mm-Ingreso de Cisterna: 7 | | | | | |
| Total general: 383 | | | | | |

Nota: La imagen presentada sintetiza la cuantificación y los detalles de las medidas de los elementos empleados en la gestión de encofrados mediante una herramienta BIM ubicado en las placas de ingreso de la cisterna de un proyecto Multifamiliar. Al realizar una planificación precisa de estos elementos, se logra una recopilación exacta de la lista de materiales necesarios, facilitando así la minimización de desperdicios derivados de una planificación deficiente. Este enfoque de obtención de datos mediante un modelado con información de cada elemento, resalta la importancia de la organización meticulosa en la fase inicial del proyecto, promoviendo una gestión eficiente de recursos y una ejecución más efectiva.

**Tabla 11**

*Evaluación de varios sistemas de encofrado*

| Tipo de encofrado | Coste laboral | Costo material | Velocidad de construcción | Geometría | Calidad de la superficie | Reciclaje y Reutilización de Encofrados |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Encofrado de madera** | Alto | Medio | Bajo | Se utiliza principalmente en configuraciones regulares (se necesitan disposiciones específicas para formas complejas) | Medio | Sí (restringido a configuraciones similares). |
| **Encofrados Metálicos** | Mediano (Rebajado porque es reutilizable) | Alto | Bajo | Principalmente para formas ortogonales. | Alto | Sí (restringido a configuraciones similares). |
| **Encofrado de tela** | Medio (reducido al tejer) | Bajo | Alto | Adaptable (determinado por el sistema de soporte). | Alto | Restringido (normalmente contaminado después de verter el hormigón). |
| **Espuma de poliestireno fresada con CNC** | Bajo | Medio | Medio | Ilimitado | Alto (Con revestimiento) | Sí (restringido a configuraciones similares). |
| **plástico impreso en 3D** | Bajo | Alto | Medio (limitado por escala) | Factible para formas no convencionales (con limitaciones en términos de escala). | Bajo (existe la posibilidad de dañar la superficie durante el decapado) | No |
| **molde modular** | Medio | Medio | Alto | formas regulares | Medio | No |
| **encofrado de arena** | Bajo (con impresión 3D) | Muy bajo | Acondicionado por el método de fabricación. | Ilimitado | Alto (con agentes desmoldantes) | Sí |
| **Encofrado de hielo** | Bajo (con fresado CNC) | Muy bajo | Acondicionado por el método de fabricación. | Ilimitado | Alto | Sí |

Nota: La muestra una comparativa de los diferentes tipos de encofrados, especificando la reutilización de cada uno. Adaptado de *Una revisión de los sistemas de encofrado para la construcción moderna de hormigón* (p. 52), por Wei Li et al. 2022, Estructuras, 38.

## DISCUSIÓN

La integración de Lean Construction y BIM en la industria de la construcción, particularmente en la fase de encofrado, evidencia mejoras sustanciales en la planificación y el control de procesos. Los hallazgos confirman la efectividad de los modelos dinámicos de planificación de encofrados (Tazikova et al., 2023) y resaltan la necesidad de un enfoque sistemático para optimizar la eficiencia y la gestión de recursos en proyectos constructivos (Tezel et al., 2020).

Al contrastar los resultados con estudios previos, se reafirma la sinergia entre Lean Construction y BIM en pequeñas y medianas empresas (Algan et al., 2020), lo que respalda la implementación de prácticas lean orientadas a reducir desperdicios y mejorar el flujo de trabajo en la ejecución de encofrados (Chien-Ho y Jiun-De, 2015). Asimismo, el uso del sistema Last Planner se presenta como una oportunidad de mejora, dado su impacto positivo en la disminución de variaciones y retrasos en la producción (Gao y Pheng Low, 2014; Choi et al., 2023).

En términos prácticos, la integración de Lean y BIM se ha consolidado como una estrategia eficaz para reducir desperdicios y optimizar procesos constructivos. Estudios demuestran que su aplicación conjunta disminuye tiempos de diseño y ejecución, lo que mejora la eficiencia del proyecto (Eldeep, Farag, & Abd El-hafez, 2022). De manera complementaria, Likita, Jelodar, Vishnupriya y Rotimi (2025) proponen lineamientos prácticos que facilitan a los actores del sector la implementación de ambas metodologías de forma integrada.

No obstante, la aplicación de Lean-BIM enfrenta desafíos importantes. Entre ellos destacan la resistencia al cambio organizacional, la necesidad de capacitación técnica especializada y los altos costos iniciales de adopción tecnológica, factores que limitan su implementación en ciertas empresas y contextos. Además, en proyectos de menor escala, la falta de recursos y de infraestructura digital puede dificultar la integración efectiva de estas metodologías.

Este estudio también reconoce algunas limitaciones. Al tratarse de una revisión documental, los resultados dependen de la disponibilidad y calidad de los estudios publicados, lo que podría generar sesgos en el análisis. Asimismo, no se incluyeron estudios empíricos aplicados a todos los tipos de proyectos, lo que restringe la generalización de los hallazgos.

Finalmente, los resultados abren camino para futuras investigaciones, particularmente en torno a la integración de Lean-BIM con tecnologías emergentes como Digital Twin e IoT, que pueden potenciar la sostenibilidad y eficiencia de la construcción. De igual manera, los hallazgos ofrecen insumos relevantes para la toma de decisiones en la gestión de encofrados, fomentando prácticas sostenibles y la reducción de costos en proyectos de diferentes escalas.

## CONCLUSIONES

La integración de Lean Construction y Building Information Modeling (BIM) en la fase de encofrados constituye una estrategia efectiva para optimizar la planificación, reducir desperdicios y mejorar la productividad en los proyectos de construcción. Los hallazgos confirman que el uso de principios Lean favorece la eliminación de actividades que no agregan valor, mientras que BIM aporta herramientas de visualización y modelado que permiten una gestión más precisa del inventario y los recursos.

Este estudio contribuye al sector al demostrar que la aplicación conjunta de Lean y BIM no solo incrementa la eficiencia en costos, tiempos y calidad, sino que también fortalece la capacidad de toma de decisiones informadas en la gestión de encofrados. Además, la investigación refuerza la importancia de vincular estas metodologías con prácticas de sostenibilidad, promoviendo la optimización del uso de materiales y la reducción del impacto ambiental.

Finalmente, los resultados tienen aplicabilidad en distintos contextos constructivos, desde proyectos de pequeña y mediana escala hasta obras de mayor complejidad, lo que resalta su potencial como lineamiento estratégico para el futuro de la industria de la construcción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abebe Wondimu, P., Hosseini, A., Lohne, J., Hailemichael, E., & Laedre, O. (2016). Early Contractor Involvement in Public Infrastructure Projects. 24th *Annual Conference of the International Group for Lean Construction* - Boston, Massachusetts, USA - 2016. https://iglc.net/papers/Details/1282

Baskova, R., Tazikova, A., Strukova, Z., Kozlovska, M., & Cabala, J. (2023). A Dynamic Model for Effective and Optimal Planning of Formwork in Construction Projects. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 1794, 13(7), 1794. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13071794

Binninger, M., Dlouhy, J., Schneider, J., & Haghsheno, S. (2017). How Can Lean Construction Improve the Daily Schedule of A Construction Manager? IOP *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(6), 062019. https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/6/062019

Blandín, F. (2023). La metodología Lean Construction: una revisión sistemática a la bibliografía (2019-2023). *South Florida Journal of Development*, 4(6), 2413–2431. https://doi.org/10.46932/sfjdv4n6-016

Choi, M., Kim, S., & Kim, S. (2024). Semi-automated visualization method for visual inspection of buildings on BIM using 3D point cloud. *Journal of Building Engineering*, 81, 108017. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108017

Dallasega, P., Revolti, A., Sauer, P. C., Schulze, F., & Rauch, E. (2020). BIM, Augmented and Virtual Reality empowering Lean Construction Management: a project simulation game. *Procedia Manufacturing*, 45, 49–54. https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.04.059

De Almeida, F., Furtado, L. M., Neves, C. C., Gois, D., & de Melo, R. (2020). Previsão da geração de resíduos na construção civil por meio da modelagem BIM. *Ambiente Construído*, 20(4), 157–176. https://doi.org/10.1590/S1678-86212020000400465

De Bortoli Saggin, A., Mota, T. R., Brito, F. L., & Mourão, C. A. M. A. (2017). Standardized Work: Practical Examples in a Brazilian Construction Company. IGLC 2017 - Proceedings of the 25th *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 713–720. https://doi.org/10.24928/2017/0128

Duan, H., & Li, J. (2016a). Construction and demolition waste management: China's lessons. Waste *Management and Research*, 34(5), 397–398. https://doi.org/10.1177/0734242X16647603

Dziuba, D., & Almeder, C. (2023). New construction heuristic for capacitated lot sizing problems. European *Journal of Operational Research*, 311(3), 906–920. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2023.06.002

Eldeep, A. M., Farag, M. A. M., & Abd El-hafez, L. M. (2022). Using BIM as a lean management tool in construction processes – A case study. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(2), 101556. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.07.009

Fabozzi, S., Biancardo, S. A., Veropalumbo, R., & Bilotta, E. (2021a). I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108, 103723. https://doi.org/10.1016/J.TUST.2020.103723

Gao, S., & Low, S. P. (2014). The Last Planner System in China's construction industry — A SWOT analysis on implementation. *International Journal of Project Management*, 32(7), 1260–1272. https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2014.01.002

Garcés, G., & Peña, C. (2023). A Review on Lean Construction for Construction Project Management. *Revista Ingeniería de Construcción*, 38(1), 43–60. https://doi.org/10.7764/RIC.00051.21

Haronian, E., & Sacks, R. (2020). ROADELS: discrete information objects for production planning and control of road construction. ITcon Vol. 25, Special Issue EWork and EBusiness in Architecture, *Engineering and Construction* 2018 , Pg. 254-271, Http://Www.Itcon.Org/2020/15, 25(15), 254–271. https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2020.015

Hoyos, M. F., & Botero, L. F. (2018). Evolución e impacto mundial del Last Planner System: una revisión de la literatura. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 187–214. https://doi.org/10.14482/INDE.36.1.10946

James, J., Ikuma, L. H., Nahmens, I., & Aghazadeh, F. (2014). The impact of Kaizen on safety in modular home manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1–4), 725–734. https://doi.org/10.1007/S00170-013-5315-0/METRICS

Karaz, M., & Teixeira, J. C. (2023). Waste elimination based on Lean Construction and Building Information Modelling: A systematic literature review. U.Porto *Journal of Engineering*, 9(3), 72–90. https://doi.org/10.24840/2183-6493_009-003_001808

Karatas, I., & Budak, A. (2023). Investigating the impact of lean-BIM synergy on labor productivity in the construction execution phase. *Journal of Engineering Research*, 11(4), 322–333. https://doi.org/10.1016/J.JER.2023.10.021

Kemmer, S., Biotto, C., Chaves, F., Koskela, L., & Fazenda, P. T. (2016). Implementing Last Planner in the Context of Social *Housing Retrofit*. https://www.researchgate.net/publication/305680969

Ko, C. H., & Kuo, J. De. (2015). Making formwork construction lean. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(4), 444–458. https://doi.org/10.3846/13923730.2014.890655

Ko, C.-H., Wang, W.-C., & Kuo, J.-D. (2011). Improving Formwork Engineering Using the Toyota Way. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 1(1), 13–27. https://www.researchgate.net/publication/260301829

Kumar, R., Chauhan, P. S., Kumar Dwivedi, R., Pratap Singh, A., & Prasad, J. (2022). Design and development of ball dispenser Machine through lean manufacturing tool Poka-Yoke technique in automobile industries. *Materials Today: Proceedings*, 62(P12), 6530–6533. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.04.335

Lee, E., Grooms, R., Mamidala, S., & Nagy, P. (2014). Six easy steps on how to create a lean sigma value stream map for a multidisciplinary clinical operation. Journal of the American *College of Radiology*, 11(12), 1144–1149. https://doi.org/10.1016/j.jacr.2014.08.031

Li, W., Lin, X., Bao, D. W., & Min Xie, Y. (2022). A review of formwork systems for modern concrete construction. *Structures*, 38, 52–63. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2022.01.089

Liebringshausen, A., Eversmann, P., & Göbert, A. (2023a). Circular, zero waste formwork - Sustainable and reusable systems for complex concrete elements. *Journal of Building Engineering*, 80, 107696. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107696

Likita, A. J., Jelodar, M. B., Vishnupriya, V., & Rotimi, J. O. B. (2025). A guideline for BIM and lean integrated construction practice. *Smart and Sustainable Built Environment*, 14(4), 1264–1291. https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2024-0098

Lin, C. J., Chen, F. F., & Chen, Y. M. (2013). Knowledge kanban system for virtual research and development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(3), 119–134. https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2012.04.020

Lu, Q., Won, J., & Cheng, J. C. P. (2016). A financial decision making framework for construction projects based on 5D Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Project Management*, 34(1), 3–21. https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2015.09.004

Mansuri, D. N. (2016). Optimization of Formwork Management Using Building Information Modeling (BIM) and Cascading Tool [Master's thesis, University of Cincinnati]. *Centro de Tesis y Disertaciones Electrónicas* OhioLINK. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ucin1470743739

Maraqa, M. J., Sacks, R., & Spatari, S. (2023). Strategies for reducing construction waste using lean principles. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200180. https://doi.org/10.1016/J.RCRADV.2023.200180

Miettinen, R., & Paavola, S. (2014). Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling. *Automation in Construction*, 43, 84–91. https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2014.03.009

Mizushima, Y., Inoue, H., Morikawa, S., & Taira, S. (2023). Optimization of formworks shoring location as a continuous optimization problem. *Structures*, 56, 104949. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.104949

Nguyen, P., & Akhavian, R. (2019). Synergistic Effect of Integrated Project Delivery, Lean Construction, and Building Information Modeling on Project Performance Measures: A Quantitative and Qualitative Analysis. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 1267048. https://doi.org/10.1155/2019/1267048

Nilimaa, J., Gamil, Y., & Zhaka, V. (2023). Formwork Engineering for Sustainable Concrete *Construction. CivilEng* 2023, Vol. 4, Pages 1098-1120, 4(4), 1098–1120. https://doi.org/10.3390/CIVILENG4040060

Nunes Mariz, R., Picchi, F. A., Denis Granja, A., Sávio, R., & De Melo, S. (2013). Production Cells in Construction: Considering Time, Space and Information Linkages to Seek Broader Implementations. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 3(1), 46–55. https://doi.org/10.32738/JEPPM.201301.0006

Nunes, R., Flavio, M., Picchi, A., & Nunes Mariz, R. (2021). Implementation of lean practices facilitated by BIM functionalities in the construction phase: advances and opportunities. *Ambiente Construído*, 21(4), 309–328. https://doi.org/10.1590/S1678-86212021000400571

Pronk, A., Brancart, S., & Sanders, F. (2022). Reusing Timber Formwork in Building Construction: Testing, Redesign, and Socio-Economic Reflection. *Urban Planning*, 7(2), 81–96. https://doi.org/10.17645/UP.V7I2.5117

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). Manual BIM: una guía para el BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. *BIM Handbook*. https://doi.org/10.1002/9781119287568

Sampaio, A. Z., Fernandes, V., & Gomes, A. (2023). The use of BIM-based tools to improve collaborative building projects. *Procedia Computer Science*, 219, 2027–2034. https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2023.01.504

Sánchez, O., Galvis, J., Porras, H., Ardila, D., & Martínez, A. (2017). BrIM 5D models and Lean Construction for planning work activities in reinforced concrete bridges. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26(46), 39–50. https://doi.org/10.19053/01211129.V26.N46.2017.7314

Schlachter, A., Rasmussen, M. H., & Karlshøj, J. (2022). Using Linked Building Data for managing temporary construction items. *Automation in Construction*, 139, 104258. https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104258

Sepasgozar, S. M. E., Hui, F. K. P., Shirowzhan, S., Foroozanfar, M., Yang, L., & Aye, L. (2021). Lean Practices Using Building Information Modeling (BIM) and Digital Twinning for Sustainable *Construction. Sustainability*, 13(1), 161. https://doi.org/10.3390/su13010161

Shrivastava, A., Chourasia, D., & Saxena, S. (2021). Planning of formwork materials. *Materials Today: Proceedings*, 47, 7060–7063. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.06.121

Su, Y., & Lucko, G. (2015). Comparison and Renaissance of Classic Line-of-balance and Linear Schedule Concepts for Construction Industry. *Procedia Engineering*, 123, 546–556. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.10.107

Terzioglu, T., Polat, G., & Turkoglu, H. (2021). Analysis of Industrial Formwork Systems Supply Chain Using Value Stream Mapping. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 12(1), 47–61. https://doi.org/10.32738/JEPPM-2022-0005

Tezel, A., Taggart, M., Koskela, L., Tzortzopoulos, P., Hanahoe, J., & Kelly, M. (2020). Lean construction and BIM in small and medium-sized enterprises (SMEs) in construction: A systematic literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 47(2), 186–201. https://doi.org/10.1139/CJCE-2018-0408

Valle, P. L., Baena-Extremera, A., & Granero-Gallegos, A. (2011). Buenas prácticas para un desarrollo sostenible en los eventos deportivos en el medio natural. *Interciencia,* 36(7), 531–537. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33919424009

Weflen, E., MacKenzie, C. A., & Rivero, I. V. (2022). An influence diagram approach to automating lead time estimation in Agile Kanban project management. *Expert Systems with Applications,* 187, 115866. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2021.115866

Yilmaz, G., Akcamete, A., & Demirors, O. (2023). BIM-CAREM: Assessing the BIM capabilities of design, construction and facilities management processes in the construction industry. *Computers in Industry*, 147, 103861. https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2023.103861

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 81 al 90
DOI: https://doi.org/10.37787/2c53fe39

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-9805

**ARTÍCULO DE REVISIÓN**

# Tecnologías de la información de la cadena de suministro empresarial: Una revisión sistemática.

# Business Supply Chain Information Technologies: A Systematic Review.

Luis M. Llanos [1]*, Dennis Noriega [2], Lucio Yep [2] y Frans Fuentes[1]

## RESUMEN

La transformación de las estrategias tecnológicas en un contexto de la globalización viene transformando de forma incremental la gestión empresarial, teniendo como prioridad migrar al uso de tecnologías de la información (TI) en la gestión de la cadena de suministro (GCS), la investigación contribuyo a identificar y describir las TI más importantes a través de la metodología PRISMA, lo que permite realizar un análisis transparente y sistemático de los antecedentes, entre las tecnologías más relevantes esta la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático(ML), que ayudan a la gestión de la empresa mediante la predicción de los comportamientos de los mercados; ofrecen trazabilidad y seguridad en las transacciones (blockchain (BC); internet de las cosas (IoT), que permite el monitorio y control en tiempo real de los procesos logísticos y la automatización robótica de procesos (RPA) permitiendo incrementar la eficiencia en los procesos funcionales, los resultados obtenidos evidencian el impacto positivo reduciendo los tiempos en el procesamiento de grandes volúmenes de datos e información, aumento de la competitividad, mejora en la resiliencia de la cadena de suministro, permitiendo la satisfacción de cliente, las TI desarrollan capacidades en el ser humano como el análisis de datos e información permitiendo tomar decisiones estratégicas.

**Palabras clave:** cadena suministros; inteligencia artificial; IoT; Blockchain; automatización robótica de procesos.

## ABSTRACT

The transformation of technological strategies in a context of globalisation is gradually transforming business management, with the priority being to migrate to the use of information technology (IT) in supply chain management (SCM). The research contributed to identifying and describing the most important IT through the PRISMA methodology, which allows for a transparent and systematic analysis of the background. Among the most relevant technologies are artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), which help in business management by predicting market behaviour; they offer traceability and security in transactions (blockchain (BC)); the Internet of Things (IoT), which enables real-time monitoring and control of logistics processes; and robotic process automation (RPA), which increases the efficiency of functional processes. The results obtained show a positive impact, reducing the time taken to process large volumes of data and information, increasing competitiveness, improving the resilience of the supply chain, enabling customer satisfaction, and allowing IT to develop human capabilities such as data and information analysis, enabling strategic decisions to be made.

**Keywords:** supply chain; artificial intelligence; IoT; Blockchain; robotic process automation.

* Autor para correspondencia

[1] Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: luis.llanos@unj.edu.pe, ingfrans@unj.edu.pe
[2] Universidad Nacional de Trujillo, Perú. Email: noriegadennis5@gmail.com, autor3@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

La GCS está atravesando por una transformación profunda, impulsada por las TI en un entorno complejo empresarial caracterizado por la globalización y la complejidad de los mercados, el uso de los robots de software (RS) para automatizar tareas procesando grandes volúmenes de información (MVI), minimizando errores humanos, costos y tiempo, enfocándose al análisis y toma de decisiones (Escandon-Barbosa & Salas-Paramo, 2025); así como IoT diseñado para interconectar todos los equipos industriales (Ahmed et al., 2023), en supervisión de biomateriales, productos químicos en cadena productiva de medicamentos (Sharma et al., 2020). Actualmente la tecnología IoT ha transformado los modelos de negocio de comercio electrónico va más allá de optimizar procesos en CS, con un eco cada vez mayor en la toma de decisiones basados en datos (Shamsuzzoha & Pelkonen, 2025; Su et al., 2025). La IA es una tecnología que permite optimizar y analizar datos como gastos y gestión de contratos, predicción de ventas y comportamientos proveedor-cliente (Bhat & Aljuneidi, 2025; Guida et al., 2025; Rahman Mahin et al., 2025), la inteligencia artificial (IA) y el machine learning (ML) destacan por su capacidad de automatizar la clasificación de gastos, optimizar contratos, predecir ventas y anticipar el comportamiento proveedor–cliente, además de potenciar el marketing relacional mediante la identificación y aprovechamiento de patrones en el mercado (Cuesta-Valiño et al., 2025; S. K. Roy et al., 2025), asimismo, la combinación IA–Blockchain (BC) mejora la velocidad y seguridad en el comercio electrónico, mientras que el BC de forma independiente asegura la trazabilidad en cadenas agrícolas y logísticas gracias a su carácter descentralizado, transparente e inmutable (Pang et al., 2024; Valami & Ahmadifar, 2025; Zhu, 2025), la TI gemelos digitales (GD) es una tecnología potente que permite la creación virtual de sistemas mediante sensores IoT interactuando con el mundo físico real, esta TI se mejora en gran medida en cuanto a la seguridad de sus datos al registrarse en plataforma BC que brinda una característica inmutable y clara en los datos (Joshi et al., 2025; Lehner et al., 2024) los GD se busca implementar en los diferentes cadenas de suministro como el sector de la construcción que busca mejorar la productividad y la eficiencia operativa en los procesos constructivos (Moshood et al., 2024). Si bien es cierto las TI impulsan RI4.0, hoy en día es aplicable a grandes empresas que poseen infraestructura tecnológica de vanguardia, a diferencia de los países en desarrollo que enfrentan barreras tipo organizativas, tecnológicas para su implementación (Awasthy et al., 2025; Elhusseiny & Crispim, 2022); será cuestión de tiempo para que las PYMES rompan las barreras y encuentren soluciones aplicables y accedan a TI (Nevi et al., 2025).

Las TI, se vienen implementando en diferentes campos como la ingeniería, ciencias sociales, ciencias matemáticas, la gestión administrativa entre otros, mediante el uso de sensores inteligentes, Big Data ,

minería de datos, permitiendo de bases de datos robustas de datos e información, lo que permite tener un cambio en la gestión de la cadena de suministro, posicionando a las TI como herramientas claves en la mejora de procesos operativos, visibilidad en tiempo real y la capacidad de adaptación de la empresas, es así que en el análisis de los antecedentes de las investigaciones ofrece información clara permitiendo fundamentar decisiones sobre inversiones en TI y construir cadenas de suministro más ágiles y competitivas, tal como lo menciona (Rumson & Hallett, 2019; Sharifmousavi et al., 2024).

Sin embargo, la sinergia entre tecnologías como blockchain (BC) y el internet de las cosas (IoT), establecen desafíos como la interoperabilidad y la falta de estándares. Además, las tecnologías de la información tienen algunas limitaciones estructurales como la dependencia de la conexión a internet, fallas en la red, la complejidad de su implementación y mantenimiento. Sumado a la posibilidad de sesgo en los datos, lo cual afecta a la calidad de la información y, en consecuencia, la toma de decisiones estratégicas acertadas.

En este contexto el propósito de esta investigación es identificar y describir las TI más relevantes aplicadas en la GCS, así como determinar cuáles son las tecnologías clave actualmente utilizadas en el sector empresarial. Para ello, se recurre al análisis de publicaciones científicas que funcionan como guía y respaldo en torno a la incorporación de TI en la cadena de suministro, además de evaluar el impacto de las TI como la IA, el aprendizaje autónomo (ML), blockchain (BC), IoT y la automatización robótica de procesos (RPA) en la gestión de la cadena de suministro, con el fin de aportar una visión integral sobre sus beneficios, limitaciones y retos en el entorno empresarial actual.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El marco metodológico se estructuró bajo el enfoque de revisión sistemática de literatura (RSL), siguiendo las recomendaciones de PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)(Ahn & Kang, 2018), identificando las tecnologías de la información (TI) más relevantes aplicadas en la gestión de la cadena de suministro (GCS). La revisión se realizó en la base de datos ScienceDirect, seleccionada por su alta cobertura de artículos científicos indexados y revisados por pares en ingeniería, administración y ciencias aplicadas. Se utilizaron las siguientes combinaciones de palabras clave, “automation” AND “supply chain”, “blockchain” AND “supply chain” AND “business sector”, “IoT” AND “supply chain”, “artificial intelligence” AND “supply chain” AND “business sector”, Se aplicó como filtro el rango temporal hasta el año 2025, considerando únicamente artículos en inglés y español, en los criterios de inclusión se trabajó con artículos científicos publicados en revistas indexadas, estudios empíricos o revisiones que abordaran aplicaciones prácticas de TI (IA, ML, IoT, BC, RPA) en la GCS empresarial y Publicaciones con acceso a texto completo, respecto a la exclusión en la

búsqueda fueron artículos duplicados, trabajos que se limitaran a marcos teóricos sin aplicación en GCS, publicaciones en congresos sin revisión por pares o de carácter meramente descriptivo, tras eliminar duplicados y estudios irrelevantes, el número final de artículos analizados fue de 53, continuación se presenta el diagrama de flujo PRISMA.

**Figura 1**

*Diagrama de flujo PRISMA*




La figura1 muestra el proceso sistemático seguido para la identificación, filtro, elegibilidad e inclusión de los artículos considerados en el proceso de revisión. En la fase de identificación se encontraron 179 registros en la base de datos ScienceDirect. Seguidamente, se eliminaron 32 duplicados, quedando 147 estudios para el filtro. De ellos, 94 fueron excluidos por no cumplir los criterios de inclusión. Entre los excluidos se especifican dos causas frecuentes: falta de acceso a texto completo (n=15) y publicaciones no académicas (n=12), en la fase de elegibilidad, se evaluaron 53 artículos con texto completo y que cumplían los criterios definidos, constituyendo el número final de estudios incluidos (n=53) en el análisis.

## RESULTADOS

La creciente competencia empresarial, sumada a la recesión económica global producto de la pandemia, ha establecido nuevas reglas en el mercado donde la adaptabilidad a entornos dinámicos se convierte en un factor esencial para sostener la competitividad. En ese sentido, las Tecnologías de la Información (TI) a través de la Industria 4.0 (IR4.0), permite la automatización de la gestión de la cadena de suministro (GCS) en el ámbito empresarial, en ese sentido se presenta una tabla describiendo la tecnología, el ámbito de aplicación y beneficios.

**Tabla 1**

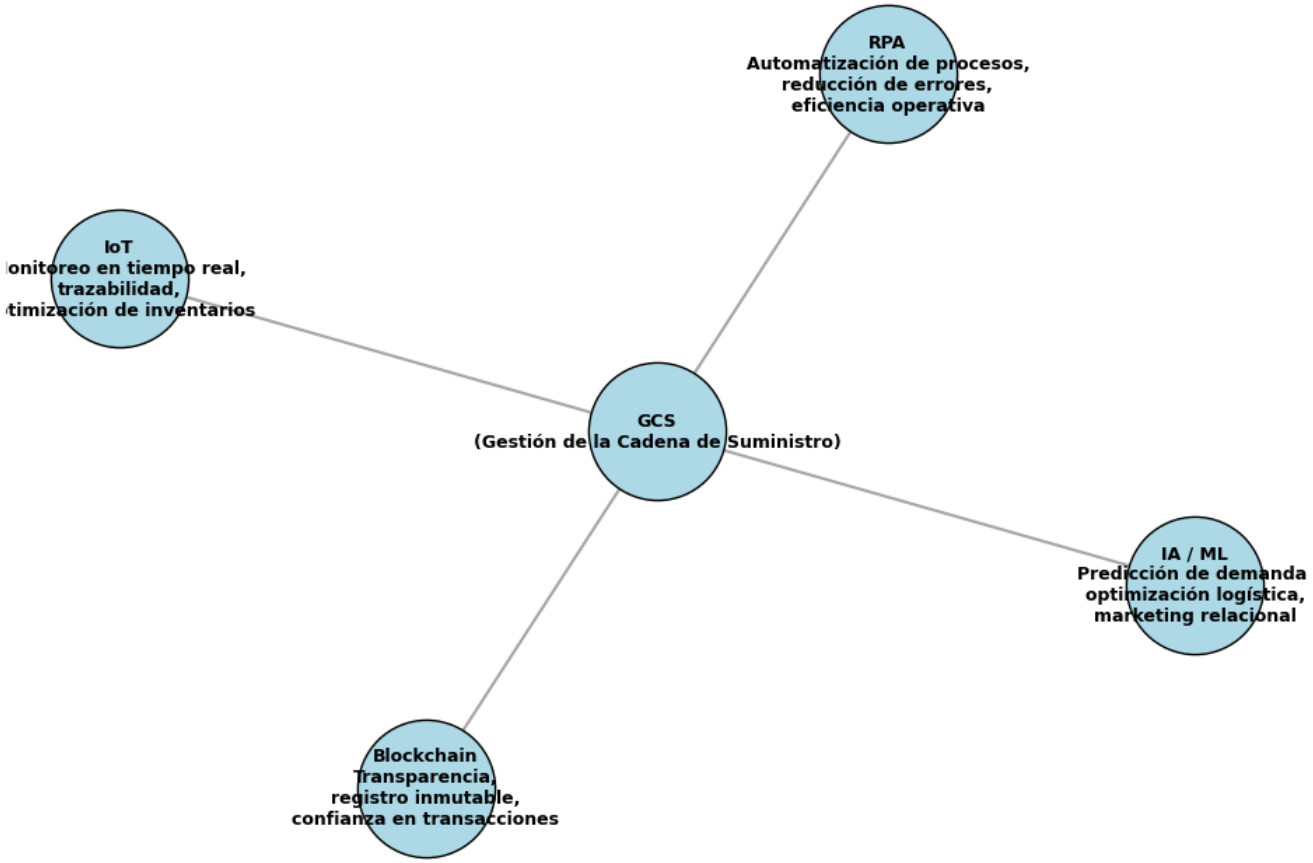
*Tecnologías de la Información aplicadas en la Gestión de la Cadena de Suministro (GCS).*

| Tecnología | Ámbito de aplicación | Beneficios principales | Referencias |
|---|---|---|---|
| IA / ML | Logística, inventarios, transporte, finanzas, marketing | Automatización en tiempo real; predicción de demanda; rutas óptimas; análisis de grandes volúmenes de datos; fidelización de clientes | (Balan et al., 2025; Guida et al., 2025; S. K. Roy et al., 2025) |
| IoT | Inventarios, monitoreo de la demanda | Gestión inteligente de inventarios; reducción de retrasos; monitoreo en tiempo real | (Jin & Karki, 2025) |
| Blockchain (BC) | Comercio electrónico, trazabilidad | Registro descentralizado, inmutable y transparente; confianza en transacciones; trazabilidad de productos | (Zhu, 2025) |
| IoT + BC (sinergia) | Logística e inventarios | Minimización de retrasos; monitoreo de demanda; visibilidad completa | (Jin & Karki, 2025) (Zhu, 2025) |
| RPA | Procesos administrativos y logísticos | Digitalización de procesos; reducción de errores; mayor eficiencia en pedidos | (Shamsuzzoha & Pelkonen, 2025) |

La Tabla 1 muestra el resumen de las principales TI aplicadas en la gestión de la cadena de suministro, la **IA/ML** destaca por su capacidad de predicción de la demanda, optimización logística y fidelización de clientes. El **IoT** facilita el monitoreo en tiempo real y la gestión inteligente de inventarios, mientras que el **blockchain (BC)** asegura transparencia, trazabilidad y confianza en transacciones, la combinación **IoT + BC** potencia la visibilidad de los procesos logísticos y el control de inventarios, en conjunto, estas tecnologías fortalecen la eficiencia, la resiliencia y la competitividad empresarial.

**Figura 2**

*Sinergia de Tecnologías de la Información en la GCS.*




La Figura 2 muestra la gestión de la cadena de suministro (GCS) donde se apoya en tecnologías disruptivas de la Industria 4.0. La IA/ML facilita la predicción de la demanda y la optimización logística, mientras el IoT aporta el control y monitoreo en tiempo real y trazabilidad. El Blockchain refuerza la transparencia y la confianza mediante registros inmutables, y la RPA automatiza procesos permitiendo la reducción de tiempo, en conjunto, estas tecnologías fortalecen la eficiencia, resiliencia y competitividad empresarial.

## DISCUSIÓN

Los antecedentes recientes muestran un cambio constante en el sector empresarial hacia la digitalización y la automatización de procesos en la cadena de suministro (CS), en donde las capacidades tecnológicas se encuentran en constante mejoramiento. Desde este contexto, la implementación de tecnologías aisladas ya no es suficiente; diversos autores destacan que la integración y centralización de la información con ayuda de herramientas tecnológicas como la inteligencia artificial (IA), blockchain (BC), internet de las cosas (IoT) y big data (BD) permite maximizar los resultados y fortalecer la resiliencia empresarial (Jin & Karki, 2025; Zhu, 2025).

Un aspecto relevante de discusión gira en torno al paradigma cultural sobre remplazar el trabajo de las personas por la IA, en ese sentido la evidencia científica demuestra que la IA no está diseñada para reemplazar al trabajador, sino para mejorar sus capacidades, es así que la IA se centra en el procesamiento

de datos, la gestión de información y la automatización de procesos operativos, mientras que el ser humano conserva un rol crítico y el análisis estratégico, la supervisión y la interpretación de los datos e información (Balan et al., 2025; Guida et al., 2025; Shamsuzzoha & Pelkonen, 2025).

Pero de acuerdo a los avances significativos en la implementación de estas tecnologías aún se identifican vacíos de investigación y diferencias contextuales en su implementación. En países con economías y tecnologías sobresalientes, el proceso de automatización de la CS se ha consolidado gracias a una infraestructura tecnológica robusta, inversiones planificadas y sostenibles en la innovación y capital humano altamente capacitado. En contraste con economías en desarrollo, especialmente en las pequeñas y medianas empresas (PYMES), las TI enfrentan barreras contextuales y estructurales, destacando la poca infraestructura tecnológica, escasez de competencias digitales y la resistencia cultural al cambio organizacional, factores que dificultan la adopción plena de estas tecnologías (Alnoor et al., 2025; Awasthy et al., 2025; Elhusseiny & Crispim, 2022; Mao, 2025; W. Roy et al., 2023; Rumson & Hallett, 2019).

A pesar de estas limitaciones, el impacto de las TI en la CS resulta cuantificable, significativo y eficiente. Los estudios muestran beneficios como la reducción en los tiempos de procesamiento de grandes volúmenes de información (MVI), la predicción más precisa de la demanda y de segmentos de mercado específicos, el aumento de la capacidad de adaptación organizacional, así como una mayor satisfacción, desarrollo y fidelización de los clientes (Roy et al., 2025). En este sentido, el éxito de estas tecnologías depende de una gestión estratégica de los datos, una integración tecnológica efectiva y la superación de barreras culturales y estructurales.

## CONCLUSIONES

El uso de las tecnologías de información (TI) vienen posicionándose como herramientas claves en la gestión de la cadena de suministro, sobresaliendo las IA,IoT,ML,BC y RPA, que si trabajan de forma integrada potencian la eficiencia operacional y la resiliencia empresarial, las investigaciones demuestran que la IA, fortalece las capacidades críticas en el procesamiento de grandes volumen de datos e información obteniendo insumos para las decisiones estratégicas (Benchis et al., 2025). Sin embargo, la implementación de estas tecnologías enfrenta barreras significativas en países en proceso de desarrollo, entre ellas altos costos, la falta de infraestructura y la resistencia cultural (Ghobakhloo et al., 2023; Govindarajan et al., 2025). A esto se suman dependencia tecnológica y riesgos de ciberseguridad, aunque las investigaciones destacan que los beneficios superan los desafíos y que las medidas de mitigación evolucionan al mismo ritmo que las innovaciones (Delgado-von-Eitzen et al., 2026).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, S. F., Alam, Md. S. B., Hoque, M., Lameesa, A., Afrin, S., Farah, T., Kabir, M., Shafiullah, G., & Muyeen, S. M. (2023). Industrial Internet of Things enabled technologies, challenges, and future directions. *Computers and Electrical Engineering*, *110*, 108847. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108847

Ahn, E., & Kang, H. (2018). Introduction to systematic review and meta-analysis. *Korean Journal of Anesthesiology*, *71*(2), 103-112. https://doi.org/10.4097/kjae.2018.71.2.103

Alnoor, A., Abbas, S., Sadaa, A. M., Chew, X., & Bayram, G. E. (2025). Navigating the power of blockchain strategy: Analysis of technology-organization-environment (TOE) framework and innovation resistance theory using PLS-SEM and ANN insights. *Technological Forecasting and Social Change*, *214*, 124044. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124044

Awasthy, P., Haldar, T., & Ghosh, D. (2025). Blockchain enabled traceability—An analysis of pricing and traceability effort decisions in supply chains. *European Journal of Operational Research*, *321*(3), 760-774. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.019

Balan, G. S., Kumar, V. S., & Raj, S. A. (2025). Machine learning and artificial intelligence methods and applications for post-crisis supply chain resiliency and recovery. *Supply Chain Analytics*, *10*, 100121. https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100121

Benchis, M. P., Shahzad, K., & Dan, S. (2025). Comparative analysis of blockchain adoption in the public and private sectors. A technology-organization-environment (TOE) framework approach. *Journal of Innovation & Knowledge*, *10*(4), 100746. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100746

Bhat, S. A., & Aljuneidi, T. (2025). Viable intertwined supply network: Modelling and dynamic analysis using artificial neural networks. *Applied Soft Computing*, *168*, 112503. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112503

Cuesta-Valiño, P., Kazakov, S., Durán-Álamo, P., & Gutiérrez-Rodríguez, P. (2025). The role of AI as an unconventional salesperson in consumer buying decisions, satisfaction and happiness. *European Research on Management and Business Economics*, *31*(2), 100278. https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2025.100278

Delgado-von-Eitzen, C., Fernández-Iglesias, M. J., Anido-Rifón, L., & Mikic-Fonte, F. A. (2026). Blockchain beyond immutability: Application firewalls on ethereum-based platforms. *Computer Standards & Interfaces*, *95*, 104038. https://doi.org/10.1016/j.csi.2025.104038

Elhusseiny, H. M., & Crispim, J. (2022). SMEs, Barriers and Opportunities on adopting Industry 4.0: A Review. *Procedia Computer Science*, *196*, 864-871. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.086

Escandon-Barbosa, D., & Salas-Paramo, J. (2025). Driving success: Leveraging strategic decision-making and digital technology for sustainable performance. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, *11*(2), 100536. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100536

Ghobakhloo, M., Asadi, S., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Mubarak, M. F., & Yadegaridehkordi, E. (2023). Intelligent automation implementation and corporate sustainability performance: The enabling role of corporate social responsibility strategy. *Technology in Society*, *74*, 102301. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102301

Govindarajan, U. H., Narang, G., Singh, D. K., & Yadav, V. S. (2025). Blockchain technologies adoption in healthcare: Overcoming barriers amid the hype cycle to enhance patient care. *Technological Forecasting and Social Change*, *213*, 124031. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124031

Guida, M., Caniato, F., & Moretto, A. (2025). AI meets spend classification: A new frontier in information processing. *Journal of Purchasing and Supply Management*, *31*(3), 100993. https://doi.org/10.1016/j.pursup.2025.100993

Jin, S., & Karki, B. (2025). Integrating IoT and blockchain for intelligent inventory management in supply chains: A multi-objective optimization approach for the insurance industry. *Journal of Engineering Research*, *13*(2), 527-537. https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.04.021

Joshi, R., Kumari, S., & Pandey, K. (2025). Chapter 26 - Rise of blockchain based digital twin: A transformative tool for new research trends. En S. Iyer, A. Nayyar, A. Paul, & M. Naved (Eds.), *Digital Twins for Smart Cities and Villages* (pp. 601-630). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28884-5.00026-9

Lehner, C., Padovano, A., Zehetner, C., & Hackenberg, G. (2024). Digital twin and digital thread within the product lifecycle management. *Procedia Computer Science*, *232*, 2875-2886. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.104

Mao, H. (2025). The Optimization Strategy and Application Practice of Business Management Supply Chain Based on Artificial Intelligence Technology. *Procedia Computer Science*, *261*, 707-715. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.324

Moshood, T. D., Rotimi, J. OB., Shahzad, W., & Bamgbade, J. A. (2024). Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry. *Technology in Society*, *77*, 102519. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102519

Nevi, G., Pizzichini, L., Bastone, A., & Dezi, L. (2025). Adoption of AI by micro and small health enterprises: Effects of entrepreneurial orientation on the TOE model. *European Journal of Innovation Management*, *28*(11), 209-241. https://doi.org/10.1108/EJIM-07-2024-0770

Pang, S., Teng, S. W., Murshed, M., Bui, C. V., Karmakar, P., Li, Y., & Lin, H. (2024). A survey on evaluation of blockchain-based agricultural traceability. *Computers and Electronics in Agriculture*, *227*, 109548. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109548

Rahman Mahin, Md. P., Shahriar, M., Das, R. R., Roy, A., & Reza, A. W. (2025). Enhancing Sustainable Supply Chain Forecasting Using Machine Learning for Sales Prediction. *Procedia Computer Science*, *252*, 470-479. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.006

Roy, S. K., Tehrani, A. N., Pandit, A., Apostolidis, C., & Ray, S. (2025). AI-capable relationship marketing: Shaping the future of customer relationships. *Journal of Business Research*, *192*, 115309. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2025.115309

Roy, W., Hans, B., Jannat, R. U., Reddy, Y. K., Hadi, Y., & Gayam, S. (2023). Tele-visits for GERD: "Ecofriendly, efficient and effective". *Journal of Gastroenterology and Hepatology (Australia)*, *38*(6), 905-909. Scopus. https://doi.org/10.1111/jgh.16148

Rumson, A. G., & Hallett, S. H. (2019). Innovations in the use of data facilitating insurance as a resilience mechanism for coastal flood risk. *Science of The Total Environment*, *661*, 598-612. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.114

Shamsuzzoha, A., & Pelkonen, S. (2025). A robotic process automation model for order-handling optimization in supply chain management. *Supply Chain Analytics*, *9*, 100102. https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100102

Sharifmousavi, M., Kayvanfar, V., & Baldacci, R. (2024). Distributed Artificial Intelligence Application in Agri-food Supply Chains 4.0. *Procedia Computer Science*, *232*, 211-220. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.021

Sharma, D. K., Bhargava, S., & Singhal, K. (2020). Chapter 6—Internet of Things applications in the pharmaceutical industry. En V. E. Balas, V. K. Solanki, & R. Kumar (Eds.), *An Industrial IoT Approach for Pharmaceutical Industry Growth* (pp. 153-190). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821326-1.00006-1

Su, Y.-S., Wang, J., Tu, S.-H., Liao, K.-T., & Lin, C.-L. (2025). Detecting latent topics and trends in IoT and e-commerce using BERTopic modeling. *Internet of Things*, *32*, 101604. https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101604

Valami, Z. H., & Ahmadifar, H. (2025). A low cost blockchain-based model for detecting of counterfeiting container in the road transport system. *Research in Transportation Business & Management*, *60*, 101329. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101329

Zhu, H. (2025). E-Commerce Big Data Logistics Supply Chain Control System Based on Artificial Intelligence and Blockchain. *Procedia Computer Science*, *259*, 923-930. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.045

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 91 al 103
DOI: https://doi.org/10.37787/t0wzg155

Revista Científica PAKAMUROS
E-ISSN: 2522-3240
ISSN: 2306-6806

**ARTÍCULO DE REVISIÓN**

# Evaluación del daño y recuperación de la capacidad portante del concreto tras la exposición al fuego

# Damage assessment and recovery of concrete bearing capacity after fire exposure

Kleiner Saucedo[1]*, Donny Vásquez[1], Zadith Garrido[1]

## RESUMEN

El presente artículo realiza un análisis comparativo de diversas investigaciones enfocadas en el desempeño del concreto frente a elevadas temperaturas, considerando particularmente la degradación y posible recuperación de su capacidad estructural tras un incendio. Se examinan estudios que abordan variables como el tipo de concreto utilizado, la incorporación de fibras metálicas o sintéticas, la adición de materiales puzolánicos, los métodos de enfriamiento aplicados y las técnicas de diagnóstico post-fuego. Los hallazgos revisados indican que el uso de fibras de acero o vidrio puede contribuir a mejorar la estabilidad térmica del concreto, aunque su efectividad depende del tipo de mezcla y de las condiciones térmicas alcanzadas. Del mismo modo, la incorporación de ceniza volante ha mostrado efectos positivos en la resistencia residual del concreto autocompactante. Se incluyen tanto enfoques experimentales como modelaciones teóricas que permiten evaluar daños térmicos y fenómenos como el desprendimiento explosivo (spalling). Esta revisión permite identificar patrones recurrentes, contradicciones metodológicas y vacíos de conocimiento, subrayando la necesidad de criterios unificados para la evaluación estructural post-incendio. En conjunto, se resalta el valor de integrar estos conocimientos en el diseño y recuperación de estructuras afectadas por el fuego.

**Palabras clave:** *concreto, fuego, resistencia, spalling, capacidad portante*.

## ABSTRACT

This article presents a comparative analysis of various studies focused on concrete performance at high temperatures, particularly considering the degradation and possible recovery of its structural capacity after a fire. Studies are examined that address variables such as the type of concrete used, the incorporation of metallic or synthetic fibers, the addition of pozzolanic materials, the cooling methods applied, and post-fire diagnostic techniques. The reviewed findings indicate that the use of steel or glass fibers can contribute to improving the thermal stability of concrete, although their effectiveness depends on the type of mix and the thermal conditions achieved. Similarly, the incorporation of fly ash has shown positive effects on the residual strength of self-compacting concrete. Both experimental approaches and theoretical models are included, allowing for the assessment of thermal damage and phenomena such as spalling. This review identifies recurring patterns, methodological contradictions, and knowledge gaps, highlighting the need for unified criteria for post-fire structural assessment. Overall, the value of integrating this knowledge into the design and recovery of fire-damaged structures is highlighted.

**Keywords:** concrete, fire, strength, spalling, load-bearing capacity.

* Autor para correspondencia

[1] Universidad Nacional de Jaén. Email: kleiner.saucedo@est.unj.edu.pe, donny.vasquez. @est.unj.edu.pe, zadith.garrido@unj.edu.pe

## INTRODUCCIÓN

El concreto, un material fundamental en la construcción moderna, valorado por su resistencia inherente al fuego; sin embargo, su exposición a altas temperaturas durante incendios induce cambios físicos, químicos y microestructurales que comprometen su capacidad portante y la seguridad estructural de las edificaciones (Kodur, 2014; Aguirre & Aguirre, 2018). Fenómenos como la pérdida de resistencia, el agrietamiento, el desprendimiento explosivo (spalling) y las alteraciones en la matriz cementicia afectan su funcionalidad, lo que resalta la necesidad de evaluar el daño térmico y desarrollar estrategias efectivas de rehabilitación (Silva, 2025; Jansson, 2013). La investigación reciente ha abordado el comportamiento de diversos tipos de concreto bajo condiciones de incendio, incluyendo el concreto armado tradicional, autocompactante (SCC), de alta resistencia (HPC), de ultra-alta resistencia (UHPC), liviano y mampostería, considerando variables como el tipo de material, aditivos, fibras, duración del fuego, métodos de enfriamiento y técnicas de evaluación post-incendio (Aboud et al., 2024; Heiza, 2012; Durmaz, 2025; Estevan et al., 2024).

Estudios experimentales han demostrado que la incorporación de aditivos como ceniza volante, humo de sílice o nanosílice, y fibras (de acero, vidrio o poliméricas) mejora la resistencia térmica y la capacidad residual del concreto hasta ciertos rangos de temperatura, aunque la degradación es significativa a temperaturas superiores a 700-1000°C (Abdelrahim et al., 2021; Kessel et al., 2023). Por ejemplo, el SCC con fibras de vidrio muestra un mejor desempeño hasta 700°C (Aboud et al., 2024), mientras que el UHPC retiene propiedades hasta 600°C (Estevan et al., 2024). Asimismo, investigaciones como las de Oliveira et al. (2021) y Qiao et al. (2022) destacan la importancia de la distribución térmica y el modelado del spalling para predecir el daño. Por su parte, los métodos desarrollados por Alonso y Flor-Laguna (2013), para determinar la profundidad del daño térmico han proporcionado herramientas esenciales para el diagnóstico y la toma de decisiones en la rehabilitación de estructuras.

Esta revisión literaria sintetiza los avances en la evaluación del daño por fuego y la recuperación de la capacidad portante del concreto, integrando enfoques experimentales, numéricos y teóricos. Se analizan los patrones clave en el comportamiento de distintos tipos de concreto, el impacto de aditivos y fibras, los efectos de los métodos de enfriamiento y las estrategias de restauración propuest as (Cuyán et al., 2021 ; Kiran et al., 2018). Con ello, se busca contribuir al diseño de estructuras más resilientes al fuego, optimizar las técnicas de rehabilitación y abordar las brechas en la literatura actual para garantizar la seguridad y durabilidad de las edificaciones afectadas por incendios. En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión comparativa de investigaciones recientes sobre el desempeño del concreto expuesto al fuego, enfocándose en la degradación térmica, la pérdida de capacidad portante y las estrategias de recuperación estructural.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión sistemática de estudios publicados entre 2012 y 2024, obtenidos de bases de datos como Scopus, Scielo y ScienceDirect, enfocada en evaluar el impacto de altas temperaturas en la resistencia de diversos tipos de concreto (convencional, liviano, reforzado, autocompactante, reciclado y de ultra alto desempeño). Se priorizaron investigaciones con enfoques experimentales, modelos teóricos y análisis estructurales post-incendio, considerando el tipo de concreto, temperatura máxima, métodos de enfriamiento, incorporación de fibras o aditivos y técnicas de evaluación del daño. Las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, tracción, flexión, módulo de elasticidad), térmicas (spalling, transferencia de calor) y microestructurales (fisuras, porosidad, descomposición química) se analizaron mediante ensayos de compresión (ASTM C39), tracción por compresión (ASTM C496), flexión (ASTM C78), módulo de elasticidad (ASTM C469), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopia infrarroja (FTIR), difracción de rayos X (DRX), porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) y modelado con elementos finitos (ANSYS, Abaqus). El análisis estadístico empleó ANOVA y pruebas de Tukey.

La evaluación experimental incluyó el diseño de concretos con materiales locales, utilizando cemento Portland tipo I (resistencia a compresión: 306-433 kg/cm²) y relaciones agua/cemento de 0.40-0.50, optimizadas con superplastificantes (0.5-0.8% en peso) (Qiao et al., 2022; Alonso & Laguna, 2013). Se emplearon agregados como arena silícea (tamaño máximo 4-5 mm, densidad 2620-2650 kg/m³), gravas basálticas o calizas (tamaño máximo 12-20 mm, densidad 2680-2700 kg/m³), arcilla expandida (LECA, densidad ~1100 kg/m³) y pumita (~900 kg/m³) para concretos livianos (Kuehnen et al., 2022; Kang & Weibin, 2018). Se incorporaron aditivos como nanosílice (1-3% en peso, diámetro 15 nm, pureza >99.8% $SiO_2$) y PET reciclado (5-15% en volumen, tamaño 2-10 mm, densidad 1380 kg/m³), así como fibras de acero, polipropileno, vidrio o híbridas (basalto-aramida) en proporciones de 0.5-2% (Aboud et al., 2024; Dyson & Shankar, 2024). El refuerzo estructural se realizó con barras de acero (límite elástico: 4200 kg/cm²) y láminas CFRP (Alzamili et al., 2023). Los especímenes (cubos de 100-150 mm, cilindros de 100×200 mm o 150×300 mm, prismas de 100×100×400 mm, vigas de 200×300 mm) se fabricaron según ASTM C192 (ASTM International, 2019), con nanosílice dispersada mediante ultrasonificación durante 1800 s (Liu et al., 2024). El curado se realizó durante 28 días en agua (20-23 °C) o cámaras con 95% de humedad relativa (20 °C).

Los ensayos evaluaron el comportamiento bajo temperaturas de 200-1300 °C, con métodos de enfriamiento natural, acelerado o con agua, analizando spalling, resistencia y deformaciones en cámaras térmicas (Jansson, 2013; Oliveira et al., 2021; Vitorino et al., 2024). Se realizaron pruebas de compresión, tracción, flexión (incluyendo flexión a cuatro puntos durante exposición al fuego, Kodur, 2014), módulo de elasticidad y pérdida de masa, con tres repeticiones por condición. Las variables incluyeron tipo de agregado (LECA, pumita, grava), aditivos (nanosílice, PET, ceniza volante) y temperatura. Los análisis microestructurales emplearon SEM, TGA, FTIR, DRX y MIP para evaluar fisuras, descomposición química y porosidad (ASTM International, 2020; Ning et al., 2022). El modelado numérico se realizó con ANSYS (leyes constitutivas no lineales, Kodur, 2014) y gemelos digitales en Python (Liu et al., 2024). Estrategias como el uso de fibras híbridas y materiales reciclados (GGBS, agregado reciclado 20-60%) se evaluaron experimentalmente (Saqib et al., 2025; Nazri et al., 2017).

**Tabla 1**

*Cuadro de resumen de los métodos y muestras analizadas*

| **Tipo de Hormigón** | **Autor(es) y Año** | **Materiales y Aditivos** | **Rango de Temperatura (°C)** | **Métodos de Ensayo** | **Propiedades Evaluadas** | **Aplicación Principal** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Convencional | Qiao et al (2022) | Agente expansivo (8%), ceniza volante, aditivo químico | 800, 1000 (40 °C/min, 30 min) | Enfriamiento natural | Spalling | Estructuras |
| | Alonso & Flor-Laguna, (2013) | Cemento Portland | 300, 500 | Enfriamiento natural | Resistencia | Estructuras |
| | Jansson (2013) | Cemento Portland | 200 - 600 | Enfriamiento natural | Resistencia,Spalling | Estructuras |
| | Kiran et al (2018) | Cemento Portland | 600, 800 | Enfriamiento natural, agua, estado caliente | Resistencia, análisis térmico | Estructuras |
| | Oliveira et al. (2021) | Ceniza volante (10–20%) | 200–600 | Enfriamiento acelerado | Resistencia, Spalling | Estructuras |
| | Pasztetnik & Wróblewski (2021) | Cemento Portland | 600 | Enfriamiento natural | Resistenci | Estructuras |
| | Wróblewska & Kowalski (2020) | Cemento Portland | 400, 600 | Enfriamiento natural | Resistencia | Estructuras |
| | Noman et al. (2022) | Epóxido y acero | 400, 800 | Enfriamiento con agua, epóxido | Resistencia | Estructuras |
| **Tipo de concreto** | **Autor(es) y Año** | **Materiales y Aditivos** | **Rango de Temperatura (°C)** | **Métodos de Ensayo** | **Propiedades Evaluadas** | **Aplicación Principal** |
| Convencional | Kang & Li, (2018) | Sustitución de agregado 0–100 % | Hasta 800 (curva ISO 834) | Enfriamiento natural | Resistencia, deformación | Estructuras generales |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Kuehnen et al. (2022) | Agregado reciclado (20–30%) | 200–500 | Enfriamiento posterior al fuego | Resistencia | Estructuras |
| UHPC (Concreto de ultra alto desempeño) | Van der Merwe, (2023) | Cemento HS y HSC | No especificado | Enfriamiento posterior al fuego | Spalling explosivo, permeabilidad | Estructuras |
| | Kaura et al., (2023) | Fibras híbridas simples | No especificado | Enfriamiento natural | Resistencia térmica | Construcción avanzada |
| | Mehran et al., (2023) | fibras híbridas | No específico | Enfriamiento natural | Resistencia ,spalling | Pavimentos y estructuras |
| | (Kang & Wei, 2018) | fibras individuales e híbridas | 400–600 | Enfriamiento natural | Spalling, Resistencia, microestructura | Pavimento |
| Reforzado | Elif et al., (2025) | Fibras de polipropileno, poliamida y vidrio | 300–600 | Ensayos térmicos, enfriamiento natural | Resistencia térmica superficial | Estructuras |
| | Saqib et al., (2025) | Agregado reciclado, fibras metálicas, fibras poliméricas | 300–600 | Ensayos térmicos y mecánicos | Resistencia, sostenibilidad | Estructuras |
| | Dyson & Shankar, (2024) | Fibras de basalto y aramida combinadas | 250 - 500 | Ensayos compresión y tracción dividida | Resistencia a compresión y tracción dividida | Estructuras |
| | Alzamili et al., (2023) | Láminas CFRP, fibras de acero, 2% vol. | 200, 500 | Simulación numérica, ensayos mecánicos | Resistencia | Estructuras |
| | Nazri et al., (2017) | UHPC con fibras múltiples | 200 – 400 – 600 | Ensayos térmicos y mecánicos | Spalling, resistencia post-incendio | Estructuras |
| | Minh et al., (2023) | GGBS 20–60 % más agregado reciclado | 200–800 | Compresión, tracción, módulo | Resistencia, módulo elástico | Elementos sostenibles |
| Autocompactante (SCC) | Aboud et al. (2024) | Fibras de vidrio (0.5-1%) | 200–700 | enfriamiento natural, acelerado | Resistencia, Spalling | Estructuras |
| | Ning et al., (2022) | Fibras de acero y polipropileno | 200–1000 | Compresión, flexión, pérdida de masa | Spalling, resistencia residual | Estructuras |
| | Heiza (2012) | Ceniza volante (10–20%) | 200 - 700 | Enfriamiento acelerado | Resistencia | Estructuras |
| | (Gebre et al., 2024) | Fibras de vidrio | 200–700 | Enfriamiento acelerado | Resistencia, Spalling | Estructuras |
| **Tipo de concreto** | **Autor(es) y Año** | **Materiales y Aditivos** | **Rango de Temperatura (°C)** | **Métodos de Ensayo** | **Propiedades Evaluadas** | **Aplicación Principal** |
| Armado | Yamanaka & otros (2024) | Cemento Portland | 600 - 1300 | Enfriamiento natural | Propiedades térmicas | Estructuras |
| | Yağan y otros (2024) | Cemento Portland | 200–800 | Enfriamiento natural | Resistencia | Vigas |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Armado | Aguirre & Aguirre (2018) | Cemento Portland | 400, 800 | Enfriamiento natural / acelerado | Resistencia | Vigas, |
| Compactado | Ünverdi et al. (2025) | Fibras de acero , polipropileno | 25, 300, 600, 900 | Enfriamiento natural | Spalling, Resistencia | Pavimentos |
| Silíceos | Vitorino et al. (2024**)** | Agregados silíceos | 942.5 (exposición a curva ISO 834; por 1 hora) | Enfriamiento natural | Resistencia | Estructuras |
| Polvo reactivo (RPC) | Abdelrahim et al., (2021) | Fibras de acero (1–2%) | 200 - 800 | Enfriamiento natural | Resistencia | Estructuras |

## RESULTADOS

Los estudios revisados muestran que la exposición del concreto a altas temperaturas (600–850 °C) puede reducir su resistencia a compresión entre 20 % y 70 %, dependiendo de la composición de la mezcla y los aditivos incorporados. Diversas investigaciones evidencian que la inclusión de fibras metálicas o de vidrio atenúa la pérdida de resistencia en 10–25 %, mientras que la adición de ceniza volante puede incrementar la resistencia residual hasta 15 % en concreto autocompactante. Asimismo, los métodos de enfriamiento post-incendio influyen en la absorción de agua, con incrementos de 3–8 %, reflejando un aumento de la porosidad y el riesgo de desprendimiento explosivo (spalling). En conjunto, estos hallazgos indican que un enfoque integral considerando la composición del concreto, los refuerzos y las estrategias de enfriamiento es esencial para optimizar la recuperación estructural.

### Degradación de Propiedades Mecánicas

### Resistencia a Compresión

Diversas investigaciones realizadas han documentado que la exposición a altas temperaturas provoca una reducción significativa en la resistencia a compresión del concreto, influenciada por la temperatura alcanzada, tiempo de exposición, el tipo de concreto y los materiales incorporados. Kodur (2014) determinó que el concreto convencional disminuye entre el 20-50% de su resistencia a compresión a temperaturas superiores a 400°C, debido a la deshidratación de los hidratos de cemento y la formación de microfisuras. En contraste, Abdelrahim et al. (2021) el concreto de polvo reactivo (RPC) con fibras de acero (1 - 2%) muestra una disminución del 10- 30% de la resistencia a 600 °C, atribuido a su impermeabilidad, su matriz compacta y baja porosidad. Así mismo Minh et al. (2023) examinaron concretos con agregados reciclados y escoria de alto horno granulada molida (GGBS, 20-60%) reduce la pérdida de resistencia a compresión a 15-25% a 800°C, en comparación con el 40-60% en concretos convencionales.

**Resistencia a Flexión**

La exposición al fuego afecta gravemente la resistencia a la flexión de elementos estructurales como vigas de concreto armado. Aguirre y Aguirre (2018) reportaron una reducción del 30-50% en la resistencia a flexión de vigas expuestas a 600°C tras 60 minutos de exposición, mientras que Yağan et al. (2024), observan pérdidas de hasta el 60% a 800°C en vigas armadas, asociadas a daños microestructurales severos. Alzamili et al. (2023) encontraron que el concreto reforzado con láminas de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) retiene hasta un 70% de su capacidad de flexión a 500°C, debido a la capacidad de las fibras para redistribuir las tensiones. Asimismo, Ünverdi et al. (2025) reportaron que el concreto compactado con fibras de acero limita las pérdidas de resistencia a flexión a un 20-35% a 600°C, al mitigar la propagación de fisuras.

**Resistencia a Tracción**

La resistencia a tracción es altamente sensible a las altas temperaturas, con pérdidas significativas debido a microfisuras y descomposición química. Silva et al. (2025) reportaron una disminución del 40-60% a 700°C en concreto convencional, atribuida a la formación de microfisuras y la descomposición química de la matriz cementicia, mientras que Aboud et al. (2024) y Gebre et al. (2024) investigaron que el concreto autocompactante (SCC) con fibras de vidrio (0.5-1%) exhibe una reducción de solo 20-30% a 700°C. Dyson y Shankar (2024) destacaron que las fibras híbridas (basalto-aramida) permiten retener hasta un 80% de la resistencia a tracción a 500°C, Nazri et al. (2017) confirmó que el UHPC con fibras múltiples reduce las pérdidas a un 15-25% a 600°C.

**Módulo de Elasticidad**

El módulo de elasticidad del concreto se reduce drásticamente con el aumento de la temperatura, afectando la rigidez estructural. Cuyán et al. (2021) obtuvieron una pérdida del 60-70% a 600°C en concreto convencional, mientras que el UHPC retiene aproximadamente el 50% de su módulo de elasticidad a 700°C debido a su microestructura densa (Estevan et al., 2024). Durmaz (2025) determinó que la incorporación de fibras de acero y aditivos como sílice mejora la retención, con pérdidas de 30-40% a 800°C incluso bajo condiciones extremas como radiación gamma. Asi mismo Minh et al. (2023) identificó que el uso de GGBS en concreto con agregados reciclados limita la reducción del módulo de elasticidad a un 25-35% a 800°C.

### Fenómeno de Spalling

El *spalling* es un fenómeno crítico en concretos densos, especialmente en UHPC y HPC, debido a la acumulación de presión de vapor en la matriz. Qiao et al. (2022) y Jansson (2013) determinaron que el *spalling* ocurre principalmente entre 200-600°C, siendo más severo en concretos de alta resistencia (HPC) y UHP, debido a su baja permeabilidad. La incorporación de fibras de polipropileno, vidrio o híbridas reduce significativamente el *spalling* al facilitar la liberación de vapor (Ning et al., 2022; Elif et al., 2025; Saqib et al., 2025). Así mismo Van der Merwe (2023) destaca que el UHPC con fibras de acero muestra una reducción del *spalling* en un 40-50% a 600°C. Sin embargo, Oliveira et al. (2021) observó que el enfriamiento acelerado tras la exposición al fuego exacerba el *spalling* en un 15-20% debido a choques térmicos.

### Efecto de Aditivos y Fibras

La incorporación de aditivos y fibras como ceniza volante (10-20%), humo de sílice, o nanosílice (1-3%) mejora la resistencia térmica y la capacidad residual del concreto. Heiza (2012) y Kaura et al. (2023) determinaron que la ceniza volante en SCC incrementa la resistencia a compresión residual en un 10 - 15% a 700°C, al reducir la porosidad y mejorar la cohesión de la matriz. Las fibras de acero, vidrio, polipropileno o híbridas (basalto-aramida) mitigan el agrietamiento y el *spalling*, con mejoras de hasta un 30% en la resistencia a tracción y flexión (Dyson y Shankar, 2024; Aboud et al., 2024; Ünverdi et al., 2025). Sin embargo, la efectividad depende de la proporción (0.5-2%) y la distribución homogénea de las fibras, con resultados menos consistentes en concretos compactados a 900°C (Ünverdi et al., 2025).

### Estrategias de Recuperación de la Capacidad Portante

La restauración de la capacidad portante incluye técnicas como el refuerzo con CFRP, epóxidos, y morteros de reparación. Noman et al. (2022) determinaron que la aplicación de epóxidos y refuerzos de acero restaura hasta un 80% de la resistencia a compresión a 400°C, aunque la efectividad disminuye a 50% a 800°C. Alzamili et al. (2023) identificaron que las láminas CFRP incrementan la capacidad de flexión en un 60-70% en elementos dañados a 500°C. Saqib et al. (2025) propusieron morteros de reparación con agregados reciclados y fibras metálicas, logrando una recuperación del 70-85% de la resistencia a tracción a 600°C. Sin embargo, las estrategias de reparación son menos efectivas en concretos expuestos a temperaturas superiores a 800°C debido al daño microestructural irreversible (Mehran et al., 2023).

## DISCUSIÓN

Las investigaciones han demostrado que la exposición al fuego reduce significativamente las propiedades mecánicas del concreto de 55-85% a 600-1000°C, Abdelrahim et al. (2021) y Mehran et al. (2023) afirman que con el UHPC y SCC mejorados con nanosílice y fibras de acero o vidrio, generan una retención superior, conservando entre 60% y 90% de su resistencia a 600°C debido a su matriz densa y mayor cohesión térmica. En contraste, el PET reciclado agrava el daño por su fusión a temperaturas cercanas a 400°C (Albiajawi et al., 2024); el *spalling* es mitigado por fibras de vidrio y acero hasta 700°C (Aboud et al., 2024), pero persiste en concretos densos a 1000°C, el enfriamiento natural preserva mejor la resistencia que el enfriamiento con agua y facilita reparaciones con epóxidos (Noman et al., 2022), las técnicas de evaluación (SEM, TGA, FTIR, DRX, MIP) y modelado numérico (Kodur, 2014) ofrece diagnóstico preciso, pero requieren calibración para fuegos no normativos y estructuras mixtas, sugiriendo la necesidad de normativas unificadas para optimizar el diseño y rehabilitación de estructuras resilientes al fuego.

## CONCLUSIONES

En definitiva la revisión sistemática revela que la exposición al fuego reduce las propiedades mecánicas del concreto en un 55-85% a temperaturas de 600-1000°C, aunque los concretos de ultra-alto desempeño y autocompactantes, mejorados con nanosílice y fibras de acero o vidrio, conservan hasta un 60-90% de su resistencia a 600°C gracias a su matriz compacta y mayor cohesión térmica, mientras que el PET reciclado intensifica el daño por su fusión a bajas temperaturas; las fibras mitigan el desprendimiento explosivo hasta 700°C, pero no a 1000°C en concretos densos; el enfriamiento natural preserva mejor la capacidad portante frente al enfriamiento con agua, que facilita reparaciones con materiales compuestos; las técnicas de evaluación microestructural y el modelado numérico proporcionan diagnósticos precisos, pero requieren calibración para fuegos no normativos y estructuras mixtas, lo que subraya la necesidad de normativas unificadas para optimizar el diseño de estructuras resilientes al fuego y la rehabilitación con materiales compuestos y morteros reciclados, garantizando mayor seguridad y durabilidad en edificaciones afectadas por incendios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelrahim, M. A. A., Elthakeb, A., Mohamed, U., & Noaman, M. T. (2021). Behavior of Reactive Powder Concrete Beams Exposed to Fire. *Diyala Journal of Engineering Sciences, 14*(4), 1-12.

https://doi.org/10.24237/djes.2021.14401

Aboud, R. K., Awad, H. K., & Mohammed, S. D. (2024). Effect of Fire Exposure on the Properties of Self-Compacting Concrete reinforced by Glass Fibers. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *14*(2), 13369-13375. https://doi.org/10.48084/etasr.6924

Aguirre, M. E. U., & Aguirre, G. J. A. (2018). Efecto del tiempo de exposición al fuego en la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado. *Gaceta Técnica*, *19*(2), 7-18. https://www.redalyc.org/journal/5703/570360789001/html/b

Albiajawi, M. I., Wahppe Alkasawneh, R., Mostafa, S. A., Johari, I., Embong, R., & Muthusamy, K. (2024). Performance of sustainable concrete containing recycled latex gloves and silicone catheter under elevated temperature. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *36*(3), 186-198. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.11.008

Alonso, A. M. Cruz., & Flor-Laguna, L. V. (2013). Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio. *Redalyc*, *3*(1), Article 1. https://doi.org/10.21041/ra.v3i1.39

Alzamili, H. H., Хаким, А. Х., Elsheikh, A. M., & Мохамед, Э. А. (2023). Performance of reinforced concrete elements strengthened with carbon fiber CFRP at elevated temperatures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, *19*(5), 502-509. https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-502-509

Cuyán, A. E. B., Mio, J. L. M., & Muñoz, S. P. P. (2021). Comportamiento Térmico y Estructural del Concreto Expuesto a Altas Temperaturas: Una Revisión de la Thermal and Structural Behaviour of Concrete Exposed To High Temperatures: A Review of the Literature. *Investigatio*, *16*, 78-93. https://doi.org/10.31095/investigatio.2021.16.7

Durmaz, M. (2025). Synergistic Effects of Steel Fibers and Silica Fume on Concrete Exposed to High Temperatures and Gamma Radiation. *Buildings*, *15*(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/buildings15111830

Dyson, C., & Shankar, V. G. R. (2024). Fortifying flames: Boosting concrete fire resistance with hybrid fiber polymers. *Scielo*, *29*(03), 14. https://www.scielo.br/j/rmat/a/fNfF7rJNxcBRbC8H4m3TCFP/

Elif, H. B., Kaya, Y., Mardani, A., & Şenkal, F. S. (2025). Improving fire resistance of lightweight concrete facade elements by using fibers. *Springer*, *25*(70), 18. https://doi.org/10.1007/s43452-025-01133-6

Estevan, L., Torres, B., Baeza, F. J., Gattulli, V., & Ivorra, S. (2024). Enhancing fire resistance of masonry structures: The potential of ultra high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, *425*, 136088. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136088

Gebre, Y., Gebremariam, H., & Tarekegn, A. G. (2024). BEHAVIOR OF CONCRETE UNDER FIRE EXPOSURE. *European Journal of Materials Science and Engineering*, *9*(4), 281-294. https://doi.org/10.36868/ejmse.2024.09.04.281

Heiza, K. M. (2012). Performance of Self-Compacted Concrete Exposed to Fire or Aggressive Media. *Challenge Journal*, *3*(2), 406-425. https://www.challengejournal.com/index.php/cjcrl/article/view/147

Jansson, R. (2013). Fire spalling of concrete – A historical overview. *MATEC Web of Conferences*, *6*, 01001. https://doi.org/10.1051/matecconf/20130601001

Kang, M., & Wei, bin L. (2018). Effect of the Aggregate Size on Strength Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Wiley*, *2018*(1). https://doi.org/10.1155/2018/2428576

Kaura, P., Mohapatra, B., Ojha, P. N., Singh, B., Kumar, S., & Liju, V. (2023). Fresh, hardened and durability properties of concrete made with flyash and limestone based Portland composite cement. *Journal of Asian Concrete Federation*, *9*, 1-16. https://doi.org/10.18702/acf.2023.9.1.1

Kessel, O., Bennia, A., Bravo Hidalgo, D., Abderraouf Belkadi, A., Lyes Kamel Khouadjia, M. (2023). Investigación experimental del hormigón de alta resistencia sometido a altas temperaturas. *Revista ingeniería de construcción*, *38*(1), 114-126. https://doi.org/10.7764/ric.00056.21

Kiran, K. P., Chiranjeevi, R. R., & Chiranjeevi, R. (2018). (PDF) Strength Studies on Different Grades of Concrete Considering Fire Exposure. *ResearchGate*, *6*(1), 23. https://doi.org/10.11648/j.ajce.20180601.14

Kodur, V. (2014). Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *ISRN Civil Engineering*, *2014*(1), 1-15. https://doi.org/10.1155/2014/468510

Kuehnen, R., Youssef, M., & El-Fitiany, S. (2022). Influence of Natural Fire Development on Concrete Compressive Strength. *Fire*, *5*, 34. https://doi.org/10.3390/fire5020034

Liu, C., Wang, P., Wang, X., & Miao, J. (2024). Autonomous damage segmentation of post-fire reinforced concrete structural components. *Advanced Engineering Informatics*, *61*, 102498. https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102498

Mehran, K., Mingfeng, K., Muhammad, A., Jiancong, L., & Jian, G. D. (2023). *Fire Performance of Fiber-reinforced Ultra-High-Performance Concrete: A state-of-the-art review*. *9*(1), 66-101. https://dx.doi.org/10.18702/acf.2023.9.1.65

Minh, T. T., Le, D.-H., & Emmanuel, O. B. (2023). Investigation of Post Fire Mechanical Performance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag. *E3S Conferencia*, *437*(03003), 14. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343703003

Nazri, F. M., Jaya, R. P., Abu Bakar, B. H., & Ahmadi, R. (2017). Fire resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete due to heating and cooling. *MATEC Web of Conferences*, *87*, 01021. https://doi.org/10.1051/matecconf/20178701021

Ning, X., Li, J., & Li, Y. (2022). An Explorative Study into the Influence of Different Fibers on the Spalling Resistance and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. *researchgate*, *12*(12779), 17. https://doi.org/10.3390/app122412779

Noman, M., Yaqub, M., Abid, M., Musarat, M. A., Vatin, N. I., & Usman, M. (2022). Effects of Low-Cost Repair Techniques on Restoration of Mechanical Properties of Fire-Damaged Concrete. *Frontiers in Materials*, *8*. https://doi.org/10.3389/fmats.2021.801464

Oliveira, R. G., Rodrigues, J. P. C., Miguel Pereira, J., Lourenço, P. B., & Lopes, R. F. R. (2021). Experimental and numerical analysis on the structural fire behaviour of three-cell hollowed concrete masonry walls. *Engineering Structures*, *228*, 111439. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111439

Pasztetnik, M., & Wróblewski, R. (2021). A Literature Review of Concrete Ability to Sustain Strength after Fire Exposure Based on the Heat Accumulation Factor. *Materials*, *14*(16), Article 16. https://doi.org/10.3390/ma14164719

Qiao, R., Guo, Y., Zhou, H., & Xi, H. (2022). Explosive Spalling Mechanism and Modeling of Concrete Lining Exposed to Fire. *Materials*, *15*(9), Article 9. https://doi.org/10.3390/ma15093131

Saqib, M. K., Imran, M. K., M., R. C., Hussain, S. K., & Ahmed, A. (2025). *Performance analysis of fiber reinforced recycled aggregate concrete at elevated temperatures using response surface methodology*. *15*(12916), 17. https://doi.org/10.1038/s41598-025-94258-w

Silva, W., Souza, L., Ramalho, E., Felipe, A., & Pereira, L. (2025). Impacto de elevadas temperaturas na resistência à tração do concreto: Uma análise experimental. *Caderno Pedagógico*, *22*(1), e13534. https://doi.org/10.54033/cadpedv22n1-204

Ünverdi, M., Kaya, Y., Mardani, N., & Mardani, A. (2025). Investigation of the Microstructural and Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Roller-Compacted Concrete Under High-Temperature Exposure. *Materials*, *18*(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/ma18112430

Van Der Merwe, J. (2023). Desconchado del hormigón en caso de incendio: Visión general y relevancia local. *Revista de la Institución Sudafricana de Ingeniería Civil*, *62*(2), 2-9. https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-

20192023000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Vitorino, H., Vila Real, P., Couto, C., & Rodrigues, H. (2024). Parametric analysis of post-earthquake fire resistance of reinforced concrete frames without seismic design. *Engineering Structures*, *303*, 117556. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117556

Wróblewska, J., & Kowalski, R. (2020). Assessing concrete strength in fire-damaged structures. *Construction and Building Materials*, *254*, 119122. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119122

Yağan, M., Özkal, F. M., Öztürk, M. O., & Polat, M. (2024). Investigation of the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams at Elevated Temperatures. *ACS Omega*, *9*(8), 9593-9602. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09403

Yamanaka, F., Souza, R., & Teixeira, M. (2024). Análise das propriedades térmicas de uma parede de concreto armado submetido a temperaturas extremas. *Contribuciones a las ciencias sociales*, *17*, e13277. https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-045

Volumen 13, Número 3, Julio - Setiembre, 2025, Páginas 104 al 123
DOI: https://doi.org/10.37787/xwf8zv08
Revista Científica PAKAMUROS E-ISSN: 2522-3240 ISSN: 2306-8805

**ARTÍCULO DE REVISIÓN**

# Algas de agua dulce: propiedades funcionales y usos en la industria alimentaria

# Freshwater algae: functional properties and uses in the food industry

Lelyth Vega[1] y Hubert Arteaga[1]

## RESUMEN

Las algas de agua dulce se considera un recurso muy importante dentro de la industria alimentaria por su alto contenido nutricional y compuestos bioactivos. Este artículo de revisión tiene como objetivo abordar las microalgas y las macroalgas como fuentes de proteínas alternativas/complementarias y la exploración de sus posibles aplicaciones en productos alimenticios. Los principales tipos de microalgas de agua dulce incluyen cianobacterias (*Arthrospira)* y algas verdes (*Chlorella*, *Scenedesmus* y *Haematococcus*), de ellas se describe su morfología, relevancia ecológica y aplicaciones (alimentarias, nutracéuticas e industriales). Así mismo, se detallan los métodos de extracción (proceso convencional, ultrasónica, soxhlet, microondas, CO2 supercrítico, comparando principios, parámetros operativos, rendimientos y beneficios para la industria) y aplicación de sus componentes. Se presenta también la composición proximal y micro nutricional de cada una de las algas (proteínas, carbohidratos, lípidos, cenizas, humedad, fibra, calcio, hierro y otros minerales), junto a sus usos actuales en alimentos funcionales (harinas, bebidas, productos de panadería). Se incorpora el uso de tecnologías ómicas, como herramienta para caracterizar las algas y microalgas, se discuten los impactos del consumo de algas en la salud, su aporte de aminoácidos y vitaminas y sus propiedades antioxidantes y antinflamatorias, tan requeridas por los consumidores hoy en día para la elección de un alimento funcional. Finalmente, a pesar de las bondades que presentas las algas de agua dulce enfrentan desafíos que superar; la caracterización completa de la gran diversidad de especies, las variaciones en la composición de la biomasa y las condiciones de cultivo, las alteraciones en las estructuras funcionales durante los procesos de extracción y purificación, la mejora de sus características sensoriales o métodos para enmascararlos ya que representan un obstáculo de aceptación al incorporarlas en formulaciones alimentarias, para ello se requiere llevar a cabo investigaciones multidisciplinarias y multiactores sobre estos aspectos que permitan a posterior llegar a la transferencia tecnológica.

**Palabras clave:** Algas de agua dulce, propiedades funcionales, nutracéuticos, extracción de biocompuestos.

## ASTRACT

Freshwater algae are considered a very important resource within the food industry due to their high nutritional content and bioactive compounds. This review article aims to address microalgae and macroalgae as alternative/complementary protein sources and explore their potential applications in food products. The main types of freshwater microalgae include cyanobacteria (*Arthrospira*) and green algae (*Chlorella*, *Scenedesmus*, and *Haematococcus*). Their morphology, ecological relevance, and applications (food, nutraceutical, and industrial) are described. Likewise, the extraction methods (conventional, ultrasonic, Soxhlet, microwave, and supercritical CO2 processes, comparing principles, operating parameters, yields, and benefits for the industry) and the application of their components are detailed. The proximate and micronutrient composition of each of the algae (proteins, carbohydrates, lipids, ash, moisture, fiber, calcium, iron, and other minerals) is also presented, along with their current uses in functional foods (flours, beverages, bakery products). The use of omics technologies is incorporated as a tool to characterize algae and microalgae, and the impacts of algae consumption on health, their contribution of amino acids and vitamins, and their antioxidant and anti-inflammatory properties, so in demand by consumers today when choosing a functional food, are discussed. Finally, despite the benefits presented by freshwater algae, they face challenges that must be overcome; the complete characterization of the great diversity

[1] Universidad Nacional de Jaén 1, Perú, Email: keiko.vega@est.unj.edu.pe, hubert.arteaga@unj.edu.pe

of species, variations in biomass composition and cultivation conditions, alterations in functional structures during extraction and purification processes, the improvement of their sensory characteristics or methods to mask them since they represent an obstacle to acceptance when incorporating them into food formulations, for this it is necessary to carry out multidisciplinary and multi-actor research on these aspects that will later allow to reach technological transfer.

**Keywords:** Freshwater algae, functional properties, nutraceuticals, biocompounds extraction

* Autor para correspondencia

## INTRODUCCIÓN

Las algas de agua dulce comestibles comprenden principalmente cianobacterias y microalgas eucariotas, que aportan nutrientes y compuestos bioactivos al ecosistema. Se estima que existen más de 122 000 especies de algas en el mundo, de las cuales más de mil habitan en aguas continentales (Webb et al., 2023). Estas microalgas que carecen de raíces, tallos y hojas tradicionales actúan como fabricantes de células que a su vez son ricas en pigmentos, lípidos polinsaturados, proteínas y polisacáridos funcionales, por lo cual son consideradas como alimento suplementario (Jadhav et al., 2024).

A medida que la población mundial va creciendo, la demanda por el consumo de alimentos funcionales y nutricionales está en aumento, por ello explorar nuevas fuentes de alimento es de gran importancia (Rivera y Requena, 2020); (Wu et al., 2023). Una alternativa funcional son las algas de agua dulce que por lo general crecen principalmente en lagunas (Díaz-Godínez et al., 2024). Esta biomasa es un recurso potencial para desarrollar alimentos, extraer nutracéuticos y elaborar suplementos alimenticios, debido a que presentan alto contenido proteico (50–70% b.s.) y son fuente de aminoácidos esenciales como la lisina y leucina (Webb et al., 2023). Además, presenta compuestos bioactivos que pueden ser aprovechados (Prihanto et al., 2022).

No obstante, el uso de algas en la formulación de productos alimenticios y bebidas funcionales innovadoras aún es incipiente, al igual que los estudios sobre la aceptación y percepción de los consumidores frente a este tipo de ingredientes en los alimentos (Ayub et al., 2025). La mayoría de investigaciones se centran principalmente en la extracción y caracterización de compuestos derivados de algas, como pigmentos, proteínas, polisacáridos o lípidos, muchos de los cuales ya se encuentran disponibles en el mercado, pero aún no se aprovechan plenamente en la industria alimentaria.

Por ello, esta revisión aborda el estado actual del conocimiento sobre las algas de agua dulce en cuanto a sus tipos, métodos de extracción de compuestos, propiedades funcionales, tecnologías ómicas aplicadas en las algas de agua dulce y efectos en nutrición y salud del consumo de algas. Para ello. se realizó una selección de artículos científicos publicados entre 2008 y 2025, escritos en inglés y español de bases de datos como SciELO, Web of Science, Scopus y ScienceDirect.

## 1. Tipos de algas de agua dulce

Dentro de los tipos de algas de agua dulce se calcula que hay cerca de diez millones de especies de algas, los cuales se clasifican dentro de dos amplios grupos: microalgas y macroalgas. En términos de clasificación general, estas pueden agruparse en once filos principales: cianofitas, clorofitas, rodofitas, glaucofitas, euglenófitas, clorarachniofitas, carofitas, criptofitas, haptofitas, heterocontofitas y dinofitas (Sharma et al., 2019).

Las microalgas de agua dulce comprenden varios grupos taxonómicos: Cianobacterias (algas verde-azules) como *Arthrospira* (*espirulina*), *Nostoc, Anabaena, Aphanizomenon*; Clorófitas (algas verdes) como *Chlorella, Scenedesmus, Spirogyra, Haematococcus; Diatomeas (Bacillariophyceae*) como Asterionella; Cromófitas; y otros menos comunes (*Euglena, Glaucophyta*). Históricamente, solo unas pocas especies silvestres han sido domesticadas para consumo: por ejemplo, *Arthrospira platensis* (espirulina) y *Chlorella vulgaris*, junto a *Aphanizomenon flos-aquae* (AFA), son las microalgas comerciales dominantes por su elevado valor nutricional (Wang et al., 2021)

De las microalgas de agua dulce identificadas, numerosos investigadores se centran únicamente en examinar su fisiología y su reacción ante cambios ambientales mas no en sus propiedades funcionales o compuestos nutraceúticos y usos en la industria alimentaria. Como resultado, todavía existen muchas especies de microalgas de agua dulce que no han sido estudiadas (Prihanto et al. 2022)

En la industria alimentaria destacan varias algas de agua dulce comestibles. Las cianobacterias filamentosas como *Arthrospira platensis* (comúnmente "*espirulina*") y *Aphanizomenon flos-aquae* ofrecen alto contenido proteico (>60% b.s.) y pigmentos (ficocianina) (Scoglio et al., 2024). Las algas verdes unicelulares como *Chlorella vulgaris* son ricas en proteína (50–60% b.s.) utilizadas como suplementos antioxidantes (Abreu et al., 2023). Las cianobacterias coloniales (por ejemplo, *Nostoc commune* o "*cushuro*") forman esferas gelatinosas y se consumen secas en sopas tradicionales de los Andes, estas tienen un contenido proteico de 25–30% b.s., 62% de carbohidratos siendo esta un alga prometedora para la industria alimentaria (Ponce, 2014). También se utilizan algas verdes filamentosas como *Spirogyra varians*, recolectada en ambientes dulceacuícolas, rica en carbohidratos y proteínas (Tipnee et al., 2015). Estas especies aportan compuestos funcionales (proteínas, fibras, vitaminas y antioxidantes) y se procesan en formas pulverizadas, extractos o ingredientes alimentarios.

Más allá de la composición química, las algas de agua dulce exhiben gran diversidad morfológica: hay formas filamentosas como por ejemplo *Spirogyra, Cladophora*, unicelulares flageladas como *Chlamydomonas*, entre otras algas rojas filamentosas (*Batrachospermum*). Estas variaciones influencian

tanto en su cultivo y procesamiento (Michalak y Messyasz, 2020). En la tabla 1se presenta las especies representativas de algas de agua dulce y sus principales características.

**Tabla 1**

*Especies representativas de algas de agua dulce.*

| Nombre común | Especie (científica) | Morfología | Hábitat | Usos en la industria | Otros usos recientes | Ventaja | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Espirulina (*Arthrospira*)** | *Arthrospira platensis, A. máxima* | Filamentosas en espiral | Lagos | Suplemento dietético y funcional | Biosensores para contaminantes ambientales | Alto contenido proteico y ficocianina | (Nikolova et al., 2024 |
| **Chlorella** | *Chlorella vulgaris, C. sorokiniana* | Unicelular esférica | Estanques y lagunas | Antioxidante | NR | Fuente de vitamina B12 | (Abreu et al., 2023) |
| ***Aphanizomenon flos-aquae* (AFA)** | *Aphanizomenon flos-aquae* | Filamentosas, nodular | Fuentes de agua dulce | Suplemento nutricional | Biomasa | NR | (Scoglio et al., 2024) |
| **Cushuro (*Nostoc*)** | *Nostoc commune, N. sphaericum* | Esféricas gelatinosas | Lagos en orillas | Nutrición ancestral | NR | Combatir anemia | (Ponce, 2014) |
| **Spirogyra** | *Spirogyra varians* | Filamentosa sin ramificar | Arroyos de corriente lente | Ingrediente alimentario funcional | Biocombustible | Alto contenido de pigmentos y carbohidratos | (Tipnee et al., 2015) |
| **Euglenofita** | *Euglena gracilis* | Unicelular flagelada | Sedimentos de agua dulce | Aditivo alimentario | Extracción de paramilón | Alto contenido de paramilón y vitaminas | (Zhang et al., 2023) |
| **Haematococcus (roja)** | *Haematococcus pluvialis* | Unicelular | Fuentes de agua dulce expuestas al sol | Aplicaciones medicas | NR | Protección celular antioxidante. | (Gu et al., 2024) |
| **Dunaliella** | *Dunaliella salina* | Unicelular | Aguas con clima cálido | Uso farmacéutico | NR | Alto en β-caroteno y lípidos | (Ampofo y Abbey, 2022) |

*Nota*. No reportado (NR)

## 2. Métodos de extracción de compuestos bioactivos

Las microalgas poseen una pared celular gruesa, lo que limita la liberación de sus compuestos bioactivos debido a la rigidez de su matriz. Por ello, es crucial seleccionar métodos de pretratamiento y extracción adecuados para obtener lípidos y otros compuestos de las microalgas y preservar su bioactividad (Nguyen et al., 2024). Tradicionalmente, las algas han sido utilizadas como fuente para la extracción de β-caroteno, un compuesto esencial para la salud visual y el fortalecimiento del sistema inmunológico, su relevancia en aplicaciones industriales responde a su valor nutricional y la eficiencia de

producción que ofrecen frente a otras fuentes tradicionales (Ilyas et al., 2023). Se han empleado métodos tradicionales como la extracción Soxhlet, la extracción Folch y la extracción Bligh-Dyer para la obtención de lípidos (Cotas et al., 2020). Aunque estos métodos son generalmente fáciles de operar y económicos, lo que favorece su uso, presentan desventajas en su alto consumo de reactivos orgánicos que impacta en el medioambiente, y prolongados tiempos de extracción (Zhou et al., 2022).

**2.1. Proceso convencional para la extracción de lípidos de algas de agua dulce**

Dentro de los tipos de extracción para lípidos esta la disrupción mecánica o térmica de biomasa con solventes (agua, etanol y hexano) (Jadhav et al., 2024). La extracción Soxhlet (SE) es una técnica que mueve los componentes parcialmente solubles de una muestra sólida a una fase líquida (solvente) mediante un extractor Soxhlet. Los lípidos neutros se extraen utilizando solventes no polares como el hexano (Baumgardt et al., 2015). Además, el uso de disolventes más polares podría mejorar el rendimiento de la extracción de microalgas, facilitando así la recuperación de lípidos y pigmentos complejos.

**2.2. Extracción asistida por ultrasonidos**

La extracción por ultrasonidos se destaca frente a otros métodos de extracción en varios aspectos, incluyendo su alto rendimiento, fiabilidad, seguridad, facilidad de uso y respeto por el medio ambiente (Tavakoli et al., 2021).

El ultrasonido implica aplicar ondas ultrasónicas en un rango entre 20 kHz a 10 MHz caracterizado según la intensidad. Las microalgas tienen una pared celular muy gruesa que bloquea la liberación de lípidos dentro de la célula. Los procesos de extracción convencionales como la extracción por solventes y el prensado mecánico producen menos lípidos en comparación con el proceso de extracción asistido por ultrasonido (Mubarak et al., 2015)

La extracción asistida por ultrasonido, induce variaciones de presión en el medio líquido que provocan la formación de burbujas, ya sea a partir del gas contenido en las partículas sólidas o por burbujas preexistentes. Estas burbujas crecen progresivamente durante los ciclos de compresión, una vez que alcanzan un tamaño tal que la energía ultrasónica ya no es suficiente para contener los vapores estas colapsan (Jadhav et al., 2024).

**2.3. Extracción por alta presión**

El proceso de extracción con líquidos presurizados (PLE) ha sido ampliamente utilizado para obtener bioactivos de diversas cepas de microalgas. En comparación con los métodos de extra

convencionales, esta técnica presenta varias ventajas, como una transferencia de masa más eficiente gracias a las condiciones específicas de extracción y una mayor rapidez en el proceso, utilizando volúmenes menores de disolvente. El empleo de disolventes líquidos a altas temperaturas reduce su viscosidad, lo que facilita su penetración en la matriz celular y, en última instancia, mejora tanto el rendimiento como la cinética de la extracción (Jadhav et al., 2024).

La extracción a ultra alta presión (UHPE) es una variante de la extracción con líquidos presurizados, donde la presión puede alcanzar hasta 800 MPa, un nivel notablemente elevado. Esta aplicación de presiones extremas puede debilitar las estructuras celulares de las algas, eliminando así la necesidad de realizar una disrupción celular previa (Gallego et al., 2021). A continuación, en la tabla 2 se presenta los métodos de extracción en diferentes tipos de algas.

**Tabla 2**

*Principales métodos de extracción aplicados a algas de agua dulce.*

| Método | Tipo de alga | Principio | Compuestos | Condiciones | Ventajas | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **UAE (extracción asistida por ultrasonidos)** | *Chlorella vulgaris* | Cavitación ultrasónica rompe células | Proteínas, pigmentos y fenoles | 20 kHz a 10 MHz | Rápido, alta eficiencia, poco solvente | (Santana et al., 2012); (Wetterwald et al., 2023) |
| **Solventes convencionales (maceración/Soxhlet)** | *Chlorella* spp, *Spirulina platensis* | Extracción lipofílica por solvente orgánico | Lípidos, clorofilas, carotenoides y fenoles | 60–80 °C durante 12–24 h a baja velocidad | Extrae eficientemente lípidos, pigmentos y fenoles | (Shen et al., 2023) |
| **Microondas (MAE)** | *Chlorella vulgaris* | Ruptura celular por microondas | Carotenoides y lípidos | 60 °C, 300 W, 14 min con etanol 90% (22 mL/g biomasa | Muy rápido y eficiente | (Ioulia et al., 2023) |
| **$CO_2$ supercrítico (SFE)** | *Haematococcus pluvialis* (fase roja) | Extracción apolar con $CO_2$ supercrítico | Antioxidantes y pigmentos | Glicerol (1:2) + 21% agua, 30 s a 7500 rpm | Ecológico y selectivo. Solventes biodegradables, no tóxicos | (Kamil et al., 2025) |
| **Enzimático** | *Padina*, *Chlamydomonas* | Enzimas específicas | Polisacáridos y proteínas | pH ~5–8, T 30–60°C | Aumento recuperación de polisacáridos y fenoles respecto a agua/etanol | (Nguyen et al., 2024) |

## 3. Propiedades funcionales

Se estima que alrededor de 1 de cada 9 personas en el mundo padece desnutrición, siendo un factor muy relevante, por ello es necesario explorar nuevas fuentes de alimento para afrontar esta creciente problemática (Aswathy et al., 2025). Al promover el uso de microalgas como una nueva fuente de alimentos, se presenta la oportunidad de incrementar el suministro de estos productos esenciales de manera más eficiente y sostenible desde el punto de vista ambiental.

Investigaciones recientes sobre algas (tanto macroalgas y microalgas) como fuente emergente de proteínas, incluyendo las especies productoras de proteínas más relevantes y las estrategias para mejorar el contenido proteico en las materias primas de algas son consideradas una nueva fuente de alimento con alto valor nutricional. Muchos tipos de algas son alimentos nutricionalmente completos, considerándose una fuente de proteínas muy importante y su rendimiento supera al de la mayoría de los cultivos vegetales, y existe un creciente conjunto de herramientas para desarrollar cepas mejoradas de algas (Lucas y Brunner, 2024).

Las algas de agua dulce son ricas en proteínas de alta calidad (contienen todos los aminoácidos esenciales), fibras, minerales y pigmentos antioxidantes (ficocianina, clorofila, carotenoides) (Chiellini et al., 2022). Por ejemplo, *Spirulina* aporta hasta 60–70% de proteína en base seca y es fuente de ácidos grasos insaturados y vitaminas. *Chlorella* contiene 60% proteína en base seca y carotenoides como la luteína (Podgórska-Kryszczuk., 2024). Nostoc (*cushuro*) aporta 25% proteína en base seca, minerales y vitaminas (calcio 1076 mg/100g, vitamina A) (Ponce, 2014). Estos componentes confieren acciones antioxidantes, antiinflamatorias e inmunomoduladores. Por ejemplo, la ficocianina de *Spirulina* actúa como colorante natural y tiene efecto antioxidante; los carotenoides (β-caroteno, astaxantina) neutralizan radicales libres y protegen al organismo (Ayub et al., 2025).

Numerosos estudios han demostrado que los compuestos bioactivos presentes en las algas, como la ficocianina de *Spirulina* y los polisacáridos sulfatados de *Chlorella*, poseen potentes efectos antioxidantes. En una revisión sistemática de *Spirulina* sobre estrés oxidativo en atletas, se encontró una reducción significativa de marcadores de peroxidación lipídica (MDA 14 %, $p < 0.05$) y un aumento de la capacidad antioxidante total (TEAC 18 %) tras 8 semanas de suplementación (Díaz-Godínez et al., 2024). Asimismo, estudios in vitro e in vivo con extractos de *Chlorella* muestran inhibición de las citocinas proinflamatorias TNF-α e IL-6 hasta en un 40 % en modelos de colitis experimental, lo que sugiere un potencial antiinflamatorio en enfermedades gastrointestinales (Podgórska-Kryszczuk., 2024).

La ficocianina, una biliproteína de color azul aislada de *Spirulina platensis*, ha mostrado una alta capacidad para neutralizar radicales libres en ensayos DPPH y ABTS, alcanzando más del 90 % de

inhibición a 0.5 mg/ml (Armaini et al., 2024). Asimismo, este pigmento ejerce, de forma dependiente de la dosis, un efecto inhibidor sobre las enzimas proinflamatorias lipoxigenasa (LOX) y ciclooxigenasa-2 (COX-2) en cultivos celulares, lo que refrenda su doble acción antioxidante y antiinflamatoria en formulaciones nutracéuticas (Romay et al., 2025). Por otro lado, una revisión reveló que, en modelos in vivo, la ficocianina reduce hasta un 40 % los niveles de malondialdehído (MDA) y atenúa la exp 111 de iNOS y TNF-α, al tiempo que incrementa la actividad de enzimas antioxidantes endógenas como el superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT) (Romay et al., 2003). Estos resultados sitúan a la ficocianina como un ingrediente prometedor para atenuar el estrés oxidativo sistémico y la inflamación crónica. A continuación, en la tabla 3 se muestran las diferentes algas de agua dulce y su composición.

**Tabla 3**

*Composición de las microalgas y macroalgas.*

| Grupo | Proteína | Carbohidratos | Grasa | Cenizas | Humedad | Fibra | Calcio | Lipidos | Minerales | Hierro | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Nostoc commune, N. sphaericum*** | 28.18 ± 0.33% | 62.07 ± 0.69% | 0.71 ± 0.02 % | 7.68 ± 0.10 % | 0.22 ± 0.01% | 0.22 ± 0.01 % | 377.80 ± 1.43 mg/100 g | NR | NR | 4.76 ± 0.08 mg/100 g | (Méndez-Ancca et al., 2023) |
| ***Spirogyra varians*** | 12.0% y 24 | 42.8% y 60.0% | NR | NR | NR | NR | 445.9± 0.1 mg/100 g | 14.8 % y 21.0 % | NR | NR | (Tipnee et al., 2015) |
| ***Chlorella vulgaris*** | 32.99 ± 2.1 mg $g^{-1}$ (b.s) | 20 % | 45 % | 5 % | NR | 20 % | NR | 4 – 9% | 5 % | NR | (Noura et al., 2020) |
| ***Haematococcus pluvialis*** | 10 – 35 % | 1 - 7 % | NR | NR | NR | 15 – 35 % | NR | 2 – 3 % | NR | NR | (Nur et al., 2021) |
| ***Espirulina, AFA*** | 55-70% | 15-25% | 6-9% | NR | NR | 8-10% | NR | NR | NR | NR | (Podgórska-Kryszczuk., 2024) |
| ***Dunaliella salina*** | 39.14 g/100 g | 27.0 g/100 g | NR | NR | NR | NR | NR | 18.0 g/100 g | NR | NR | (Joana et al., 2023) |
| ***Oedogonium sp*** | 15 – 20 % | 50 – 60 % | 5 – 7% | 15 – 25 % | NR | NR | NR | NR | NR | NR | (Lawton et al., 2013) |

**Nota:** No reportado (NR)

## 4. Ómicas aplicadas a las algas

Los avances acelerados en las tecnologías ómicas están desbloqueando el potencial multifuncional de las microalgas como materias primas para el uso en la industria alimentaria, con aplicaciones prometedoras, paralelamente, las microalgas se perfilan como plataformas atractivas para su aprovechamiento (Guarnieri y Pienkos, 2014).

La proteómica es un campo complejo debido a la necesidad de analizar y clasificar las firmas prote 112
de un genoma, equipos como la espectrometría de masas (LC-MS-MS y MALDI-TOF/TOF) son centrales en la proteómica moderna. Sin embargo, los altos costos asociados con las instalaciones proteómicas, incluyendo el software, las bases de datos y la necesidad de personal especializado, limitan su adopción generalizada, especialmente en países en desarrollo (Lauritano et al., 2019). Además, la proteómica nos brinda la oportunidad de investigar las variaciones en los productos finales de la regulación génica, es decir, las proteínas, a compartir desde la transcripción hasta las modificaciones postraduccionales. Este enfoque, complementario al análisis transcriptómica, se ha utilizado para estudiar las respuestas de Nannochloropsis oceánica ante la inanición de nitrógeno a largo plazo (Garnier et al., 2014).

Así mismo, las microalgas albergan una variedad de metabolitos cuyas propiedades y relaciones aún no se han comprendido completamente, debido a la complejidad de sus procesos metabólicos (Hughes et al., 2021). La metabolómica se dedica al análisis de estos metabolitos y sus vías de acción dentro de las células. A través de la metabolómica, es posible obtener una instantánea del fenotipo de las microalgas, lo que permite esclarecer los mecanismos de las vías metabólicas. Además, esta técnica facilita la comparación de los metabolitos entre la especie silvestre y sus mutantes (Gowda y Djukovic, 2014).

La lipidómica es una rama de la metabolómica que se centra en la identificación y diferenciación de diversas clases de lípidos, así como en las moléculas que interactúan con ellos (Ivanova et al., 2009). Las técnicas más comunes para llevar a cabo a cabo estudios en lipidómica son la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS) y los métodos quimiométricos combinados con análisis multivariante (Su et al., 2012). Comprender la dinámica de la lipidómica en respuesta a diferentes señales ambientales puede proporcionar información valiosa sobre el metabolismo lipídico de las microalgas y facilitar la manipulación de su rendimiento y perfil lipídico para optimizar la producción de biocombustibles (Arora et al., 2018).

El progreso en las tecnologías ómicas, la ingeniería metabólica y la biología de sistemas ha fomentado la concepción de las algas como fábricas de células microbianas (Sirohi et al., 2021). Dado que las algas

constituyen un grupo altamente diverso de organismos acuáticos, son capaces de producir una amplia variedad de bioproductos. Los recientes avances en genómica, proteómica y transcriptómica han posicionado a las algas como una "materia prima versátil", con aplicaciones en nutracéuticos, biocombustibles, ciencia de materiales y en el ámbito biomédico (Guarnieri y Pienkos, 2014). A continuación, en la tabla 4 se muestra las ómicas principales para extracción de compuestos de algas de agua dulce.

**Tabla 4**

*Ejemplos de aplicaciones ómicas en algas de agua dulce*

| Ómicas | Alga | Objetivo | Condiciones | Compuestos | Limitaciones | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Metabolómica** | *Euglena gracilis* | Perfil de metabolitos secundar | Extracción metanólica, LC-MS | Astaxantina y carotenos medidos (%) | Rendimiento en cultivo | (Sun et al., 2022) |
| **Proteómica** | *Haematococcus pluvialis* | Cuantificar enzimas de síntesis de astaxantina | Inducción roja: 30 °C, por 72 h; extracción con 50 mM Tris-HCl | Genes VcMID (det. sexualidad) | Evolución de germen | (Irvani et al., 2024) |
| **Lipidomica** | *Nannochloropsis limnetica* | Contenido total de lípidos | Cultivo con variación de $CO_2$ y N | Omega-3 | NR | (Couto et al., 2022) |

**Nota:** No reportado (NR)

## 5. Impactos en la nutrición y salud por el consumo de algas

### 5.1. Perfil de aminoácidos, vitaminas y micronutrientes esenciales

El análisis de aminoácidos de *Spirulina* revela una composición balanceada con todos los aminoácidos esenciales, incluyendo leucina (8.6 g/100 g), lisina (5.5 g/100 g) y fenilalanina (4.2 g/100 g), lo cual la posiciona como fuente de proteína vegetal de alta calidad comparable a la de la leche y los huevos (Podgórska-Kryszczuk., 2024). Además, *Chlorella vulgaris* contiene niveles significativos de vitaminas del complejo B ($B_{12}$ hasta 66 μg/100 g en algunos lotes), vitamina C (10–15 mg/100 g) y provitamina A (β-caroteno, 2 mg/100 g), así como minerales como hierro (28 mg/100 g) y magnesio (315 mg/100 g), superando a muchas verduras de hoja verde en concentración de micronutrientes (Podgórska-Kryszczuk., 2024). Estas características la hacen particularmente útil para poblaciones con riesgo de deficiencias, como vegetarianos, mujeres embarazadas o personas con anemia ferropénica, al mejorar la biodisponibilidad de hierro y zinc y complementar dietas bajas en fuentes animales.

### 5.2.Efectos inmunomoduladores, salud intestinal y neuro protección

Las algas de agua dulce han demostrado que ejercen profundos efectos inmunomoduladores, reforzando las defensas de nuestro cuerpo de manera más natural (Naik et al., 2024). Por ejemplo, los β-glucanos actúa como patrones moleculares asociados a patógenos

(PAMP) y pueden identificarse de forma no específica mediante receptores de reconocimiento de patrones (PRR) en la superficie de las células del sistema inmunitario innato (Comer et al., 2021). Mientras que la suplementación con Chlorella ha mostrado aumentar células Natural Killer (NK) y marcadores de inmunidad en ciertas condiciones. Sus compuestos antiinflamatorios pueden ayudar a regular procesos inmunitarios (Díaz-Godínez et al., 2024 y Kartthigeen et al., 2023).

Además de sus beneficios metabólicos, las algas de agua dulce ejercen modulaciones en el sistema inmunitario y en la salud intestinal. Un extracto de *Aphanizomenon flos-aquae* (Klamin®) mostró en cultivos de músculo liso colónico humano un efecto espasmolítico significativo, mediado por β-feniletilamina que activa receptores de un antagonista del receptor de trazas de amina (TAAR1) y promueve la liberación de serotonina, modulando la motilidad intestinal (Amato et al., 2021). En modelos animales de obesidad, la suplementación con extracto *Aphanizomenon flos-aquae* (AFA) redujo la resistencia a la insulina, la inflamación hepática y la deposición de β-amiloide en cerebro, sugiriendo efectos neuro protectores y antiinflamatorios sistémicos (Galizzi et al., 2023). Finalmente, péptidos bioactivos de *Chlorella pyrenoidosa* han demostrado alterar favorablemente la composición del microbioma intestinal en ratones con dieta alta en grasas, incrementando bacterias productoras de butirato y mejorando marcadores de permeabilidad intestinal (Liu et al., 2024). Estos hallazgos sustentan el potencial de las algas como moduladores de la inmunidad y la salud gastrointestinal, con implicaciones en trastornos inflamatorios y neurodegenerativos.

### 5.3.Soporte metabólico / antidiabético

Algunos compuestos algales inhiben enzimas digestivas de carbohidratos (amilasa, glucosidasa) y modulan el microbiota intestinal hacia bacterias beneficiosas, contribuyendo al control de glucemias postprandiales. Ensayos indican efectos hipoglucémicos modestos de extractos de *Chlorella* y algas pardas en humanos (Wu et al., 2023).

La diabetes, considerada un síndrome metabólico complejo, puede ser modulada mediante el uso de fármacos nutricionales que ofrecen beneficios terapéuticos complementarios (Kim et al., 2008). La *espirulina*, una especie de alga rica en nutrientes bioactivos de alto valor funcional, tiene la capacidad para promover el equilibrio glucémico y apoyar la salud metabólica de forma natural (Ziyaei et al., 2023).

### 5.4.Salud cardiovascular

El elevado contenido de ácidos grasos omega-3 en las microalgas, especialmente el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA) tiene un gran potencial para mantener la salud cardiovascular (Begum et al., 2024). Investigaciones recientes han demostrado que los suplementos de omega-3 obtenidos de microalgas son tan efectivos como los suplementos tradicionales de aceite de pescado en la reducción de los niveles de triglicéridos, la mejora del perfil lipídico y la disminución de la presión arterial (Valado y Pereira, 2023). Además, estos compuestos han mostrado resultados prometedores en la reducción de la inflamación, la mejora de la función endotelial y la prevención de la aterosclerosis, lo que contribuye a disminuir el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Martínez et al., 2018). A continuación, en la tabla 5 se muestra el uso de algas dulce en diferentes alimentos y sus beneficios.

**Tabla 5**

*Usos de las algas de agua dulce en la industria alimentaria*

| Alga | Modo de incorporación | Producto alimentario | Propiedad funcional | Perfil sensorial | Efecto enriquecedor | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Arthrospira platensis*** | Extracto | Yogur y queso | Anticancerígeno; antioxidante y antiinflamatorio | Sin diferencias | Crecimiento del probiótico Lactobacillus casei en queso tipo feta acidificado bacteriológicamente (BAF). | (Agustini et al., 2016); (Golmakani et al., 2019) |
| ***Chlorella vulgaris*** | Polvo o harina | Galletas y bizcochos | Actividad antioxidante | Color verde intenso | Aumento de contenido fenólico del 2 % al 6 % | (Batista et al., 2017) |
| ***Tetraselmis chuii*** | Camarón | liofilizado | Actividad antioxidante y resistente al estrés salino inverso | NR | Alta resistencia a la prueba de estrés salino inverso (76,7–100%) | (Rahman et al., 2017) |
| ***Arthrospira platensis*** | Pan (crostini) | Pan (costini) | Mayor capacidad antioxidante, inmunomodulador y antiinflamatorio | Color verde | Aumento de proteínas en el pan crostini ($p < 0,05$), ficotina y contenido fenólico | (Niccolai et al., 2019) |
| ***Haematococcus pluvialis*** | Cápsulas | Suplementos | Rica en astaxantina, farmacéutica y alimentos | NR | Absorción de astaxantina (3,3-dihidroxi-β, β-caroteno-4,4-diona | (Abdel-Hameed et al., 2023) |
| ***Espirulina platensis*** | Carne | Polvo o spray | Propiedades nutricionales aumentadas | Color y sabor intensos (generalmente verdes) | Enriquece la composición de ácidos grasos y reduce la ingesta de grasas saturadas | (Furbeyre et al., 2016); (Guo et al., 2024) |

**Nota:** No reportado (NR)

## CONCLUSIONES

Las algas de agua dulce representan un recurso poderoso y sostenible para el desarrollo de alimentos funcionales de alto valor en la industria alimentaria, su perfil nutricional compuesto con bioactivos, tiene un papel fundamental al fortificar alimentos, las cianobacterias como *Arthrospira, Aphanizomenon* y microalgas verdes *Chlorella, Scenedesmus, Haematococcus* aportan proteínas completas, polisacáridos bioactivos, lípidos y micronutrientes en concentraciones superiores a muchos cultivos terrestres, lo cual las posiciona como candidatas ideales para el desarrollo de alimentos funcionales y suplementos nutracéuticos.

La implementación de métodos de extracción impulsa el aprovechamiento industrial como ultrasonido, microondas, $CO_2$ supercrítico y extracción enzimática aumentan notablemente los rendimientos de compuestos bioactivos, mientras que las tecnologías ómicas (metabolómica, proteómica y lipidómica) permiten una caracterización detallada de las rutas metabólicas y la optimización de cepas para aplicaciones específicas en la industria alimentaria, y con ello se podría cuantificar los metabolitos asociados a las propiedades funcionales y estudios in vivo o in vitro ayudarían a verificar su impacto tanto en la nutrición y la salud del ser humano.

Para impulsar el uso industrial de microalgas en alimentos funcionales, es esencial caracterizar todas las especies, desarrollar sistemas de producción y aplicar tecnologías de procesamiento sostenibles e innovadoras que transformen la biomasa cruda en productos de alto valor sin comprometer su calidad nutricional ni el entorno. Métodos no térmicos emergentes como la fermentación, ultrasonicación, microondas, campos eléctricos pulsados y enzimas permiten conservar los compuestos funcionales y garantizar la seguridad alimentaria. Al consumirlas directamente o añadir a matrices alimentarias para potenciar su aceptación, alineadas con las necesidades del consumidor, que complementariamente puede evaluarse aspectos críticos como la bioaccesibilidad, biodisponibilidad y beneficios para la salud tan requeridos de verificación, esto permitirá un cubrir estas brechas de conocimiento que con una adecuada transferencia tecnológica puede impulsar y dinamizar el desarrollo industrial en este sector.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Hameed, M., Sestric, R., Hardy, B., Levin, D. B., y Sorensen, J. L. (2023). *Astaxanthin stability in intracellular and extracellular conditions from the green alga Haematococcus pluvialis. Food* Chemistry Advances, 3, 100432–100432. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100432

Abreu, A. P., Martins, R., y Nunes, J. (2023). *Emerging Applications of Chlorella sp. and Spirulina (Arthrospira) sp*. Bioengineering, 10(8), 955. https://doi.org/10.3390/bioengineering10080955

Agustini, W., Ma'ruf, F., Widayat, W., Suzery, M., Hadiyanto H., y Benjakul, S. (2016). *Application of spirulina platensis on ice cream and soft cheese with respect to their nutritional and sensory perspectives.* Jurnal Teknologi, 78(4-2). https://doi.org/10.11113/jt.v78.8216

Amato, A., Terzo, S., Pierenrico Marchesa, Maffongelli, A., Martorana, M., Scoglio, S., y Mulè, F. (2021). *Spasmolytic Effects of Aphanizomenon Flos Aquae (AFA) Extract on the Human Colon Contractility.* Nutrients, 13(10), 3445–3445. https://doi.org/10.3390/nu13103445

Ampofo, J., y Abbey, L. (2022). *Microalgae: Bioactive Composition, Health Benefits, Safety and Prospects as Potential High-Value Ingredients for the Functional Food Industry.* Foods, 11(12), 1744–1744. https://doi.org/10.3390/foods11121744

Armaini, A., Imelda, I., Yerizel, E., Suharti, N., Kusnanda, A. J., y Musifa, E. (2024). *Characterization and Biological activities of Phycocyanin extracted from Spirulina platensis local isolate of Maninjau Lake, West Sumatra, Indonesia*. Research Journal of Pharmacy and Technology, 3119–3126. https://doi.org/10.52711/0974-360x.2024.00488

Arora, N., Pienkos, P. T., Vikas Pruthi, Poluri, K. M., y Guarnieri, M. T. (2018). *Leveraging algal omics to reveal potential targets for augmenting TAG accumulation.* Biotechnology Advances, 36(4), 1274–1292. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.005

Aswathy, V., Mavai, S., Bains, A., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., Chawla, P., y Sharma, M. (2025). *Unveiling the potential of freshwater edible algae: Innovative extractions and functional food applications.* South African Journal of Botany, 177, 643–664. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.12.023

Ayub, A., Rahayu, F., Khamidah, A., Antarlina, S. S., Iswari, K., Supriyadi, K., Mufidah, E., Singh, A., Chopra, C., y Wani, A. K. (2025). *Harnessing microalgae as a bioresource for nutraceuticals: advancing bioactive compound exploration and shaping the future of health and functional food innovation.* Discover Applied Sciences, 7(5). https://doi.org/10.1007/s42452-025-06916-3

Batista, A. P., Niccolai, A., Patrícia Fradinho, Fragoso, S., Bursic, I., Rodolfi, L., Biondi, N., Tredici, M. R., Sousa, I., y Raymundo, A. (2017). *Microalgae biomass as an alternative ingredient in cookies: Sensory, physical and chemical properties, antioxidant activity and in vitro digestibility.* Algal Research, 26, 161–171. https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.07.017

Baumgardt, F. J. L., Filho, A. Z., Brandalize, M. V., da, C., Antoniosi, N. R., Abreu, P. C. O. V., Corazza, M. L., y Ramos, L. P. (2015). *Lipid content and fatty acid profile of Nannochloropsis oculata before and after extraction with conventional solvents and/or compressed fluids.* The Journal of Supercritical Fluids, 108, 89–95. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.11.003

Begum, N., Qi, F., Yang, F., Khan, Q. U., None Faizan, Fu, Q., Li, J., Wang, X., Wang, X., Wang, J., Li, R., Liu, D., y Zhang, W. (2024). *Nutritional Composition and Functional Properties of A. Platensis-Derived Peptides: A Green and Sustainable Protein-Rich Supplement.* Processes, 12(11), 2608–2608. https://doi.org/10.3390/pr12112608

Chiellini, C., Serra, V., Gammuto, L., Ciurli, A., Longo, V., y Gabriele, M. (2022). *Evaluation of Nutraceutical Properties of Eleven Microalgal Strains Isolated from Different Freshwater*

*Aquatic Environments: Perspectives for Their Application as Nutraceuticals.* Foods, 11(5), 654. https://doi.org/10.3390/foods11050654

Comer, J., Bassette, M., Burghart, R., Loyd, M., Ishiguro, S., Azhagiya Singam, E. R., Vergara-Jaque, A., Nakashima, A., Suzuki, K., Geisbrecht, B. V., y Tamura, M. (2021). *Beta-1,3 Oligoglucans Specifically Bind to Immune Receptor CD28 and May Enhance T Cell Activation.* International Journal of Molecular Sciences, 22(6), 3124. https://doi.org/10.3390/ijms22063124

Cotas, J., Leandro, A., Monteiro, P., Pacheco, D., Figueirinha, A., Gonçalves, A. M. M., da Silva, G. J., y Pereira, L. (2020). *Seaweed Phenolics: From Extraction to Applications.* Marine Drugs, 18(8), 384. https://doi.org/10.3390/md18080384

Couto, D., Conde, T. A., Melo, T., Neves, B., Costa, M., Cunha, P., Guerra, I., Correia, N., Silva, J. T., Pereira, H., Varela, J., Silva, J., Domingues, R., y Domingues, P. (2022). *Effects of outdoor and indoor cultivation on the polar lipid composition and antioxidant activity of Nannochloropsis oceanica and Nannochloropsis limnetica: A lipidomics perspective.* Algal Research, 64, 102718–102718. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102718

Díaz-Godínez, G., Peña-Solis, K., y Díaz-Domínguez, G. (2024). *Algae as nutritional and bioactive food ingredients.* Revista Mexicana de Ingeniería Química, 23(2), 1–22. https://doi.org/10.24275/rmiq/bio24209

Furbeyre, J. van Milgen, T. Mener, M. Gloaguen, y E. Labussière. (2016). *Effects of dietary supplementation with freshwater microalgae on growth performance, nutrient digestibility and gut health in weaned piglets.* Animal, 11(2), 183–192. https://doi.org/10.1017/s1751731116001543

Galizzi, G., Deidda, I., Amato, A., Calvi, P., Terzo, S., Caruana, L., Scoglio, S., Mulè, F., y Di Carlo, M. (2023). *Aphanizomenon flos-aquae (AFA) Extract Prevents Neurodegeneration in the HFD Mouse Model by Modulating Astrocytes and Microglia Activation.* International Journal of Molecular Sciences, 24(5), 4731. https://doi.org/10.3390/ijms24054731

Gallego, R., Bueno, M., Chourio, A. M., Ibáñez, E., Marleny D.A. Saldaña, y Herrero, M. (2020). *Use of high and ultra-high pressure based-processes for the effective recovery of bioactive compounds from Nannochloropsis oceanica microalgae.* The Journal of Supercritical Fluids, 167, 105039–105039. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105039

Garnier, M., Carrier, G., H. Rogniaux, Nicolau, E., G. Bougaran, B. Saint-Jean, y Cadoret, J. P. (2014). *Comparative proteomics reveals proteins impacted by nitrogen deprivation in wild-type and high lipid-accumulating mutant strains of Tisochrysis lutea.* Journal of Proteomics, 105, 107–120. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2014.02.022

Golmakani, M.-T., Soleimanian-Zad, S., Alavi, N., Nazari, E., y Eskandari, M. H. (2018). *Effect of Spirulina (Arthrospira platensis) powder on probiotic bacteriologically acidified feta-type cheese.* Journal of Applied Phycology, 31(2), 1085–1094. https://doi.org/10.1007/s10811-018-1611-2

Gowda, G. A. N., y Djukovic, D. (2014). *Overview of Mass Spectrometry-Based Metabolomics: Opportunities and Challenges.* Methods in Molecular Biology, 3–12. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1258-2_1

Gu, Y., Yee, M., Lian, L., Shimizu, K., Chae, K.-J., Ngoc, T., y Khoo, K. S. (2024). *Genetic engineering of Haematococcus pluvialis microalgae for the enhancement of astaxanthin production: A review.* Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 60, 103298–103298. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103298

Guarnieri, M. T., y Pienkos, P. T. (2014). *Algal omics: unlocking bioproduct diversity in algae cell factories.* Photosynthesis Research, 123(3), 255–263. https://doi.org/10.1007/s11120-014-9989-4

Guo, J., Huang, Y., Gu, X., y Meng, Z. (2024). *Spirulina platensis protein-based emulsion gel as fat substitute in meat analogs: Evaluation performance across post-processing.* Food Chemistry, 463, 141414–141414. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141414

Hughes, A. H., Magot, F., Tawfike, A. F., Rad-Menéndez, C., Thomas, N., Young, L. C., Stucchi, L., Carettoni, D., Stanley, M. S., Edrada-Ebel, R., y Duncan, K. R. (2021). *Exploring the Chemical Space of Macro- and Micro-Algae Using Comparative Metabolomics.* Microorganisms, 9(2), 311. https://doi.org/10.3390/microorganisms9020311

Ilyas, Z., Ali Redha, A., Wu, Y. S., Ozeer, F. Z., y Aluko, R. E. (2023). *Nutritional and Health Benefits of the Brown Seaweed Himanthalia elongata.* Plant Foods for Human Nutrition, 78(2), 233–242. https://doi.org/10.1007/s11130-023-01056-8

Ioulia Georgiopoulou, Soultana Tzima, Louli, V., y Magoulas, K. (2023). *Process Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Chlorophyll, Carotenoid and Phenolic Compounds from Chlorella vulgaris and Comparison with Conventional and Supercritical Fluid Extraction.* Applied Sciences, 13(4), 2740–2740. https://doi.org/10.3390/app13042740

Irvani, N., King, J., Hamzelou, S., Ji, D., Tahmasian, A., Kebede, B., Carne, A., Agyei, D., y Oey, I. (2024). *Impact of different food-grade protein extraction methods on the proteomic profile and potential allergenicity of Spirulina (Arthrospira platensis).* Algal Research, 103765–103765. https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103765

Ivanova, P. T., Milne, S. B., Myers, D. S., y Brown, H. A. (2009). *Lipidomics: a mass spectrometry-based systems level analysis of cellular lipids.* Current Opinion in Chemical Biology, 13(5-6), 526–531. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.08.011

Jadhav, H. B., Choudhary, P., Deshmukh, N. D., Singh, D. K., Das, M., Das, A., Sai, S., Muthusamy, G., Annapure, U. S., Ramniwas, S., Mugabi, R., y Gulzar Ahmad Nayik. (2024). *Advancements in non-thermal technologies for enhanced extraction of functional triacylglycerols from microalgal biomass: A comprehensive review.* Food Chemistry X, 23, 101694–101694. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101694

Joana, Madalena Grácio, Sousa, I., António Pagarete, Nunes, M. C., y Raymundo, A. (2023). *Tuning the Bioactive Properties of Dunaliella salina Water Extracts by Ultrasound-Assisted Extraction.* Marine Drugs, 21(9), 472–472. https://doi.org/10.3390/md21090472

Kamil, S. N., Tezcanlı, S., Çelik, Y., Toprakçı, İ., y Şahin, S. (2025). *Optimized extraction of Spirulina platensis phenolics using natural deep eutectic solvents for cosmetics.* Preparative Biochemistry y Biotechnology, 1–14. https://doi.org/10.1080/10826068.2025.2467440

Kartthigeen, T., Goon, J. A., Suzana Makpol, y Tan, J. K. (2023). *Effects of Microalgae on Metabolic Syndrome.* Antioxidants, 12(2), 449–449. https://doi.org/10.3390/antiox12020449

Kim, M. S., Kim, J. Y., Choi, W. H., y Lee, S. S. (2008). *Effects of seaweed supplementation on blood glucose concentration, lipid profile, and antioxidant enzyme activities in patients with type 2 diabetes mellitus.* Nutrition Research and Practice, 2(2), 62–62. https://doi.org/10.4162/nrp.2008.2.2.62

Lauritano, C., Ferrante, M. I., y Rogato, A. (2019). *Marine Natural Products from Microalgae: An -Omics Overview.* Marine Drugs, 17(5), 269. https://doi.org/10.3390/md17050269

Lawton, R. J., Nys, R. de, y Paul, N. A. (2013). *Selecting Reliable and Robust Freshwater Macroalgae for Biomass Applications.* PLoS ONE, 8(5), e64168–e64168. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064168

Liu, W., Wang, J., Gao, Q., Shen, W., Weng, P., Wu, Z., Qin, W., y Liu, Y. (2024). *Combined analysis of gut microbiota and metabolomics in high-fat model mice fed with Chlorella pyrenoidosa peptides.* Journal of Functional Foods, 121, 106410–106410. https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106410

Lucas, B. F., y Brunner, T. A. (2024). *Attitudes and perceptions towards microalgae as an alternative food: A consumer segmentation in Switzerland.* Algal Research, 78, 103386. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103386

-Sámano, J., Torres-Montes de Oca, A., Luqueño-Bocardo, O. I., Torres-Durán, P. V., y Juárez-Oropeza, M. A. (2018). *Spirulina maxima Decreases Endothelial Damage and Oxidative Stress Indicators in Patients with Systemic Arterial Hypertension: Results from Exploratory Controlled Clinical Trial.* Marine Drugs, 16(12), 496. https://doi.org/10.3390/md16120496

Méndez-Ancca, Renzo Pepe-Victoriano, Hebert, Zambrano-Cabanillas, A. W., Olegario Marín-Machuca, Zapata, C., Maquera, M. M., Rosmery Fernandez Huanca, Aguilera, J. G., Zuffo, A. M., y Ratke, R. F. (2023). *Physicochemical Evaluation of Cushuro (Nostoc sphaericum Vaucher ex Bornet y Flahault) in the Region of Moquegua for Food Purposes.* Foods, 12(10), 1939–1939. https://doi.org/10.3390/foods12101939

Michalak, I., y Messyasz, B. (2020). *Concise review of Cladophora spp.: macroalgae of commercial interest.* Journal of Applied Phycology, 33(1), 133–166. https://doi.org/10.1007/s10811-020-02211-3

Mubarak, M., A. Shaija, y T.V. Suchithra. (2014). *A review on the extraction of lipid from microalgae for biodiesel production.* Algal Research, 7, 117–123. https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.10.008

Naik, B., Mishra, R., Kumar, V., Mishra, S., Gupta, U., Rustagi, S., Gupta, A. K., Preet, M. S., Bhatt, S. C., y Rizwanuddin, S. (2024). *Micro-algae: Revolutionizing food production for a healthy and sustainable future.* Journal of Agriculture and Food Research, 15, 100939. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100939

Nguyen, H. C., Ngo, K. N., Tran, H. K., y Barrow, C. J. (2024). *Enzyme-Assisted Coextraction of Phenolics and Polysaccharides from Padina gymnospora.* Marine Drugs, 22(1), 42–42. https://doi.org/10.3390/md22010042

Niccolai, A., Venturi, M., Galli, V., Pini, N., Rodolfi, L., Biondi, N., D'Ottavio, M., Batista, A. P., Raymundo, A., Granchi, L., y Tredici, M. R. (2019). *Development of new microalgae-based sourdough "crostini": functional effects of Arthrospira platensis (spirulina) addition.* Scientific Reports, 9(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-55840-1

Nikolova, K., Petkova, N., Mihaylova, D., Gentscheva, G., Gavrailov, G., Pehlivanov, I., y Andonova, V. (2024). *Extraction of Phycocyanin and Chlorophyll from Spirulina by "Green Methods."* Separations, 11(2), 57. https://doi.org/10.3390/separations11020057

Noura El-Ahmady El-Naggar, Hussein, M. H., Shaaban-Dessuuki, S. A., y Dalal, S. R. (2020). *Production, extraction and characterization of Chlorella vulgaris soluble polysaccharides and their applications in AgNPs biosynthesis and biostimulation of plant growth.* Scientific Reports, 10(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-59945-w

Nur, S., Tan, J. S., Siti Nurbaya Oslan, Matanjun, P., Mohd, A., Rossita Shapawi, y Huda, N. (2021). *Haematococcus pluvialis as a Potential Source of Astaxanthin with Diverse Applications in Industrial Sectors: Current Research and Future Directions.* Molecules, 26(21), 6470–6470. https://doi.org/10.3390/molecules26216470

Podgórska-Kryszczuk., I. (2024). *Spirulina—An Invaluable Source of Macro- and Micronutrients with Broad Biological Activity and Application Potential.* Molecules, 29(22), 5387–5387. https://doi.org/10.3390/molecules29225387

Ponce, E. (2014). *Nostoc: un alimento diferente y su presencia en la precordillera de Arica.* Idesia, 32(2), 119–121. https://doi.org/10.4067/s0718-34292014000200015

Prihanto, A., Jatmiko, D., Wakayama, M. (2022). *Microalgas de agua dulce como fuentes prometedoras de alimentos: propiedades nutricionales y funcionales.* https://openmicrobiologyjournal.com/volume/16/elocator/e187428582206200/fulltext/

Rahman, N. A., Khatoon, H., Yusuf, N., Banerjee, S., Haris, N. A., Lananan, F., y Tomoyo, K. (2017). *Tetraselmis chuii biomass as a potential feed additive to improve survival and oxidative stress status of Pacific white-leg shrimp Litopenaeus vannamei postlarvae.* International Aquatic Research, 9(3), 235–247. https://doi.org/10.1007/s40071-017-0173-2

Rivera, E., José, B., y Requena, Z. (2020). *Las microalgas como fuente de nutrientes en vías de desarrollo.* Trabajo de fin de grado. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/107312/1/Las_microalgas_como_fuente_de_nutrientes_en_vias_de_d_Agudelo_Rivera_Esteban.pdf

Romay, C., Remírez, D., y González, R. (2025). *Actividad antioxidante de la ficocianina frente a radicales peroxílicos y la peroxidación lipídica microsomal.* Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, 20(1), 38–41. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0864-03002001000100008

Santana, A., Jesus, S., Larrayoz, M. A., y Filho, R. M. (2012). *Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Algal Lipids for the Biodiesel Production.* Procedia Engineering, 42, 1755–1761. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.569

Scoglio, G. D., Jackson, H. O., y Purton, S. (2024). *The commercial potential of Aphanizomenon flos-aquae, a nitrogen-fixing edible cyanobacterium.* Journal of Applied Phycology, 36(4), 1593–1617. https://doi.org/10.1007/s10811-024-03214-0

Sharma, P., Slathia, P. S., Raina, N., y Bhagat, D. (2019). *Microbial diversity in freshwater ecosystems and its industrial potential.* Freshwater Microbiology, 341–392. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817495-1.00009-8

Shen, L., Pang, S., Zhong, M., Sun, Y., Qayum, A., Liu, Y., Rashid, A., Xu, B., Liang, Q., Ma, H., y Ren, X. (2023). *A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies.* Ultrasonics Sonochemistry, 101, 106646. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646

Sirohi, R., Joun, J., Choi, H. I., Gaur, V. K., y Sim, S. J. (2021). *Algal glycobiotechnology: omics approaches for strain improvement.* Microbial Cell Factories, 20(1). https://doi.org/10.1186/s12934-021-01656-6

Su, X., Xu, J., Yan, X., Zhao, P., Chen, J., Zhou, C., Zhao, F., y Li, S. (2012). *Lipidomic changes during different growth stages of Nitzschia closterium f. minutissima.* Metabolomics, 9(2), 300–310. https://doi.org/10.1007/s11306-012-0445-1

Sun, J., Li, Q., Xu, H., y Zhang, W. (2022). *Analysis of Metabolomic Changes in Xylem and Phloem Sap of Cucumber under Phosphorus Stresses.* Metabolites, 12(4), 361. https://doi.org/10.3390/metabo12040361



Tavakoli, S., Hong, H., Wang, K., Yang, Q., Hadi Hashemi Gahruie, Zhuang, S., Li, Y., Liang, Y., Tan, Y., y Luo, Y. (2021). Ultrasonic-assisted food-grade solvent extraction of high-value added compounds from microalgae Spirulina platensis and evaluation of their antioxidant and antibacterial properties. Algal Research, 60, 102493–102493. https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102493

Tipnee, S., Ramaraj, R., y Unpaprom, Y. (2015). *Nutritional Evaluation of Edible Freshwater Green Macroalga Spirogyra varians.* Emer Life Sci Res, 1(2), 1–7. https://www.emergentresearch.org/uploads/38/1778_pdf.pdf

Valado, A., y Pereira, L. (2023). *Algae and cardiovascular-health.* Elsevier EBooks, 493–517. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-98819-3.00009-2

Wang, Y., Tibbetts, S., y McGinn, P. (2021). *Microalgae as Sources of High-Quality Protein for Human Food and Protein Supplements.* Foods, 10(12), 3002–3002. https://doi.org/10.3390/foods10123002

Webb, P., Somers, N. K., y Thilsted, S. H. (2023). *Seaweed's contribution to food security in low- and middle-income countries: Benefits from production, processing and trade.* Global Food Security, 37, 100686–100686. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100686

Wetterwald, L., Leybros, A., Fleury, G., Delrue, F., Dimitriades-Lemaire, A., Chambonniere, P., y Hertz, A. (2023). *Supercritical CO2 extraction of neutral lipids from dry and wet Chlorella vulgaris NIES 227 microalgae for biodiesel production.* Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(5), 110628. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110628

Wu, J. Y., Tso, R., Teo, H. S., y Haldar, S. (2023). *The utility of algae as sources of high value nutritional ingredients, particularly for alternative/complementary proteins to improve human health.* Frontiers in Nutrition, 10. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1277343

Zhang, K., Wan, M., Bai, W., He, M., Wang, W., Fan, F., Guo, J., Yu, T., y Li, Y. (2023). *A novel method for extraction of paramylon from Euglena gracilis for industrial production.* Algal Research, 71, 103058. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103058

Zhou, J., Wang, M., Saraiva, J. A., Martins, A. P., Pinto, C. A., Prieto, M. A., Simal-Gandara, J., Cao, H., Xiao, J., y Barba, F. J. (2022). *Extraction of lipids from microalgae using classical and innovative approaches.* Food Chemistry, 384, 132236–132236. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132236

Ziyaei, K., Abdi, F., Mokhtari, M., Daneshmehr, M. A., y Ataie, Z. (2023). *Phycocyanin as a nature-inspired antidiabetic agent: A systematic review.* Phytomedicine, 119, 154964. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2023.154964

UNIVERSIDAD
NACIONAL DE JAÉN

¡Hola Revista PAKAMUROS!

pakamuros@unj.edu.pe
https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros
Carretera Jaén - San Ignacio Km24 - sector Yanuyacu - Jaén
Módulo de Ing. Civil - 4° piso