UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA

RIIIT REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÒN E INNOVACIÒN TECNÒLOGICA

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

RIIIT Científica
Bimestre: Noviembre – Diciembre 2026
Vol. 14, No. 83



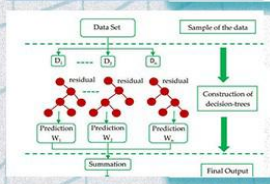
Propiedades fisicoquímicas y bioactivas de películas orales a base de biopolímeros con jugo de granada y aceite esencial de menta

Rosales-Celso, J.I., Islas-Moreno, A., Cenobio-Galindo, A.J., León-López, A., Leyva-López, R., Aguirre-Álvarez, G.



Entomofauna asociada a leguminosas forrajeras en un sitio cálido-subhúmedo en el sur de Tamaulipas, México

Meraz-Cruz, C.J., Felipe-Victoriano, M., García-Rodríguez, J.C., Silva-Martínez, K.L., Garay-Martínez, J.R.



Análisis comparativo de modelos de regresión, una alternativa para la predicción de la generación de residuos sólidos urbanos a partir de su composición

Hernández-Cruz, A., Castañeda-Gutiérrez, J.L., Hernández-Hernández, J.C., Sánchez-Olarte, J.



Evaluación experimental y estadística del sensor capacitivo SEN0193 para la medición de humedad en materiales granulares

Diaz-Peña, I., Hermosillo-Nevárez, J.J., Félix-Sámano, A.L., Zaldívar-Cadena, A.A., Castro Rubio, J.R., Félix-Medina, J.V.



Disminución de carga por viento en pared de invernadero mediante la modificación de perfil aerodinámico

Nava-Gómez, L.A., Carrera-Escobedo, J.L., Chávez-Romero, R.



Development of a low-cost integrated PWM controller and battery management system for a formula-type electric vehicle prototype

López-Meraz, R.A., Carmona-Valdés, J.C., Méndez-Ramírez, C.T., López-González, C.



Eficiencia técnica del emprendimiento universitario como parte de la Tercera Misión. Caso: Universidades Públicas Federales de México

González-Cadena, M., Pedraza-Amador, E.M., Coronado-Meneses, M., Vázquez-Rojas, A.M.



Rendimiento escolar, inteligencia emocional y resiliencia en escolares de una primaria del Estado de Campeche, México

Sánchez-Domínguez, J., López-Cisneros, A., Villanueva-Echavarría, J., Torres-Zapata, Á.



Evaluación de métodos físicos para la extracción y calidad del agua recuperada de residuos agroalimentarios

Cano-Gómez, C.I., Wong-Arguelles, C., Muñiz-Márquez, D.B., Hinojosa-López, J.I., Soni-Aradillas, C.G., Mata-Guzmán, R., Hernández-Hernández, J., Wong-Paz, J.E.



Efecto del Thidiazuron sobre el crecimiento vegetativo y la productividad de higuera (Ficus carica L.) bajo condiciones áridas

Ruisanchez-Ortega, Y., Núñez-Ramírez, F., Romero-Félix, C.S., Ruelas-Islas, J.R., Buelna-Tarín, S., Salomón-Torres, R., Valle-Gough, R., Olivas-López, C.A., Samaniego-Sandoval, L.

PERIÓDICA · Actualidad Iberoamericana · latindex · SciELO · CONAHCYT

RIIIT Científica
Bimestre: Noviembre - Diciembre 2026
Vol. 14, No. 83

Cintillo Legal

RIIIT REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, Vol. 14, No. 83. Noviembre - Diciembre 2026, es una publicación bimestral editada y publicada por Universidad Autónoma de Coahuila, boulevard Venustiano Carranza s/n colonia República Oriente, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, Tel. (844) 414 85 82, https://riiit.com.mx/, correo electrónico: publicacionesriiit@uadec.edu.mx. Editor responsable: Dra. Antonia Mtz. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-021512364600-102, ISSN: 2007-9753, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Departamento de Divulgación y Comunicación Digital de la Dirección de Investigación y Posgrado de la UAdeC, Q.F.B. Fernando García, Edificio "D" planta alta, unidad Camporredondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, Tel. (844) 414 85 82, fecha de última modificación: 01 Noviembre 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de Universidad Autónoma de Coahuila.

Tabla de Contenido

Título artículo/ Autores	Páginas
Propiedades fisicoquímicas y bioactivas de películas orales a base de biopolímeros con jugo de granada y aceite esencial de menta Rosales-Celso, J.I., Islas-Moreno, A., Cenobio-Galindo, A.J., León-López, R., Leyva-López, A., Aguirre-Álvarez. A.	1 – 26
Entomofauna asociada a leguminosas forrajeras en un sitio cálido-subhúmedo en el sur de Tamaulipas, México Meraz-Cruz, C.J., Felipe-Victoriano, M., García-Rodríguez, J.C., Silva-Martínez, K.L., Garay-Martínez, J.R.	27 - 39
Análisis comparativo de modelos de regresión, una alternativa para la predicción de la generación de residuos sólidos urbanos a partir de su composición Hernández-Cruz, A., Castañeda-Gutiérrez, J.L., Hernández-Hernández, J.C., Sánchez-Olarte, J.	40 – 55
Evaluación experimental y estadística del sensor capacitivo SEN0193 para la medición de humedad en materiales granulares Diaz-Peña, I., Hermosillo-Nevárez, J.J., Félix-Sámano, A.L., Zaldívar-Cadena, A.A., Castro Rubio, J.R., Félix-Medina, J.V.	56 – 79
Disminución de carga por viento en pared de invernadero mediante la modificación de perfil aerodinámico Nava-Gómez, L.A., Carrera-Escobedo, J.L., Chávez-Romero, R.	80 – 92
Development of a low-cost integrated PWM controller and battery management system for a formula-type electric vehicle prototype López-Meraz, R.A., Carmona-Valdés, J.C., Méndez-Ramírez, C.T., López-González, C.	93 - 117
Eficiencia técnica del emprendimiento universitario como parte de la Tercera Misión. Caso: Universidades Públicas Federales de México González-Cadena, M., Pedraza-Amador, E.M., Coronado-Meneses, M.	118 - 131

Rendimiento escolar, inteligencia emocional y resiliencia en escolares de una primaria del Estado de Campeche, México Sánchez-Domínguez, J., López-Cisneros, M.A., Villanueva-Echavarría, J., Torres-Zapata, Á.	132 - 152
Evaluación de métodos físicos para la extracción y calidad del agua recuperada de residuos agroalimentarios Cano-Gómez, C.I., Wong-Arguelles, C., Muñiz-Márquez, D.B., Hinojosa-López, J.I., Soni-Aradillas, C.G., Mata-Guzmán, R., Hernández-Hernández, J., Wong-Paz, J.E.	153 - 173
Efecto del Thidiazuron sobre el crecimiento vegetativo y la productividad de higuera (*Ficus carica* L.) bajo condiciones áridas Ruisanchez-Ortega, Y., Núñez-Ramírez, F., Romero-Félix, C.S., Ruelas-Islas, J.R., Buelna-Tarín, S., Salomón-Torres, R., Valle-Gough, R., Olivas-López, C.A., Samaniego-Sandoval, L.	174 - 185

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Propiedades fisicoquímicas y bioactivas de películas orales a base de biopolímeros con jugo de granada y aceite esencial de menta

Physicochemical and bioactive properties of biopolymer-based oral films incorporating pomegranate juice and peppermint essential oil

Rosales-Celso, J.I.[a], Islas-Moreno, A.[a], Cenobio-Galindo, A.J.[a], León-López, A.[b], Leyva-López, R.[b], Aguirre-Álvarez, G.[a,c]*

[a] Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Av. Universidad No. 133. Col. San Miguel Huatengo. C. P. 43775. Santiago Tulantepec, Hidalgo. México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2240-1134, https://orcid.org/0000-0002-1693-564X, https://orcid.org/0000-0003-3098-0487, https://orcid.org/0000-0001-7652-2647*.

[b] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza Av. Tecnológico S/N, Col. el Huasteco, Ciudad Lázaro Cárdenas, Puebla 73049, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9781-9423, https://orcid.org/0000-0002-0307-0325.

[c] Uni-Collagen S.A. de C.V., Arnulfo González No. 203, El Paraíso, Tulancingo C.P. 43684, Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7652-2647*.

jenniitzelr@gmail.com; asael_islas@uaeh.edu.mx; antonio_cenobio@uaeh.edu.mx; arely.leon@itsvc.edu.mx, roman.leyva@itsvc.edu.mx; aguirre@uaeh.edu.mx*.

Innovación tecnológica: Formulación de películas orales con alta capacidad antioxidante mediante la incorporación sinérgica de compuestos bioactivos naturales.

Área de aplicación industrial: Aplicable en la industria de alimentos funcionales y confitería saludable.

Recibido: 30 julio 2026
Aceptado: 21 agosto 2026

Abstract

Oral films (OFs) were developed using gelatin (2%), maltodextrin (1%), and Tween 80 (0.5%), incorporating pomegranate juice at three different concentrations—30% (OF1), 40% (OF2), and 50% (OF3)—along with peppermint essential oil (2%), to characterize their physicochemical (proximal analysis, pH, thickness, degradation time, and color) and functional (antioxidant activity) properties. The recorded thicknesses ranged from 0.04 to 0.05 mm, while the pH varied from 6.83 ± 0.26 to 3.56 ± 0.38, indicating thin films with an acidic character. Regarding the colorimetric analysis, the obtained parameters were: L* values between 87.52 ± 1.03 and 74.86 ± 1.42, a* values between 0.40 ± 0.18 and 14.61 ± 1.00, and b* values between 5.41 ± 0.24 and 1.25 ± 0.20, reflecting

luminous matrices with a reddish hue and a slight tendency toward yellow. The dissolution time ranged from 28.33 ± 3.51 to 52.33 ± 3.06 s, a behavior associated with the hydrophilic nature of the films. This trend was also reflected in the thermal analysis, where the glass transition temperature (T g) was 93.89 °C for formulation OF1 and decreased to 63.07 °C for OF3, suggesting lower polymeric matrix stability in the latter. Fourier-transform infrared (FTIR) spectra showed no significant variations among the evaluated formulations. Finally, the free radical inhibition capacity, determined through ABTS (89.70 ± 0.54%) and DPPH (68.14 ± 1.57%) assays for treatment OF3, revealed an antioxidant activity attributable to the presence of phenolic compounds, flavonoids, and anthocyanins.

Keywords: biopolymers, oral films, pomegranate, antioxidant activity.

Resumen

Se desarrollaron películas orales (OF) formuladas con gelatina (2%), maltodextrina (1%) y tween 80 (0.5%), a las que se incorporó jugo de granada en tres distintas proporciones: 30% (OF1), 40% (OF2) y 50% (OF3) junto con aceite esencial de menta (2%), con el fin de caracterizar sus propiedades fisicoquímicas (análisis proximal, espesor, pH, tiempo de desintegración y color) y funcionales (actividad antioxidante). Los espesores registrados se ubicaron entre 0.04 y 0.05 mm, mientras que el pH varió de 6.83±0.26 a 3.56±0.38, lo cual es indicativo de películas delgadas de carácter ácido. Respecto a la determinación colorimétrica, los parámetros obtenidos fueron: L entre 87.52±1.03 y 74.86±1.42, a* entre 0.40±0.18 y 14.61±1.00, y b* entre 5.41±0.24 y 1.25±0.20, valores que reflejan matrices luminosas con tonalidad rojiza y una leve inclinación hacia el amarillo. Por su parte, el tiempo de disolución fluctuó entre 28.33±3.51 y 52.33±3.06 s, comportamiento asociado al carácter hidrofílico de las películas, tendencia que también se manifestó en el análisis térmico: la temperatura de transición vítrea (Tg) fue de 93.89 °C en la formulación OF1 y descendió hasta 63.07 °C en OF3, lo que sugeriría una menor estabilidad de la matriz polimérica en esta última. Los espectros obtenidos mediante FTIR no evidenciaron variaciones significativas entre las distintas formulaciones evaluadas. Finalmente, la capacidad de inhibición de radicales libres, determinada mediante los ensayos de ABTS (89.70±0.54%) y DPPH (68.14±1.57%) en el tratamiento OF3, evidenció actividad antioxidante atribuible a la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides y antocianinas.

Palabras clave: biopolímeros, películas orales, granada, actividad antioxidante.

1. Introducción

Las películas de disolución oral también se reconocen en la Farmacopea de los Estados Unidos (USP32-NF27) como láminas delgadas que se introducen en la boca y que pueden contener una o más capas de sustancias activas [1]. Estas láminas delgadas y flexibles surgieron a principios del año 2002 con un espesor de 5-150 µm y la cualidad de disolverse rápidamente (20-60 s) en presencia de la saliva [2, 3]. Gracias a su capacidad de desintegrarse rápidamente, las películas orales se introdujeron comercialmente como productos refrescantes

bucales destinados a atender casos de halitosis [4]. En la formulación de las películas orales intervienen diversos componentes, entre ellos polímeros, plastificantes, ingredientes activos, edulcorantes, agentes estimulantes de la salivación, saborizantes y colorantes [5, 6]. Dentro de los principales polímeros se encuentran aquellos de naturaleza hidrofílica, como la gelatina [2, 7, 8] que es obtenida a partir de la hidrólisis parcial del colágeno presente en huesos, tendones y pieles de animales (bovinos, porcinos, ovinos, aves y peces). La gelatina es una proteína ampliamente utilizada en la formulación de películas, gracias a propiedades como su biodegradabilidad, no toxicidad, solubilidad acuosa y biocompatibilidad [9, 10]. Sin embargo, suelen ser frágiles en condiciones específicas de temperatura (10 a 40 °C) y humedad (50 a 70 % HR). Además, suelen hincharse al estar en contacto con agua, es por ello que se ha reportado que la gelatina se ha combinado con otros polímeros, para mejorar las propiedades de estas [11, 12]. La maltodextrina, por ejemplo, es un carbohidrato que se obtiene mediante hidrólisis parcial del almidón ya sea por vía ácida o enzimática y está constituida por unidades de D-glucosa enlazadas mediante uniones glucosídicas α-1,4 [13, 14]. Diversos estudios han combinado la maltodextrina con otros polímeros para el desarrollo de películas orales, aprovechando su elevada solubilidad acuosa y su baja viscosidad, propiedades que contribuyen a acelerar su desintegración [15-17]. Debido a esta rápida disolución, las películas orales resultaron especialmente adecuadas para la administración de ingredientes farmacéuticos en pacientes pediátricos y geriátricos, poblaciones que con frecuencia presentan dificultades para deglutir tabletas, cápsulas o jarabes [18, 19]. Diversas investigaciones previas han incorporado productos farmacéuticos naturales en películas orales, confiriéndoles actividad antiinflamatoria, anticancerígena, anestésica, antibacteriana y antioxidante; dichos compuestos pueden obtenerse de distintas fuentes vegetales y frutales, entre ellas la granada (*Punica granatum L.*).

Entre las propiedades de la granada se encuentra su riqueza en vitaminas, minerales y compuestos bioactivos [20-22], destacando particularmente los polifenoles (antocianinas, flavonoles y taninos), a los cuales se atribuye principalmente su capacidad antioxidante [23-26]. Adicionalmente, las películas orales admiten la incorporación de otros ingredientes, entre ellos los aceites esenciales, siendo el de menta un ejemplo representativo. Este aceite se caracteriza por contener compuestos considerados bioactivos, tales como mentol y mentona. [27, 28].

Aunque diversas frutas han sido empleadas como fuente de compuestos bioactivos en el desarrollo de películas comestibles, la granada (*Punica granatum L.*) destaca por concentrar una de las mayores capacidades antioxidantes reportadas entre los frutos comúnmente estudiados, atribuible principalmente a los elagitaninos (punicalaginas) y antocianinas presentes en el arilo [18-21], además de constituir un cultivo de relevancia agroindustrial en regiones como Tasquillo, Hidalgo, lo que favorece su aprovechamiento como materia prima local. No obstante, la mayoría de los trabajos que han incorporado compuestos bioactivos de granada en películas comestibles han utilizado extractos o polvos obtenidos a partir de la cáscara [68, 70, 86], mediante procesos que habitualmente requieren solventes orgánicos y etapas adicionales de purificación y secado, lo que incrementa el costo y la complejidad del proceso. En contraste, el empleo directo del jugo de granada, obtenido únicamente mediante extracción mecánica y pasteurización, permite conservar la matriz natural del fruto, con sus azúcares, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos en su

proporción original, además de simplificar la obtención del ingrediente activo y de aportar potencialmente un efecto plastificante a la matriz polimérica. Esta aproximación ha sido documentada de forma parcial y únicamente en combinación con quitosano [76], por lo que, hasta donde se tiene conocimiento, no existen reportes de películas orales a base de gelatina y maltodextrina formuladas con jugo, y no extracto, de granada.

Por su parte, la incorporación del aceite esencial de menta responde a un doble criterio, funcional y sensorial: se ha reportado que el mentol y la mentona le confieren actividad antibacteriana y antibiofilm de interés para aplicaciones orales [22, 23], y su adición en películas a base de gelatina y quitosano ha mostrado efectos favorables sobre las propiedades de barrera y la capacidad antioxidante de la matriz [74, 82]. Adicionalmente, su carácter refrescante contribuye a atenuar la astringencia y acidez propias de los compuestos fenólicos de la granada, mejorando así la aceptabilidad sensorial del producto. Si bien la granada y la menta han sido incorporadas de manera independiente en distintos sistemas de películas comestibles, no se identificaron reportes que evalúen su combinación en una película oral a base de gelatina y maltodextrina, ni que caractericen de manera integral sus propiedades fisicoquímicas, térmicas y bioactivas. Este vacío en el conocimiento constituye la principal justificación del presente estudio.

En este contexto, esta investigación se propuso como objetivo la obtención y la caracterización, tanto fisicoquímica como de la actividad funcional, de una película oral formulada con gelatina, maltodextrina, incorporando jugo de granada (*Punica granatum L.*), aceite esencial de menta y tween como emulsionante.

2. Materiales y equipos

Se emplearon gelatina de piel de cerdo de 275° Bloom (Wilson Porcin Skin), maltodextrina (Mi Granero, México), tween 80 (Meyer, México) y aceite esencial de menta comestible (Naturaly, México), además de granadas de la variedad Wonderful, recolectadas para la obtención del jugo durante el periodo de junio a agosto del 2024 en el municipio de Tasquillo, Hidalgo, México.

3. Métodos experimentales

Obtención del jugo de granada

Las granadas se lavaron con agua destilada, se desinfectaron con hipoclorito de sodio a 200 ppm y se cortaron por la mitad para separar los arilos de la cáscara. El jugo se extrajo colocando manualmente los arilos en un extractor convencional, se pasteurizó a 65°C por 30 min y se almacenó en botellas ámbar a -8±2°C hasta su uso [29].

Caracterización del jugo de granada

El jugo de granada fue sometido a un análisis proximal que comprendió las siguientes determinaciones: °Brix (refractómetro digital), pH (método 981.12), humedad (método gravimétrico 925.45), proteína (método de Kjeldahl), grasa (extracción por Soxhlet), cenizas (método 940.26) y carbohidratos totales (cálculo por diferencia) [30].

Actividad antioxidante del jugo de Granada

Determinación de Fenoles totales

El contenido fenólico se determinó por el método de Folin-Ciocalteu [31]. Se mezclaron 500 µl de jugo con 2.5 ml de reactivo Folin-Ciocalteu diluido (1:10), dejando incubar 5 min; posteriormente se añadieron 2.5 ml de solución de Na_2CO_3 al 7.5% y se incubó 2 h en oscuridad a 25°C. La absorbancia se midió a 760 nm en un espectrofotómetro (JENWAY, Modelo 6705,

Dunmow, UK), con base en una curva de calibración de ácido gálico, reportando el contenido de fenoles totales en miligramos equivalentes de ácido gálico por litro de jugo (mg EAG/L).

Determinación de Flavonoides

Siguiendo la metodología de Arvouet-Grand, Vennat [32]. Se preparó una solución metanólica de $AlCl_3$ al 2%, mezclando 2 ml de jugo de granada diluido en agua destilada (1:10) con 2 ml de $AlCl_3$, y se dejó incubar 20 min en oscuridad a 25°C. La absorbancia se leyó a 415 nm en un espectrofotómetro (JENWAY, Modelo 6705, Dunmow, UK), con base en una curva de calibración de quercetina, expresando los resultados en mg EQ/L de jugo.

Determinación de Antocianinas

El contenido de antocianinas se determinó a través del método de diferencia de pH [33], para lo cual se prepararon dos buffers: uno a pH 1 (KCl 0.025 M) y otro a pH 4.5 ($C_2H_3NaO_2$ 4 M). Se tomaron alícuotas de 500 µl de jugo de granada, diluido previamente en agua (1:10), y se combinaron con 2 ml de cada buffer en tubos independientes. Después de agitar las muestras y dejarlas incubar por 15 min, se registró la absorbancia a 510 y 700 nm para ambos buffers. Con estos valores, se calculó la absorbancia final aplicando la Ec. (1):

$$A=(A_{510nm}-A_{700nm})_{pH1} - (A_{510nm}-A_{700nm})_{pH4.5} \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

El contenido de antocianinas se expresó en mg/L mediante la **Ec. (2)**:

$$\text{Antocianina monomérica } \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{A*PM*FD*100}{\varepsilon*1} \quad \textbf{(Ec. 2)}$$

Donde:
A= Diferencia de absorbancias pH 1- pH 4.5
PM= Peso molecular de Cianidina-3 (449.2 g/mol)
FD= Factor de dilución
ε= Absortividad molar (26,900 L/cm/mg)

Determinación de la actividad antioxidante por inhibición del radical 2,2'-azino-bis 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico (ABTS).

Siguiendo la metodología reportada por Re, Pellegrini [34], se evaluó la actividad antioxidante del jugo de granada. El procedimiento inició con la reacción entre el radical ABTS (7 µM) y persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$, 2.45 µM) en proporción 1:1, la cual se mantuvo protegida de la luz, con agitación constante, a temperatura ambiente y durante 16 h. El radical resultante fue posteriormente diluido con etanol al 20% hasta obtener una absorbancia de 0.7±0.02 a 734 nm, valor medido mediante espectrofotometría (JENWAY, Modelo 6705, Dunmow, UK). Para la determinación de la actividad antioxidante, se combinaron 2 ml de la solución del radical estabilizado con 200 µl de jugo de granada, permitiendo que la reacción se desarrollara en oscuridad durante 6 min a temperatura ambiente. Transcurrido ese tiempo, se registró la absorbancia a 734 nm, y el porcentaje de inhibición del radical ABTS se calculó mediante la Ec. (3):

$$\% \text{ Inhibición} = \left(\frac{\text{Absorbancia inicial-Absorbancia final}}{\text{Absorbancia final}}\right) \text{ x } 100 \quad \textbf{(Ec. 3)}$$

Determinación de la actividad antioxidante por inhibición del radical 1,1 -difenil-2-picrilhidrazil (DPPH).

Siguiendo la metodología propuesta por Brand-Williams, Cuvelier [35], se determinó la actividad antioxidante mediante la preparación de una solución madre de DPPH ($6.1x10^{-5}$ M) diluida en metanol al 80%, ajustando la absorbancia a 0.7±0.02 a 515 nm de longitud de onda. Para el ensayo, se mezclaron 2.7 ml de la solución de DPPH estabilizada con 300 µl de jugo de granada, dejando reaccionar la mezcla por 30 min en condiciones de oscuridad. Finalmente, el porcentaje de inhibición del radical libre DPPH se determinó mediante la Ec. (4):

$$\% \text{ Inhibición} = \left(\frac{\text{Absorbancia inicial-Absorbancia final}}{\text{Absorbancia final}}\right) \text{x } 100 \qquad \textbf{(Ec. 4)}$$

Elaboración de las películas orales refrescantes

Las películas orales se elaboraron mediante el método de casting, con base en la metodología reportada por Borges, Silva [36] introduciendo algunas modificaciones. En primer lugar, se preparó la solución de gelatina y maltodextrina en agua destilada a 60°C por 10 min. De forma independiente, se preparó la solución de Tween 80 y aceite esencial de menta, disueltos en agua destilada con agitación constante a 40°C por 10 min. La cantidad de agua destilada usada para preparar ambas soluciones fue ajustada a la que se indicó en la tabla 1. Las soluciones se dejaron enfriar hasta 35°C, momento en el cual se mezclaron y se adicionó el jugo de granada manteniendo la agitación constante por 10 min a 35°C. La mezcla final se vació en cajas Petri de 9 cm de diámetro, dejándose secar a una temperatura de 25±2°C durante 24 h. Una vez finalizado el secado, las películas fueron despegadas de la placa y almacenadas en un desecador con sílica.

Tabla 1. Formulaciones de las películas orales.

Películas orales	Gelatina (%)	Maltodextrina (%)	Tween 80 (%)	Menta (%)	Jugo de granada (mL)	Agua destilada (mL)
Blanco	2	1	0.5	2	--	10
OF1	2	1	0.5	2	3	7
OF2	2	1	0.5	2	4	6
OF3	2	1	0.5	2	5	5

Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de las películas orales refrescantes

Análisis proximal de películas orales

Se llevó a cabo la determinación de humedad conforme al método 925.45, así como del contenido de proteína mediante el método de Kjeldahl, grasa a través de extracción por Soxhlet, cenizas siguiendo el método 940.26, y carbohidratos totales calculados por diferencia [30].

Espesor

Para la determinación del espesor, las películas se cortaron en tiras de 2x3 cm, midiéndose el grosor en seis puntos distintos con ayuda de un micrómetro digital (Mitutoyo, Japón), a partir de lo cual se

obtuvo el espesor promedio de 10 películas orales refrescantes por cada tratamiento [37].

pH de la película

La determinación del pH se realizó humedeciendo una muestra de película en 25 ml de agua destilada por un lapso de 2 min, para posteriormente poner en contacto el electrodo con la superficie humedecida y registrar la lectura. El procedimiento se efectuó por triplicado[38].

Color

Siguiendo la metodología propuesta por Himani, Kumar [39], el color se determinó con ayuda de un colorímetro CM-508d (Minolta, Tokio, Japón), evaluando los parámetros L (luminosidad), a* (positivo hacia el rojo, negativo hacia el verde) y b* (positivo hacia el amarillo, negativo hacia el azul) de cada muestra. Se realizaron tres mediciones por cada muestra analizada.

Tiempo de disolución de las películas orales refrescantes

Siguiendo la metodología de Himani, Kumar [39], a la cual se incorporaron algunas modificaciones. El ensayo requirió la preparación de un buffer de fosfato (2.38 g de Na_2HPO_4, 0.19 g de KH_2PO_4 y 8 g de NaCl por litro de agua destilada), ajustado a pH 6.8 con HCl. Fragmentos de película de 2x3 cm fueron sumergidos en 25 ml de dicho buffer, bajo agitación suave y a 37±0.5°C. El tiempo de disolución se determinó registrando el intervalo transcurrido entre el inicio de la ruptura de la película y su disolución completa.

Propiedades térmicas por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Para determinar la estabilidad térmica de las películas orales refrescantes, se utilizó un calorímetro diferencial de barrido (DSC) serie Q2000 con intercooler RCS 90 (TA Instruments; New Castle, Delaware, EE. UU.), operando bajo atmósfera de nitrógeno. Las muestras, de 5±0.1 mg, se analizaron con un flujo constante de nitrógeno de 10 ml/min, dentro de un rango térmico de 25 a 200 °C, a una velocidad de calentamiento de 10°C/min. El equipo se calibró previamente utilizando indio como metal de referencia (punto de fusión: 156.6°C; ΔH=28.5 J/g). A partir de la primera derivada de los termogramas se determinó la temperatura de transición vítrea (Tg), la cual corresponde a la línea base del termograma DSC durante la transición vítrea, específicamente en el punto medio de dicho tramo [40].

Análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Para caracterizar espectralmente las películas orales delgadas, se utilizó un espectrofotómetro FTIR con accesorio de reflectancia total atenuada [41], que garantizó el contacto óptico necesario entre los componentes de la muestra. Se realizaron un total de 16 escaneos dentro del intervalo de 400 a 4000 cm^{-1}, empleando una resolución de 2 cm^{-1} y condiciones de temperatura ambiente [39].

Determinación de actividad antioxidante de las películas orales

Extracción de compuestos bioactivos de las películas orales

Siguiendo la metodología propuesta por Espino-Manzano, León-López [42], se llevó a cabo la extracción de compuestos bioactivos. Un gramo de película se disolvió en 10 ml de agua destilada y se sometió a baño ultrasónico (20°C, 30 min), seguido de centrifugación a 11,000 rpm a 4°C durante 20 min. El sobrenadante resultante se resguardó en un tubo de ensayo tapado y protegido de la luz, utilizándose posteriormente para la evaluación de su capacidad antioxidante a través de la determinación de fenoles [31], flavonoides [32], antocianinas [33] e

inhibición de radicales ABTS [34] y DPPH [35].

Análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente al azar, considerando tres repeticiones por experimento. Para el análisis estadístico se aplicó un ANOVA, complementado con pruebas de Tukey ($p \leq 0.05$). El procesamiento de los datos se llevó a cabo mediante el software SPSS v25.

4. Resultados y discusiones

Caracterización químico proximal del jugo de granada

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos del análisis químico proximal. Los valores registrados fueron: 90.63±2.28% de humedad, 0.42±0.12% de proteína, 0.18±0.01% de grasa, 0.20±0.0% de cenizas y 8.56±2.18% de carbohidratos. Estos resultados son consistentes con los reportados por Uzuner [24], quien encontró valores de 85.95% de humedad, 0.15% de proteína, 0.29% de grasa, 0.1% de fibra y 12.65% de carbohidratos al analizar fisicoquímicamente distintos cultivares de granada. Cabe señalar que el contenido de fibra no fue evaluado en este estudio, dado que el jugo se obtuvo exclusivamente a partir de los arilos de la granada; al respecto, diversas investigaciones señalan que la fibra en las frutas se concentra principalmente en la cáscara [43].

Por otra parte, el jugo de granada mostró un pH de 2.91±0.02 y 15.72±0.07 °Brix, valores ubicados dentro del intervalo de pH 2.8-3.6 y 13-16 °Brix reportado por Kandylis and Kokkinomagoulos [44] para la variedad Wonderful, aunque inferiores a los valores de pH 3.49 y 18.2 °Brix señalados por Labbe, Ulloa [45] para la misma variedad. Estas diferencias podrían atribuirse al grado de maduración de la fruta y al método de extracción empleado, factores que en conjunto influyen en las características finales del producto [46].

Tabla 2. Caracterización del jugo de granada.

Parámetro	Contenido
pH	2.91 ± 0.02
°Brix	15.72 ± 0.07
Humedad (%)	90.68 ± 2.28
Proteína (%)	0.42 ± 0.12
Grasa (%)	0.18 ± 0.01
Fibra (%)	N/D
Cenizas (%)	0.20 ± 0.03
Carbohidratos (%)	8.52 ± 2.36

Actividad antioxidante del jugo de granada

El jugo de granada destaca como fuente de compuestos bioactivos, entre ellos, ácidos fenólicos, flavonoides y antocianinas, cuyo aporte antioxidante ha impulsado el aumento en su consumo [47].

Los resultados de la actividad antioxidante del jugo de granada se muestran en la tabla 3, donde se observó una inhibición del radical ABTS de 99.10±0.33% y del radical DPPH de 90.58±2.98%. Ambos porcentajes fueron superiores a los reportados por Bopitiya and Madhujith [48] , cuyo rango de inhibición para ABTS osciló entre 72.73 y 93.1 %. Por su parte, Kaoutar, Loubna [49] registraron una inhibición del 53% para el radical DPPH en jugos obtenidos de arilos congelados correspondientes a las variedades "Sefri" y "Wonderful".

Dicha capacidad antioxidante puede atribuirse principalmente a compuestos fenólicos, entre los que se incluyen flavonoides, como los taninos hidrolizables y antocianinas [50].

Se registró un contenido de fenoles totales de 1117.33±5.00 mg EAG/L, valor que se ubica dentro del intervalo reportado por Gözlekçi, Saraçoğlu [51] quienes obtuvieron entre 784.4 y 1551.1 mg EAG/L en jugos de granada elaborados a partir de arilos. No

obstante, este resultado fue menor al señalado por Hmid, Elothmani [52] quienes al comparar el contenido de compuestos fenólicos entre diferentes cultivares de granada, reportaron valores de 1284 a 9476 mg EAG/L.

Respecto al contenido de flavonoides totales, se obtuvo un valor de 572.47±17.09 mg EQ/L, cifra que se asemeja al rango reportado por El Kar, Ferchichi [53], quienes registraron valores de 135 a 636 mg EQ/L en jugos de granada correspondientes a diversas variedades del Mediterráneo. No obstante, Habib, El-Gendi [54] documentaron valores más bajos, de 82.58 mg EQ/L, en concentrados de jugo de granada.

El jugo de granada analizado registró 177.92±7.14 mg C3G/L de antocianinas, cifra prácticamente equivalente a los 178.79 mg C3G/L descritos por Hmid, Elothmani [52] para la variedad Wonderful, lo que apunta a un perfil de antocianinas similar entre ambas muestras. En contraste, el valor obtenido fue considerablemente menor al documentado por Gil, Tomás-Barberán [55], quienes reportaron 387.4 mg C3G/L en jugos de esa misma variedad,

Labbe y colaboradores [45] señalan que la variedad, el grado de maduración y el método de extracción determinan las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del jugo, pues el prensado del fruto completo extrae compuestos bioactivos de la cáscara [52], aumentando el contenido fenólico, como lo mencionan Gözlekçi, Saraçoğlu [51].

Tabla 3. Evaluación de actividad antioxidante del jugo de granada *(P. granatum)* obtenido por método de prensado manual.

Evaluación antioxidante	Contenido
Inhibición radical ABTS	99.10 ± 0.33%
Inhibición radical DPPH	90.58 ± 2.98%
Fenoles totales	1117.33 ± 5.00 (mg EAG/L)
Flavonoides totales	572.47 ± 17.09 (mg EQ/L)
Antocianinas totales	177.92 ± 7.14 (mg C3G/L)

Propiedades fisicoquímicas de las películas orales refrescantes

Análisis proximal en películas orales

El análisis proximal (Tabla 4) evidenció que la incorporación de jugo de granada modificó las propiedades de las películas obtenidas. En relación con el contenido de humedad, se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los distintos tratamientos, registrándose el valor más alto en la formulación OF3, con 0.176±0.017%, en comparación con el blanco, que presentó 0.017±0.001%. Cabe resaltar que este parámetro tendió a incrementarse conforme aumentaba la proporción de jugo de granada en las formulaciones, comportamiento que podría asociarse a un mayor aporte de compuestos hidrofílicos en las mezclas [44].

Tabla 4. Análisis proximal en películas orales.

Películas orales	% Humedad	% Proteína	% Grasa	% Cenizas	% Carbohidratos
Blanco	0.017 ± 0.001^{d}	31.659 ± 0.498^{a}	1.661 ± 0.116^{a}	0.657 ± 0.003^{b}	66.007 ± 0.586^{c}
OF1	0.103 ± 0.009^{c}	13.955 ± 0.642^{b}	1.706 ± 0.117^{a}	1.222 ± 0.111^{a}	83.015 ± 0.809^{b}
OF2	0.144 ± 0.127^{b}	11.000 ± 0.191^{c}	1.856 ± 0.118^{a}	1.293 ± 0.096^{a}	85.707 ± 0.211^{a}
OF3	0.176 ± 0.017^{a}	10.134 ± 0.118^{c}	1.712 ± 0.119^{a}	1.232 ± 0.108^{a}	86.746 ± 0.260^{a}

$^{a, b, c, d}$ indican diferencias significativas por prueba Tukey ($p \leq 0.5$).

El análisis reveló diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el contenido proteico entre las distintas formulaciones. El tratamiento blanco registró la mayor concentración, con 31.66±0.50%, mientras que la formulación OF3 presentó el valor más bajo, con 10.13±0.2%. Esta tendencia resulta congruente con lo documentado por Aykin-Dinçer, Koç [56] , quienes reportaron un contenido de proteína de 88.45% en gelatina bovina comercial. Un aspecto destacable es que, a medida que se incrementó la proporción de jugo de granada en las formulaciones, el contenido proteico disminuyó progresivamente, fenómeno que podría atribuirse a un proceso de desnaturalización de las proteínas inducido por las condiciones ácidas del jugo [57].

El contenido lipídico no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) entre tratamientos; los valores fluctuaron entre 1.66±0.12% en el blanco y 1.86±0.12% en OF2, posiblemente debido al aporte graso del jugo de granada, de 0.18%, y a los ácidos grasos del aceite esencial de menta.

El porcentaje de cenizas se mantuvo estadísticamente similar ($p > 0.05$) entre las formulaciones elaboradas con jugo de granada, diferenciándose únicamente del blanco, que registró el nivel más bajo, con 0.66±0.00%. Este patrón sugiere una asociación con el aporte mineral tanto del jugo de granada, con 0.20±0.03%, como de la gelatina incorporada en las mezclas.

El porcentaje de carbohidratos fue mayor en los tratamientos adicionados con jugo de granada en comparación con el blanco, alcanzando OF3 el valor más alto, con 86.75±0.26%, frente a 66.01±0.59% registrado por el blanco. Este incremento puede atribuirse a la presencia del jugo de granada y de la maltodextrina, esta última un carbohidrato compuesto por polímeros de glucosa derivados de la hidrólisis de almidones provenientes de fuentes como el maíz o el trigo [13]. Es pertinente discutir el posible riesgo cariogénico asociado al contenido de carbohidratos fermentables del jugo de granada (8.52%; 15.72°Brix, Tabla 2), dado que azúcares como la glucosa y la fructosa pueden ser metabolizados por bacterias cariogénicas (p. ej., *Streptococcus mutans*), generando ácidos orgánicos que favorecen la desmineralización del esmalte. No obstante, este riesgo podría verse parcialmente contrarrestado por la actividad antibacteriana del aceite esencial de menta frente a *S. mutans* [27, 28] y por el breve tiempo de disolución de la película (28.33-52.33 s), que limita el tiempo de exposición del esmalte al sustrato fermentable frente a productos de disolución prolongada.

Los resultados del análisis proximal obtenidos para las películas orales resultaron congruentes con lo reportado por Rodríguez, Sibaja [58], quienes, al caracterizar películas comestibles elaboradas con papaya, *Moringa oleífera* y ácido ascórbico, evidenciaron un notable valor nutricional asociado a la incorporación de compuestos antioxidantes, con contenidos de carbohidratos que oscilaron entre 71 y 85 %. De manera similar, Navas Guzmán and Espitia [59], en películas comestibles elaboradas a partir de frutas tropicales colombianas (papaya, maracuyá y piña), reportaron valores igualmente elevados de carbohidratos, situados entre 64.7 y 65.3 %.

Espesor

Los datos de espesor de las películas orales se muestran en la Figura 1, donde el análisis reveló diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre el blanco y las formulaciones con jugo de granada. Se registraron valores de 0.04±0.00 mm para el blanco y 0.05±0.00 mm para OF3, cifras que se enmarcan dentro del intervalo característico de las películas orales según Bala, Pawar [2], quienes

establecen un rango de 0.005 a 0.2 mm. Esto podría favorecer a una mayor penetración de moléculas de agua hacia el interior de la matriz polimérica, contribuyendo así a acelerar el proceso de desintegración de la película.

Las variaciones en el espesor asociadas a la incorporación de jugo de granada podrían explicarse por una alteración en los enlaces intermoleculares, provocada por los sólidos presentes en el jugo. Un comportamiento comparable fue reportado por Lim and Hadinoto [60] en películas a base de almidón adicionadas con distintas concentraciones de curcumina, quienes registraron espesores de 0.3 a 0.35 mm, atribuidos a la acumulación de curcumina dentro de las cadenas poliméricas de la película. En la misma línea, Garcia, Borges [61] reportaron espesores de 0.069 a 0.071 mm en películas orales elaboradas con gelatina y almidón pregelatinizado, incorporando distintas concentraciones de acerola.

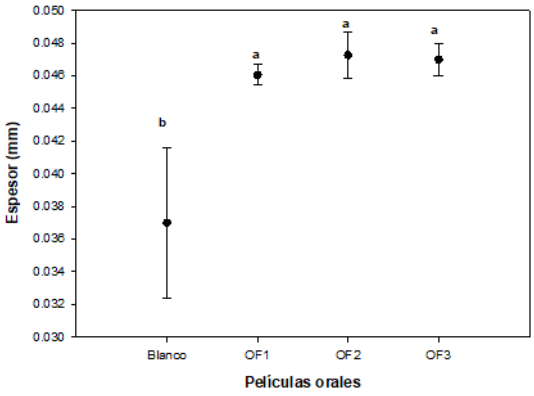


Figura 1. Espesor en películas orales.
[a, b] indican diferencias significativas por prueba Tukey (p≤0.5).

pH de películas orales

En relación con el pH, el blanco presentó un valor de 6.83±0.26, el cual disminuyó a 3.56±0.38 con la incorporación de jugo de granada, sin observarse diferencias significativas (p>0.05) entre los distintos tratamientos, tal como se muestra en la Figura 2. Esta reducción podría explicarse por el pH del jugo de granada, reportado en 2.91±0.02 [44]. Cabe discutir la implicación del pH ácido obtenido (hasta 3.56±0.38 en las formulaciones activas) sobre la salud del esmalte dental, dado que valores inferiores al pH crítico de 5.5 favorecen la desaturación salival respecto a la hidroxiapatita, promoviendo la desmineralización del esmalte. Si bien el reducido tiempo de contacto propio de una película de disgregación rápida (28.33-52.33 s) y la capacidad amortiguadora de la saliva podrían atenuar este efecto frente a una exposición prolongada, un uso frecuente o repetido del producto podría representar un riesgo erosivo acumulativo, de forma análoga a lo reportado para jugos cítricos y golosinas ácidas.

Neagu, Ghitea [62] en su estudio sobre películas orales elaboradas con extractos de diente de león y manzanilla, reportaron valores de pH cercanos a la neutralidad, resultado similar al obtenido por Bharti, Mittal [63] en películas con nanopartículas de buspirona. De acuerdo con estos autores, se recomienda que las películas orales presenten valores de pH próximos a la neutralidad, con el fin de evitar irritación en la mucosa bucal [2]. No obstante, Pimparade, Vo [64] documentaron valores de pH entre 2.9 y 3.4 en películas adicionadas con ácido cítrico, señalando que esta condición podría favorecer un mayor flujo salival y, con ello, una desintegración más rápida de las películas; adicionalmente, mediante análisis sensorial, no se identificaron molestias en el paladar por parte de los participantes.

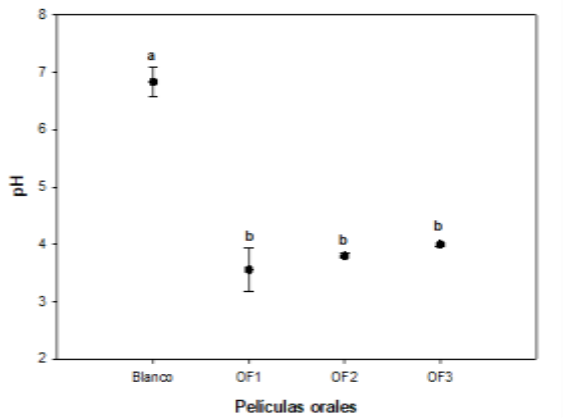


Figura 2. pH en películas orales.
[a, b] indican diferencias significativas por prueba Tukey (p≤0.5).

Tiempo de desintegración

Cuando las películas orales hacen contacto con la saliva, experimentan una hidratación y disolución acelerada, proceso mediante el cual se liberan los compuestos activos, que posteriormente son absorbidos por la mucosa oral [65]. Resulta fundamental que esta desintegración ocurra en periodos cortos, a fin de prevenir riesgos de asfixia y garantizar una adecuada sensación en boca [66]. La Figura 3 presenta los tiempos de disolución registrados para las diferentes formulaciones, donde se identificaron diferencias significativas (p≤0.05) entre ellas. La formulación OF3 mostró el menor tiempo de desintegración, con 28.333±3.512 s, mientras que el blanco presentó el mayor tiempo, con 52.333±3.055 s. Este parámetro puede estar influenciado tanto por el espesor de las películas como por su carácter hidrofílico [64]. Es importante señalar que, conforme se incrementó la concentración de jugo de granada, el tiempo de desintegración tendió a reducirse, lo cual podría atribuirse a un mayor aporte de compuestos hidrofílicos que favorecen la disolución de las películas [67]. Entre estos compuestos hidrofílicos aportados por el jugo de granada se encuentran principalmente los azúcares solubles (glucosa y fructosa), los ácidos orgánicos (p. ej., ácido cítrico) y los compuestos fenólicos hidrosolubles (antocianinas y taninos hidrolizables), los cuales, al incrementar la fracción de solutos hidrófilos de bajo peso molecular en la matriz, favorecen una mayor afinidad por el agua y una hidratación más rápida de la película.

Los tiempos aquí obtenidos resultaron inferiores a los descritos por Himani, Kumar [39], quienes trabajando con películas de maltodextrina, quitosano y pululano adicionadas con extracto acuoso de ajo, obtuvieron valores de 44 a 48 s. En cambio, Borges, Silva [36] en películas orales elaboradas con lecitina, gelatina y colágeno hidrolizado enriquecidas con extracto etanólico de propóleo, registraron tiempos de 18.9 a 25.3 s, cifras por debajo de las alcanzadas en el presente trabajo; dicho comportamiento fue atribuido por los autores a la naturaleza hidrófila y al bajo peso molecular del colágeno hidrolizado.

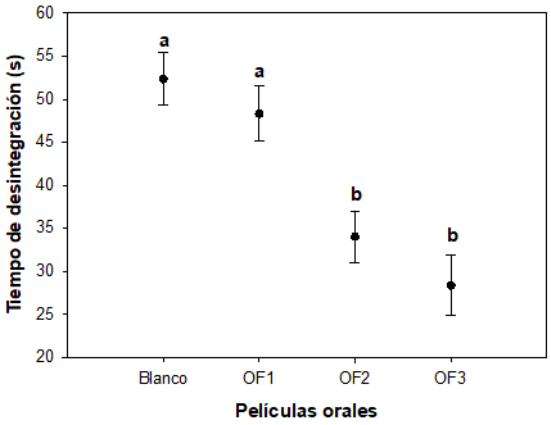


Figura 3. Tiempo de desintegración en películas orales.
[a, b] indican diferencias significativas por prueba Tukey (p≤0.5).

Color

El color representa una característica determinante en la evaluación de películas, dado su peso en la percepción del consumidor [8]. En la tabla 5 se resumen los valores colorimétricos obtenidos. El parámetro L es indicativo del nivel de luminosidad, donde

cifras cercanas a 100 corresponden a tonos más claros; en este estudio, el blanco alcanzó un valor de 87.52±1.03, mismo que fue decreciendo a medida que aumentaba la proporción de jugo de granada añadida. Respecto al parámetro a*, cuya escala abarca del verde al rojo, todas las muestras arrojaron cifras positivas, lo que denota predominancia del tono rojizo. En cuanto a b*, que representa la transición entre azul y amarillo, los valores positivos obtenidos sugieren una leve tendencia hacia tonalidades amarillas. Tal comportamiento se relaciona con la presencia de antocianinas en el jugo de granada, compuestos polifenólicos que confieren tonalidades naranja, púrpura y roja a diversas frutas y plantas [68-70]. Es posible destacar que las formulaciones obtenidas presentaron una coloración rosácea de tono casi translúcido, en concordancia con lo señalado por Kumar, Neeraj [71], en películas elaboradas con quitosano y pululano, adicionadas con cáscara y jugo de granada.

Tabla 5. Determinación de color en películas orales.

Películas orales	L*	a*	b*
Blanco	87.51 ± 1.03^{a}	0.40 ± 0.18^{d}	5.40 ± 0.24^{a}
OF1	83.29 ± 1.13^{b}	7.95 ± 1.31^{c}	4.24 ± 0.50^{b}
OF2	77.37 ± 0.97^{c}	10.13 ± 0.67^{b}	3.19 ± 0.50^{c}
OF3	74.85 ± 1.42^{d}	14.61 ± 1.00^{a}	1.25 ± 0.20^{d}

$^{a, b, c, d}$ indican diferencias significativas por prueba Tukey ($p \leq 0.5$).

Propiedades térmicas por Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El termograma de las películas orales se presenta en la figura 4, donde se observó una Tg de 93.89°C en el blanco, valor que disminuyó en las formulaciones con jugo de granada incorporado. Este parámetro es representativo del cambio de fase vítrea a gomosa en la estructura del material, relacionándose con el grado de amorfismo presente en la matriz polimérica. De igual manera, el blanco exhibió un pico endotérmico nítido, con temperatura de fusión de 101.95°C, mismo que se volvió menos evidente en presencia de jugo de granada. Este comportamiento podría explicarse por la pérdida de agua estructural, propia del carácter hidrofílico de las películas [72]. Los valores de ΔH obtenidos fueron de 5.17 J/g (blanco), 2.29 J/g (OF1), 1.63 J/g (OF2) y 0.29 J/g (OF3), lo cual apuntaría a que se precisa de menor energía para romper la estructura cristalina de la película, dada la mayor cantidad de compuestos hidrofílicos, lo que a su vez beneficia su solubilidad. Esto confirmaría, además, la fragmentación de enlaces no covalentes en las cadenas poliméricas, resultado del pH ácido del jugo [57]. Kumar, Pratibha [73] describieron un comportamiento similar en películas de quitosano con extracto de cáscara de granada, donde la disminución de la Tg tras incorporar el extracto sugiere que las cadenas poliméricas necesitan menos calor para pasar de un estado rígido a uno amorfo, optimizando así la solubilidad. En contraste, Alkahtani, Aodah [74] trabajando con películas de polivinilpirrolidona combinadas con escitalopram/quetiapina, no registraron picos endotérmicos marcados.

La disminución de la Tg con el incremento del jugo de granada incorporado tiene, además de la implicación positiva sobre la solubilidad ya señalada, una lectura relevante en términos de estabilidad física del material que conviene discutir. Los valores de Tg obtenidos para las formulaciones activas (58.06-63.07 °C) permanecen, en principio, por encima de la temperatura ambiente habitual de almacenamiento (20-25 °C), por

lo que las películas se mantendrían en estado vítreo bajo condiciones normales. No obstante, dado que los compuestos hidrofílicos del jugo (azúcares y ácidos orgánicos) actúan como plastificantes, un incremento en la humedad relativa del entorno de almacenamiento podría inducir una plastificación adicional por absorción de agua, desplazando la Tg efectiva hacia valores más cercanos, o incluso inferiores, a la temperatura ambiente. Este desplazamiento del material hacia un estado gomoso conllevaría un mayor riesgo de pegajosidad superficial (dificultando el manejo individual de las películas), una mayor tendencia a la absorción de humedad -que a su vez retroalimentaría el efecto plastificante- y una pérdida de rigidez estructural que podría comprometer su integridad durante el manejo, empaque y transporte. En este sentido, la reducción de la Tg observada en las formulaciones con mayor contenido de jugo, si bien favorece la disgregación rápida deseada para la aplicación oral, representa un compromiso tecnológico que debe monitorearse mediante estudios de estabilidad bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, y que condiciona las recomendaciones de almacenamiento y empaque del producto final.

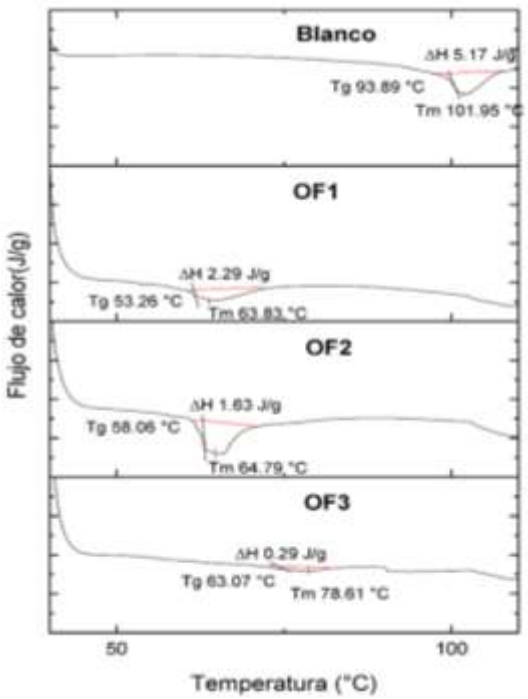


Figura 4. Propiedades térmicas por calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en películas orales.

Análisis por FTIR

El análisis mediante FTIR de las películas orales se muestra en la Figura 5. Aunque no se registraron picos adicionales asociados a la formulación, sí se observaron variaciones en la intensidad de las bandas de absorción entre los distintos tratamientos, atribuibles a las diferentes concentraciones de jugo de granada empleadas [75]. Esto significa que la interacción real es de tipo no covalente (puentes de hidrógeno) entre los -OH fenólicos del jugo y los grupos -NH/C=O de la gelatina y -OH de la maltodextrina. Este tipo de interacción no crea nuevos grupos funcionales, así que no genera picos nuevos en cambio, desplaza, ensancha e intensifica las bandas ya existentes (amida A, amida I, región de carbohidratos). Es importante precisar que la ausencia de nuevas bandas de absorción no descarta la existencia de interacción entre los componentes de la película; por el contrario, corresponde al comportamiento esperado cuando dicha interacción ocurre mediante fuerzas no

covalentes, principalmente puentes de hidrógeno, entre los grupos hidroxilo de los compuestos fenólicos del jugo de granada y los grupos amino/carbonilo de la gelatina, así como los grupos hidroxilo de la maltodextrina [76, 77]. Este tipo de interacción no genera nuevos grupos funcionales y, por tanto, no produce nuevas bandas en el espectro; en cambio, modifica la posición, la anchura y la intensidad de las bandas ya existentes, tal como se observó en las regiones de amida A, amida I y de carbohidratos del presente estudio. Este comportamiento coincide con lo reportado en sistemas de películas proteicas enriquecidas con compuestos fenólicos, donde la formación de puentes de hidrógeno entre los grupos –OH de los polifenoles y los grupos –NH/C=O de la matriz proteica se evidencia mediante desplazamientos y ensanchamientos de banda, y no mediante la aparición de picos adicionales. En este sentido, la interacción señalada en las conclusiones de este trabajo se refiere específicamente a este tipo de asociación física por puente de hidrógeno, y no a la formación de nuevos enlaces covalentes entre los componentes de la formulación.

Las cuatro formulaciones evidenciaron las bandas típicas de la gelatina. La región de 3269 a 3275 cm^{-1} se vinculó al estiramiento del grupo amino (-NH) de la amida A; la de 2927 a 2932 cm^{-1}, al estiramiento de CH y NH_3; la de 1636 a 1647 cm^{-1}, a las vibraciones del grupo carbonilo C=O de la amida I; la de 1544 a 1554 cm^{-1}, a la flexión de grupos N-H junto con el estiramiento de C-N de la amida II; y la de 1239 a 1244 cm^{-1}, a vibraciones de C-N, N-H, o del grupo CH_2 de la glicina, correspondientes a la amida III. Estos resultados guardan concordancia con los obtenidos por Bhatia, Al-Harrasi [78] en películas de gelatina de origen porcino y bovino con aceites esenciales, donde se ubicaron picos comparables en 3292 cm^{-1} (amida A), 3070 cm^{-1} (amida B), 1640 cm^{-1} (amida I), 1549 cm^{-1} (amida II) y 1239 cm^{-1} (amida III).

En cuanto a la región comprendida entre 1200 y 900 cm^{-1}, esta reveló bandas propias de carbohidratos, con los picos de mayor intensidad situados entre 1022 y 1030 cm^{-1}, asociados al estiramiento del enlace C-O en el grupo C-OH, así como al enlace C-C de la glucosa y fructosa aportadas por la maltodextrina y el jugo de granada. Consistente con esto Matwijczuk, Budziak-Wieczorek [79] identificaron, mediante FTIR aplicado a portadores como la maltodextrina, picos en una posición cercana (1027 cm^{-1}), relacionándolos con la estructura de los carbohidratos. Por su parte, López-Diaz y colaboradores [80] en películas de quitosano combinadas con jugo de granada, reportaron picos entre 1034 y 1080 cm^{-1}, en 1063 cm^{-1}, y entre 1055 y 1138 cm^{-1}, correspondientes a azúcares como glucosa, fructosa y sacarosa presentes en el jugo.

Por último, la región entre 1337 y 1449 cm^{-1} mostró picos atribuibles al grupo $=CH_2$, presente en terpenos del aceite esencial de menta, en concordancia con lo señalado por Agatonovic-Kustrin, Ristivojevic [81], quienes, al evaluar la calidad y pureza de aceites esenciales mediante FTIR, situaron sus componentes entre 1330 y 1410 cm^{-1}. Del mismo modo, los picos ubicados entre 2927 y 2932 cm^{-1} podrían reflejar la presencia de compuestos propios de la menta, en virtud del estiramiento característico de C-H y CH_2 en dichos aceites.

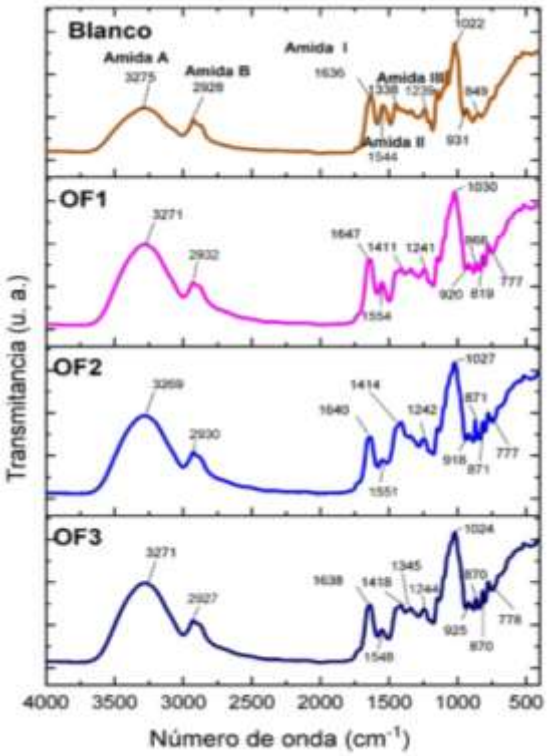


Figura 5. Análisis FTIR en películas orales.

Actividad antioxidante en películas orales

La capacidad antioxidante de las películas orales desarrolladas en esta investigación se evaluó mediante ensayos de inhibición de los radicales ABTS y DPPH. Según se ilustra en la figura 6, el porcentaje de inhibición del radical ABTS mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre el tratamiento blanco y aquellos con jugo de granada. La incorporación de jugo de granada incrementó significativamente la actividad antioxidante respecto al blanco; sin embargo, no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las concentraciones de 30, 40 y 50%.

El blanco reportó un 30.29±1.01%, en tanto que OF3 alcanzó un 89.70±0.54%, incremento que podría explicarse por el aporte antioxidante propio del jugo incorporado. Los compuestos fenólicos mayoritarios (elagitaninos, ácido elágico, antocianinas) neutralizan los radicales ABTS/DPPH principalmente por transferencia de átomos de hidrógeno (HAT) y, en menor medida, transferencia de electrón seguida de pérdida de protón (SET-PT). El grupo -OH fenólico cede un H (o electrón) al radical, generando un radical fenoxilo estabilizado por resonancia aromática. La ausencia de diferencias significativas en la actividad antioxidante determinada mediante ABTS entre los tratamientos de jugo de granada, a pesar de utilizar diferentes concentraciones de jugo, puede atribuirse a que los compuestos antioxidantes presentes alcanzaron una respuesta cercana a la saturación del radical ABTS•+. En estas condiciones, el incremento en la concentración de jugo no necesariamente produce un aumento proporcional en la capacidad de neutralización del radical. Además, la matriz de la película oral puede limitar la disponibilidad o difusión de los compuestos fenólicos y otros antioxidantes hacia el radical ABTS•+, generando un efecto de concentración aparente. También es posible que las concentraciones evaluadas contengan cantidades suficientes de compuestos antioxidantes para alcanzar valores similares de inhibición, reduciendo la capacidad del ensayo para discriminar entre tratamientos.

Estos valores superaron los reportados por Hanani, Yee [69], quienes, en películas de gelatina con diferentes proporciones de cáscara de granada, obtuvieron una inhibición del radical ABTS entre 32.01 y 80.02 %. Asimismo, fueron más altos que los descritos por Bhatia, Al-Harrasi [78] en películas de quitosano y alginato de sodio adicionadas con extracto de *Ficus*, cuyos valores oscilaron entre 13.43 y 59.59 %.

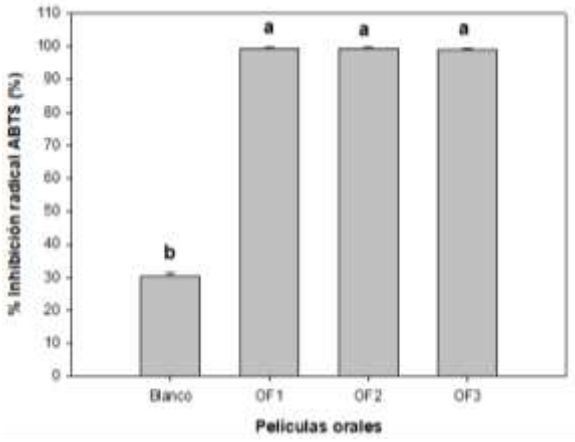


Figura 6. Actividad antioxidante de las películas orales por porcentaje de inhibición del radical ABTS. [a, b] indican diferencias significativas por prueba Tukey ($p \leq 0.5$).

El porcentaje de inhibición frente al radical DPPH también evidenció diferencias notables ($p \leq 0.05$) entre las cuatro formulaciones analizadas (figura 7), fluctuando entre 10.65±0.54% para el blanco y 68.14±1.57% para OF3. Este patrón resulta congruente con lo descrito por Kumar, Pratibha [73], quienes, trabajando con películas de quitosano y extracto de cáscara a diversas concentraciones, obtuvieron actividad antioxidante para DPPH entre 23.13 y 76.84 %. En contraste, Bhatia, Al-Harrasi [78] reportaron cifras más bajas, de 9.12 a 36.02 %, en películas de quitosano y alginato de sodio con diferentes concentraciones de *Ficus*.

La capacidad antioxidante de las películas orales se relaciona principalmente con los compuestos fenólicos aportados por el jugo de granada, entre ellos taninos hidrolizables y flavonoides [82]. No obstante, el tratamiento blanco también mostró actividad antioxidante, comportamiento vinculado a la presencia del aceite esencial de menta y de la gelatina en su formulación. Según, dicha actividad en el aceite esencial de menta se debe a monoterpenoides como el mentol, la carvona y el 1,8-cineol. En este sentido, Liu, Wang [83] , al trabajar con películas activas de quitosano incorporadas con aceites esenciales, reportaron para el aceite de menta una inhibición del radical DPPH del 66.79%. Por su parte, la gelatina podría contribuir a esta actividad gracias a péptidos bioactivos, cuya acción se asocia con su composición de aminoácidos, particularmente glicina y prolina [84].

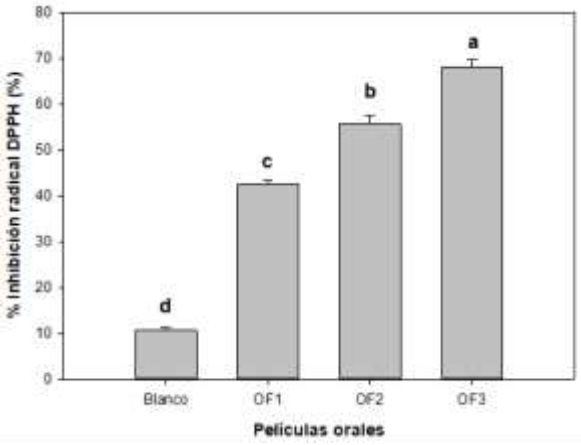


Figura 7. Actividad antioxidante de las películas orales por porcentaje de inhibición del radical DPPH. [a, b] indican diferencias significativas por prueba Tukey ($p \leq 0.5$).

En la figura 8 se presenta el contenido de fenoles totales de las películas orales, donde se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los distintos tratamientos. Los resultados oscilaron entre 4.9±0.67 mg GAE/g para el blanco y 43.46±1.26 mg GAE/g de película para OF3. El hecho de que el blanco también presentara compuestos fenólicos podría deberse a los terpenoides y fenilpropanoides de carácter fenólico presentes en el aceite esencial de menta [41]. En comparación, Borges and De Carvalho [85] reportaron, en películas orales elaboradas con colágeno hidrolizado y extracto etanólico de propóleo, valores de entre 41.5 y 62.5 mg GAE/g de película.

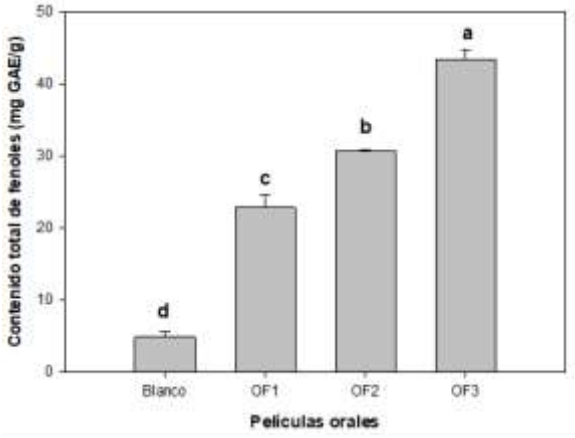


Figura 8. Contenido total de fenoles en películas orales.
[a, b, c, d] indican diferencias significativas por prueba Tukey (p≤0.5).

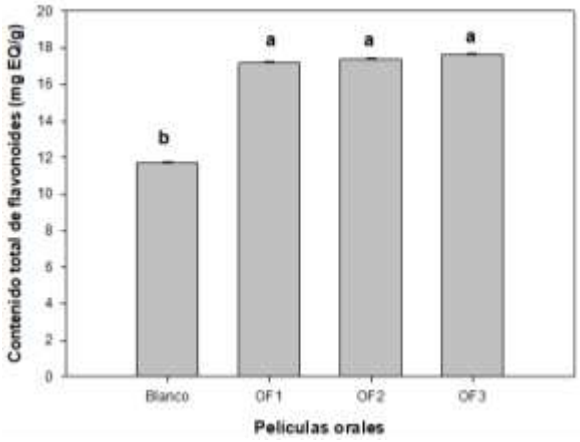


Figura 9. Contenido total de flavonoides en películas orales.
[a, b] indican diferencias significativas por prueba Tukey (p≤0.5).

Si bien el contenido de fenoles ofrece una referencia sobre la capacidad antioxidante de una fuente natural, es necesario complementar dicha información con la cuantificación de compuestos como flavonoides y antocianinas. Los resultados del contenido de flavonoides se presentan en la figura 9, donde se observaron diferencias significativas (p≤0.05) entre el blanco y las formulaciones con jugo de granada, siendo estas últimas las que presentaron mayor contenido. Este hallazgo confirma la presencia de metabolitos secundarios como catequina, epicatequina, kaempferol, quercetina, luteolina, rutina y antocianinas [82]. Aun así, el blanco también exhibió cierto contenido de flavonoides, lo cual concuerda con lo señalado por quienes identificaron eriodictiol, luteolina, apigenina y sus glucósidos como componentes del aceite esencial de menta. Por su parte, Mabrouk, Shaltout [86] documentaron valores de entre 23.1 y 28.8 mg EQ/g para el contenido total de flavonoides en películas de pectina adicionadas con extracto de cáscara y semilla de granada.

Los resultados relativos al contenido de antocianinas se presentan en la figura 10, donde se identificaron diferencias significativas (p≤0.05) entre los tratamientos con jugo de granada, con valores que oscilaron entre 9.95±0.87 y 13.24±0.18 mg C3G/g para OF1 y OF3, respectivamente; cabe destacar que en el blanco no se detectó contenido alguno de antocianinas. Estos compuestos son responsables del característico color rojo del jugo de granada y de sus semillas, además de contribuir a la actividad antioxidante junto con los taninos hidrolizables y el ácido elágico [55, 82]. Los valores obtenidos en este trabajo resultaron inferiores a los reportados por Otálora González, Schelegueda [87] quienes registraron un contenido de antocianinas de 37.9 mg C3G/g en películas de almidón de yuca con col morada.

Cabe precisar que la técnica de Folin-Ciocalteu, empleada para la determinación de fenoles totales, no es específica para compuestos fenólicos y puede reaccionar también con otros agentes reductores presentes en la matriz, entre ellos los azúcares reductores [88]; esta consideración es particularmente relevante en el presente estudio dado el elevado contenido de carbohidratos del jugo de granada

incorporado (8.52% y 15.72 °Brix, Tabla 2). En consecuencia, los valores de fenoles totales reportados en la Figura 8 deben interpretarse como un índice de la capacidad reductora global de la matriz, y no como una cuantificación específica y exclusiva de compuestos fenólicos. De manera similar, dado que las antocianinas son compuestos termosensibles y fotosensibles [89], y considerando que la elaboración de las películas incluyó una etapa de mezclado a 35°C y un secado de 24 h a temperatura ambiente sin protección explícita frente a la luz, es probable que el contenido de antocianinas cuantificado en la Figura 10 represente una fracción residual, inferior al contenido inicial presente en el jugo fresco (Tabla 3), como consecuencia de una degradación parcial de estos compuestos durante el procesamiento.

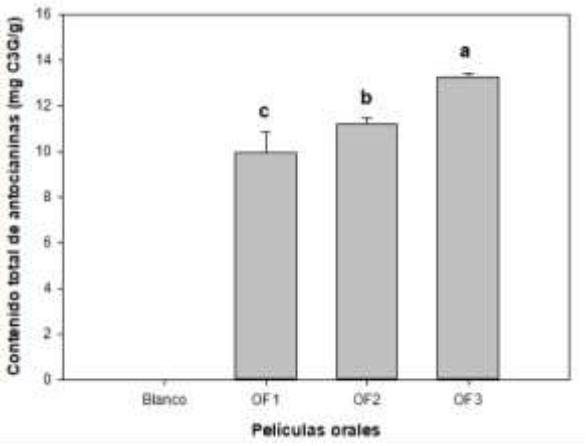


Figura 10. Contenido total de antocianinas en películas orales.
[a, b, c] indican diferencias significativas por prueba Tukey ($p \leq 0.5$).

5. Conclusiones

La determinación de las propiedades fisicoquímicas de las películas orales mostró que variables como el pH, el espesor y el aporte de compuestos hidrofílicos, incluyendo gelatina, maltodextrina y jugo de granada, inciden de manera directa en su tiempo de desintegración, lo cual se vio respaldado por el estudio de las propiedades térmicas, que confirmó una estructura de tipo amorfo. Adicionalmente, el análisis FTIR evidenció la interacción entre los distintos componentes que constituyen la película oral, reflejando la presencia de compuestos bioactivos. En lo referente a la actividad antioxidante, la formulación OF3 obtuvo el mejor resultado lo cual se asocia con el contenido de compuestos fenólicos presentes en el jugo de granada y el aceite esencial de menta. El aporte principal de este trabajo radica en presentar, hasta donde se tiene conocimiento, el primer reporte de una película oral a base de gelatina y maltodextrina formulada con jugo (no extracto) de granada en combinación con aceite esencial de menta, lo que representa una alternativa de valorización de esta fruta como ingrediente activo natural, evitando el uso de solventes orgánicos propios de los procesos de extracción convencionales. Asimismo, los resultados obtenidos amplían el conocimiento disponible sobre el efecto de la incorporación de compuestos bioactivos de origen frutal en las propiedades fisicoquímicas, térmicas y antioxidantes de películas orales de disgregación rápida, aportando información de utilidad para el desarrollo de productos funcionales de bajo costo y proceso simplificado.

Como líneas de trabajo futuro, se recomienda complementar la caracterización con ensayos mecánicos, de capacidad de hinchamiento y microscopía SEM, así como evaluar la actividad antimicrobiana frente a microorganismos de relevancia oral (p. ej., *Streptococcus mutans*) y realizar estudios de estabilidad y aceptabilidad sensorial. Asimismo, resultaría de interés aplicar un diseño experimental de superficie de respuesta que permita optimizar la concentración de jugo de granada y de aceite esencial de menta en función de las propiedades deseadas, así como explorar el escalamiento del proceso de producción. Desde el punto de vista de la aplicación, la película oral desarrollada podría explorarse

como un producto funcional de higiene bucal, de carácter refrescante y antioxidante, o como plataforma tecnológica para la incorporación de otros jugos de frutas ricos en compuestos bioactivos, ampliando su potencial dentro de la industria de alimentos funcionales y nutracéuticos.

6. Agradecimientos

La primera autora agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado con la beca de posgrado No. 203967.

7. Referencias

1. Li, Y., et al., *Advances in oral dissolving film research in the food field.* Food Production, Processing and Nutrition, 2025. **7**(1): p. 9.

2. Bala, R., et al., *Orally dissolving strips: A new approach to oral drug delivery system.* International journal of pharmaceutical investigation, 2013. **3**(2): p. 67-76.

3. Himani, et al., *Edible and Oral Thin Films: Formulation, Properties, Functions, and Application in Food Packaging and Pharmaceutical Industry*, in *Edible Food Packaging : Applications, Innovations and Sustainability*, A. Poonia and T. Dhewa, Editors. 2022, Springer: Singapore. p. 411-432.

4. Xu, G., et al., *Breath freshening film, C.P. Co.*, Editor. 2002, Colgate Palmolive Co.: New York, US.

5. Jain, A., H.T. Ahirwar, S. , and P. Mohanty, *Fast dissolving oral films: a tabular update. Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 2018. **8(4)**: p. 10-19.

6. Park, C.-H., C. Ganbat, and J.-A. Han, *Hydrocolloid-specific performance of orally disintegrating films: physicochemical, dissolution, and sensory insights.* Food Science and Biotechnology, 2026. **35**(4): p. 895-905.

7. Dahiya, M., S. Saha, and F.A. Shahiwala, *A Review on Mouth Dissolving Films.* Current Drug Delivery, 2009. **6**(5): p. 469-476.

8. Sevinç Özakar, R. and E. Özakar, *Current Overview of Oral Thin Films.* Turkish journal of pharmaceutical sciences, 2021. **18**(1): p. 111-121.

9. Calixto, S., et al., *Gelatin as a Photosensitive Material.* Molecules (Basel, Switzerland), 2018. **23**(8): p. 2064.

10. Shaikh, S., M. Yaqoob, and P. Aggarwal, *An overview of biodegradable packaging in food industry.* Current research in food science, 2021. **4**: p. 503-520.

11. Lu, Y., et al., *Application of Gelatin in Food Packaging: A Review.* Polymers, 2022. **14**(3): p. 436.

12. Sharma, D., et al., *Fast Dissolving Oral Films Technology: A Recent Trend For An Innovative Oral Drug Delivery System.* International Journal of Drug Delivery, 2015. **7**: p. 60-75.

13. Hofman, D.L., V.J. van Buul, and F.J. Brouns, *Nutrition, Health, and Regulatory Aspects of Digestible Maltodextrins. Critical reviews in food science and nutrition*, 2016. **56**(12): p. 2091-100.

14. Takeiti, C.Y., T.G. Kieckbusch, and F.P. Collares-Queiroz,

Morphological and Physicochemical Characterization of Commercial Maltodextrins with Different Degrees of Dextrose-Equivalent. International Journal of Food Properties, 2010. **13**(2): p. 411-425.

15. Cupone, I.E., et al. *Orodispersible Film (ODF) Platform Based on Maltodextrin for Therapeutical Applications*. Pharmaceutics, 2022. **14**, DOI: 10.3390/pharmaceutics14102011.

16. Olechno, K., A. Basa, and K. Winnicka, *"Success Depends on Your Backbone"—About the Use of Polymers as Essential Materials Forming Orodispersible Films.* Materials, 2021. **14**(17).

17. Shah, K.A., et al., *Development and Characterizations of Pullulan and Maltodextrin-Based Oral Fast-Dissolving Films Employing a Box-Behnken Experimental Design.* Materials (Basel), 2022. **15**(10).

18. Karki, S., et al., *Thin films as an emerging platform for drug delivery.* Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2016. **11**(5): p. 559-574.

19. Tian, Y., et al., *Recent progress in orodispersible films-mediated therapeutic applications: A review.* MedComm – Biomaterials and Applications, 2023. **2**(2): p. e34.

20. Fawole, O.A., U.L. Opara, and K.I. Theron, *Chemical and Phytochemical Properties and Antioxidant Activities of Three Pomegranate Cultivars Grown in South Africa.* Food and Bioprocess Technology, 2012. **5**(7): p. 2934-2940.

21. Jamróz, E. and P. Kopel, *Polysaccharide and Protein Films with Antimicrobial/Antioxidant Activity in the Food Industry: A Review.* Polymers, 2020. **12**(6): p. 1289.

22. Zhang, M., et al., *Pomegranate: A Comprehensive Review of Functional Components, Health Benefits, Processing, Food Applications, and Food Safety.* Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025. **73**(10): p. 5649-5665.

23. Ferrazzano, G.F., et al., *In Vitro Antibacterial Activity of Pomegranate Juice and Peel Extracts on Cariogenic Bacteria.* BioMed research international, 2017. **2017**: p. 2152749-2152749.

24. Uzuner, S., *Pomegranate*, in *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables*, A.K. Jaiswal, Editor. 2020, Academic Press: Bolu, Turkey. p. 549-563.

25. Nabeel Ahmad, H., et al., *Development of novel carboxymethyl cellulose/gelatin-based edible films with pomegranate peel extract as antibacterial/antioxidant agents for beef preservation.* Food Chem, 2024. **443**: p. 138511.

26. Valdés-Miramontes, E.H., et al., *Potencial antioxidante de tres subproductos de granada (Punica granatum L.).* Archivos latinoamericanos de nutrición, 2024. **74**(3): p. 155-164.

27. Chaemsanit, S., N. Matan, and N. Matan, *Effect of peppermint oil on the shelf-life of dragon fruit during*

storage. Food Control, 2018. **90**: p. 172-179.

28. Kang, J., et al., *Antibacterial and anti-biofilm activities of peppermint essential oil against Staphylococcus aureus.* LWT, 2019. **101**: p. 639-645.

29. Khaksar, G., K. Assatarakul, and S. Sirikantaramas, *Effect of cold-pressed and normal centrifugal juicing on quality attributes of fresh juices: do cold-pressed juices harbor a superior nutritional quality and antioxidant capacity?* Heliyon, 2019. **5**(6): p. e01917.

30. AOAC, *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 18 ed. 2005, MD, USA.

31. Singleton, V.L., R. Orthofer, and R.M. Lamuela-Raventós, *[14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent*, in *Methods in Enzymology*. 1999, Academic Press. p. 152-178.

32. Arvouet-Grand, A., et al., *[Standardization of propolis extract and identification of principal constituents]*. Journal de pharmacie de Belgique., 1994. **49**(6): p. 462-8.

33. Giusti, M.M. and R.E. Wrolstad, *Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy*. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, 2001. **00**(1): p. F1.2.1-F1.2.13.

34. Re, R., et al., *Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay*. Free Radical Biology and Medicine, 1999. **26**(9): p. 1231-1237.

35. Brand-Williams, W., M.E. Cuvelier, and C. Berset, *Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity.* LWT - Food Science and Technology, 1995. **28**(1): p. 25-30.

36. Borges, J.G., et al., *Lecithin, gelatin and hydrolyzed collagen orally disintegrating films: functional properties.* International Journal of Biological Macromolecules, 2016. **86**: p. 907-916.

37. Cilurzo, F., et al., *Fast dissolving films made of maltodextrins.* Eur J Pharm Biopharm, 2008. **70**(3): p. 895-900.

38. Irfan, M., et al., *Orally disintegrating films: A modern expansion in drug delivery system.* Saudi Pharmaceutical Journal, 2016. **24**(5): p. 537-546.

39. Himani, et al., *Physical, Mechanical, Functional, and Thermal Characterization of Chitosan: Maltodextrin Blends Edible Oral Film Incorporated with Aqueous Clove Extract.* Starch - Stärke, 2021. **73**(1-2): p. 1900220.

40. Nair, A.B., et al., *In vitro techniques to evaluate buccal films.* Journal of Controlled Release, 2013. **166**(1): p. 10-21.

41. Wu, Z., et al., *Chemical Composition and Antioxidant Properties of Essential Oils from Peppermint, Native Spearmint and Scotch Spearmint.* Molecules, 2019. **24**(15): p. 2825.

42. Espino-Manzano, S.O., et al., *Application of Nanoemulsions (W/O) of Extract of Opuntia oligacantha C.F. Först and Orange Oil in*

Gelatine Films. Molecules, 2020. **25**(15).

43. Berdeja, M., et al., *Caracterización bromatológica y microbiológica de la cáscara de granada (Punica granatum L.) como fuente de ingredientes funcionales. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2019. **4**: p. 799-804.

44. Kandylis, P. and E. Kokkinomagoulos, *Food Applications and Potential Health Benefits of Pomegranate and its Derivatives.* Foods, 2020. **9**(2): p. 122.

45. Labbe, M., et al., *Characterization of chemical compositions and bioactive compounds in juices from pomegranates (’Wonderful’, ’Chaca’ and ’Codpa’) at different maturity stages.* Chilean journal of agricultural research, 2016. **76**: p. 479-486.

46. Ejjilani, A., et al., *Pomegranate morpho-chemodiversity: computational investigations based on in-vivo and in-vitro screening.* Heliyon, 2022. **8**(5): p. e09345.

47. Catania, P., et al., *Effects of the Extraction Technology on Pomegranate Juice Quality.* Agronomy, 2020. **10**(10): p. 1483.

48. Bopitiya, D. and T. Madhujith, *Antioxidant Potential of Pomegranate (Punica granatum L.) Cultivars Grown in Sri Lanka.* Tropical Agricultural Research, 2015. **24(1)**: p. 71–81.

49. Kaoutar, E., et al., *Quality attributes, chemical properties, and selected bioactive compounds of pomegranate juice (Punica granatum L.) processed from arils after freezing storage. African & Mediterranean Agricultural Journal*, 2022: p. 236-255.

50. Fernandes, L., et al., *Physicochemical composition and antioxidant activity of several pomegranate (Punica granatum L.) cultivars grown in Spain.* European Food Research and Technology, 2017. **243**.

51. Gözlekçi, S., et al., *Total phenolic distribution of juice, peel, and seed extracts of four pomegranate cultivars. Pharmacognosy Magazine*, 2011. **7**(26): p. 161-4.

52. Hmid, I., et al., *Comparative study of phenolic compounds and their antioxidant attributes of eighteen pomegranate (Punica granatum L.) cultivars grown in Morocco.* Arabian Journal of Chemistry, 2017. **10**: p. S2675-S2684.

53. El Kar, C., et al., *Pomegranate (Punica granatum) juices: chemical composition, micronutrient cations, and antioxidant capacity. Journal of food science*, 2011. **76**(6): p. C795-800.

54. Habib, H.M., et al., *Antioxidant, Anti-Inflammatory, Antimicrobial, and Anticancer Activities of Pomegranate Juice Concentrate.* Nutrients, 2023. **15**(12).

55. Gil, M.I., et al., *Antioxidant Activity of Pomegranate Juice and Its Relationship with Phenolic Composition and Processing.* Journal

of Agricultural and Food Chemistry, 2000. **48**(10): p. 4581-4589.

56. Aykin-Dinçer, E., A. Koç, and M. Erbas, *Extraction and physicochemical characterization of broiler (Gallus gallus domesticus) skin gelatin compared to commercial bovine gelatin. Poultry science*, 2017. **96**(11): p. 4124-4131.

57. Kishore, D., S. Kundu, and A.M. Kayastha, *Thermal, chemical and pH induced denaturation of a multimeric β-galactosidase reveals multiple unfolding pathways.* PLoS One, 2012. **7**(11): p. e50380.

58. Rodríguez, G.M., et al., *Antioxidant active packaging based on papaya edible films incorporated with Moringa oleifera and ascorbic acid for food preservation.* Food Hydrocolloids, 2020. **103**: p. 105630.

59. Navas Guzmán, N. and P. Espitia, *Development and characterization of edible films based on colombian tropicall fruits.* . Italian Journal of Food Science, 2019. **31**: p. 61-68.

60. Lim, L.M. and K. Hadinoto, *High-Payload Buccal Delivery System of Amorphous Curcumin–Chitosan Nanoparticle Complex in Hydroxypropyl Methylcellulose and Starch Films.* International Journal of Molecular Sciences, 2021. **22**(17).

61. Garcia, V.A.d.S., et al., *Orally disintegrating films based on gelatin and pregelatinized starch: new carriers of active compounds from acerola.* Food Hydrocolloids, 2020. **101**: p. 105518.

62. Neagu, O.M., et al., *Formulation and Characterization of Mucoadhesive Polymeric Films Containing Extracts of Taraxaci Folium and Matricariae Flos.* Molecules, 2023. **28**(10): p. 4002.

63. Bharti, K., P. Mittal, and B. Mishra, *Formulation and characterization of fast dissolving oral films containing buspirone hydrochloride nanoparticles using design of experiment.* Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2019. **49**: p. 420-432.

64. Pimparade, M.B., et al., *Development and evaluation of an oral fast disintegrating anti-allergic film using hot-melt extrusion technology.* European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics : official journal of Arbeitsgemeinschaft fur Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V., 2017. **119**: p. 81-90.

65. Speer, I., et al., *Comparative study on disintegration methods for oral film preparations.* European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2018. **132**: p. 50-61.

66. Low, A., et al., *A New Test Unit for Disintegration End-Point Determination of Orodispersible Films.* Journal of Pharmaceutical Sciences, 2015. **104**(11): p. 3893-3903.

67. Dixit, R.P. and S.P. Puthli, *Oral strip technology: overview and future potential.* J Control Release, 2009. **139**(2): p. 94-107.

68. Chen, L., et al., *Effect of Anthocyanins on Colorimetric Indicator Film Properties.* Coatings, 2023. **13**(10).

69. Hanani, Z.A.N., F.C. Yee, and M.A.R. Nor-Khaizura, *Effect of pomegranate (Punica granatum L.) peel powder on the antioxidant and antimicrobial properties of fish gelatin films as active packaging.* Food Hydrocolloids, 2019. **89**: p. 253-259.

70. Welch, C.R., Q. Wu, and J.E. Simon, *Recent Advances in Anthocyanin Analysis and Characterization. Current analytical chemistry*, 2008. **4**(2): p. 75-101.

71. Kumar, N., et al., *Preparation and characterization of chitosan - pullulan blended edible films enrich with pomegranate peel extract.* Reactive and Functional Polymers, 2019. **144**: p. 104350.

72. Panraksa, P., et al., *Formulation of Orally Disintegrating Films as an Amorphous Solid Solution of a Poorly Water-Soluble Drug.* Membranes, 2020. **10**(12): p. 376.

73. Kumar, N., et al., *Chitosan Edible Films Enhanced with Pomegranate Peel Extract: Study on Physical, Biological, Thermal, and Barrier Properties.* Materials (Basel), 2021. **14**(12).

74. Alkahtani, M.E., et al., *Fabrication and Characterization of Fast-Dissolving Films Containing Escitalopram/Quetiapine for the Treatment of Major Depressive Disorder*. Pharmaceutics, 2021. **13**(6): p. 891.

75. Bodini, R.B., et al., *Antioxidant and anti-inflammatory properties of orally disintegrating films based on starch and hydroxypropyl methylcellulose incorporated with Cordia verbenacea (erva baleeira) extract.* International Journal of Biological Macromolecules, 2020. **159**: p. 714-724.

76. Le, T., et al., *Influence of Various Phenolic Compounds on Properties of Gelatin Film Prepared from Horse Mackerel Trachurus japonicus Scales.* J Food Sci, 2018. **83**(7): p. 1888-1895.

77. Grzebieniarz, W., et al., *Multifunctional Biopolymer Films Based on Gelatin and Chitosan Enriched with Plant Extracts: From Functional Characterisation to Food Application and Environmental Impact.* Materials, 2026. **19**(10): p. 2009.

78. Bhatia, S., et al., *A Comparative Study of the Properties of Gelatin (Porcine and Bovine)-Based Edible Films Loaded with Spearmint Essential Oil.* Biomimetics, 2023. **8**(2): p. 172.

79. Matwijczuk, A., et al., *Classification of Honey Powder Composition by FTIR Spectroscopy Coupled with Chemometric Analysis.* Molecules, 2022. **27**(12).

80. López-Díaz, A.S., et al., *Effect of short wave ultraviolet radiation on selected properties of edible films formulated with pomegranate juice and chitosan.* Revista Mexicana de Ingeniería Química, 2018. **17**(1): p. 63-73.

81. Agatonovic-Kustrin, S., et al., *Essential Oil Quality and Purity Evaluation via FT-IR Spectroscopy and Pattern Recognition Techniques.* Applied Sciences, 2020. **10**(20).

82. Melgarejo-Sánchez, P., et al., *Pomegranate variety and pomegranate plant part, relevance from bioactive point of view: a review.* Bioresources and Bioprocessing, 2021. **8**(1): p. 2.

83. Liu, T., et al., *Development and Characterization of Novel Active Chitosan Films Containing Fennel and Peppermint Essential Oils.* Coatings, 2020. **10**(10): p. 936.

84. Gómez-Guillén, M.C., et al., *Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review.* Food Hydrocolloids, 2011. **25**(8): p. 1813-1827.

85. Borges, J.G. and R.A. De Carvalho, *Orally Disintegrating Films Containing Propolis: Properties and Release Profile.* Journal of Pharmaceutical Sciences, 2015. **104**(4): p. 1431-1439.

86. Mabrouk, O., et al., *Evaluation of Bioactive Compounds in Pomegranate Fruit Parts as an Attempt for Their Application as an Active Edible Film.* Journal of Biomaterials, 2019. **3**: p. 7-17.

87. Otálora González, C.M., et al., *Cassava Starch Films with Anthocyanins and Betalains from Agroindustrial by-Products: Their Use for Intelligent Label Development.* Foods, 2022. **11**(21).

88. Sánchez-Rangel, J.C., et al., *The Folin–Ciocalteu assay revisited: improvement of its specificity for total phenolic content determination.* Analytical Methods, 2013. **5**(21): p. 5990-5999.

89. Enaru, B., et al., *Anthocyanins: Factors Affecting Their Stability and Degradation.* Antioxidants, 2021. **10**(12): p. 1967.

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Entomofauna asociada a leguminosas forrajeras en un sitio cálido-subhúmedo en el sur de Tamaulipas, México

Entomofauna associated with forage legumes at a warm-subhumid site in southern Tamaulipas, Mexico

Meraz-Cruz, C.J.[a], Felipe-Victoriano, M.[b]*, García-Rodríguez, J.C.[b], Silva-Martínez, K.L.[c], Garay-Martínez, J.R.[b]*

[a] Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Valles. Carretera al Ingenio Plan de Ayala Vista Hermosa, Ciudad Valles, San Luis Potosí. CP 79010, México.
[b] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), C.E. Las Huastecas (CEHUAS). Carretera Tampico-Mante km 55, Altamira, Tamaulipas. CP 89610, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1223-5204*; https://orcid.org/0000-0001-8950-0172; https://orcid.org/0000-0002-7197-3673*.
[c] Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca. Desviación Lindero Tametate S/N, La Morita, Tantoyuca, Veracruz. CP 92100, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2010-6123.
20690648@tecvalles.mx; felipe.victoriano00@gmail.com*; garcia.juliocesar@inifap.gob.mx; karla.silva@itsta.edu.mx; garay.jonathan@inifap.gob.mx*

Innovación tecnológica: Matriz insecto-leguminosa para orientar el manejo fitosanitario sustentable de las leguminosas en condiciones cálido-subhúmedas.

Área de aplicación industrial: Agricultura sustentable y manejo integrado de plagas en sistemas forrajeros tropicales en condiciones cálido-subhúmedas.

Recibido: 04 junio 2026
Aceptado: 30 agosto 2026

Abstract

Legumes are affected by various arthropods that can reduce grain yield and forage quality. The objective of this research was to identify the entomofauna associated with seven forage legumes and characterize insect–legume association patterns at a study site in southern Tamaulipas, Mexico. The research was conducted at the Sitio Experimental Aldama and the Toxicology Laboratory of the Campo Experimental Las Huastecas, both belonging to the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Two samplings were conducted at a 30-day interval using a plant-shaking method based on the beating-sheet technique. During the first sampling, six orders and 14 insect families were recorded, whereas three orders and six families were recorded during the second sampling. Across the two sampling dates, insect pest families

accounted for 67–72% of the total families recorded, natural enemy families for 17–21%, and non-pest insect families for 7–16%. During the first sampling, the highest levels of association were observed: five insect pest families were associated with *Centrosema schottii* and *Glycine max*; four families with *Vigna radiata* and *Dolichos lablab*; two families with *Canavalia ensiformis* and *Mucuna pruriens*; and only one family was recorded for *Clitoria ternatea*. The most frequent insect pest families were Pentatomidae, Membracidae, and Tettigoniidae. Among the natural enemies, the families Reduviidae, Chrysopidae, and Coccinellidae were identified. Regarding non-pest insects, only the families Chironomidae and Tenebrionidae were recorded. The results obtained show that legumes harbor a wide diversity of insects, among which insect pests predominate over natural enemies and non-pest insects. At the study site and sampling dates, Pentatomidae, Membracidae, and Tettigoniidae were among the most frequently recorded pest families.

Keywords: Pests, natural enemies, insect abundance, arthropods, plant–insect interactions.

Resumen

Las leguminosas son afectadas por diversos artrópodos que pueden disminuir el rendimiento de grano y la calidad del forraje. El objetivo de esta investigación fue identificar la entomofauna asociada a siete leguminosas forrajeras y caracterizar los patrones de asociación insecto-leguminosa en un sitio del sur de Tamaulipas, México. La investigación se llevó a cabo en el Sitio Experimental de Aldama y en el Laboratorio de Toxicología del Campo Experimental Las Huastecas, pertenecientes al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Se realizaron dos muestreos con un intervalo de 30 días mediante una técnica de sacudido de plantas basada en el método “beating sheet”. En el primer muestreo se registraron seis órdenes y 14 familias de insectos, mientras que en el segundo se registraron tres órdenes y seis familias. En ambos muestreos, las familias clasificadas como insectos plaga representaron entre 67 y 72 % del total de familias registradas, las familias de enemigos naturales entre 17 y 21 %, y las familias de insectos no plaga entre 7 y 16 %. En el primer muestreo se presentaron los mayores niveles de asociación: cinco familias de insectos plaga se asociaron a *Centrosema schottii* y *Glycine max*; cuatro familias a *Vigna radiata* y *Dolichos lablab*; dos familias a *Canavalia ensiformis* y *Mucuna pruriens;* y solo se registró una familia para *Clitoria ternatea*. Las familias de insectos plaga registradas con mayor frecuencia fueron Pentatomidae, Membracidae y Tettigoniidae. Entre los enemigos naturales, se identificaron las familias Reduviidae, Chrysopidae y Coccinellidae. En cuanto a los insectos no plaga, únicamente se registraron las familias Chironomidae y Tenebrionidae. Los resultados obtenidos evidencian que las leguminosas albergan una amplia diversidad de insectos, entre los cuales predominan los insectos plaga sobre los enemigos naturales y los insectos no plaga. En las condiciones y fechas de muestreo evaluadas, Pentatomidae, Membracidae y Tettigoniidae estuvieron entre las familias de insectos plaga registradas con mayor frecuencia.

Palabras clave: Plagas, enemigos naturales, abundancia de insectos, artrópodos, interacción planta-insecto.

I. Introducción

Los insectos constituyen uno de los grupos de organismos más diversos de los ecosistemas (Gómez y Builes, 2018; Galante, 2023). De acuerdo con su relación con el cultivo, pueden clasificarse en insectos plaga (principalmente fitófagos que se alimentan de los tejidos vegetales y ocasionan daños), enemigos naturales (depredadores y parasitoides que contribuyen a regular las poblaciones de otros insectos), polinizadores y otros insectos no plaga (non-pest insects), que se encuentran asociados al cultivo sin ocasionar daños (Guzmán-Mendoza *et al*., 2016; Batis *et al*., 2021; Collantes *et al*., 2023; Martelli y Batterham, 2025). Dentro de esta última categoría funcional (insectos no plaga) se incluyen taxones cuya presencia no afecta negativamente al cultivo y que, bajo las condiciones del presente estudio, no fueron clasificados como plagas, enemigos naturales o polinizadores (Alessandrini *et al*., 2026).

En los cultivos, los artrópodos son consideradas de mayor o menor importancia de acuerdo con los daños que pueden ocasionar; en leguminosas para grano y forrajeras las plagas asociadas incluyen principalmente: *Anticarsia gemmatalis* Hübner, 1818*; Helicoverpa armigera* Hübner, 1805*; Maruca vitrata* Fabricius, 1787*; Astraptes talus* Cramer*; Copitarsia* sp. Hampson, 1906; *Spodoptera* sp. Guenée, 1852 (Lepidoptera); *Phyllophaga* sp. Harris, 1827; *Cerotoma ruficornis* Olivier, 1791*; Cerotoma fascialis* Erichson, 1847*; Diabrotica undecimpunctata* Mannerheim, 1843; *Diabrotica viridula* Fabricius, 1801; *Diabrotica speciosa* Germar, 1824; *Callosobruchus maculatus* Fabricius, 1775; *Caryedes brasiliensis* Thunberg, 1816; *Acanthoscelides obtectus (Coleoptera); Nezara viridula* Linnaeus, 1758; *Piezodorus guildinii* Westwood, 1837; *Euschistus* sp.; *Aphis craccivora* C. L. Koch, 1854; *Bemisia tabaci* Gennadius, 1889; *Empoasca* sp., (Hemiptera); *Liriomyza* sp. Mik, 1894 (Diptera); *Thrips palmi* Karny*; Megalurothrips usitatus* Bagnall, 1913; *Megalurothrips distalis* (Thysanoptera) y *Tetranychus urticae* Koch, 1836 (Ribeiro *et al.*, 2009; Anteparra y Velásquez, 2014; Cruz *et al.*, 2016; Marrero *et al*., 2016; Ramírez *et al*., 2017; Arzuaga *et al*., 2021; Santana-Baños *et al*., 2023). Estas plagas en los agroecosistemas son reguladas por sus enemigos naturales, entre los que se incluyen principalmente depredadores, parasitoides y entomopatógenos (virus, hongos y bacterias) (Ribeiro y Castiglioni, 2008; Montecalvo y Navasero, 2021; Aguilar *et al*., 2024).

Al respecto, en leguminosas puede encontrarse un amplio grupo de enemigos naturales de los órdenes Hymenoptera, Hemiptera, Coleoptera, Diptera, Neuroptera y Odonata (Stepin-Sytnik *et al*., 2018), entre los que destacan parasitoides de las familias Braconidae, Tachinidae, Pteromalidae, Platygastridae y Trichogrammatidae, así como depredadores de las familias Forficulidae, Coccinellidae, Reduviidae, Chrysopidae y Syrphidae (González *et al*., 2021; Guera *et al*., 2021; Pierre *et al*., 2022; Santana-Baños *et al*., 2023; Chan y Arjona, 2024). En *Glycine max*, una de las leguminosas más importantes para la producción de grano y forraje (Garay-Martínez *et al*., 2021), Ribeiro y Castiglioni (2008) y Pratissoli *et al*. (2024) señalan que puede albergar una amplia diversidad de controladores biológicos de sus principales plagas, entre los que destacan arácnidos, hemípteros (*Orius insidiosus* Say, 1832*; Nabis punctipennis* Blanchard, 1852*; Geocoris* sp. Fallén, 1814), crisópodos y parasitoides como *Trichogramma atopovirilia* Oatman y Platner.

Como se ha mencionado, los cultivos están asociados a una gran diversidad de insectos, entre los que destacan los insectos plaga; estos pueden provocar pérdidas de rendimiento y calidad del grano o forraje en leguminosas. En la región sur de Tamaulipas existe información limitada sobre la entomofauna asociada a

leguminosas forrajeras; por ello, el objetivo de esta investigación fue identificar la entomofauna asociada a siete leguminosas forrajeras y caracterizar los patrones de asociación insecto-leguminosa en el Sitio Experimental de Aldama, Tamaulipas, México. La información generada podrá servir como referencia para orientar futuros programas de monitoreo y manejo fitosanitario.

II. Materiales y métodos

Ubicación del experimento

La investigación se llevó a cabo en el Sitio Experimental de Aldama, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el municipio de Aldama, Tamaulipas, México; en las coordenadas geográficas 22º 51’ 44’’ N y 98º 14’ 04’’ O, a una altitud de 130 msnm. La identificación de la entomofauna asociada a las leguminosas se realizó en el Laboratorio de Toxicología del Campo Experimental Las Huastecas (CEHUAS).

Siembra y establecimiento de las leguminosas forrajeras

Las parcelas de las especies de leguminosas evaluadas se establecieron originalmente con fines de producción de semilla y no específicamente para realizar un experimento entomológico. La siembra se llevó a cabo durante la primera semana de septiembre de 2023 mediante siembra directa. El suelo presentó textura franco-arcillosa, pH de 8.56, densidad aparente de 1.16 g cm^{-3} y contenido de materia orgánica de 4.2%. Cada especie de leguminosa se estableció en una franja constituida por seis surcos de 30 m de longitud, separados a 0.80 m. Durante el desarrollo de los cultivos se observó de manera natural la presencia de insectos asociados a las diferentes especies, lo que motivó la realización del presente muestreo entomológico.

La distancia entre surcos, la densidad de plantas y la profundidad de siembra variaron y dependieron de la especie. *Mucuna pruriens* (L.) DC. y *Canavalia ensiformis* (L.) DC. fueron sembradas a una profundidad de 5 a 7 cm, con una densidad de dos plantas por metro lineal; *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek, *Dolichos lablab* (L.) y *Centrosema schottii* (Millsp.) K. Schum se sembraron a una profundidad de 3 a 5 cm, con una densidad de 10 plantas por metro lineal; *Glycine max* (L.) Merr. se sembró a una profundidad de 3 a 5 cm, con una densidad de 18 a 20 plantas por metro lineal; y *Clitoria ternatea* L. fue sembrada a una profundidad de 3 cm, con una densidad de 40 plantas por metro lineal.

Colecta de entomofauna asociada a leguminosas forrajeras

Para la colecta de la entomofauna asociada a leguminosas forrajeras, se realizaron dos muestreos con un intervalo de 30 días durante el periodo verano-otoño. Se empleó la técnica de sacudido de plantas, una variante del monitoreo de insectos mediante la técnica “beating sheet” (Montgomery *et al.,* 2021). Para el muestreo se utilizó un plástico blanco de polietileno de un metro de largo, colocado bajo el surco; las plantas de ambos lados del surco, por separado, se inclinaron ligeramente y se sacudieron de manera uniforme, con el fin de que los insectos se desprendieran del cultivo y cayeran sobre el plástico. El procedimiento se realizó en las tres unidades de muestreo de cada leguminosa, evaluando dos metros lineales por unidad.

Los insectos capturados se colocaron en tubos Falcon® de 50 mL con solución hidroetanólica al 70%, los cuales se etiquetaron por especie de leguminosa y unidad de muestreo. Para realizar el muestreo entomológico, cada franja de 30 m correspondiente a una especie de leguminosa se dividió longitudinalmente en tres segmentos de 10 m, considerados unidades de muestreo dentro de la misma franja. En cada unidad de

muestreo se evaluaron dos metros lineales de cultivo. Los segmentos se utilizaron para obtener una representación espacial de la entomofauna presente dentro de cada franja y no constituyeron repeticiones experimentales independientes. Las muestras se trasladaron al Laboratorio de Toxicología del Campo Experimental Las Huastecas, para su identificación mediante las claves taxonómicas propuestas por Arnett *et al*. (2002), Domínguez y Fernández (2009), Bland y Jaques (2010), y la guía de campo para identificación de chinches de importancia agrícola de Herbert *et al*. (2014). Los organismos se identificaron hasta el nivel taxonómico más bajo posible (familia, género o especie, según el espécimen y las claves disponibles).

Análisis estadístico

Debido a que las parcelas fueron establecidas originalmente con fines de producción de semilla y existió una sola franja por especie de leguminosa, el estudio se consideró de carácter observacional. Los tres segmentos de 10 m establecidos dentro de cada franja se consideraron unidades de muestreo y no repeticiones experimentales independientes. En consecuencia, no se realizaron pruebas estadísticas inferenciales para comparar las especies de leguminosas ni las fechas de muestreo, con el fin de evitar pseudorreplicación. La información obtenida se analizó mediante estadística descriptiva. La presencia correspondió al registro de un taxón en cada especie de leguminosa y fecha de muestreo; la riqueza taxonómica se expresó como el número de órdenes y familias registradas; la frecuencia de asociación se describió a partir del número de especies de leguminosas en las que se registró cada taxón; y la abundancia se resumió mediante el promedio aritmético de los conteos obtenidos en las tres unidades internas de muestreo de cada franja y se expresó como individuos por 2 m lineales de cultivo. Estos valores se utilizaron únicamente con fines descriptivos. Para representar gráficamente la asociación entre los insectos registrados y las especies de leguminosas se utilizó un "bubble plot" basado en una matriz insecto × leguminosa. El tamaño del símbolo se escaló proporcionalmente al valor de abundancia representado ($s \propto \sqrt{x}$) para evitar la saturación visual causada por unos pocos valores dominantes. El color se asignó mediante un gradiente continuo ("colormap viridis") con normalización lineal entre los valores mínimo y máximo observados. La representación gráfica siguió criterios de visualización similares a los empleados por Tonanzi *et al.* (2021) y Chen *et al*. (2023). La figura se generó utilizando matplotlib v3.8 y pandas v2.2 en Python 3.11.

III. Resultados y discusión

Principales órdenes y familias de insectos asociadas a leguminosas forrajeras

En el primer muestreo se registraron seis órdenes y 14 familias de insectos, mientras que en el segundo muestreo se identificaron tres órdenes y seis familias (Tabla 1). En ambos muestreos, Hemiptera fue el orden con mayor representación, con seis familias registradas durante el primer muestreo y tres en el segundo. Los órdenes Neuroptera, Diptera y Lepidoptera estuvieron representados por una sola familia y únicamente se registraron durante el primer muestreo. Coleoptera se registró en ambos muestreos, con tres familias en el primero y una en el segundo. Resultados similares fueron reportados por Ribeiro *et al.* (2009), quienes señalan que los insectos del orden Hemiptera son plagas de importancia en leguminosas forrajeras y cultivadas en sistemas agrícola-pastoriles de Uruguay. En otras investigaciones se menciona que las leguminosas pueden ser hospederas frecuentes de insectos de los órdenes Orthoptera, Hemiptera, Coleoptera, Lepidoptera, Thysanoptera, Diptera e Hymenoptera (Ferrufino, 1986; Nuessly *et al*., 2004; Alonso *et al*., 2011; Echeverria, 2021; Gallardo *et al*., 2021; Jaba *et al*., 2021; Ballona *et al*., 2022),

lo que concuerda con algunos órdenes observados en esta investigación.

Tabla 1. Órdenes y familias de insectos asociados a leguminosas forrajeras en Aldama, Tamaulipas, México.

Primer muestreo		Segundo muestreo	
Orden	**Familia**	**Orden**	**Familia**
Coleoptera	Meloidae	Coleoptera	Tenebrionidae
	Coccinellidae	Hemiptera	Pentatomidae
	Chrysomelidae		Reduviidae
Lepidoptera	Noctuidae		Membracidae
Hemiptera	Pentatomidae	Orthoptera	Acrididae
	Lygaeidae		Tettigoniidae
	Reduviidae		
	Membracidae		
	Cicadellidae		
	Thyreocoridae		
Diptera	Chironomidae		
Neuroptera	Chrysopidae		
Orthoptera	Acrididae		
	Tettigoniidae		

En el primer muestreo, las familias clasificadas como insectos plaga representaron 71.4% del total de familias registradas, los enemigos naturales 21.4% y los insectos no plaga 7.1%. En el segundo muestreo, estas categorías representaron 66.7, 16.7 y 16.7 %, respectivamente. Respecto a la entomofauna asociada, en el primer muestreo se observó que *C. schottii* y *G. max* presentaron cinco familias de insectos plaga. Ambas leguminosas fueron hospederas de Pentatomidae y Chrysomelidae; Noctuidae, Acrididae y Tettigoniidae se registraron únicamente en *C. schottii*, mientras que Meloidae, Membracidae y Thyreocoridae se registraron únicamente en *G. max*, *V. radiata* y *D. lablab* presentaron cuatro familias de insectos plaga; en ambas especies se registró Pentatomidae. Meloidae, Noctuidae y Cicadellidae se registraron únicamente en *V. radiata*, mientras que Membracidae, Chrysomelidae y Cicadellidae se registraron en *D. lablab*. En *C. ensiformis* y *M. pruriens* se registraron dos familias, Pentatomidae y Lygaeidae. En *C. ternatea* únicamente se registró Pentatomidae.

En el segundo muestreo, *C. schottii* y *C. ensiformis* presentaron tres familias de insectos plaga. Pentatomidae se registró en ambas leguminosas; Membracidae y Tettigoniidae se registraron en *C. schottii*, mientras que Tettigoniidae y Acrididae se registraron en *C. ensiformis*. Pentatomidae y Membracidae se registraron en *G. max*. En *M. pruriens* únicamente se registró Pentatomidae (Figura 1-a). En el segundo muestreo no se colectaron insectos en *V. radiata* ni en *D. lablab*, debido a que ambos cultivos habían completado su ciclo fenológico.

En conjunto se registraron tres familias de enemigos naturales. En el primer muestreo, Reduviidae se registró en *C. ensiformis* y *C. schottii;* Chrysopidae en *V. radiata* y *D. lablab*; mientras que Coccinellidae se registró únicamente en *M. pruriens*. En el segundo muestreo únicamente se registró la familia Reduviidae. Respecto a los insectos no plaga, se registró una familia en cada muestreo. En el primer muestreo se colectó un espécimen de la familia Chironomidae en *D. lablab*, el cual posiblemente empleó el cultivo como refugio; al respecto, Caleño *et al.* (2018) mencionan que esta familia es mayormente acuática y que los adultos pueden alimentarse de néctar, agua o polen. En el segundo muestreo se identificó

un espécimen de la familia Tenebrionidae en *C. ensiformis*; estos insectos, por lo general, son detritívoros y se encuentran en diferentes ambientes, aunque algunas especies se consideran plagas de granos almacenados (Figura 1-b).

Los registros mostraron variación descriptiva en la composición de familias de insectos plaga entre las especies de leguminosas evaluadas. Pentatomidae presentó la mayor recurrencia entre las leguminosas, mientras que Membracidae también mostró una frecuencia elevada de asociación. Estos patrones corresponden únicamente a las condiciones y fechas de muestreo evaluadas y no implican necesariamente una preferencia alimenticia, ya que esta variable no fue evaluada directamente. En diversos estudios en leguminosas para grano y forrajeras se ha reportado que las principales plagas asociadas son de las familias Noctuidae, Crambidae, Hesperiidae (Lepidoptera); Chrysomelidae (Coleoptera); Pentatomidae, Aphididae, Aleyrodidae, Cicadellidae (Hemíptera); Agromyzidae (Diptera); *Thripidae* (Thysanoptera) y *Tetranychidae* (Trombidiformes) (Anteparra y Velásquez, 2014; Marrero *et al*., 2016; Ramírez *et al*., 2017; Arzuaga *et al*., 2021; Santana-Baños *et al*., 2023), lo cual está en correspondencia con lo registrado en esta investigación.

En los agroecosistemas es común encontrar una amplia diversidad de insectos plaga, así como de insectos benéficos (Hernández-Aranda *et al*., 2022; Amatta y Campos, 2024). Estos insectos forman parte de las cadenas tróficas, en las que se establecen relaciones alimentarias entre plantas, insectos herbívoros y sus enemigos naturales (Hernández *et al*., 2013). Al respecto, King y Saunders (1984) señalan que los insectos plaga suelen estar presentes en los cultivos en altas poblaciones, debido principalmente a la disponibilidad de alimento, así como a otros factores, tales como el manejo del cultivo, la temperatura y la precipitación. Lo anterior concuerda parcialmente con los registros obtenidos en esta investigación, en los cuales las familias clasificadas como insectos plaga representaron la mayor proporción del total de familias registradas en ambos muestreos, mientras que los enemigos naturales y los insectos no plaga estuvieron representados por un menor número de familias.

Lo anterior refuerza lo reportado por Price (1976), quien menciona que las poblaciones de los enemigos naturales son inferiores y su desarrollo poblacional es más lento que el de los insectos plaga; no obstante, Altieri y Nicholls (2007) y Echeverría (2021) refieren que ciertos hábitats con elevada abundancia de insectos fitófagos favorecen el establecimiento y desarrollo de poblaciones de depredadores y parasitoides, y que estos hábitats se pueden emplear como una estrategia para el control biológico mediante corredores biológicos. Al respecto, en otras investigaciones se resalta que las leguminosas en asociación con otros cultivos pueden albergar diversas familias de enemigos naturales, entre los que destacan parasitoides de las familias Braconidae, Tachinidae, Pteromalidae, Platygastridae y Trichogrammatidae, así como depredadores de las familias Forficulidae, Coccinellidae, Reduviidae y Syrphidae; los cuales pueden contribuir al control de plagas (Guera *et al*., 2021; Pierre *et al*., 2022; Chan y Arjona, 2024).

Particularmente, Santana-Baños *et al*. (2023), mencionan que *Vigna unguiculata* L. puede ser hospedera de diversos enemigos naturales de la familia Coccinellidae, los cuales pueden contribuir al control de poblaciones de insectos plaga. Adicionalmente, Ribeiro y Castiglioni (2008) y González *et al*. (2021) destacan que especies de las familias Chrysopidae (*Chrysoperla* sp. Steinmann, 1964) y Coccinellidae (*Harmonia axyridis* Pallas, 1773; *Hippodamia convergens* Guérin-Méneville, 1842 y *Cycloneda sanguinea* L.) son depredadoras de áfidos y huevos de

Piezodorus guildinii (pentatómidos) en algunas leguminosas como *Dolichos lablab.*

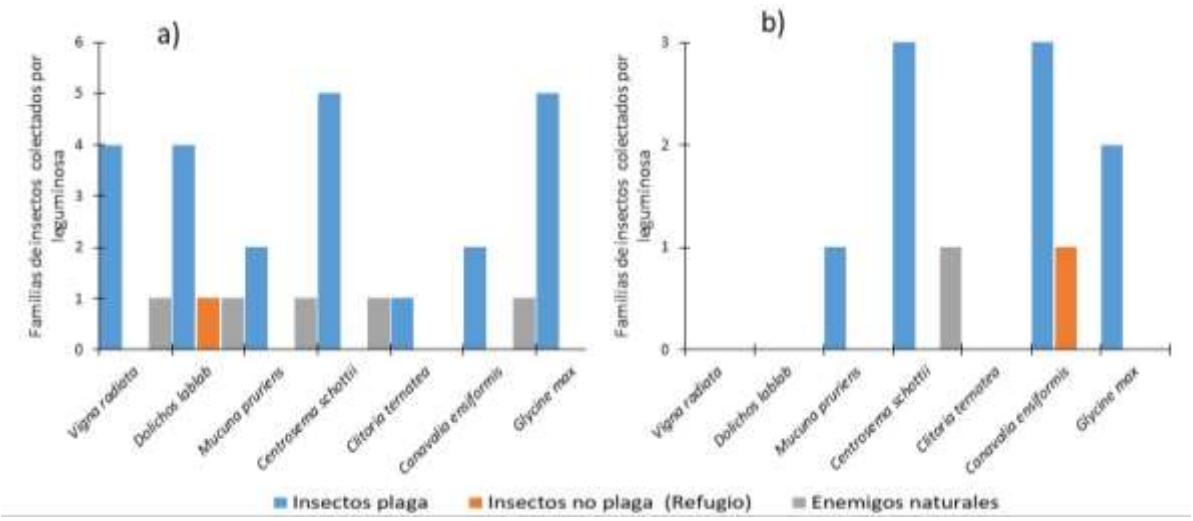


Figura 1. Número de familias de insectos plaga, enemigos naturales e insectos no plaga registradas en leguminosas forrajeras en Aldama, Tamaulipas, México: a) primer muestreo y b) segundo muestreo. En *V. radiata* y *D. lablab* no se registraron insectos durante el segundo muestreo debido a que ambos cultivos habían completado su ciclo fenológico.

Abundancia de insectos plaga asociados a leguminosas forrajeras

La abundancia se resumió descriptivamente mediante el promedio de individuos registrados en las tres unidades de muestreo internas de cada franja y se expresó como individuos por 2 m lineales de cultivo. En general, los valores observados fueron numéricamente mayores en el primer muestreo que en el segundo. Entre las especies de insectos plaga con los valores descriptivos de abundancia más altos se encontraron *Euschistus quadrator* Rolston, 1874*; Piezodorus guildinii; Spissistilus* sp. Caldwell, 1949 y *Epicauta fabricii* LeConte, 1853 (Figura 2).

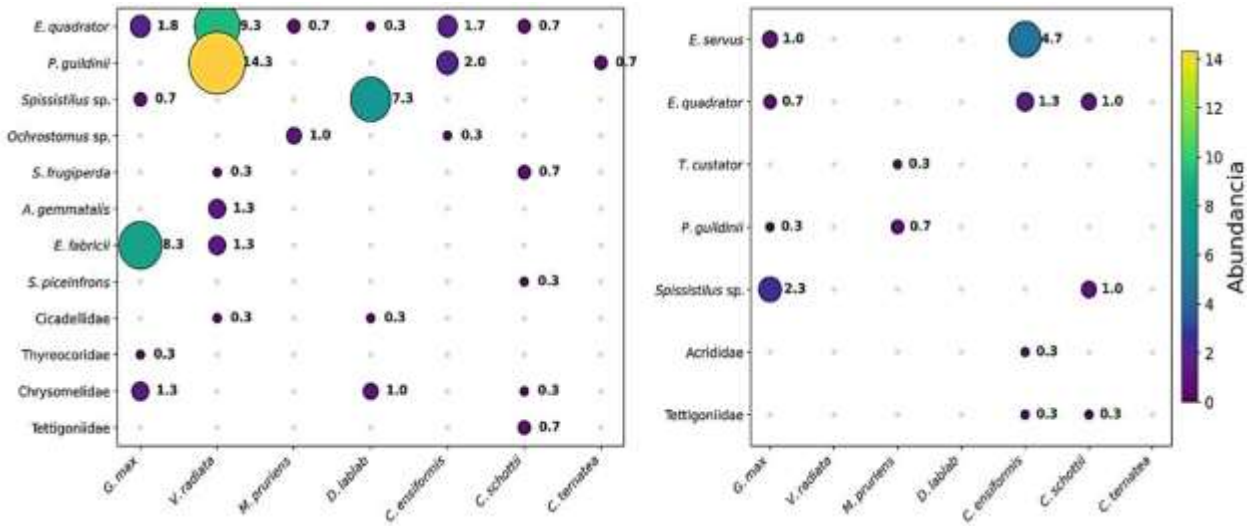


Figura 2. Abundancia media descriptiva de insectos plaga (individuos por 2 m lineales) registrada en el primer (izquierda) y segundo (derecha) muestreo en leguminosas forrajeras en Aldama, Tamaulipas, México.

En el primer muestreo, el valor descriptivo más alto de *E. quadrator* se registró en *V. radiata*, con 9.3 individuos por 2 m lineales, mientras que en *G. max*, *C. ensiformis*, *M. pruriens*, *C. schottii* y *D. lablab* los valores fueron menores. Para *P. guildinii*, el valor más alto también se registró en *V. radiata*, con 14.3 individuos por 2 m lineales, mientras que *C. ternatea* y *C. ensiformis* presentaron valores de 0.7 y 2.0, respectivamente. *Spissistilus* sp. presentó el valor más alto en *D. lablab*, con 7.3 individuos por 2 m lineales, seguido de *G. max*, con 0.7. Para *E. fabricii*, el valor más alto se registró en *G. max*, con 8.3 individuos por 2 m lineales, seguido de *V. radiata*, con 1.3.

En el segundo muestreo se observaron descriptivamente menores valores de riqueza y abundancia que en el primero (Figuras 1 y 2). Entre las especies con los valores de abundancia más altos se registraron *E. servus*, con 4.7 individuos por 2 m lineales en *C. ensiformis*; *Spissistilus* sp., con 2.3 individuos por 2 m lineales en *G. max*; y *E. quadrator*, con valores de hasta 1.3 individuos por 2 m lineales. Para *P. guildinii* se registraron valores inferiores a 1 individuo por 2 m lineales. En *V. radiata* y *D. lablab* no se registraron insectos durante el segundo muestreo, debido a que ambos cultivos habían completado su ciclo fenológico.

En términos descriptivos, el segundo muestreo presentó menor riqueza y menores valores de abundancia que el primero. Este patrón coincidió con cambios fenológicos observados en algunas de las leguminosas; sin embargo, debido al carácter observacional del estudio, no es posible atribuir estas diferencias a una causa específica. Medal *et al*. (2016) señalan que las especies de la familia Pentatomidae son plagas principales de leguminosas, así como de algunas plantas ornamentales, y que el daño varía según el estadio del cultivo y la densidad de la plaga (Belorte *et al*., 2003). Asimismo, Ribeiro (2010) resalta que *Piezodorus guildinii*, *Spissistilus* sp., *Epicauta fabricii* se encuentran entre las principales plagas asociadas con leguminosas, lo que concuerda con los taxones registrados en el presente trabajo de investigación.

IV. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

En las condiciones del sitio y en las fechas de muestreo evaluadas se registraron seis órdenes y 14 familias de insectos. Entre las familias clasificadas como insectos plaga, Pentatomidae presentó la mayor recurrencia entre las especies de leguminosas evaluadas. Como enemigos naturales se registraron representantes de las Reduviidae, Chrysopidae y Coccinellidae, mientras que Chironomidae y Tenebrionidae correspondieron a la categoría de insectos no plaga. Entre las especies de insectos plaga con los mayores valores descriptivos de abundancia se encontraron *Piezodorus guildinii*, *Euschistus quadrator*, *Spissistilus* sp. y *Epicauta fabricii*. Esta información puede utilizarse como referencia para orientar futuros programas de monitoreo fitosanitario. La implementación de medidas de control deberá sustentarse en evaluaciones específicas de daño y, cuando estén disponibles, en umbrales de acción validados para cada plaga y cultivo. Por ello, se recomienda que futuros estudios incluyan evaluaciones del nivel de daño asociado con la presencia de insectos plaga en las especies de leguminosas evaluadas. Debido a que las parcelas fueron establecidas previamente para producción de semilla y se contó con una sola franja por especie, los resultados representan asociaciones observadas bajo las condiciones particulares del sitio y las fechas de muestreo y no deben interpretarse como evidencia experimental de preferencia de hospedero. Estudios posteriores deberán considerar parcelas independientes y aleatorizadas para evaluar estadísticamente diferencias en abundancia de insectos entre especies de leguminosas.

V. Referencias

Aguilar, A. P. F., Robles, H. J. F., Cruz, M. P. W., Frías, F. A. J., Toledo, M. G. J., Pantoja, W. N. L., & Castro, M. C. D. R. (2024). Control biológico de insectos plaga mediante bioinsecticidas virales para la producción de alimentos inocuos. *Jóvenes en la ciencia*, 28. https://doi.org/10.15174/jc.2024.4272

Alessandrini, C., Sethi, K., Granata, E., Mogilnaia, E., Vitangeli, V., Zanfei, G., ... & Brambilla, M. (2026). Orchard netting impacts on biodiversity leading to cascading effects at the ecosystem level. *Biological Reviews*.

Alonso, O., Lezcano, J. C., & Suris, M. (2011). Composición trófica de la comunidad insectil en dos agroecosistemas ganaderos con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit y *Panicum maximum* Jacq. *Pastos y Forrajes*, 34(4), 433-444.

Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas*, 16(1).

Amatta, E., & Campos, V. (2024). Evaluación de la biodiversidad de artrópodos en agroecosistemas del Valle de Tulum, San Juan, Argentina. *Quebracho*, 32(1-2), 74-88.

Anteparra, M., & Velásquez, J. (2014). Revisión de la familia Chrysomelidae asociada a leguminosas de grano en el trópico sudamericano. *RevIA*, 4, 1-2.

Arnett, R. H., Jr., Thomas, M. C., Skelley, P. E., & Frank, J. H. (Eds.). (2002). *American Beetles, Volume II: Polyphaga: Scarabaeoidea through Curculionoidea*. CRC Press. 880 p.

Arzuaga, L. G., Yanes, L. C., Cabrera, I. M., Castro, A. S., Díaz, H. L. B., & Campos, M. S. (2021). Influencia de variables climáticas sobre la fluctuación poblacional de thrips (*Megalurothrips usitatus* Bagnall) en frijol. *Revista de Protección Vegetal*, 36(2).

Ballona, L. C., Espinoza, L. D. C. L., de la Cruz Pérez, A., Ramírez, J. A. R., & Sánchez-Soto, S. (2022). Insectos asociados a *Crotalaria ongirostrata* Hook. & Arn. (Fabales: Fabaceae) en La Chontalpa, Tabasco, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 8(1), 1-14. https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081002

Batis, B. V., Hernández, D. G., García, Y. M. R., Leyva, G. B., & Fonseca, R. R. (2021). Agricultura suburbana: biodiversidad, servicios ecosistémicos y control natural de plagas agrícolas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 137-146. https://doi.org/10.62452/z172w154

Belorte, L. C., Ramiro, Z. A., Faria, A. M., & Marino, C. A. B. (2003). Danos causados por percevejos (Hemiptera: Pentatomidae) em cinco cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill, 1917) no município de Araçatuba, SP. *Arquivos do Instituto Biológico*, 70(2), 169-175.

Bland, R. G., & Jaques, H. E. (2010). *How to know the insects*. Waveland Press. 409 p.

Caleño Ruiz, Y., Rivera-Rondon, C. A., & Ovalle, H. (2018). Feeding habits of chironomids (Diptera: Chironomidae) of paramo Chingaza lakes, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(1), 136-148. http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i1.28951

Collantes, R. D., Ruth Del Cid, A., Santos-Murgas, A., & Atencio, R. (2023). Importancia de los insectos polinizadores en la sostenibilidad de los agroecosistemas

productivos. *Revista Semilla del Este*, 3(2), 8-26.

Cruz Limonte, A., Álvarez Hernández, U., Grillo Ravelo, H., Ortega Camacho, R. A., & Cárdenas Morales, M. (2016). Entomofauna asociada a la soya [*Glycine max* (L.) Merr.] en sistemas de siembra directa y convencional. *Centro Agrícola*, 43(1), 77-84.

Chan, A. D., & Arjona, R. R. (2024). Leguminosas: proveedoras de servicios agroecológicos para la producción sostenible de maíz. *Centro*, 16, 116-121.

Chen, Y., Ren, Z., Wang, L., Zhang, X., Li, Y., & Gao, Y. (2023). Niche-mediated bacterial community composition in continental glacier alluvial valleys under cold and arid environments. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1120151. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1120151

Domínguez, E., & Fernández, H. (Eds.). (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología*. Fundación Miguel Lillo.

Echeverria, A. (2021). Influencia de la variedad sembrada sobre la abundancia de plagas y enemigos naturales del cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Trabajo presentado como requisito para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. 59 p.

Ferrufino, A. (1986). Entomofauna asociada con pasturas en Chipiriri, Bolivia. *Pasturas Tropicales*, 8(1), 18-21.

Galante, E. (2023). Insectos, biodiversidad amenazada en un mundo cambiante. *Ecología política*, 66, 43-50.

Gallardo, C. B., Medina, O. D., & Agostini, S. (2021). Plagas de importancia económica en leguminosas de grano en la provincia de Jujuy, Argentina. *Bio Scientia*, 4(09), 45-46.

Garay-Martínez, J. R., Maldonado-Moreno, N., Ascencio-Luciano, G., Joaquín-Cancino, S., Bautista-Martínez, Y., & Granados-Rivera, L. D. (2021). Potencial forrajero de líneas experimentales de soya (*Glycine max*). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(II), e2932. https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2932

Gómez, G. F., & Builes, L. A. G. (2018). Los artrópodos. *Revista Tecnológico de Antioquia*, 1, 80-87.

González, R. D. C., Perla, D., & Berrío, A. R. R. (2021). Coccinellidae (Coleoptera) depredadores de *Aphis craccivora* (Hemiptera: Aphididae) en el cultivo de *Lablab purpureus* en Ica, Perú. *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 4(1), 1-13.

Guera, O. G. M., Castrejón-Ayala, F., Robledo, N., Jiménez-Pérez, A., Sánchez-Rivera, G., Salazar-Marcial, L., & Flores-Moctezuma, H. E. (2021). Effectiveness of Push-Pull Systems to Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda*) Management in Maize Crops in Morelos, Mexico. *Insects*, 12(4), 298. https://doi.org/10.3390/insects12040298

Guzmán-Mendoza, R., Calzontzi-Marín, J., Salas-Araiza, M. D., & Martínez-Yáñez, R. (2016). La riqueza biológica de los insectos: análisis de su importancia multidimensional. *Acta Zoológica Mexicana*, 32(3), 370-379.

Herbert, D. A., Kamminga, K. L., Malone, S., Kuhar, T. P., Day, E. R., Greene, J. K., Brown, L. M., & Ellsworth, P. C. (2014). *Field guide to stink bugs of agricultural*

importance in the United States. Virginia Tech and Virginia State University. 52 p.

Hernández, M. S., Vargas, O. M., Areces, B. B., Delgado, J. F., & Ayala, A. D. (2013). Artrópodos beneficiosos en el control natural de plagas del frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walpers). *Agrotecnia de Cuba*, 37(1).

Hernández-Aranda, V., Jarquin-Gálvez, R., Lara-Ávila, P., & Aguilar-Benítez, G. (2022). Bioprospección de insectos benéficos en sistemas de producción agroecológicos y orgánicos en San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 511-525. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2896

Jaba, J., Bhandi, S., Deshmukh, S., Pallipparambil, G. R., Mishra, S. P., & Arora, N. (2021). Identification, evaluation, and utilization of resistance to insect pests in grain legumes: Advancement and restrictions. In *Genetic Enhancement in Major Food Legumes: Advances in Major Food Legumes* (pp. 197-230). Springer International Publishing.

King, A. B., & Saunders, J. L. (1984). *Las plagas invertebradas de cultivos anuales alimenticios en América Central*. IICA/CATIE.

Marrero Artabe, L., Tejera, Y., Liriano, R., Torres, L., Fernández, R., Rojas, M., & González, F. (2016). Insectos nocivos asociados al cultivo del garbanzo (*Cicer arietinum* L.) en zonas de la provincia Matanzas. *Revista de Protección Vegetal*, 31(2), 134-136.

Martelli, F., & Batterham, P. (2025). Agrochemicals: Insect declines in a warming world. *Current Biology*, 35(2), R66-R69.

Medal, J., Lotz, G., Smith, T., Santa-Cruz, A., Rohrig, E., Hoelmer, K., & Tatman, K. (2016). Pruebas de especificidad con el parasitoide de huevos *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Hymenoptera: Platygastridae) para el control biológico de la chinche hedionda *Halyomorpha halys* Yang (Heteroptera: Pentatomidae) en los Estados Unidos de América. *Entomología Mexicana*, 3, 191-196.

Montgomery, G. A., Belitz, M. W., Guralnick, R. P., & Tingley, M. W. (2021). Standards and best practices for monitoring and benchmarking insects. *Frontiers in ecology and evolution*, *8*, 579193.

Montecalvo, M. P., & Navasero, M. M. (2021). *Metarhizium (= Nomuraea) rileyi* (Farlow) Samson from *Spodoptera exigua* (Hübner) cross-infects fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) larvae. *Philippine Journal of Science*, 150(1), 193-199.

Nuessly, G. S., Hentz, M. G., Beiriger, R., & Scully, B. T. (2004). Insects associated with faba bean, *Vicia faba* (Fabales: Fabaceae), in southern Florida. *Florida Entomologist*, 87(2), 204-211. https://doi.org/10.1653/0015-4040(2004)087[0204:IAWFBV]2.0.CO;2

Pierre, J. F., Latournerie-Moreno, L., Garruña, R., Jacobsen, K. L., Laboski, C. A., Us-Santamaría, R., & Ruiz-Sánchez, E. (2022). Effect of maize-legume intercropping on maize physio-agronomic parameters and beneficial insect abundance. *Sustainability*, 14(19), 12385. https://doi.org/10.3390/su141912385

Pratissoli, D., Vianna, U. R., de Oliveira, R. C., Damascena, A. P., de Oliveira, A. C. L. F., & Piffer, A. B. M. (2024). Analysis of the optimal densities and embryonic ages of *Anticarsia gemmatalis* eggs for the

biological control agent *Trichogramma atopovirilia*. *Outlooks on Pest Management*, 35(5), 187-192. https://doi.org/10.1564/v35_oct_02

Price, P. W. (1976). Colonization of crops by arthropods: non-equilibrium communities in soybean fields. *Environmental Entomology*, 5(4), 605-611. https://doi.org/10.1093/ee/5.4.605

Ramírez Cariño, R. N., Romero Nápoles, J., Vera Graziano, J., Equihua Martínez, A., Bautista Martínez, N., Hernández Morales, J., & Aragón García, A. (2017). Demografía de brúquidos (Coleoptera: Bruchidae) asociados con *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (Fabaceae). *Acta Zoológica Mexicana*, 33(1), 9-17.

Ribeiro, A. (2010). Prospección de agentes para el control natural de plagas en sistemas agrícola-pastoriles. *Enfermedades y plagas en pasturas*.

Ribeiro, A., & Castiglioni, E. (2008). Characterization of the populations of natural enemies of *Piezodorus guildinii* (Westwood) (Hemiptera: Pentatomidae). *Agrociencia Uruguay*, 12(2), 48-56.

Ribeiro, A., Castiglioni, E., Silva, H., & Bartaburu, S. (2009). Fluctuations in Pentatomidae (Hemiptera: Pentatomidae) populations in soybean (*Glycine max*) and lotus (*Lotus corniculatus*). *Bulletin of Plant Health Pests*, 35(3), 429-438.

Santana-Baños, Y., Carrodeguas-Díaz, S., Rodríguez-Espinosa, F. L., Pupo-Pérez, R. A., Díaz-Barrio, M., & del Busto-Concepción, A. (2023). Insectos asociados al frijol caupí en agroecosistemas de Pinar del Río, Cuba. *Revista de Protección Vegetal*, 38(1), 1-4.

Stepin-Sytnik, E. V., Garay-Villalba, M. C., Maidana-Ojeda, M., & Cabral-Antúnez, C. (2018). Insectos depredadores y parasitoides asociados al cultivo de soya (*Glycine max* L. Merrill, 1917), en el distrito Arquitecto Tomás Romero Pereira, Itapúa, Paraguay. *Intropica*, 13, 122-129.

Tonanzi, B., Crognale, S., Gianico, A., Della Sala, S., Miana, P., Zaccone, M. C., & Rossetti, S. (2021). Microbial community successional changes in a full-scale mesophilic anaerobic digester from the start-up to the steady-state conditions. *Microorganisms*, 9(12), 2581. https://doi.org/10.3390/microorganisms9122581

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Análisis comparativo de modelos de regresión, una alternativa para la predicción de la generación de residuos sólidos urbanos a partir de su composición

Comparative analysis of regression models: an alternative for predicting municipal solid waste generation based on composition

Hernández-Cruz, A.[a], Castañeda-Gutiérrez, J.L.[b], Hernández-Hernández, J.C.[b]*, Sánchez-Olarte, J.[c]

[a] Doctorado en Ciencias de la Ingeniería; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco; CP 90491, Tzompantepec, Tlaxcala. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8704-5460.
[b] División de Estudios de Posgrado e Investigación; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco; CP 90491, Tzompantepec, Tlaxcala. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3971-6935, https://orcid.org/0000-0001-7245-9564*.
[c] División de Ingeniería en Gestión empresarial; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de San Martín Texmelucan; CP 74120, San Martín Texmelucan, Puebla. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4469-2726.
d95370469@apizaco.tecnm.mx; jorge.cg@apizaco.tecnm.mx; crispin.hh@apizaco.tecnm.mx*; josset.sanchez@smartin.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Comparativa experimental de modelos de aprendizaje automático para la optimización de predicciones en la generación de Residuos Sólidos Urbanos.

Área de aplicación industrial: Gestión de Residuos sólidos Urbanos y modelos de predicción basados en aprendizaje automático.

Recibido: 31 julio 2026
Aceptado: 22 septiembre 2026

Abstract

The growing generation of municipal solid waste (MSW) and the operational closure of landfills pose critical challenges for municipal management. This study aimed to evaluate and compare the predictive performance of three regression architectures—second-order polynomial regression (PR, d=2), support vector regression (SVR), and extreme gradient boosting (XGBoost)—to estimate weekly MSW generation based on the waste types generated in the previous week (t-1). Methodologically, a historical time series (2010–2024) from a municipality in Tlaxcala was processed; a chronological split was performed, allocating 80% of the data for training and 20% for testing, using a time-series cross-validation scheme (TimeSeriesSplit with k=5). Empirical results demonstrated that polynomial regression achieved optimal performance (R^2 = 0.9972),

outperforming more complex non-linear models such as XGBoost (R^2 = 0.9926) and SVR (R^2 = 1.0585). These results indicate that increasing algorithmic complexity does not guarantee superior predictive capability when the time series retains a strong autoregressive structure and well-defined compositional trends. It is concluded that lightweight parametric architectures offer an efficient, low-computational-cost alternative, serving as a quantitative tool with the potential to support logistics planning and decision-making in municipal waste management.

Keywords: machine learning, polynomial regression, municipal solid waste.

Resumen

La creciente generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y el cierre operativo de vertederos plantean desafíos críticos para la gestión municipal. El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar el desempeño predictivo de tres arquitecturas de regresión: Regresión Polinómica de segundo orden (RP, d=2), Regresión de Vectores de Soporte (RVS) y Extreme Gradient Boosting (XGBoost), para estimar la generación semanal de RSU a partir de los tipos de residuos generados de la semana previa (*t-1*). Metodológicamente, se procesó una serie temporal histórica del 2010 a 2024 de un municipio de Tlaxcala, se realizó una división cronológica asignando el 80% para entrenamiento y 20% para prueba, bajo un esquema de validación cruzada temporal (TimeSeriesSplit y k=5). Los resultados empíricos demostraron que la Regresión Polinómica obtuvo un desempeño óptimo con R^2 = 0.9972, superando a modelos no lineales de mayor complejidad como XGBoost con R^2 = 0.9926 y SVR (R^2= -1.0585). Estos resultados muestran que incrementar la complejidad algorítmica no garantiza una mayor capacidad predictiva cuando la serie conserva una fuerte estructura autorregresiva y tendencias de composición bien definidas. Se concluye que las arquitecturas paramétricas ligeras son una alternativa eficiente y de bajo costo computacional, proyectándose como un insumo cuantitativo con el potencial de apoyar la planificación logística y la toma de decisiones en la gestión municipal de residuos.

Palabras clave: aprendizaje automático, regresión polinómica, residuos sólidos urbanos.

I. Introducción

En aumento en la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) representa importantes retos para la gestión municipal a nivel global, ya que a nivel mundial se supera los 2.01 mil millones de toneladas anuales, proyectando 3.4 mil millones para los próximos 30 años (Cook et al., 2026). En América Latina y el Caribe se generan 541,000 t/día, destinado el 90% a disposición final y reciclando apenas el 10% (Programa, 2018), lo que absorbe hasta el 50% del presupuesto operativo en ciudades medianas (ONU-Habitat, s.f.). En México la cifra alcanza 139,000 t/día con solo 5% de tratamiento adecuado (Naturales, s.f.), panorama agravado por el cierre acelerado de rellenos sanitarios y la proliferación de vertederos clandestinos (Gobierno del Estado de Tlaxcala, 2025; Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 2026).

Frente a esta complejidad sistémica, la optimización operacional ha abordado rutas de recolección (Alshaikh & Abdelfatah, 2024; Hannan et al., 2020), modelos

biobjetivo (Alzate Montoya et al., 2024; Aydemir-Karadag, 2022) y enfoques multicriterio (Barma & Modibbo, 2022; Li et al., 2025). Estrategias aplicadas en Shanghái redujeron 15.3% los costos y 12.7% de CO_2 (Zhou et al., 2022), mientras que en Monterrey se lograron reducciones de hasta 20% en distancias recorridas (Benítez-Bravo et al., 2021). En este contexto, las ciudades inteligentes han integrado Tecnologías de la Información, Internet de las Cosas y Aprendizaje Automático (Machine Learning, ML) para responder a estos desafíos urbanos (Aktemurer al., 2020; Szpilko et al., 2023).

La previsión de RSU ha evolucionado de estimaciones per cápita con modelos matemáticos de programación lineal (Koushik et. al, 2020) hacia modelos predictivos avanzados Support Vector Regression, Random Forest, XGBoost abarcando transporte, tratamiento y disposición final (Abdallah et al., 2020; Arroyo et al., 2023; Subedi et al., 2025; Zhang et al., 2024). Algoritmos como SVR, Regresión Polinómica (PR) y XGBoost destacan por modelar dinámicas no lineales complejas y adaptarse a datos con preprocesamiento estructurado (Khoirunisa et al., 2025; Bhattacharya et al., 2021; Soegianto et al., 2024; Xia et al., 2022). No obstante, existen vacíos críticos al omitir la integración de depuración temporal, clasificación detallada por tipología de residuo y modelado comparativo cuantitativo en América Latina (Zou et al., 2025). Específicamente, existe una limitación recurrente en la literatura al no incorporar la composición fraccionada semanal en *t-1* como variable dinámica de entrada para predecir la masa total en el periodo futuro (t).

Para resolver esta limitación, este estudio evalúa y compara el desempeño predictivo de tres arquitecturas de aprendizaje supervisado: Regresión Polinómica (PR), Regresión de Vectores de Soporte (SVR) y Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Utilizando doce categorías de residuos desfasadas en *t-1* como variables independientes, se evalúa el rendimiento mediante R^2, MAE y RMSE. El análisis reconoce metodológicamente la influencia de la estructura por composición y la dependencia autorregresiva en los márgenes de ajuste de modelos complejos. Los resultados se proyectan como un insumo analítico para la toma de decisiones en la planificación municipal de recolección y la reducción del confinamiento en vertederos, alineándose con las metas de sustentabilidad de la Agenda 2030 (CEPAL, s.f.). El artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección II presenta los materiales y equipo; la Sección III detalla los métodos experimentales y la formulación matemática; la Sección IV aborda los resultados y la discusión; y la Sección V expone las conclusiones de forma sintetizada.

II. Materiales y equipos

Todos los experimentos computacionales y las arquitecturas de los modelos se implementaron utilizando Python 3.10, empleando bibliotecas especializadas para el análisis de datos y aprendizaje automático de alto rendimiento (por ejemplo, scikit-learn v1.2, pandas v2.0 y xgboost v1.7).

Los datos analizados provienen de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Tlaxcala (2025). Las 12 categorías de residuos se definieron como variables independientes (X) en el periodo ($t-1$) detalladas en la Tabla 1, mientras que la variable dependiente (Y) representa la masa total generada en el periodo futuro (t).

Tabla 1. Clasificación de RSU.

No.	Categoría de residuos	Subproducto asociado
1	Orgánicos	Orgánico
2	Papel y cartón	Papel cerrado, cartón, cartón cerrado, cartón multicapa
3	Plástico	LDPE (bolsas), PP, PET, PVC, PS, HDPE, bolsas metalizadas, caucho
4	Sanitarios	Residuos sanitarios (toallas, tampones, pañales), papel higiénico y servilletas.
5	Textiles	Textiles
6	Otros	Otros residuos / inertes / finos
7	Metales	Materiales ferrosos, materiales no ferrosos (latas de aluminio)
8	Madera	Madera
9	Vidrio	Vidrio transparente, vidrio de color
10	Construcción	Materiales de construcción
11	Peligroso	Residuos potencialmente peligrosos
12	Electrónicos	Residuos electrónicos

El conjunto de datos históricos abarca registros semanales desde 2010 hasta 2024, consolidando un total de 700 observaciones. El área de estudio corresponde a un municipio del estado de Tlaxcala. Cabe destacar que, por motivos de confidencialidad institucional solicitados por las autoridades proveedoras de la información, la ubicación geográfica exacta y el nombre del municipio se mantienen en anonimato. Sin embargo, esto no afecta la reproducibilidad cuantitativa del análisis.

III. Métodos experimentales

Se adoptó un enfoque cuantitativo y comparativo mediante aprendizaje automático supervisado para la estimación de RSU. El análisis utiliza una serie temporal retrospectiva de 700 observaciones semanales recolectadas entre 2010 y 2024. Se evalúan tres arquitecturas de regresión con distintos fundamentos matemáticos: RP, SVR y XGBoost. Cada algoritmo se sometió a un protocolo estandarizado de entrenamiento, basado en las doce categorías fraccionadas de la semana previa (*t-1*) para predecir la masa generada en el periodo futuro (*t*), aplicando una división temporal estricta (80% entrenamiento, 20% prueba) y una evaluación estadística mediante las métricas R^2, MAE y RMSE.

La Figura 1 sintetiza el flujo metodológico implementado, desde la adquisición y preprocesamiento de los datos por tipo de RSU y el ajuste de hiperparámetros hasta la comparación final del desempeño predictivo entre las arquitecturas evaluadas TimeSeriesSplit, (k=5), hasta la comparación final del desempeño predictivo entre las arquitecturas evaluadas.

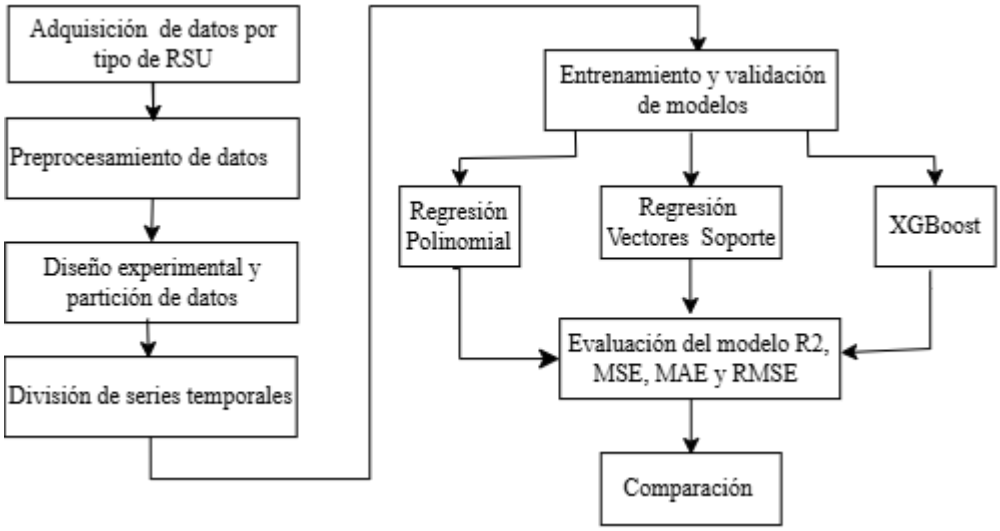


Figura 1. Esquema general del flujo metodológico de la investigación.

A. Adquisición y preprocesamiento de datos

La fase inicial consistió en identificar y extraer los registros brutos procedentes de las fuentes primarias institucionales, consolidándolos en una matriz de datos (formato CSV). Posteriormente, se ejecutó un protocolo de control de calidad de los datos, lo que incluye la limpieza de datos, la imputación de valores faltantes, la detección de valores atípicos y la normalización de características para garantizar la integridad y la estabilidad numérica del conjunto de datos antes de la etapa de modelado.

Modelos de Regresión e hiperparámetros

Para estimar la generación semanal de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), se evaluaron tres arquitecturas con supuestos matemáticos diferenciados: RP, SVR y XGBoost. Todos los experimentos se ejecutaron sobre una partición temporal de la serie histórica, 80% entrenamiento y 20% para la prueba, sin reordenamiento aleatorio (shuffle=False), con el fin de preservar la secuencia cronológica y evitar la fuga de información futura (data leakage) (Cerqueira et al., 2021; Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

Las 12 categorías de residuos en *t-1* se ingresaron como matriz explicativa *(X)*, mientras que la masa total semanal en *t* se definió como variable objetivo *(Y)*. Previo al ajuste de modelos sensibles a la escala como SVR, las características se estandarizaron mediante escalado Z-score (StandardScaler), calculando la media y varianza únicamente sobre el conjunto de entrenamiento. La optimización de hiperparámetros se realizó sobre el conjunto de entrenamiento mediante búsqueda en malla (GridSearchCV) en combinación con un esquema de validación cruzada para series temporales (TimeSeriesSplit con $k=5$). Para la RP (d=*2*) se aplicó un ajuste directo por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS). Los métodos de preprocesamiento, esquemas de selección y la configuración de hiperparámetros óptimos seleccionados para cada arquitectura se sintetizan en la Tabla 2.

B. Formulación matemática de los modelos

Para estimar la generación semanal de RSU a partir de las categorías independientes, se precisaron diferentes arquitecturas de regresión con distintos supuestos matemáticos:

1. Regresión polinómica (PR)

Inicialmente se consideró como referencia inicial la regresión lineal múltiple que asume una relación lineal entre la variable de respuesta. *Y* y un conjunto de predictores (Yang et al., 2021). El modelo se expresa mediante:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad \textbf{(Ec.1)}$$

Sin embargo, para capturar interacciones complejas y curvaturas sin hacer de lado la estimación eficiente por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), se derivó la Regresión Polinómica de segundo orden (d=2) como su extensión directa (Chanchí Golondrino et al., 2020):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 \cdots + \beta_p X^p + \varepsilon \quad \textbf{(Ec. 2)}$$

Donde p=12 representa el número de categorías fraccionadas en *t-1*, y ε es el término de error.

2. Regresión de Vectores de Soporte (SVR)

Para evaluar las posibles relaciones no lineales mediante un enfoque no paramétrico, se utilizó el modelo de Regresión de Vectores de Soporte (Abdallah et al., 2020), este modelo busca una función $f(x)$ que no se desvíe más de un umbral ε de los resultados reales y_i:

$$f(x) = (w^\top, \phi(x)) + b \quad \textbf{(Ec. 3)}$$

Donde *w* equivale al vector de pesos y *b* se refiere al término de sesgo y , $\phi(x)$ representa la transformación del espacio de entrada mediante la función de núcleo RBF.

3. Potenciación de Gradiente XGBoost

Con un enfoque de aprendizaje en ensamble, XGBoost construye iterativamente una serie de árboles de decisión f_k mediante descenso de gradiente (Wiens et al., 2025). La función objetivo a optimizar en la iteración *t* se define como:

$$L^{(t)} = \sum_{i=1}^{n} l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + \ + f_t(x_i)) + \Omega(f_t) \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

Donde l es una función de pérdida diferenciable que mide la discrepancia entre la etiqueta real y_i la predicción $\hat{y}_i$, aunado a ello $\Omega(f_t) = \gamma T + \frac{1}{2}\lambda \sum_{j=1}^{T} \omega_j^2$ es un término de regularización para penalizar la complejidad del árbol donde *T* es el número de hojas y *w* son sus pesos. Para controlar la velocidad de aprendizaje y prevenir el sobreajuste, se establece una tasa de aprendizaje (η) al incorporar un nuevo árbol.

C. Diseño experimental y división temporal de datos

Para evaluar los modelos y garantizar la validez metodológica, la serie temporal se dividió mediante una representación cronológica de entrenamiento y prueba (*Train/Test Split*). Se asignó el 80% inicial de los datos históricas al conjunto de entrenamiento para la optimización de parámetros, reservando el 20% restante que corresponde al periodo más reciente como conjunto de prueba independiente. Esta separación secuencial sin reordenamiento aleatorio (*shuffle=False*) evita la fuga de información (*data leakage*) y simula un escenario real de pronóstico temporal (Cerqueira et al., 2021).

Las variables de entrada corresponden a la matriz de composición fraccionada de la semana previa (*t-1*), mientras que la variable objetivo es la masa total de RSU generada en la semana actual (*t*). Previo al entrenamiento de modelos sensibles a la escala como SVR, las características se estandarizaron mediante escalado Z-score (*Standard*

Scaler), calculando los parámetros exclusivamente sobre la partición de entrenamiento.

- **Configuración e hiperparámetros de los modelos**

La optimización de los hiperparámetros se realizó sobre la partición de entrenamiento mediante búsqueda exhaustiva en malla (*GridSearchCV*) en combinación con validación cruzada para series temporales (*TimeSeriesSplit con k=5*), garantizando el respeto al orden cronológico del flujo de datos para prevenir la fuga de información (Cerqueira et al., 2020).

La Regresión Polinómica aplicó una transformación de grado *d=2* sobre las variables en t-1 con ajuste por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS). Para SVR (núcleo RBF) y XGBoost, los rangos del espacio de búsqueda y las configuraciones óptimas que minimizan el error de validación, consolidándose en la Tabla 2. Todas las rutinas se implementaron en el entorno Python 3.10.

Tabla 2. Resumen de configuración e hiperparámetros de los modelos evaluados.

Modelo	Preprocesamiento	Método de Selección	Hiperparámetros Óptimos
Regresión Polinómica	Polynomial Features (*d=2*)	Ajuste directo (OLS)	Grado *d=2*
SVR (RBF)	Standard Scaler (Z-score)	Grid Search CV (*Time Series Split, k=5*)	*C=100, ϵ=0.01, γ='scale'*
XGBoost	Ninguno (basado en árboles)	Grid Search CV (*Time Series Split, k=5*)	*n_estimators=100, max_depth=4, learning_rate=0.05, subsample=0.8*

Fuente: Elaboración propia. Estrategia de optimización e hiperparámetros adaptada de las metodologías propuestas por Alqahtani y El-Khatib (2024) y Zou et al. (2025) para series temporales de RSU.

IV. Resultados y discusión

La evaluación inicial de la calidad de los datos reveló una ausencia total de valores faltantes, eliminando la necesidad de técnicas de imputación. El análisis de la variable objetivo (*Y*) mediante la Estimación de Densidad de Kernel (KDE) mostró una distribución asimétrica y no normal, con una concentración de observaciones en niveles bajos y un rango operativo entre 49,700.0 kg y 77,232.79 kg, con una media de 61,140.09 kg, una mediana de 60,055.12 kg y una desviación estándar de 8,117.0 kg como se muestra en la Figura 2.

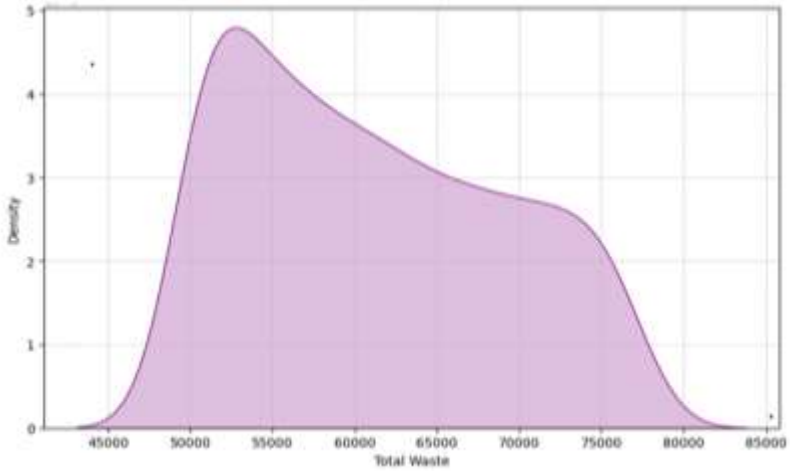


Figura 2. Distribución de probabilidad de la variable objetivo mediante la estimación de densidad de Kernel (KDE).

Para caracterizar la estructura interna de la serie, se calculó la matriz de correlación de Pearson que se muestra en la Figura 3.

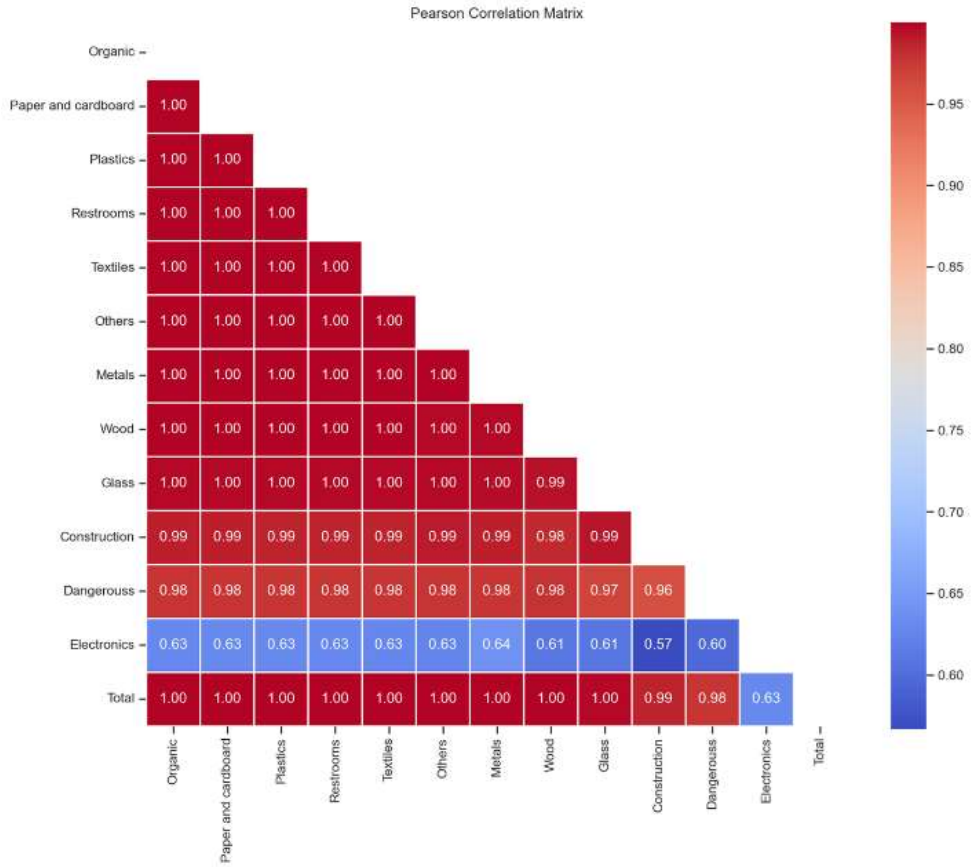


Figura 3. Matriz de correlación de Pearson entre los tipos de residuos y la masa total.

La matriz de correlación muestra coeficientes altos ($r > 0.95$) entre múltiples variables predictoras y la variable objetivo. Si bien esta condición introduce una elevada multicolinealidad, lo que restringe la interpretación causal o inferencial de los coeficientes individuales, el estudio se aborda desde una perspectiva puramente predictiva.

A. Evaluación del pronóstico temporal

El conjunto de datos se particionó cronológicamente (shuffle=False), asignando las semanas 1 a 560 (80%) para entrenamiento y las semanas 561 a 700 (20%) como ventana de prueba futura. Esta estructura evaluó directamente la capacidad de generalización en horizontes no vistos.

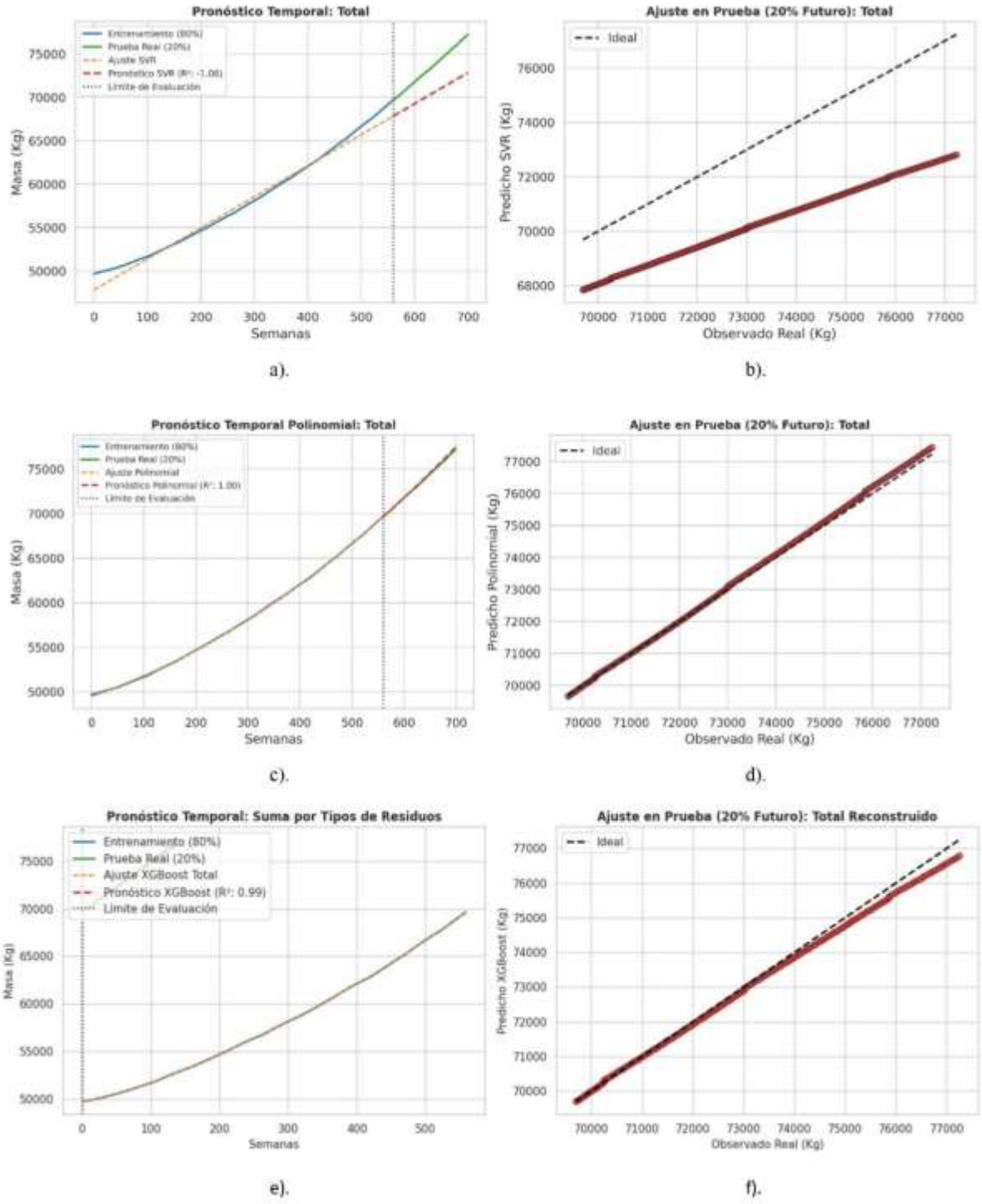


Figura 4. Pronóstico temporal y desempeño en prueba (20% futuro) para la masa total de residuos condicionado por la composición de residuos: a) y b) SVR, c) y d) Regresión Polinomial, y e) y f) XGBoost.

La evaluación en el conjunto de prueba se muestra en la Figura 4, donde se observan comportamientos divergentes. En el caso del modelo SVR obtuvo un R^2 = -1.0585, en la (Figura 4 a-b) se muestra como colapsó tras la semana 560 por la incapacidad del núcleo RBF para extrapolar la tendencia temporal al acoplar los retardos de las distintas

categorías de residuos. Sin embargo, con la RP d=2 se obtuvo un R^2 = 0.9972, en la (Figuras 4c–d) se muestra que se ajustó la trayectoria real gracias a la naturaleza continua de la curva cuadrática. Por otra parte, XGBoost: R^2 = 0.9926, (Figuras 4e–f) logró una precisión equivalente al capturar las dependencias autorregresivas multivariadas en t-1. Ambos modelos mostraron una alineación homogénea sobre la diagonal ideal, confirmando que considerar la estructura de la serie garantiza la estabilidad de la predicción futura.

B. Evaluación del desempeño e inferencia predictiva

Los resultados numéricos demuestran que la Regresión Polinómica de segundo grado alcanzó el rendimiento óptimo, registrando un R^2 =0.9972 con los menores márgenes de error MAE=87.6302 y RMSE=115.3839. Estos hallazgos muestran que un incremento en la complejidad algorítmica no garantiza una mayor precisión predictiva sobre series temporales. XGBoost, aunque mantuvo una elevada precisión R^2 =0.9926, presentó errores marginalmente superiores MAE=142.2482 y RMSE=188.6473. Por su parte, el modelo SVR sufrió un colapso en su capacidad de aproximación en el horizonte futuro R^2=−1.0585, RMSE=3,047.3023.

C. Análisis e interpretación de hallazgos

Al comparar la precisión predictiva de las arquitecturas evaluadas frente a los antecedentes reportados en la literatura especializada (Tabla 3), se observan aspectos metodológicos clave respecto a la dinámica territorial y la complejidad de los modelos. En primer lugar, los resultados obtenidos para la serie semanal del municipio de Tlaxcala muestran la efectividad de la RP d=2, la cual registró el desempeño global más alto del estudio R^2 = 0.9972, RMSE = 115.3839, MAE = 87.6302$ y MAPE = 0.12. Este nivel de ajuste supera marginalmente al coeficiente alcanzado por Chanchí Golondrino et al. (2020) R^2 = 0.99662, demostrando que la estructura parabólica ajustada por Mínimos Cuadrados Ordinarios abstrae fidedignamente la tendencia continua y no lineal de las series temporales de residuos sin incurrir en sobreajuste. Por otra parte, la aproximación mediante ensambles no lineales mostró matices relevantes. El modelo XGBoost exhibió una capacidad predictiva sobresaliente R^2 = 0.9926, MAPE = 0.19, ubicándose muy cerca del ajuste polinómico y superando los coeficientes reportados por Yang et al. (2021) para el mismo algoritmo R^2 = 0.90 y por Khoirunisa et al. (2025) RMSE = 0.147. No obstante, la ligera ventaja en precisión de la RP frente a XGBoost resalta un principio de parsimonia en la escala municipal: mientras que los árboles de decisión segmentan el espacio de búsqueda mediante funciones a partes sensibles a fluctuaciones locales, la formulación cuadrática absorbe suavemente la variabilidad estacional de las 12 categorías en t-1.

Tabla 3. Comparación del rendimiento del modelo para la predicción de la generación de RSU.

Referencia (APA)	Ámbito y Territorio de Estudio	Modelo Evaluado	MAE	RMSE	MAPE (%)	R^2
Yang et al. (2021)	Recolección RSU municipal (China)	DNN	861.03	1288.80	N/A	0.97
Yang et al. (2021)	Recolección RSU municipal (China)	XGBoost	1219.91	1706.78	N/A	0.90
Yang et al. (2021)	Recolección RSU municipal (China)	RF	774.30	1348.63	N/A	0.91
Khoirunisa et al. (2025)	Residuos con imputación (Java, Indonesia)	XGBoost	N/A	0.147 t	N/A	N/A
Chanchí Golondrino et al. (2020)	Serie temporal continúa acumulada	Regresión Polinómica (d=2)	N/A	150.04 u	N/A	0.99662
Este estudio	**Serie semanal (Municipio de Tlaxcala)**	**Regresión Polinómica ($d=2)**	**87.6302**	**115.3839**	**0.12**	**0.9972**
Este estudio	Serie semanal (Municipio de Tlaxcala)	SVR	3136.5751	3047.3023	4.13	-1.0585
Este estudio	Serie semanal (Municipio de Tlaxcala)	XGBoost	142.2482	188.6473	0.19	0.9926

Un hallazgo crítico reside en el colapso operativo del modelo SVR R^2 = -1.0585, MAPE = 4.13. Un coeficiente R^2 negativo evidencia que la proyección del hiperplano mediante el kernel ajustado resultó menos precisa que la media aritmética simple de la serie. Este comportamiento dista de la estabilidad habitual de SVR en la literatura y se atribuye a la alta dimensionalidad relativa al ajustar los retardos temporales de las distintas tipologías de residuos, lo que provocó una saturación en las funciones de margen. En términos de aplicabilidad tecnológica para la gestión pública local, la clara superioridad de la Regresión Polinómica representa una ventaja sustancial. Al no depender del ajuste hiperparamétrico ni de la opacidad algorítmica de los modelos de ensamble o redes profundas como el DNN de Yang et al., 2021, R^2 = 0.97, el modelo cuadrático proporciona una formulación matemática transparente, determinista y de bajísimo costo computacional, ideal para su integración inmediata en herramientas de planificación operativa municipal

Desde la perspectiva de la ingeniería y la gestión municipal, estos hallazgos confirman la viabilidad de implementar sistemas predictivos de alta fidelidad, computacionalmente ligeros y claros para estimar la generación semanal de RSU. La capacidad de anticipar volúmenes mediante el uso de datos históricos (t-1) brinda un insumo cuantitativo con el potencial de apoyar la planificación logística, la programación de rutas y la toma de decisiones operativas. De tal modo que, las predicciones resultantes se posicionan básicamente como una herramienta para el diseño futuro de políticas públicas y estrategias de minimización de residuos orientadas a la sostenibilidad ambiental.

Conclusiones

En este estudio se evaluó el desempeño de tres arquitecturas de regresión, Regresión Polinómica, XGBoost y SVR para la estimación de la generación semanal de

residuos sólidos urbanos (RSU), empleando una serie histórica comprendida entre los años 2010 y 2024 bajo una partición temporal estricta (shuffle=False). Los resultados empíricos demostraron que la Regresión Polinómica de segundo orden ofrece la mayor precisión y estabilidad predictiva en el horizonte futuro con un R^2 = 0.9972, superando a modelos no lineales de mayor complejidad algorítmica como XGBoost y SVR. Este comportamiento confirma que un aumento en la complejidad del modelo no garantiza una mejora en la capacidad de extrapolación cuando la serie temporal conserva patrones autorregresivos y tendencias de composición bien definidas. Dada su alta precisión predictiva y su reducido costo computacional, la regresión polinómica se consolida como un insumo cuantitativo con el potencial de apoyar la planificación logística y la toma de decisiones en la gestión municipal de RSU. Finalmente, se sugiere incorporar en investigaciones futuras variables exógenas (como indicadores socioeconómicos, demográficos o climáticos) que permitan evaluar la robustez del modelo frente a perturbaciones exógenas que alteren la dinámica histórica de generación de los RSU.

Bibliografía

1 Cook, E., Ionkova, K., Bhada-Tata, P., Yadav, S., & van Woerden, F. (s.f.). *Panorama global de la gestión de residuos sólidos hacia la circularidad hasta 2050. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-2309-1*

2 Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA/UNEP). (2018). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*. s.l.: PNUMA. Recuperado de https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26448

3 ONU-Hábitat. (s.f.). *Recolectar y eliminar residuos de manera eficiente*. s.l.: ONU-Hábitat. Recuperado de https://onu-habitat.org/index.php/recolectar-y-eliminar-residuos-de-manera-eficiente

4 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (s.f.). *Semarnat presenta diagnóstico nacional para transformar la gestión de residuos y avanzar hacia la economía circular*. Ciudad de México: Gob.mx. Recuperado de http://www.gob.mx/semarnat/prensa/semarnat-presenta-diagnostico-nacional-para-transformar-gestion-de-residuos-y-avanzar-hacia-la-economia-circular

5 Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Tlaxcala. (2025). *Diagnóstico básico y programa para la prevención, gestión integral y economía circular de los residuos del estado de Tlaxcala 2025–2027*. Tlaxcala: Gobierno del Estado de Tlaxcala. Recuperado de https://cjuridica.tlaxcala.gob.mx/images/Diagnostico/DIAGNOSTICO%20BASICO%20Y%20PROGRAMA%20PARA%20LA%20PREVENCION%20GESTION%20INTEGRAL%20Y%20ECONOMIA%20CIRCULAR%20DE%20LOS%20RESIDUOS%202.12.2025.pdf

6 Gobierno del Estado de Tlaxcala. (2025, 3 de noviembre). *Gobierno del Estado inicia clausura de tiraderos de Panotla y Huamantla*. Tlaxcala:

Coordinación de Comunicación. Recuperado de https://comunicacion.tlaxcala.gob.mx/index.php?view=article&id=20136:tlaxcala-avanza-como-referente-nacional-en-el-cierre-de-sitios-de-disposicion-final-semarnat

7 Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). (2026, 9 de enero). *Profepa impone multa y clausura definitiva a relleno sanitario de Huehuetla, Puebla*. Ciudad de México: Gob.mx. Recuperado de https://www.gob.mx/profepa/prensa/profepa-impone-multa-y-clausura-definitiva-a-relleno-sanitario-de-huehuetla-puebla

8 Alshaikh, R., & Abdelfatah, A. (2024). "Técnicas de optimización en la gestión de residuos sólidos municipales: una revisión sistemática". *Sustainability*, vol. 16, no. 15, julio de 2024, art. 6585. https://doi.org/10.3390/su16156585

9 Hannan, M. A., Akhtar, M., & Begum, R. A. (2020). "Objetivos, limitaciones, enfoques de modelado y desafíos de la optimización de la recolección de residuos sólidos para el logro de los objetivos de desarrollo sostenible". *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, art. 123557, diciembre de 2020, pp. 1-15. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123557

10 Alzate, Montoya, P. M., Bustamante Gutiérrez, L. C., & Alzate Álvarez, A. M. (2024). "Un modelo de rutas para la recolección de residuos sólidos domiciliarios: Un caso de estudio". *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, vol. 38, no. 1, junio de 2024, pp. 1-14. https://doi.org/10.46661/rev.metodoscuant.econ.empresa.7820

11 Aydemir-Karadag, A. (2022). "Algoritmo de búsqueda adaptativa de vecindario amplio con dos objetivos para el problema de enrutamiento de inventario de ubicación periódica de residuos sanitarios". *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, no. 3, marzo de 2022, pp. 3861-3876. https://doi.org/10.1007/s13369-021-06106-4

12 Barma, M., & Modibbo, U. M. (2022). "Modelo de optimización matemática multiobjetivo para la gestión de residuos sólidos municipales con análisis económico de la reutilización/reciclaje de materiales de desecho recuperados". *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, vol. 1, no. 3, septiembre de 2022, pp. 122-137. https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE149145

13 Li, W., Wang, P., Xu, Y., Pan, L., Nie, C., & Yang, B. (2025). "Optimización multiobjetivo de la recolección de residuos sólidos municipales basada en la búsqueda adaptativa de vecindarios grandes". *Electronics*, vol. 14, no. 1, enero de 2025, art. 103. https://doi.org/10.3390/electronics14010103

14 Zhou, J., Zhang, M., & Wu, S. (2022). "Problema de enrutamiento

vehicular multiobjetivo para la clasificación y recolección de residuos con consideraciones de sostenibilidad: el caso de la ciudad de Shanghái". *Sustainability*, vol. 14, no. 18, septiembre de 2022, art. 11498. https://doi.org/10.3390/su141811498

15 Benítez-Bravo, R., Gomez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J. E., Huerta-Guevara, O. F., García-León, A. M., & Rueda-Avellaneda, J. F. (2021). "Optimización de rutas de recolección de residuos sólidos municipales en un contexto latinoamericano". *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 71, no. 11, noviembre de 2021, pp. 1415-1427. https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040

16 Aktemur, I., Erensoy, K. & Kocyigit, E. "Optimización de la recogida de residuos en ciudades inteligentes mediante el uso de algoritmos evolutivos", 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey, 2020, pp. 1-8, https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152865

17 Szpilko, D., de la Torre Gallegos, A., Jiménez Naharro, F., Rzepka, A., & Remiszewska, A. (2023). "Gestión de residuos en la ciudad inteligente: prácticas actuales y direcciones futuras". *Recursos*, vol. 12, no. 10, octubre de 2023, art. 115. https://doi.org/10.3390/resources12100115

18 P. Koushik, S. Chattopadhyay, A. Dutta, A. P. Krishna, S. Ray, "A comprehensive optimization model for integrated solid waste management system: A case study", Revista de investigación de Ingeniería Ambiental, Volumen 24, no.2, pp 220-237, 2019. https://doi.org/10.4491/eer.2018.132

19 Abdallah, M., Abu Talib, M., Feroz, S., Nasir, Q., Abdalla, H., & Mahfood, B. (2020). "Aplicaciones de inteligencia artificial en la gestión de residuos sólidos: una revisión sistemática de la investigación". *Waste Management*, vol. 109, mayo de 2020, pp. 231-246. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.057

20 Arroyo, L. A. B., Nicola, R. J. V., Moreno, W. V., & Baque, G. D. L. (2023). "La intervención de la logística en la gestión de residuos sólidos en Latinoamérica". *RECIAMUC*, vol. 7, no. 2, abril de 2023, pp. 328-350. https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.(2).abril.2023.328-350

21 Subedi, A., Shrestha, S., & Paudel, S. R. (2025). "Aplicación del aprendizaje automático para la predicción de la generación de residuos sólidos". *Natural Built Social Environment Health*, vol. 1, no. 2, enero de 2025, pp. 14-33. https://doi.org/10.63095/NBSEH.25.831599

22 Zhang, J., Wen, Z., Hu, Y., Fei, F., Wang, Y., & Xie, Y. (2024). "Simulación de sistemas y metodología de optimización

multiobjetivo para la gestión sostenible de la clasificación de residuos sólidos municipales: un estudio de caso en China". *Producción y consumo sostenibles*, vol. 50, noviembre de 2024, pp. 475-485. https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.014

23 Khoirunisa, R., Sani, A. F., Riatma, D. L., Masbahah, M., & Rachman, Y. F. (2025).” Imputing Data and Predicting Waste with Machine Learning in East Java. Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 5(1), 521–528. https://doi.org/10.47709/brilliance.v5i1.6461

24 Bhattacharya, S., Kalita, K., Čep, R., & Chakraborty, S. (2021). "Análisis comparativo del rendimiento predictivo de modelos de regresión durante el mecanizado de materiales compuestos". *Materials*, vol. 14, no. 21, noviembre de 2021, art. 6689. https://doi.org/10.3390/ma14216689

25 Soegianto, L. M., Hinandra, A. T., Suri, P. A., & Fajar, M. (2024). "Comparación del rendimiento de modelos en el sector inmobiliario utilizando regresión lineal, regresor de bosque aleatorio, SVR y redes neuronales". *Procedia Computer Science*, vol. 245, octubre de 2024, pp. 1139-1145. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.343

26 Xia, W., Jiang, Y., Chen, X., & Zhao, R. (2022). "Aplicación de algoritmos de aprendizaje automático en la gestión de residuos sólidos municipales: una mini revisión". *Waste Management & Research*, vol. 40, no. 6, junio de 2022, pp. 609-624. https://doi.org/10.1177/0734242X211033716

27 Zou, Q., Duan, H., Yang, Z., Wang, X., Tian, Y., Hou, H., & Yang, J. (2025). "Gestión del ciclo de vida de residuos sólidos asistida por aprendizaje automático: aplicaciones, limitaciones y oportunidades futuras". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 219, agosto de 2025, art. 108320. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108320

28 Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Agenda 2030 en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: CEPAL. Recuperado de https://agenda2030lac.org/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible-ods

29 Wiens, M., Verone-Boyle, A., Henscheid, N., Podichetty, J. T., & Burton, J. (2025). "Un tutorial y un ejemplo práctico del algoritmo de inteligencia artificial eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) para aplicaciones en el desarrollo de fármacos". *Clinical and Translational Science*, vol. 18, no. 3, marzo de 2025, art. e70172. https://doi.org/10.1111/cts.70172

30 Cerqueira, V., Torgo, L. y Mozetič, I. “Evaluación de modelos de pronóstico de series temporales: un estudio empírico sobre métodos de estimación del rendimiento”. Mach Learn 109, 1997–2028 (2020).

https://doi.org/10.1007/s10994-020-05910-7

31 Yang, L., Zhao, Y., Niu, X., Song, Z., Gao, Q., & Wu, J. (2021). "Pronóstico de residuos sólidos municipales en China basado en modelos de aprendizaje automático". *Fronteras en la Investigación Energética*, vol. 9, diciembre de 2021, art. 763977. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.763977

32 Chanchí Golondrino, G. E., Campo Muñoz, W. Y., & Sierra Martínez, L. M. (2020). "Aplicación de la regresión polinomial para la caracterización de la curva del COVID-19, mediante técnicas de machine learning". *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 8, no. 2, julio-diciembre de 2020, pp. 87-105. https://doi.org/10.17081/invinno.8.2.4103

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Evaluación experimental y estadística del sensor capacitivo SEN0193 para la medición de humedad en materiales granulares

Experimental and Statistical Evaluation of the SEN0193 Capacitive Sensor for Moisture Measurement in Granular Materials

Diaz-Peña, I.[a], Hermosillo-Nevárez, J.J.[b], Félix-Sámano, A.L.[a], Zaldívar-Cadena, A.A.[c], Castro-Rubio, J.R.[a], Félix-Medina, J.V.[a]*

[a] División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Culiacán. Culiacán 80220. México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9852-4309, https://orcid.org/0009-0006-4934-2177, roberto.cr@culiacan.tecnn.mx, https://orcid.org/0009-0005-6018-7414*.

[b] Universidad Autónoma de Occidente-Unidad Regional Culiacán. 80020. Culiacán, Sinaloa, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0462-231x.

[c] Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, 66455, San Nicolás de los Garza, N.L., México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7216-2557.

ismael.dp@culiacan.tecnm.mx; jhonatan.hermosillo@uadeo.mx; ana.fs@culiacan.tecnm.mx; azaldiva70@hotmail.com; roberto.cr@culiacan.tecnn.mx; jennifer.fm@culiacan.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Análisis del comportamiento de un sensor de ultra bajo costo para medición de humedad en materiales granulares.

Área de aplicación industrial: Materiales granulares**,** Instrumentación y control.

Recibido: 28 abril 2026
Aceptado: 23 septiembre 2026

Abstract

This study presents a methodology for the experimental and statistical evaluation of low-cost capacitive sensors (SEN0193) for moisture measurement in granular media under controlled laboratory conditions. Ten sensors were used to measure the moisture content of a granular material characterized by particle size distribution in accordance with ASTM D1241. Moisture content was systematically varied across seven levels (0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 %), with 10,000 measurements per moisture level (a total N of 70,000) acquired through a data acquisition system. The analysis focused on characterizing the sensor response as a function of gravimetric water content (GWC), assessing its repeatability and stability under controlled soil–water ratio conditions. Statistical analysis included multiple normality tests (Shapiro–Wilk, Anderson–Darling, Lilliefors, Jarque–Bera, and D'Agostino), as well as descriptive statistics such as the mean, standard deviation, and coefficient of variation. The results show low dispersion in the

measurements (CV < 1%), indicating high repeatability and consistency among the sensors. Two fitting models were developed: a fourth-order polynomial model for empirical fitting and an exponential model to describe the nonlinear behavior of the signal as a function of moisture. Both models exhibited a high degree of fit to the experimental data within the evaluated range, although the exponential model demonstrated greater consistency with the expected system behavior. The results indicate that the sensor response exhibits a nonlinear relationship with moisture content, consistent with the nature of capacitive sensing. Under the experimental conditions, stable and reproducible performance of the measurement system was observed. This work demonstrates the feasibility of low-cost capacitive sensors for moisture measurement in granular media under controlled conditions, highlighting their high repeatability, which may help complement the results of conventional techniques that typically entail greater time, effort, cost, and labor requirements.

Keywords: SEN0193 sensor, moisture measurement, granulometry test, ASTM D1241.

Resumen

Este estudio presenta una metodología para la evaluación experimental y estadística de sensores capacitivos de bajo costo (SEN0193) para la medición de humedad en medios granulares bajo condiciones controladas de laboratorio. Se emplearon 10 sensores para medir la humedad de un material granular caracterizado mediante distribución de tamaño de partícula conforme a ASTM D1241. El contenido de humedad se varió sistemáticamente en siete niveles (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 %) con 10,000 mediciones por nivel de humedad (*N* total de 70,000) adquiridas mediante un sistema de digitalización. El análisis se centró en la caracterización de la respuesta del sensor en función del contenido de agua gravimétrico (GWC), evaluando su repetibilidad y estabilidad bajo condiciones controladas de relaciones suelo/agua. El análisis estadístico incluyó múltiples pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk, Anderson–Darling, Lilliefors, Jarque–Bera y D'Agostino), así como estadísticos descriptivos como media, desviación estándar y coeficiente de variación. Los resultados muestran una baja dispersión en las mediciones (CV < 1%), lo que indica alta repetibilidad y consistencia entre sensores. Se desarrollaron dos modelos de ajuste: un modelo polinomial de cuarto orden para ajuste empírico y un modelo exponencial para describir el comportamiento no lineal de la señal en función de la humedad. Ambos modelos mostraron un alto grado de ajuste a los datos experimentales dentro del rango evaluado, aunque el modelo exponencial presenta mayor coherencia con el comportamiento esperado del sistema. Los resultados indican que la respuesta del sensor presenta una relación no lineal con el contenido de humedad, consistente con la naturaleza del sensor capacitivo. Bajo las condiciones del experimento, se observó un comportamiento estable y reproducible del sistema de medición. Este trabajo demuestra la viabilidad de sensores capacitivos de bajo costo para la medición de humedad en medios granulares bajo condiciones controladas, destacando su alta repetibilidad, lo que pudiera ayudar a complementar los resultados de las técnicas convencionales, las cuales conllevan un mayor consumo de tiempo, esfuerzo, dinero y mano de obra.

Palabras clave: Sensor SEN0193, Medición de Humedad, Granulometría, ASTM D1241.

1. Introducción

El contenido de agua en suelos y materiales granulares es un parámetro fundamental en el análisis de propiedades mecánicas y comportamiento geotécnico (Das, 2010). En particular, la compactación del suelo depende directamente de su contenido de humedad, lo que influye en la capacidad de carga y estabilidad de estructuras construidas sobre él. Ensayos clásicos como los derivados del método Proctor permiten establecer relaciones entre la densidad seca y el contenido de agua, identificando condiciones óptimas de desempeño mecánico (ASTM International, 2007; American Association of State Highway and Transportation Officials, 1995a; American Association of State Highway and Transportation Officials, 1995b).

La determinación convencional del contenido de agua se basa en procedimientos gravimétricos que implican el secado de muestras en horno a temperaturas cercanas a 105 °C durante periodos prolongados. Aunque este método es ampliamente aceptado, presenta limitaciones asociadas a tiempos de análisis elevados y costos operativos, lo que restringe su aplicabilidad en mediciones rápidas o monitoreo continuo (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2003).

En este contexto, los sensores capacitivos de bajo costo han surgido como una alternativa viable para la estimación indirecta del contenido de humedad, permitiendo reducir tiempos de medición y costos de implementación (Contreras-Ferreyra et al., 2024; Vaz et al., 2013). Entre estos dispositivos, el sensor SEN0193 destaca por su accesibilidad económica y su principio de operación basado en la respuesta dieléctrica del medio, lo que les confiere sensibilidad a variaciones en el contenido de agua (Abdelmoneim et al., 2025; Placidi et al., 2020). No obstante, su desempeño depende significativamente de las propiedades del suelo, tales como granulometría, compactación y distribución de fases, lo que hace necesario el desarrollo de procedimientos de calibración específicos para cada material (Adla et al., 2020).

Adicionalmente, la creciente disponibilidad de sensores de ultra bajo costo ha impulsado su uso en configuraciones multisensor, con el objetivo de capturar la heterogeneidad espacial de los materiales. No obstante, este enfoque introduce nuevos retos asociados a la repetibilidad, la variabilidad entre sensores y la confiabilidad de los datos obtenidos, aspectos que no han sido ampliamente documentados en materiales no cohesivos utilizados en aplicaciones geotécnicas, particularmente en capas de subbase para infraestructura vial (Hidayat et al., 2024).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar experimentalmente el comportamiento de múltiples sensores capacitivos SEN0193 en un material granular no cohesivo, bajo condiciones controladas de laboratorio (Fernandes-Genovez et al., 2025). Se emplea un agregado triturado caracterizado con base en ASTM D1241 (retirada el 29 de enero de 2024, sin sustituta directa) como material de referencia. El contenido de humedad se varía en un rango de 0 a 30 %, y se analizan más de 70,000 datos experimentales obtenidos a partir de 10 sensores. Estudios previos con el SEN0193 en suelos naturales reportan una variabilidad entre sensores considerablemente mayor a la buscada en aplicaciones de precisión. Algunos investigadores (Radi et al., 2018; Pereira et al., 2022) obtuvieron coeficientes de variación de 3.27–17.84 % en suelos del Cerrado brasileño, y en otros trabajos calibraron cinco sensores en suelo franco-arenoso mediante regresión potencial (R^2 = 0.842–0.989), excluyendo una unidad de bajo ajuste sin un criterio estadístico explícito. A

diferencia de estos antecedentes, centrados en suelos naturales con fines agrícolas, este trabajo aborda un material no cohesivo caracterizado para aplicaciones de pavimentación, evaluando su comportamiento estadístico con un diseño experimental más extenso.

El enfoque adoptado se centra en la caracterización estadística de la respuesta del sensor, evaluando su repetibilidad, dispersión y consistencia entre dispositivos mediante el uso de estadísticos descriptivos y pruebas de normalidad. A partir de estos resultados, se desarrollan modelos matemáticos no lineales que permiten correlacionar el contenido de agua gravimétrico con la señal digital del sensor, proporcionando una base para su uso en aplicaciones geotécnicas. Se ha seguido un enfoque comparable en varios estudios (Kulmány et al., 2022; Al-Rawi, 2024) para suelos arcillosos, donde se obtienen resultados más favorables mediante el uso de curvas polinomiales en comparación con modelos lineales y exponenciales, alcanzando coeficientes de determinación (R^2) de hasta 0.97.

En contraste con la técnica gravimétrica por secado en horno, este estudio busca complementar la evidencia existente sobre la relativa robustez del sensor SEN0193 de ultra bajo costo para la estimación del contenido de agua gravimétrico, como se ha demostrado previamente (Agustirandi et al., 2024), bajo una caracterización específica del suelo. Este trabajo se motiva y desarrolla en respuesta a la falta de documentación sobre la aplicabilidad del sensor SEN0193 en materiales no cohesivos utilizados en la construcción de carreteras.

En este estudio, el contenido de humedad gravimétrico (GWC) se determina respecto a la masa seca de la muestra base (400 g). La unidad experimental corresponde a cada combinación única de sensor, nivel de humedad y repetición de preparación física de la muestra (n = 5 repeticiones con reposo de 5 minutos), mientras que las 200 lecturas consecutivas registradas en cada ensayo se consideran repeticiones técnicas de dicha unidad experimental. El análisis estadístico detallado se realiza sobre el conjunto de 10,000 lecturas correspondientes al nivel de 0% de humedad como caso representativo del comportamiento del sistema, mientras que el ajuste de los modelos de calibración se realizó utilizando los valores promedio de cada medición a lo largo de los seis niveles de humedad, proporcionando grados de libertad para la estimación de los coeficientes.

Este trabajo busca contribuir a la validación experimental del uso de sensores capacitivos de bajo costo en materiales granulares con aplicaciones ingenieriles (Rahman, 2017; Schwamback et al., 2023; Nagahage et al., 2019; ASTM International, 2015; Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016), destacando su potencial como herramienta complementaria a métodos tradicionales, así como identificar las limitaciones asociadas a su implementación en condiciones reales.

2. Materiales y Métodos

Se extrajo una muestra de 3 kg de agregado de arena triturada de la región de Culiacán, Sinaloa (latitud 24.8091° N, longitud 107.39° O; México), para caracterizar sus parámetros morfológicos y físicos. Se realizaron análisis granulométricos por tamizado con el fin de cuantificar la masa que pasa a través de cada malla y compararla con una referencia basada en la norma ASTM D1241. Adicionalmente, el estudio se complementó mediante la medición de las áreas proyectadas de la fase sólida utilizando un microscopio digital (Microscope LED Light), con el propósito de complementar la distribución de tamaño de partícula observada en el análisis granulométrico. Finalmente, se determinó el ángulo de reposo (φ) para proporcionar una

estimación indirecta de la fricción del material estudiado. Los análisis de caracterización se llevaron a cabo utilizando arena sin fase líquida como material base, con el objetivo de caracterizar el material en condiciones secas.

2.1 Granulometría

Se emplearon siete tamices estándar ASTM–AASHTO (proveedor ALCON) para la realización de los ensayos granulométricos. Los números de tamiz utilizados (Figura 1), de acuerdo con la recomendación de la norma ASTM D1241, fueron 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200, correspondientes a aberturas de 4.75, 2.36, 1.18, 0.60, 0.30, 0.15 y 0.075 mm, respectivamente. El proceso de tamizado se llevó a cabo mediante un equipo de vibración mecánica, modelo FII-114 (FIICSA), operado durante 10 minutos a nivel 3 de intensidad en cada uno de los tres ensayos realizados.

Los ensayos se efectuaron utilizando arena previamente acondicionada, la cual fue sometida a un proceso de secado en horno a 110 °C durante 7 días, con el propósito de eliminar la fase líquida y trabajar exclusivamente con la fase sólida. Para cada ensayo de tamizado se utilizaron muestras de 1 kg de material. La determinación de masas se realizó mediante una balanza electrónica de precisión, modelo 102317 (TRUPER), con una resolución mínima de 0.1 g.

Con el fin de mejorar la exactitud de las mediciones, se emplearon dos balanzas digitales con diferentes niveles de precisión. Una balanza OHAUS PA163, con resolución de 1 mg, se utilizó para registrar la masa retenida en los tamices de mayor abertura (4.75 y 2.36 mm), mientras que la balanza electrónica de precisión se utilizó para los tamices restantes. A partir de estos datos, se calcularon los porcentajes de masa pasante para cada tamiz, los cuales fueron comparados con las cinco graduaciones establecidas en la norma. Como resultado, el material analizado presentó una caracterización granulométrica que corresponde principalmente a la graduación No. 3 según dicha normativa.



Figura 1. Equipo para tamizado automático modelo FII-114 (FIICSA).

2.2 Análisis de imagen de morfología

De manera complementaria al análisis granulométrico, se adquirieron 40 imágenes con una resolución de 1920 × 1080 px (equivalente a 5.96 × 3.35 mm, bajo una calibración de 322.2938 px/mm, utilizando muestras de 2 g de arena previamente acondicionada, dispersas de forma uniforme sobre una caja Petri.

Las áreas proyectadas de las partículas sólidas con diámetros mayores a 25 μm fueron determinadas mediante el software ImageJ, empleando un procedimiento de delimitación manual de los contornos de cada partícula (Figura 2). Este análisis permitió complementar la caracterización granulométrica mediante una evaluación directa de la geometría de las partículas.

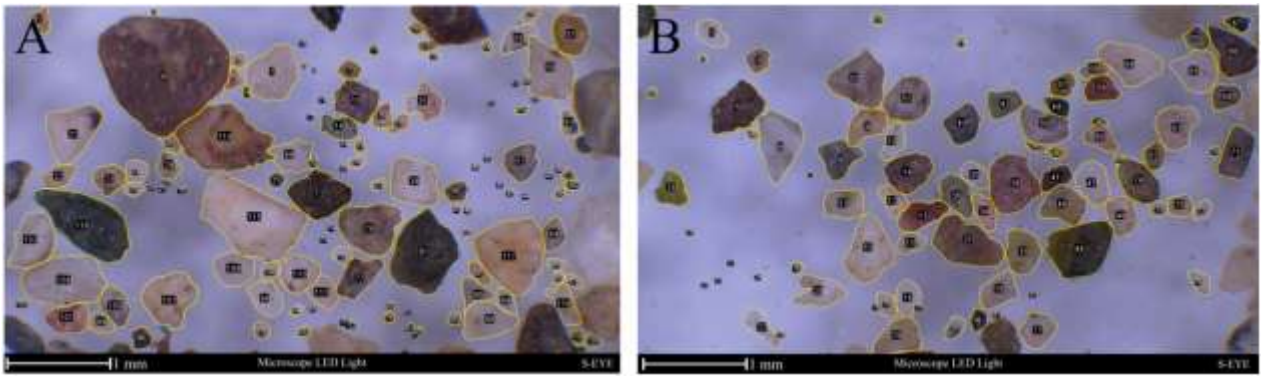


Figura 2. Análisis de imagen de contorno y área proyectada de partículas.

2.3 Ángulo de reposo

De manera complementaria, se determinó el ángulo de reposo (φ) como parámetro de la fricción del material granular. Este se calculó a partir de la relación entre la altura y el radio del cono formado, siguiendo metodologías reportadas en la literatura (Geldart et al., 2006).

El procedimiento consistió en la caída libre de 100 g de arena previamente acondicionada a través de un embudo de vidrio (diámetro inferior de 8 mm y longitud de cuello de 100 mm), formando un cono sobre una superficie de vidrio tras una altura de caída de 100 mm. La altura del cono se midió con un medidor digital (Mitutoyo 570-312), mientras que el radio promedio se determinó con un vernier digital. Adicionalmente, se capturaron imágenes laterales para documentar la geometría del depósito (Figura 3).

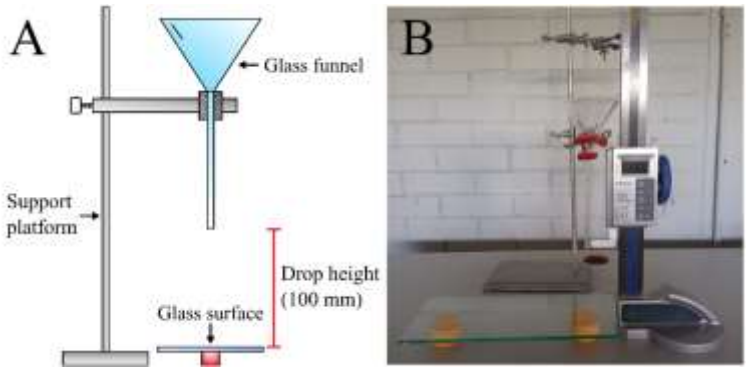


Figura 3. Arreglo para determinación de ángulo de reposo. A) Diagrama esquemático, B) Experimento.

2.4 Adquisición de Datos

El sistema de adquisición de datos se implementó mediante una tarjeta Arduino DUE (Arduino, 2026) en conjunto con el sensor de humedad SEN0193 (Figura 4). Las señales analógicas fueron digitalizadas utilizando el convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits integrado en el microcontrolador Atmel SAM3X8E, y posteriormente almacenadas en tiempo real en una hoja de cálculo mediante el complemento Data Streamer.

La salida del sensor depende tanto del medio circundante como de la resistencia de los conectores. El voltaje de salida está determinado por un circuito temporizador basado en un TL555I, operando a frecuencias cercanas a 1.5 MHz (Placidi et al., 2020), donde la señal se ve influenciada por la permitividad del medio a través de cambios

en la capacitancia del sistema. Asimismo, la resistencia de los conectores introduce caídas de voltaje que afectan la magnitud de la señal, por lo que estas fueron medidas utilizando un medidor HRM-10, marca FNIRSI (Figura 5).

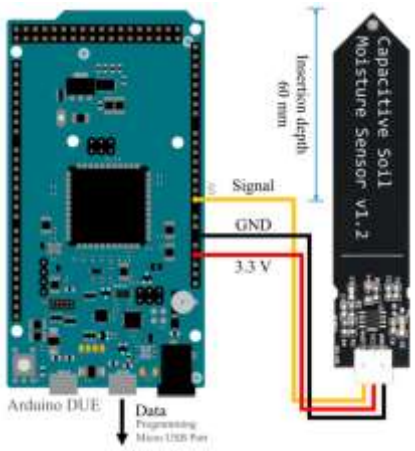


Figura 4. Diagrama esquemático de conexión del sensor SEN0193.

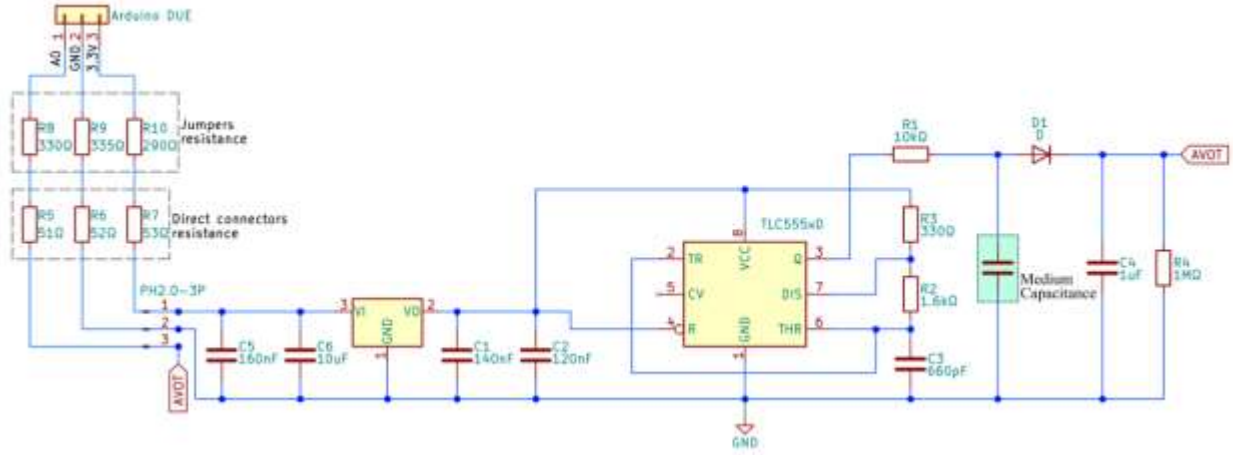


Figura 5. Diagrama interno del sensor SEN0193.

2.5 Preparación de las muestras

La primera etapa consistió en la eliminación de la fase líquida (humedad ambiental) del material. Para ello, se emplearon 3 kg de arena, los cuales fueron sometidos a secado en horno a 110 °C durante 168 horas. Posteriormente, la arena se transfirió a un recipiente de polipropileno (PP) de 5 L herméticamente cerrado durante 24 horas, con el fin de permitir su estabilización térmica a condiciones ambientales. Finalmente, el material seco se almacenó en un contenedor sellado para evitar la reabsorción de humedad. Para calcular el porcentaje de agua, se obtuvo el contenido de agua gravimétrico (GWC) a través de la Ec. (1) como:

$$\mathrm{GWC} = \frac{m_A}{m_S} \times 100 \qquad \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde m_A es la masa de agua y m_S es la masa de suelo seco. Los ensayos se realizaron con una masa base de 400 g de arena con diferentes niveles de GWC. Las pruebas experimentales consistieron en siete niveles de GWC: 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 % (0, 20, 40, 60, 80, 100 y 120 g de agua, respectivamente). El agua utilizada presentó un pH de 7.25 ± 0.1, medido con un equipo HI98129 (Hanna Instruments).

Las mezclas se prepararon en recipientes de polipropileno (Ø75 × 135 mm) y, una vez alcanzado el contenido de humedad deseado, se sometieron a agitación en el equipo FII-114

durante 5 minutos a nivel 3, con el fin de homogenizar la distribución del agua en el material (Figura 6).

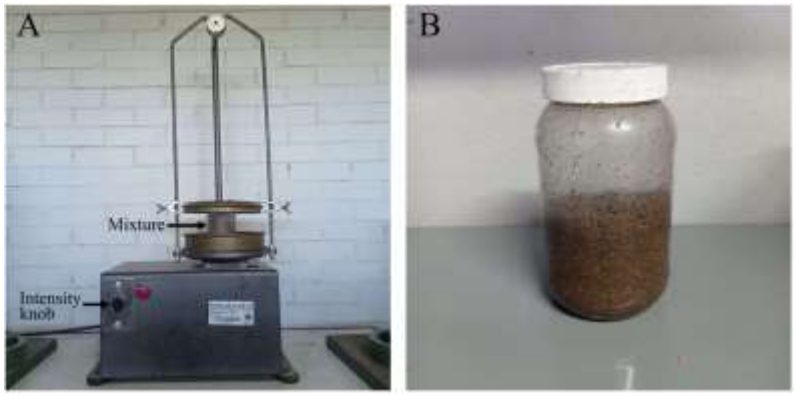


Figura 6. A) Tamizadora eléctrica automática y B) Muestra preparada con porcentaje de agua.

Previo a la medición de humedad, se implementó un procedimiento para asegurar una distribución homogénea de la fase líquida entre ensayos. Debido a la sensibilidad de los sensores capacitivos al nivel de contacto, la rugosidad superficial y el nivel de compactación (Placidi et al., 2020), el procedimiento consistió en someter el contenedor a caídas libres repetidas desde una altura de 50 mm, medida con un calibrador de altura Mitutoyo 570-312.

Se definieron dos tipos de repeticiones: 200 caídas posteriores a la etapa de vibración, y 100 caídas adicionales tras cada cambio de sensor, con el fin de mantener condiciones consistentes de medición (Figura 7).

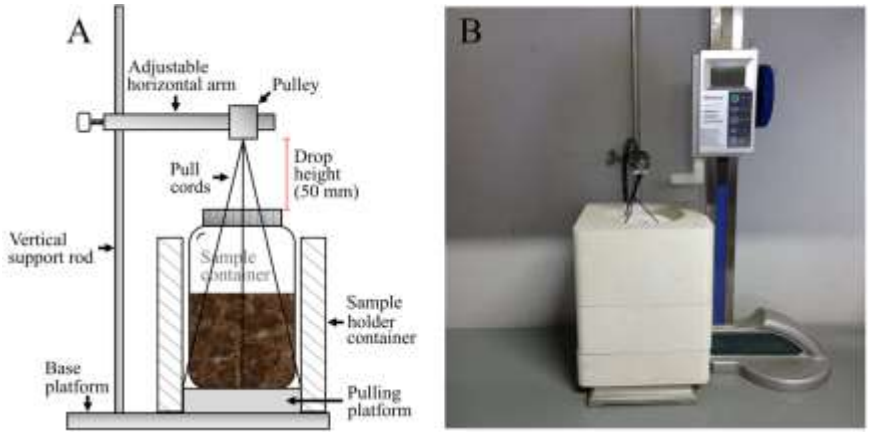


Figura 7. A) Esquema de arreglo de compactación de muestras y B) Experimento físico.

La recolección de datos consistió en emplear las siete muestras distintas de agregado triturado con GWC específicos para evaluar la consistencia de las lecturas a través del intercambio de 10 sensores. Las lecturas del ADC se registraron cada 500 ms, obteniéndose 200 lecturas por ensayo (1 min 40 s), con cinco repeticiones por condición. La profundidad a la que se sometieron los sensores fue de 60 mm (indicada en la Figura 4).

El número total de observaciones por nivel de humedad se obtuvo del producto entre 10

sensores, 5 repeticiones y 200 lecturas por ensayo (10,000 datos por nivel). Previo a cada medición, las muestras se dejaron reposar durante 10 minutos para favorecer una distribución homogénea de la humedad en la zona de medición.

2.6 Análisis de datos

El análisis de los datos se realizó en MATLAB. Para cada nivel de humedad (0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 % GWC) se adquirieron 5 corridas de 200 lecturas del ADC por sensor, es decir, 1,000 lecturas por sensor, 10,000 por nivel y 70,000 en total. La estadística descriptiva y las pruebas de normalidad se aplicaron a las lecturas del nivel de 0% de humedad (10,000 datos), tomado como referencia; para el análisis de los modelos se emplearon los promedios por sensor y nivel (70 valores). Los valores atípicos se identificaron mediante el Z-score (ver Ec. (2)) (Triola, 2009):

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \qquad \textbf{(Ec. 2)}$$

Donde z representa el número de desviaciones estándar por encima o por debajo de la media, x es el valor individual de la medición y μ y σ corresponden a la media y la desviación estándar, respectivamente, estimadas por cada corrida de 200 lecturas. En este estudio, se evaluaron tres umbrales, $|z| \leq 1.96$, 2.58 y 3.29, que corresponden a niveles de confianza de 95, 99 y 99.9 % de una distribución normal. Los umbrales se definieron a priori a partir de estos cuantiles, y se evaluaron los tres para analizar la sensibilidad de los resultados al criterio de filtrado. El filtrado se justifica porque los datos sin filtrar presentan valores extremos de 3.1 a 6.5 desviaciones estándar respecto a la media de cada sensor, mayores a las 3.4 esperadas en 1,000 lecturas asumidas gaussianas.

Para cada conjunto de datos se calcularon la media (μ), la mediana (M), la desviación estándar (σ), la varianza (σ^2), el coeficiente de variación (CV), el número de valores atípicos detectados (#OL), el mínimo y el máximo.

La normalidad se evaluó con las pruebas de Shapiro–Wilk, Jarque–Bera, Anderson–Darling, Lilliefors y D'Agostino, aplicadas a cada corrida de 200 lecturas, con los datos sin filtrar y con los datos filtrados con cada uno de los tres umbrales de Z-score. La decisión se tomó con niveles de significancia (α) de 0.05 para las pruebas y criterios, de modo que las diferencias entre criterios reflejen el efecto del filtrado y no un cambio en el criterio de rechazo. Se reportan los valores *p* y la tasa de aceptación, definida como el porcentaje de las 50 corridas (10 sensores × 5 corridas) en que no se rechazó la normalidad.

2.7 Modelos de ajuste

El ajuste de modelos se realizó en MATLAB utilizando la función incorporada *lsqcurvefit*, la cual estima los coeficientes de una función no lineal, en este caso exponenciales y polinomiales, mediante un algoritmo basado en el método de mínimos cuadrados (Ec. (3)):

$$\min_{\boldsymbol{x}} \sum_i \left(F\left(x, x_{value,i}\right) - y_{value,i}\right)^2 \qquad \textbf{(Ec. 3)}$$

Donde x es el vector de coeficientes del modelo no lineal F, mientras que $x_{value,i}$ y $y_{value,i}$ corresponden a las variables de entrada (GWC) y salida (valores ADC), respectivamente. El criterio definido en la Ec. (3) se aplicó a los dos modelos no lineales previamente establecidos. Estas métricas se calcularon utilizando como referencia el ajuste previo de la curva correspondiente. Las definiciones empleadas para el cálculo de cada una de las medidas estadísticas se presentan en las Ec (4) y (5):

$$R^2 = \frac{\left|\sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADC_i}-\bar{C}_{ADC}\right)\left(C_{ADCR_i}-\bar{C}_{ADCR}\right)\right|^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADC_i}-\bar{C}_{ADC}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADCR_i}-\bar{C}_{ADCR}\right)^2} \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{GDL}}\sum_{i=1}^{n}\left(C_{ADC_i} - C_{ADCR_i}\right)^2} \quad \textbf{(Ec. 5)}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|C_{ADC_i} - C_{ADCR_i}\right| \quad \textbf{(Ec. 6)}$$

Donde *n* representa el tamaño de la muestra, que en este caso corresponde a los valores en unidades de código ADC representativos de cada nivel de humedad; C_{ADC_i}y C_{ADCR_i}denotan el valor medido representativo y el valor estimado por el modelo ajustado para el nivel de humedad *i*, respectivamente, expresados en unidades de código; mientras que $\bar{C}_{ADC}$y $\bar{C}_{ADCR}$ corresponden a las medias globales de los valores medidos y estimados por el modelo, respectivamente, para los niveles de humedad; GDL representa los grados de libertad.

Los coeficientes de los modelos se estimaron mediante optimización no lineal por mínimos cuadrados (función *lsqcurvefit* incorporada de Optimization Toolbox, MATLAB). El orden del polinomio fue predefinido a tercer y cuarto grado con tal de capturar adecuadamente la curvatura no lineal de la respuesta del sensor dentro del rango de calibración evaluado (0–25 % GWC). Por tratarse de un ajuste empírico, su validez se restringe al intervalo de humedad evaluado.

3. Resultados

3.1 Propiedades físicas del material granular

Los resultados de la caracterización física muestran que las curvas granulométricas 2 y 3 se ubican dentro de los límites de la graduación No. 3 de la norma ASTM D1241 (Figura 8, Tabla 1). En la muestra 1, el porcentaje que pasa la malla No. 200 (5.779%) excede el máximo de 5% especificado, por lo que esta muestra no cumple con dicho requisito. Cabe precisar que la evaluación se limitó al criterio granulométrico y no incluyó otras propiedades exigidas por la norma (límites de Atterberg), por lo que los resultados son válidos únicamente para las muestras y condiciones ensayadas. A partir de un total de 1,057 partículas medidas, los sólidos se clasificaron en intervalos de 0.05 mm² para generar un diagrama de frecuencia y distribución (Figura 9). Se observó una mayor concentración de partículas con áreas menores a 0.2 mm², lo cual es consistente con los resultados obtenidos en las curvas granulométricas.

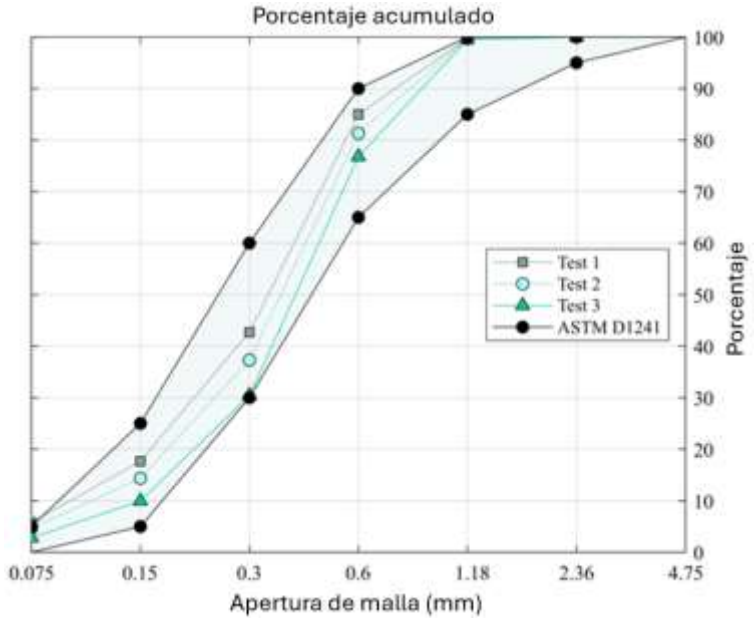


Figura 8. Curva granulométrica de material de estudio.

Tabla 1. Retención por tamaño de partícula.

Malla	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	ASTM D1241	
				Min	Max
4.75 mm (No. 4)	100	99.9	100	100	100
2.36 mm (No. 8)	99.9	99.9859	99.9950	95	100
1.18 mm (No. 16)	99.7379	99.6671	99.5309	85	100
600 µm (No. 30)	85.00	81.33	76.79	65	90
300 µm (No. 50)	42.6950	37.2987	30.4258	30	60
150 µm (No. 100)	17.6559	14.3642	9.9621	5	25
75 µm (No. 200)	5.7790	4.6711	2.7978	0	5

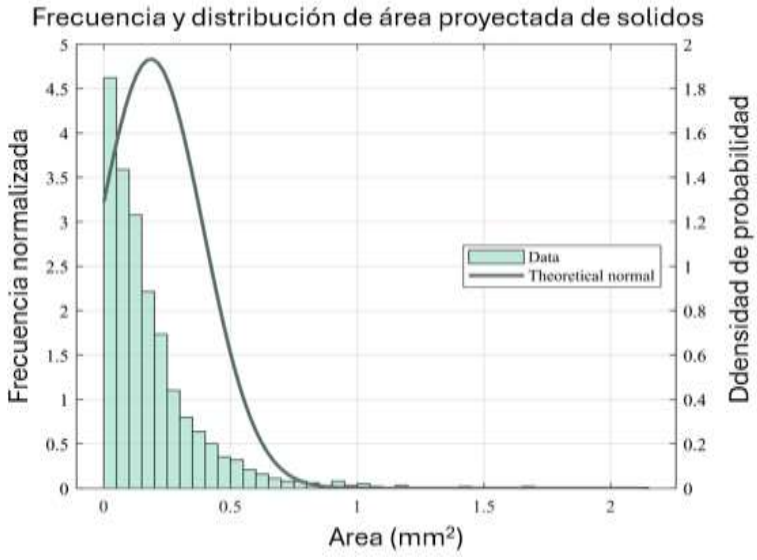


Figura 9. Distribución de área de sólidos.

Se utilizó ImageJ para ajustar el contraste y la saturación, con el fin de mejorar la visualización de los contornos de la arena. Los perfiles obtenidos se presentan junto con la representación gráfica del ángulo de reposo (φ) y sus valores correspondientes (Figura 10, Tabla 2). En la determinación del ángulo de reposo, los ensayos se realizaron por triplicado, obteniéndose un rango de variación de 1.3° y un valor promedio de 29.58°. Este resultado es comparable con el valor reportado en la referencia [22], con una diferencia de 4.42°.

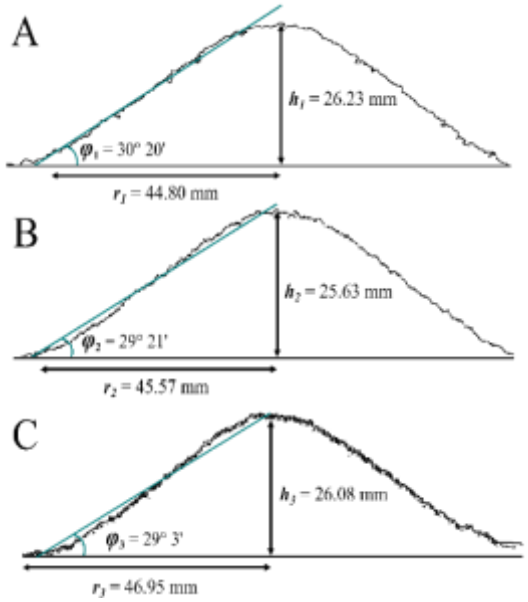


Figura 10. Perfiles en caída libre de área para determinación de ángulo de reposo.

Tabla 1. Radio, Altura y Angulo de reposo φ.

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Radio (mm)	44.805	45.57	46.95
Altura (mm)	26.23	25.63	26.08
φ (°)	30.35	29.35	29.05

3.2 Análisis de las mediciones del sensor

Una vez obtenidos los 70,000 datos provenientes de los 10 sensores, se realizó el análisis estadístico. En primer lugar, se compararon las distribuciones de las cinco repeticiones para cada sensor. Como se muestra en la Figura 11, las medias se ubicaron en un rango de 3054.0 a 3143.43, con una diferencia máxima de 89.4, lo que representa menos del 2.5% del valor máximo registrado (4095).

Asimismo, los resultados indican que el filtrado de datos mediante distintos niveles de confianza no modifica significativamente los valores medios (Figura 12, Tablas 3–5). En particular, las diferencias entre las medias de las cinco repeticiones para cada sensor individual fueron inferiores al 0.254% del rango total de medición, lo que evidencia una alta consistencia en las mediciones. Cabe aclarar que las 200 lecturas consecutivas que conforman cada una de estas repeticiones no se interpretan como observaciones estadísticamente independientes, sino como una serie temporal de una misma unidad experimental. Esto debido a la autocorrelación en el retardo 1 (*lag*-1) de las 200 lecturas: el valor promedio fue de 0.05 (rango −0.16 a 0.34), y en 8 de las 50 corridas superó el umbral de significancia ($\pm 1.96/\sqrt{200} \approx 0.14$). Además, se detectó una tendencia lineal significativa ($p < 0.05$) en 23 de 50 corridas, con una deriva mediana de 1.2 cuentas en 200 lecturas.

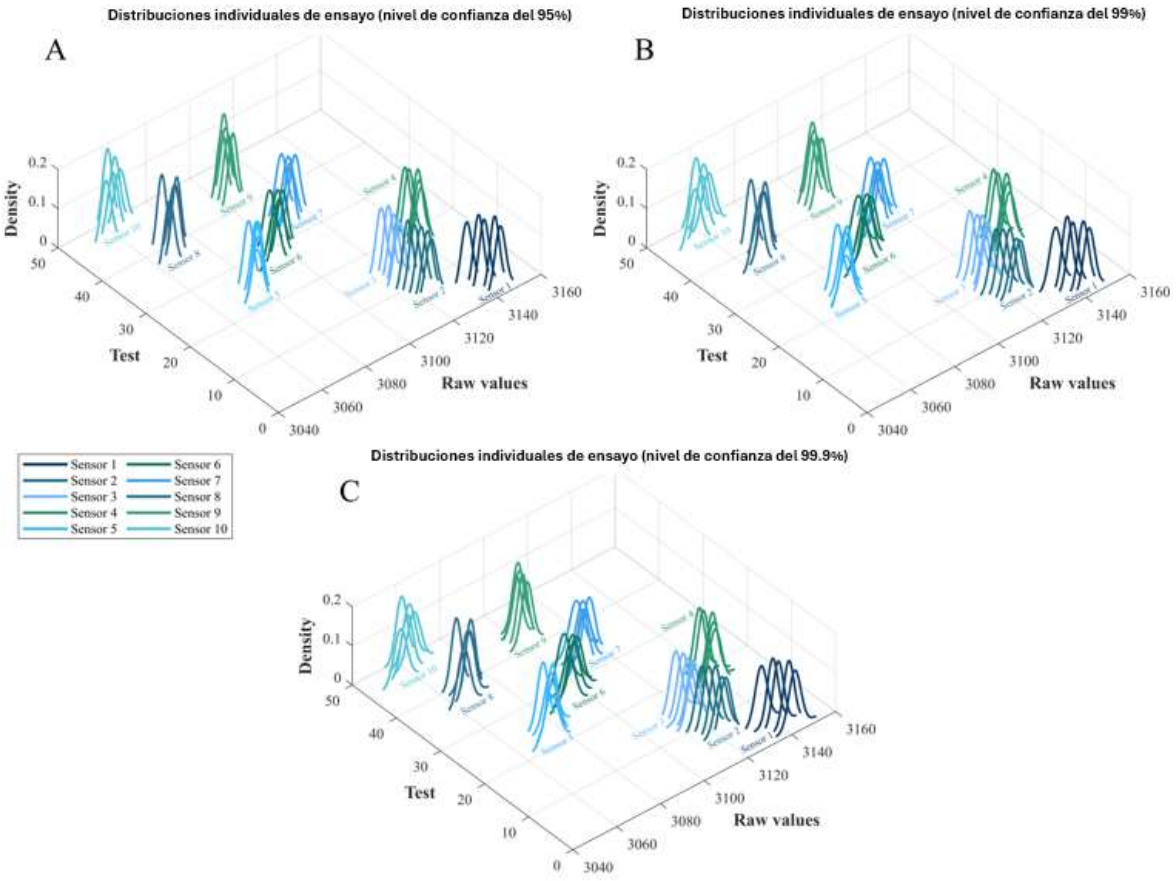


Figura 11. Distribuciones de densidad para cada ensayo en diferentes niveles de confianza: (A) 95%, (B) 99% y (C) 99.9%.

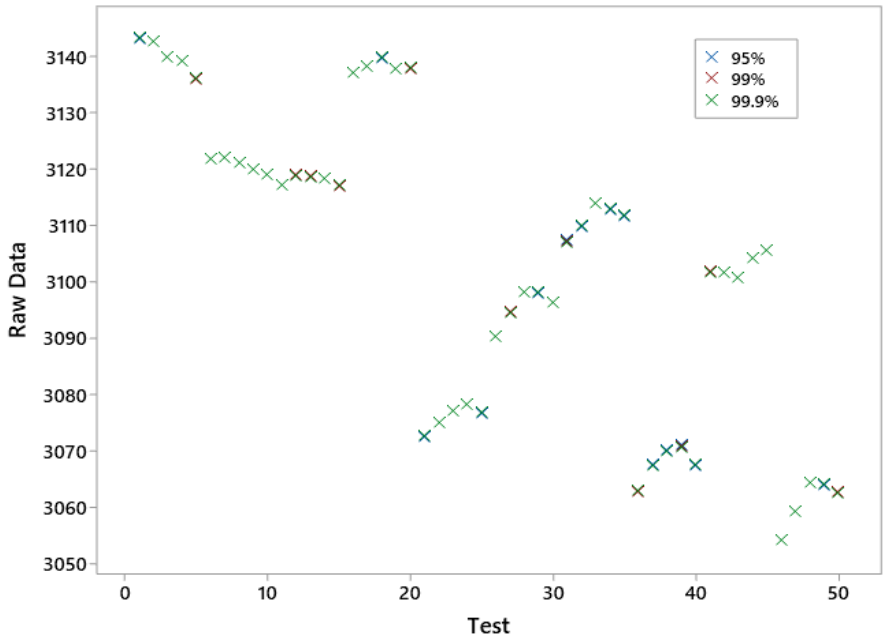


Figura 12. Comparación de las medias entre las cinco repeticiones de cada uno de los diez sensores en niveles de confianza del 95%, 99% y 99.9%.

3.3 Pruebas de normalidad

El análisis estadístico de las señales crudas (*Raw Data*) obtenidas por los diez sensores SEN0193 muestra que la aproximación a la distribución gaussiana depende de la prueba aplicada y del criterio de filtrado empleado. Se aplicaron cinco pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk, Jarque–Bera, Anderson–Darling, Lilliefors y D'Agostino), con α = 0.05, a 50 subgrupos de 200 lecturas por criterio (5 corridas por sensor, 10,000 lecturas en total), para analizar cómo el filtrado de valores atípicos basado en el Z-score influye en la representatividad de la muestra. El umbral Z-95% ($|z| > 1.96$) excluyó el 4.2% de los datos y produjo las menores tasas de aceptación (80% en Jarque–Bera y 38% en D'Agostino), lo que sugiere que un umbral tan restrictivo trunca las colas y altera la forma de la distribución. Con Z-99% (1.24% de datos excluidos) las tasas fueron de 98% y 80%, y con Z-99.9% (0.45% excluido) de 94% y 92%, valores cercanos al 95% esperado bajo normalidad, por lo que este último fue el criterio que menos alteró la distribución original.

Sin filtrar, las tasas de aceptación fueron de 54% en Jarque–Bera y 56% en D'Agostino, frente a 94% y 92% con Z-99.9%, por lo que el filtrado de valores extremos mejora la aproximación a la normalidad en asimetría y curtosis.

Sin embargo, Shapiro–Wilk, Anderson–Darling y Lilliefors rechazaron la normalidad en 98–100 % de los subgrupos con todos los criterios de filtrado. En consecuencia, los datos son consistentes con una distribución gaussiana en términos de asimetría y curtosis, pero no puede afirmarse normalidad estricta, un resultado que podría atribuirse en parte a la resolución discreta del convertidor analógico-digital.

Dentro de cada corrida, las lecturas digitales presentan fluctuaciones de baja amplitud (σ de aproximadamente 2.2–3.3 cuentas del ADC; coeficientes de variación por corrida de 0.07 a 0.11 %) y una asimetría y curtosis compatibles con una distribución aproximadamente gaussiana, aunque esto no se confirmó en todas las pruebas de normalidad. Este comportamiento es consistente con ruido aleatorio de medición (posible error de cuantización del ADC). Por otro lado, las medias por corrida de un mismo sensor variaron hasta 10.3 cuentas, lo cual sugiere una componente de deriva o variabilidad entre corridas, y se refleja en coeficientes de variación por sensor de 0.09 a 0.16 %. Estos valores indican repetibilidad de cada dispositivo en condición de 0% de humedad, aunque la desviación estándar entre sensores fue de 28 cuentas (diferencia máxima ≈ 80), frente a 3–5 cuentas dentro de cada sensor.

La diferencia entre las pruebas se explica por lo que evalúa cada una. Jarque–Bera y D'Agostino se basan únicamente en la asimetría y la curtosis, por lo que fueron las que más aceptaron la normalidad (94% y 92% con Z-99.9%). En cambio, Shapiro–Wilk, Anderson–Darling y Lilliefors comparan la forma completa de la distribución con la de una normal y son más sensibles a desviaciones en el centro y en las colas, así como a la discretización de las lecturas, por lo que rechazaron la normalidad en 98–100 % de los subgrupos con todos los criterios. Con una resolución de una cuenta y σ de aproximadamente 2.5 cuentas, la función de distribución empírica de las lecturas del ADC es escalonada, lo que puede producir rechazos aun cuando el ruido subyacente sea gaussiano. Por su parte, el umbral Z-95% ($|z| > 1.96$) descarta por construcción cerca del 5% de los datos incluso en una distribución normal, lo que trunca las colas y altera la forma de la distribución; por ello fue el criterio con las menores tasas de aceptación (80% en Jarque–Bera y 38% en D'Agostino).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para los ensayos al 0% de humedad (nivel de significancia α de 0.05).

Test	OL	μ	M	σ^2	σ	CV	Shapiro-Wilk			Jarque-Bera		Anderson-Darling		Lilliefors		D'Agostino		
							h	p	W	h	p	h	p	h	p	h	p	K^2
Y11	6	3143.31	3143	5.92	2.43	0.00077	⊗	0.00267	0.977	✓	0.188	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0845	4.94
Y21	9	3142.72	3143	4.79	2.19	0.00070	⊗	0.00027	0.969	✓	0.205	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1041	4.52
Y31	6	3139.89	3140	5.26	2.29	0.00073	⊗	0.00053	0.971	✓	0.229	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1859	3.37
Y41	6	3139.39	3139	4.95	2.23	0.00071	⊗	0.00011	0.966	✓	0.062	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0017	12.76
Y51	9	3136.01	3136	6.07	2.46	0.00079	⊗	0.00038	0.970	✓	0.112	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0373	6.58
Y12	3	3121.79	3122	6.90	2.63	0.00084	⊗	0.00006	0.964	⊗	0.030	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	24.24
Y22	10	3122.14	3122	6.00	2.45	0.00078	⊗	0.00057	0.971	✓	0.151	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1170	4.29
Y32	4	3121.20	3121	5.63	2.37	0.00076	⊗	0.00112	0.974	✓	0.169	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0696	5.33
Y42	6	3120.06	3120	5.57	2.36	0.00076	⊗	0.00086	0.973	✓	0.138	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0424	6.32
Y52	12	3119.15	3119	5.28	2.30	0.00074	⊗	0.00008	0.963	✓	0.066	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0189	7.94
Y13	7	3117.29	3117	6.44	2.54	0.00081	⊗	0.00016	0.967	⊗	0.043	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0003	16.01
Y23	4	3118.98	3119	6.40	2.53	0.00081	⊗	0.00045	0.971	✓	0.088	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0109	9.04
Y33	6	3118.76	3119	5.81	2.41	0.00077	⊗	0.00046	0.971	✓	0.099	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0136	8.60
Y43	14	3118.33	3118	4.90	2.21	0.00071	⊗	0.00016	0.966	✓	0.050	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0004	15.84
Y53	8	3117.02	3117	5.56	2.36	0.00076	⊗	0.00038	0.970	✓	0.166	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1064	4.48
Y14	7	3137.23	3137	6.80	2.61	0.00083	⊗	0.00257	0.977	✓	0.141	⊗	0.0015	⊗	0.002	✓	0.0506	5.97
Y24	7	3138.40	3138	6.14	2.48	0.00079	⊗	0.00113	0.974	✓	0.088	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0086	9.51
Y34	7	3139.84	3140	5.16	2.27	0.00072	⊗	0.00061	0.972	✓	0.100	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0154	8.35
Y44	6	3137.79	3138	5.25	2.29	0.00073	⊗	0.00063	0.972	✓	0.106	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0179	8.05
Y54	5	3137.98	3138	5.54	2.35	0.00075	⊗	0.00016	0.967	✓	0.056	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0009	13.97
Y15	14	3072.45	3073	7.68	2.77	0.00090	⊗	0.00112	0.973	✓	0.109	⊗	0.0008	⊗	0.001	⊗	0.0188	7.95
Y25	14	3075.01	3075	6.14	2.48	0.00081	⊗	0.00007	0.962	⊗	0.045	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0039	11.11
Y35	6	3077.01	3077	4.69	2.17	0.00070	⊗	0.00001	0.954	⊗	0.026	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	27.12
Y45	15	3078.14	3078	5.31	2.30	0.00075	⊗	0.00184	0.975	✓	0.405	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3777	1.95
Y55	7	3076.64	3077	5.43	2.33	0.00076	⊗	0.00009	0.965	✓	0.051	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0009	14.00
Y16	8	3090.22	3090	7.88	2.81	0.00091	⊗	0.00156	0.975	✓	0.219	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1508	3.78
Y26	7	3094.56	3095	6.41	2.53	0.00082	⊗	0.00208	0.976	✓	0.294	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.2809	2.54
Y36	10	3098.16	3098	6.19	2.49	0.00080	⊗	0.00041	0.970	✓	0.088	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0120	8.85
Y46	9	3097.96	3098	6.73	2.59	0.00084	⊗	0.00187	0.975	✓	0.148	⊗	0.0009	⊗	0.001	✓	0.0567	5.74
Y56	9	3096.27	3096	7.13	2.67	0.00086	⊗	0.00144	0.974	✓	0.476	⊗	0.0012	⊗	0.001	✓	0.4842	1.45
Y17	10	3107.34	3107	5.09	2.26	0.00073	⊗	0.00003	0.960	⊗	0.036	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	21.39
Y27	8	3109.80	3110	7.13	2.67	0.00086	⊗	0.00015	0.966	⊗	0.047	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0003	16.19
Y37	7	3113.94	3114	5.98	2.44	0.00078	⊗	0.00197	0.976	✓	0.298	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2348	2.90
Y47	11	3112.86	3113	6.77	2.60	0.00084	⊗	0.00028	0.968	✓	0.071	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0044	10.84
Y57	10	3111.74	3112	6.66	2.58	0.00083	⊗	0.00010	0.964	✓	0.123	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0678	5.38
Y18	10	3062.71	3063	5.50	2.35	0.00077	⊗	0.00013	0.966	✓	0.075	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0037	11.18
Y28	9	3067.38	3068	4.45	2.11	0.00069	⊗	0.00003	0.960	✓	0.050	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0233	7.52
Y38	7	3069.99	3070	4.27	2.07	0.00067	⊗	<0.00001	0.952	⊗	0.025	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	23.42
Y48	10	3070.87	3071	6.21	2.49	0.00081	⊗	0.00018	0.967	⊗	0.050	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0004	15.90
Y58	8	3067.24	3067	4.39	2.10	0.00068	⊗	0.00005	0.962	✓	0.128	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0529	5.88
Y19	10	3101.77	3102	4.59	2.14	0.00069	⊗	0.00026	0.968	✓	0.145	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0972	4.66
Y29	3	3101.70	3102	5.33	2.31	0.00074	⊗	0.00095	0.974	✓	0.432	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4333	1.67
Y39	9	3100.65	3100	5.07	2.25	0.00072	⊗	0.00006	0.963	✓	0.097	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0336	6.78
Y49	6	3104.31	3104	5.68	2.38	0.00076	⊗	0.00004	0.962	⊗	0.036	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0000	21.59
Y59	12	3105.64	3105.5	4.37	2.09	0.00067	⊗	0.00044	0.970	✓	0.293	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2659	2.65
Y110	14	3053.91	3054	5.89	2.43	0.00079	⊗	0.00056	0.970	✓	0.072	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0050	10.59
Y210	6	3059.05	3059	6.10	2.47	0.00080	⊗	0.00014	0.966	✓	0.085	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0079	9.67
Y310	7	3064.24	3065	7.49	2.74	0.00089	⊗	0.00017	0.967	⊗	0.044	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0004	15.90
Y410	10	3063.88	3064	5.43	2.33	0.00076	⊗	0.00231	0.976	✓	0.350	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2922	2.46
Y510	12	3062.59	3063	4.57	2.14	0.00069	⊗	0.00017	0.966	✓	0.081	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0162	8.24

Nota: los símbolos "✓" y "⊗" indican no rechazo y rechazo de normalidad de pruebas, respectivamente; "OL" indica la cantidad de *outliers*; W es el estadístico de prueba de Shapiro-Wilk; K^2 es el estadístico ómnibus de D'Agostino-Pearson; el número de test 'Y' es designado como corrida + sensor.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para los ensayos al 0% de humedad (nivel de significancia α de 0.01).

Test	OL	μ	M	σ^2	σ	CV	Shapiro-Wilk			Jarque-Bera		Anderson-Darling		Lilliefors		D'Agostino		
							h	p	W	h	p	h	p	h	p	h	p	K^2
Y11	4	3143.38	3143	6.32	2.51	0.00080	⊗	0.00727	0.9802	✓	0.3479	⊗	0.0007	⊗	0.001	✓	0.3529	2.0833
Y21	3	3142.77	3143	5.55	2.36	0.00075	⊗	0.00317	0.9777	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5209	1.3043
Y31	3	3139.86	3140	5.72	2.39	0.00076	⊗	0.00295	0.9775	✓	0.4077	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4645	1.5338
Y41	4	3139.39	3139	5.21	2.28	0.00073	⊗	0.00078	0.9730	✓	0.1106	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0220	7.6296
Y51	2	3136.10	3136	7.25	2.69	0.00086	✓	0.01596	0.9828	✓	0.5000	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.6723	0.7940
Y12	1	3121.85	3122	7.22	2.69	0.00086	⊗	0.00017	0.9681	✓	0.0372	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0001	17.8169
Y22	1	3122.11	3122	7.70	2.78	0.00089	✓	0.01517	0.9827	✓	0.5000	⊗	0.0011	⊗	0.001	✓	0.6852	0.7561
Y32	2	3121.20	3121	6.00	2.45	0.00078	✓	0.01040	0.9815	✓	0.4354	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.4382	1.6500
Y42	1	3120.10	3120	6.46	2.54	0.00081	✓	0.01329	0.9823	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.6146	0.9735
Y52	3	3118.98	3119	6.84	2.62	0.00084	⊗	0.00057	0.9720	✓	0.0644	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0855	4.9182
Y13	2	3117.31	3117	7.17	2.68	0.00086	⊗	0.00254	0.9771	✓	0.0962	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0205	7.7784
Y23	1	3118.95	3119	6.85	2.62	0.00084	⊗	0.00374	0.9785	✓	0.1610	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.0636	5.5115
Y33	4	3118.75	3119	6.26	2.50	0.00080	⊗	0.00500	0.9791	✓	0.4723	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4980	1.3944
Y43	3	3118.42	3118	6.47	2.54	0.00082	✓	0.01166	0.9818	✓	0.3844	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.4256	1.7083
Y53	5	3117.05	3117	6.03	2.46	0.00079	⊗	0.00231	0.9765	✓	0.2871	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2917	2.4641
Y14	1	3137.24	3137	7.88	2.81	0.00089	✓	0.02245	0.9839	✓	0.3844	⊗	0.0061	⊗	0.003	✓	0.3866	1.9006
Y24	4	3138.37	3138	6.76	2.60	0.00083	✓	0.01401	0.9823	✓	0.3565	⊗	0.0009	⊗	0.001	✓	0.3549	2.0718
Y34	3	3139.91	3140	5.88	2.42	0.00077	⊗	0.00744	0.9804	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6304	0.9228
Y44	2	3137.80	3138	5.95	2.44	0.00078	⊗	0.00981	0.9813	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5797	1.0904
Y54	3	3137.98	3138	5.85	2.42	0.00077	⊗	0.00101	0.9740	✓	0.1179	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0263	7.2759
Y15	3	3072.49	3073	9.69	3.11	0.00101	✓	0.01406	0.9824	✓	0.3194	⊗	0.0067	⊗	0.002	✓	0.2523	2.7547
Y25	1	3074.93	3075	8.36	2.89	0.00094	⊗	0.00681	0.9803	✓	0.4415	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.5091	1.3501
Y35	1	3077.09	3077	5.25	2.29	0.00074	⊗	0.00030	0.9701	✓	0.0889	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0096	9.2967
Y45	4	3078.10	3078	7.18	2.68	0.00087	✓	0.01648	0.9827	✓	0.5000	⊗	0.0013	⊗	0.001	✓	0.9305	0.1441
Y55	2	3076.72	3077	6.03	2.46	0.00080	⊗	0.00151	0.9755	✓	0.1185	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0270	7.2229
Y16	3	3090.17	3090	9.10	3.02	0.00098	✓	0.01471	0.9825	✓	0.5000	⊗	0.0024	⊗	0.001	✓	0.8913	0.2302
Y26	3	3094.56	3095	7.22	2.69	0.00087	✓	0.01861	0.9832	✓	0.5000	⊗	0.0016	⊗	0.001	✓	0.6375	0.9005
Y36	2	3098.08	3098	7.55	2.75	0.00089	✓	0.01281	0.9822	✓	0.5000	⊗	0.0028	⊗	0.003	✓	0.5331	1.2582
Y46	4	3098.08	3098	7.82	2.80	0.00090	⊗	0.00753	0.9804	✓	0.2217	⊗	0.0022	⊗	0.001	✓	0.2859	2.5039
Y56	2	3096.24	3096	8.58	2.93	0.00095	✓	0.02708	0.9844	✓	0.5000	⊗	0.0028	⊗	0.002	✓	0.9797	0.0410
Y17	2	3107.12	3107	6.06	2.46	0.00079	⊗	0.00046	0.9714	✓	0.0927	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0215	7.6830
Y27	3	3109.90	3110	7.90	2.81	0.00090	⊗	0.00097	0.9739	✓	0.0669	⊗	0.0006	⊗	0.001	⊗	0.0052	10.5095
Y37	2	3113.96	3114	6.87	2.62	0.00084	✓	0.01037	0.9815	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.8821	0.2508
Y47	2	3113.01	3113	8.32	2.89	0.00093	⊗	0.00782	0.9807	✓	0.3631	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.3191	2.2847
Y57	5	3111.91	3112	7.61	2.76	0.00089	⊗	0.00072	0.9726	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6653	0.8152
Y18	3	3062.68	3063	6.70	2.59	0.00085	⊗	0.00646	0.9800	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6803	0.7704
Y28	3	3067.31	3068	5.34	2.31	0.00075	⊗	0.00046	0.9713	✓	0.0996	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1370	3.9761
Y38	1	3069.89	3070	4.88	2.21	0.00072	⊗	0.00019	0.9684	✓	0.1147	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0264	7.2661
Y48	1	3070.65	3071	7.65	2.77	0.00090	⊗	0.00257	0.9773	✓	0.1175	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0823	4.9954
Y58	1	3067.41	3067	5.06	2.25	0.00073	⊗	0.00073	0.9732	✓	0.3172	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2568	2.7186
Y19	5	3101.79	3102	5.30	2.30	0.00074	⊗	0.00574	0.9794	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6997	0.7143
Y29	1	3101.64	3102	5.60	2.37	0.00076	⊗	0.00279	0.9775	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6207	0.9539
Y39	2	3100.67	3100	5.96	2.44	0.00079	⊗	0.00076	0.9731	✓	0.2946	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.2765	2.5713
Y49	2	3104.26	3104	6.15	2.48	0.00080	⊗	0.00049	0.9716	✓	0.0590	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0013	13.2534
Y59	3	3105.61	3105	5.57	2.36	0.00076	⊗	0.00257	0.9771	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.9850	0.0303
Y110	3	3053.95	3054	7.85	2.80	0.00092	✓	0.02814	0.9844	✓	0.4789	⊗	0.0039	⊗	0.001	✓	0.5540	1.1812
Y210	2	3059.05	3059	6.70	2.59	0.00085	⊗	0.00157	0.9756	✓	0.2025	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1067	4.4753
Y310	2	3064.22	3065	8.50	2.91	0.00095	⊗	0.00674	0.9802	✓	0.1971	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1174	4.2849
Y410	2	3063.96	3064	6.94	2.63	0.00086	✓	0.02803	0.9844	✓	0.5000	⊗	0.0017	⊗	0.001	✓	0.6929	0.7337
Y510	2	3062.53	3062.5	5.95	2.44	0.00080	⊗	0.00532	0.9795	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.8665	0.2866

Tabla 5. Estadísticos descriptivos para los ensayos al 0% de humedad (nivel de significancia α de 0.001).

Test	OL	μ	M	σ^2	σ	CV	Shapiro-Wilk			Jarque-Bera		Anderson-Darling		Lilliefors		D'Agostino		
							h	p	W	h	p	h	p	h	p	h	p	K^2
Y11	1	3143.43	3143	7.51	2.74	0.00087	✓	0.00181	0.9748	✓	0.0221	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.0234	7.5069
Y21	1	3142.70	3143	5.95	2.44	0.00078	✓	0.00508	0.9794	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.7718	0.5181
Y31	2	3139.90	3140	6.03	2.45	0.00078	✓	0.00584	0.9790	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.9677	0.0657
Y41	1	3139.35	3139	5.99	2.45	0.00078	✓	0.00353	0.9773	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5841	1.0755
Y51	1	3136.14	3136	7.62	2.76	0.00088	✓	0.02239	0.9839	✓	0.5000	✓	0.0015	⊗	0.001	✓	0.8508	0.3232
Y12	1	3121.85	3122	7.22	2.69	0.00086	⊗	0.00017	0.9681	✓	0.0372	⊗	0.0005	⊗	0.001	⊗	0.0001	17.8169
Y22	0	3122.07	3122	7.99	2.83	0.00091	✓	0.02076	0.9835	✓	0.4122	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.4321	1.6782
Y32	2	3121.20	3121	6.00	2.45	0.00078	✓	0.01040	0.9815	✓	0.4354	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.4382	1.6500
Y42	1	3120.10	3120	6.46	2.54	0.00081	✓	0.01329	0.9823	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.6146	0.9735
Y52	3	3118.98	3119	6.84	2.62	0.00084	⊗	0.00057	0.9720	✓	0.0644	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0855	4.9182
Y13	1	3117.28	3117	7.40	2.72	0.00087	✓	0.00440	0.9790	✓	0.1266	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.0685	5.3633
Y23	0	3118.92	3119	7.05	2.66	0.00085	✓	0.00861	0.9811	✓	0.2688	✓	0.0017	✓	0.002	✓	0.1805	3.4242
Y33	1	3118.70	3119	7.37	2.72	0.00087	✓	0.00155	0.9742	✓	0.0443	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0592	5.6553
Y43	2	3118.46	3118	6.81	2.61	0.00084	✓	0.01264	0.9821	✓	0.2997	⊗	0.0010	⊗	0.001	✓	0.3407	2.1533
Y53	3	3117.14	3117	6.69	2.59	0.00083	✓	0.00173	0.9744	✓	0.0531	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0541	5.8321
Y14	1	3137.24	3137	7.88	2.81	0.00089	✓	0.02245	0.9839	✓	0.3844	✓	0.0061	✓	0.003	✓	0.3866	1.9006
Y24	3	3138.42	3138	7.19	2.68	0.00085	✓	0.01196	0.9814	✓	0.5000	✓	0.0018	✓	0.001	✓	0.7491	0.5778
Y34	2	3139.95	3140	6.18	2.49	0.00079	✓	0.00488	0.9792	✓	0.3970	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4227	1.7221
Y44	2	3137.80	3138	5.95	2.44	0.00078	✓	0.00981	0.9813	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5797	1.0904
Y54	2	3138.03	3138	6.15	2.48	0.00079	✓	0.00205	0.9764	✓	0.4404	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4821	1.4592
Y15	0	3072.54	3073	10.63	3.26	0.00106	✓	0.08119	0.9877	✓	0.5000	✓	0.0135	✓	0.006	✓	0.7579	0.5544
Y25	1	3074.93	3075	8.36	2.89	0.00094	✓	0.00681	0.9803	✓	0.4415	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.5091	1.3501
Y35	0	3077.06	3077	5.41	2.33	0.00076	⊗	0.00095	0.9741	✓	0.1385	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0444	6.2280
Y45	0	3078.20	3078	8.55	2.92	0.00095	✓	0.00518	0.9788	✓	0.0879	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1290	4.0958
Y55	1	3076.68	3077	6.23	2.50	0.00081	✓	0.00374	0.9785	✓	0.1868	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1074	4.4630
Y16	1	3090.26	3090	9.79	3.13	0.00101	✓	0.03625	0.9853	✓	0.5000	✓	0.0026	⊗	0.001	✓	0.7665	0.5318
Y26	1	3094.55	3095	7.97	2.82	0.00091	✓	0.01752	0.9829	✓	0.2733	✓	0.0019	✓	0.001	✓	0.2714	2.6081
Y36	0	3098.08	3098	8.29	2.88	0.00093	✓	0.03713	0.9854	✓	0.5000	✓	0.0050	✓	0.001	✓	0.7915	0.4677
Y46	1	3098.13	3098	8.92	2.99	0.00096	✓	0.00954	0.9808	✓	0.1374	✓	0.0023	⊗	0.001	✓	0.1466	3.8404
Y56	1	3096.28	3096	8.92	2.99	0.00096	✓	0.03811	0.9855	✓	0.5000	✓	0.0029	✓	0.006	✓	0.8143	0.4107
Y17	0	3107.05	3107	6.58	2.56	0.00083	⊗	0.00068	0.9730	✓	0.1307	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1764	3.4702
Y27	0	3109.94	3110	8.75	2.96	0.00095	✓	0.01545	0.9829	✓	0.2891	✓	0.0024	⊗	0.001	✓	0.3188	2.2865
Y37	1	3113.92	3114	7.16	2.67	0.00086	✓	0.01137	0.9819	✓	0.5000	✓	0.0010	⊗	0.001	✓	0.9092	0.1905
Y47	1	3112.96	3113	8.79	2.96	0.00095	✓	0.01288	0.9823	✓	0.5000	✓	0.0013	⊗	0.001	✓	0.7427	0.5949
Y57	0	3111.95	3112	9.48	3.08	0.00099	✓	0.00181	0.9749	✓	0.1261	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1975	3.2441
Y18	0	3062.79	3063	7.47	2.73	0.00089	✓	0.00933	0.9808	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5532	1.1839
Y28	2	3067.36	3068	5.69	2.39	0.00078	⊗	0.00076	0.9713	✓	0.3675	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3598	2.0445
Y38	1	3069.89	3070	4.88	2.21	0.00072	⊗	0.00019	0.9684	✓	0.1147	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.0264	7.2661
Y48	0	3070.61	3071	7.99	2.83	0.00092	✓	0.00367	0.9785	✓	0.1230	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1610	3.6527
Y58	0	3067.38	3067	5.24	2.29	0.00075	✓	0.00322	0.9781	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.5655	1.1402
Y19	0	3101.69	3102	6.42	2.53	0.00082	✓	0.00359	0.9775	✓	0.1283	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.1388	3.9498
Y29	1	3101.64	3102	5.60	2.37	0.00076	✓	0.00279	0.9775	✓	0.5000	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.6207	0.9539
Y39	1	3100.71	3100	6.20	2.49	0.00080	✓	0.00191	0.9763	✓	0.3146	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3768	1.9521
Y49	0	3104.18	3104	6.77	2.60	0.00084	✓	0.00124	0.9750	✓	0.2693	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3329	2.2000
Y59	1	3105.53	3105	6.09	2.47	0.00079	✓	0.00353	0.9773	✓	0.3531	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.3352	2.1858
Y110	0	3054.00	3054	8.70	2.95	0.00097	✓	0.04676	0.9862	✓	0.4878	✓	0.0045	⊗	0.001	✓	0.4912	1.4217
Y210	0	3059.05	3059	7.13	2.67	0.00087	✓	0.00741	0.9807	✓	0.4620	⊗	0.0005	⊗	0.001	✓	0.4649	1.5320
Y310	0	3064.22	3065	9.22	3.04	0.00099	✓	0.02638	0.9844	✓	0.5000	⊗	0.0008	⊗	0.001	✓	0.8146	0.4102
Y410	0	3063.96	3064	7.60	2.76	0.00090	✓	0.01679	0.9828	✓	0.3366	✓	0.0014	⊗	0.001	✓	0.3534	2.0804
Y510	1	3062.49	3062	6.20	2.49	0.00081	✓	0.00638	0.9801	✓	0.5000	⊗	0.0006	⊗	0.001	✓	0.8468	0.3326

Por otro lado, para comparar la caracterización de datos filtrados y no filtrados, en la Tabla 6 se resumen las tasas de aceptación para diferentes criterios.

Tabla 6. Tasas de aceptación de la normalidad según el criterio de filtrado de valores atípicos ($\alpha = 0.05$; nivel de 0 % GWC).

Criterio de filtrado	Datos excluidos (%)	Tasa de aceptación de la normalidad (%)				
		Shapiro–Wilk	Jarque–Bera	Anderson–Darling	Lilliefors	D'Agostino
Sin filtrar	0.00	4	54	0	0	56
Z-95 % ($\|z\| \leq 1.96$)	4.20	0	80	0	0	38
Z-99 % ($\|z\| \leq 2.58$)	1.24	0	98	0	0	80
Z-99.9 % ($\|z\| \leq 3.29$)	0.45	2	94	0	0	92

Nota: La tasa de aceptación es el porcentaje de las 50 corridas (10 sensores × 5 corridas de 200 lecturas) en que no se rechazó la normalidad con $\alpha = 0.05$. El valor z se calculó con la media y la desviación estándar muestral de cada corrida. Las pruebas se aplicaron a cada corrida por separado.

El criterio de Z-99.9% (intervalo $\pm 3.29\sigma$) se eligió como umbral de referencia para la depuración de valores atípicos utilizado en los estadísticos descriptivos y en el ajuste de los modelos de calibración. Esta elección se realizó debido a que un umbral más estricto, como Z-95% ($\pm 1.96\sigma$), excluye por definición cerca del 5% de una distribución gaussiana, removiendo variabilidad natural de la señal de los sensores en lugar de anomalías reales de los instrumentos. En el conjunto analizado (nivel de 0% de humedad, n = 10,000), el criterio Z-99% eliminó el 1.24% de las observaciones, frente a solo 0.45% bajo Z-99.9%; pese a la diferencia moderada en el total de datos removidos, el filtrado más agresivo (Z-95%) distorsionó la simetría de la distribución y redujo las tasas de aceptación de normalidad, mientras que Z-99.9% mantuvo una estructura más estable con el comportamiento esperado de la variación normal del sistema. El conjunto filtrado bajo este último criterio fue el utilizado en el ajuste de los modelos de calibración.

3.4 Estadísticos descriptivos entre sensores (S1–S10)

El análisis de los diez sensores, sin eliminación de *outliers*, mostró valores medios entre 3060.8 y 3140.3 (Tabla 7), con desviaciones estándar de 2.90 a 4.77. Los coeficientes de variación fueron bajos (0.09–0.16 %), lo que indica una mínima variabilidad relativa. En conjunto, estos resultados evidencian un comportamiento homogéneo y estable del sistema, donde las diferencias entre sensores son despreciables frente al rango total de medición.

Tabla 7. Estadística descriptiva de los 10 sensores con 0% GWC, sin filtrar.

Variable	Media	D.E.	Varianza	C.V. (%)	Min	Mediana	Max
S1	3140.3	3.80	14.5	0.12	3126.0	3141.0	3159.0
S2	3120.9	3.04	9.23	0.10	3109.0	3121.0	3140.0
S3	3118.1	2.90	8.40	0.09	3102.0	3118.0	3128.0
S4	3138.3	2.98	8.87	0.09	3119.0	3138.0	3152.0
S5	3075.9	3.45	11.9	0.11	3064.0	3076.0	3087.0
S6	3095.5	4.22	17.8	0.14	3082.0	3096.0	3111.0
S7	3111.1	3.80	14.4	0.12	3095.0	3111.0	3122.0
S8	3067.6	3.77	14.2	0.12	3056.0	3068.0	3085.0

S9	3102.7	3.18	10.1	0.10	3089.0	3103.0	3122.0
S10	3060.8	4.77	22.7	0.16	3046.0	3061.0	3075.0

La media global de los diez sensores fue de 3103.1, con valores entre 3060.8 y 3140.3, lo que indica una baja dispersión entre dispositivos. La desviación estándar fue de 28.0 y el coeficiente de variación de 0.90%, evidenciando una baja variabilidad relativa y un comportamiento consistente del sistema.

Como se muestra en las Figuras 13 y 14, las medias de los sensores se concentran en un rango estrecho (3060.75 a 3140.34), con baja variabilidad interna en cada uno (variabilidad intradispositivo, CV de 0.07 a 0.11 % por corrida). Sin embargo, entre diferentes sensores la desviación estándar fue de 28 cuentas, con una diferencia máxima de 80 cuentas entre el sensor de mayor y el de menor lectura. Este *offset* equivale a 0.16% GWC en cercanía al 0% y hasta 1.6% GWC entre 10 y 20 %, donde la sensibilidad de la curva es menor.

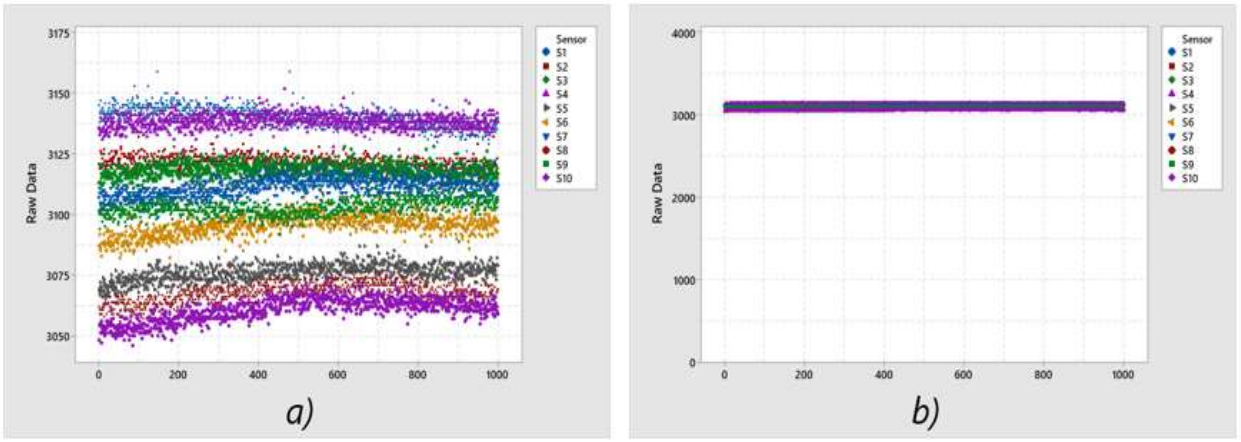


Figura 13. Diagramas de dispersión con escalado del eje *y* para (a) valores mínimos y máximos y (b) el rango completo de 0–4095.

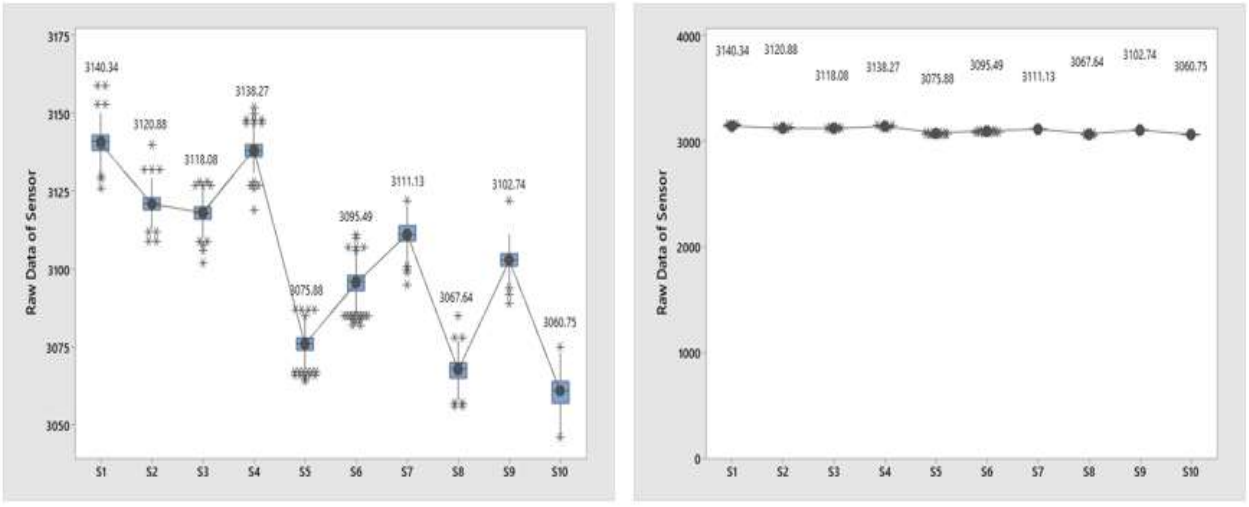


Figura 14. Diagramas de caja (*boxplot*) con escalado del eje *y* valores mínimos y máximos (izquierda) y el rango completo de 0–4095 (derecha).

3.5 Ajuste de modelos no lineales

Para obtener la curva de calibración se ajustaron cuatro modelos no lineales a la lectura promedio de los diez sensores en función del contenido gravimétrico de agua (GWC): polinomios de tercer y cuarto orden, un modelo exponencial simple y un modelo exponencial doble.

La respuesta del sensor mostró un comportamiento no lineal, con una relación inversa entre el contenido de humedad y los valores digitales registrados. La sensibilidad fue mayor a baja humedad: la pendiente promedio disminuyó de aproximadamente 178 cuentas·%$^{-1}$ entre 0 y 5 % a 17 cuentas·%$^{-1}$ entre 20 y 25 %. Entre 25 y 30 % la tendencia se invirtió en los diez sensores (incremento medio de 5.4 ± 3.6 cuentas, media ± desviación estándar), por lo que el ajuste se restringió al rango de 0–25 % (Figura 15).

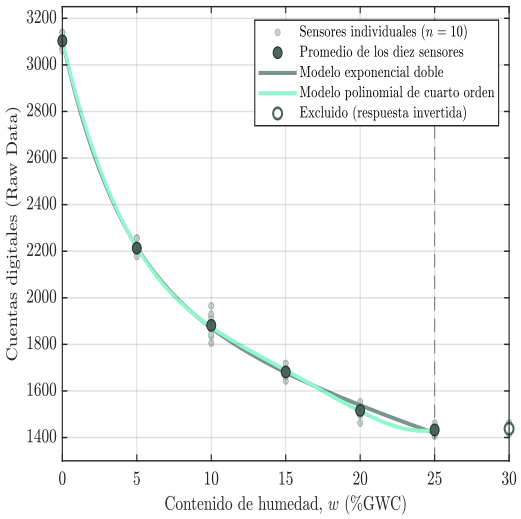


Figura 15. Curvas de ajuste del modelo polinomial de cuarto orden y del modelo exponencial doble, junto con los valores promedio y crudos de los datos experimentales.

Debido al número reducido de niveles ($n = 6$), R^2 tiende a valores cercanos al 100% incluso con modelos poco robustos, por lo que este se reporta únicamente como medida de ajuste. El desempeño predictivo se evaluó mediante validación dejando un sensor fuera: la curva se ajustó con los promedios de nueve sensores, se invirtió para estimar la humedad a partir de las lecturas del sensor omitido y el procedimiento se repitió con los diez sensores. Los errores se expresan en puntos porcentuales de GWC (Tabla 8).

Tabla 8. Ajuste y validación (dejando un sensor fuera) de los modelos de calibración en el rango de 0–25 % GWC (n = 6 niveles).

Modelo	Parámetros	Grados de libertad (GDL)	R^2 (%)	RMSE de ajuste (cuentas)	RMSE (% GWC)	MAE (% GWC)	Error máx. (% GWC)
Polinomial de 3.er orden	4	2	99.58	63.80	1.19	0.82	3.98
Polinomial de 4.º orden	5	1	99.99	11.80	1.0	0.65	3.38
Exponencial simple	3	3	99.59	51.30	1.13	0.71	5.00
Exponencial doble	4	2	99.96	20.70	0.87	0.57	3.30

Nota: el RMSE de ajuste es √(SSE/GDL) sobre la curva promedio. Las métricas de validación se calcularon sobre 60 predicciones (10 sensores × 6 niveles). Las lecturas fuera del rango de la curva se asignaron al extremo más cercano, lo cual ocurrió en 8 a 18 de las 60 predicciones según el modelo.

4. Conclusiones

La evaluación experimental del sensor capacitivo SEN0193 y la caracterización física del agregado fino, realizadas en condiciones controladas de laboratorio, indican que el sistema estudiado presenta resultados prometedores para el monitoreo de humedad en materiales granulares similares al evaluado, dentro del rango de 0-25 % GWC. Su aplicación en condiciones de campo, con otras granulometrías o rangos de humedad, requeriría validación adicional. Las curvas granulométricas se ubicaron dentro de los límites de la graduación No. 3 de la norma ASTM D1241, con la excepción de la fracción que pasa la malla No. 200 (75 μm). Asimismo, la distribución de áreas fue coherente con las curvas granulométricas, mientras que se reportó un ángulo de reposo promedio de 29.58° para describir la fricción del material.

En términos de desempeño estadístico, el análisis de las señales crudas de los diez sensores mostró buena repetibilidad de cada dispositivo, con CV de entre 0.07 a 0.11 % por corrida y de 0.09 a 0.16 % por sensor. Esto indica una baja dispersión para un sensor de bajo costo. Por otro lado, se registró una variabilidad en las medias de cada sensor de aproximadamente 10 cuentas.

Respecto a la distribución, la aproximación a una distribución gaussiana fue dependiente del tipo de prueba y filtrado respecto a la confiabilidad α. Con Z-95% ($|z| \leq 1.96$) las tasas fueron las menores (80% y 38%); con Z-99.9%, 94% y 92% ($\alpha = 0.05$). Las pruebas de normalidad Shapiro-Wilk, Anderson-Darling y Lilliefors rechazaron la normalidad en 98-100 % de los subgrupos sintetizados en las Tablas 3 a 5 bajo todos los criterios, lo cual respalda la consistencia de una variación simétrica de los valores centrales.

Los resultados coinciden con otras investigaciones (Radi et al., 2018; Pereira et al., 2022; Orangi et al., 2019; Strypsteen et al., 2026), quienes también reportan una respuesta capacitiva no lineal y calibraciones específicas por material, aunque con mayor variabilidad entre sensores (CV = 3.27–17.84 %) que la observada aquí (CV entre sensores de 0.9 a 2.61 % en el rango de 0 a 25 % GWC). En los estudios previamente mencionados se han evaluado sensores capacitivos de bajo costo similares (distintos al SEN0193) en ocho tipos de suelo, donde se incorporó validación de campo independiente frente a sensores de referencia (WET, ThetaProbe, gravimetría), alcanzando RMSE de 0.005–0.036 m^3/m^3.

Finalmente, el modelado matemático confirmó la naturaleza no lineal de la respuesta del sensor, con una sensibilidad máxima en rangos de baja humedad (aproximadamente 178 cuentas·$\%^{-1}$ entre 0 y 5 % frente a 17 cuentas entre 20 y 25 %) y una inversión en la tendencia por encima de 25% GWC en los diez sensores, por lo que la calibración se acotó al rango de 0 a 25 %. En ese rango, el modelo exponencial doble (empírico, monótono y de cuatro parámetros) obtuvo el menor error en la validación dejando un sensor fuera (RMSE = 0.87% GWC, MAE = 0.57% GWC y error máximo de 3.30% GWC), frente a 1.0% del polinomio de cuarto orden y 1.13% del exponencial simple; su R^2 (99.96%) se interpreta únicamente como medida de ajuste. Estos resultados respaldan el potencial del SEN0193 como herramienta de bajo costo para estimar humedad en el material evaluado, con un error esperado de aproximadamente 0.9% GWC para un sensor nuevo con una curva común. Su exactitud requiere, sin embargo, validación frente a un método de referencia, con otros materiales y en condiciones de campo (temperatura y compactación).

5. Agradecimientos

Se hace constar que los autores reconocen y agradecen el apoyo económico de SECIHTI a través del Programa SNII y Programa de Estancias Posdoctorales por México, así como al Programa de becas para estudio de Posgrado Nacionales.

6. Referencias

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7.ª ed.). Cengage Learning.

ASTM International. (2007). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort* (ASTM D698).

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1995a). *Moisture-density relations of soils using a 4.54-kg (10-lb) rammer and a 457-mm (18-in.) drop* (AASHTO T 180).

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1995b). *Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 2.5-kg (5.5-lb) rammer and a 305-mm (12-in.) drop* (AASHTO T 99).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2003). *Manual MMP: Métodos de muestreo y prueba de materiales. Parte 1: Suelos y materiales para terracerías*.

Contreras Ferreyra, D. U., Chávez Negrete, C., & Pastor Gómez, N. (2024). Utilization of low-cost water content sensors in compaction tests. *Ingeniería Investigación y Tecnología, 25*(3), 1–7. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.020

Vaz, C. M. P., Jones, S., Meding, M., & Tuller, M. (2013). Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. *Vadose Zone Journal, 12*(2), 1–16. https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160

Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. *Sensors, 25*(2), 343. https://doi.org/10.3390/s25020343

Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. *Sensors, 20*(12), 3585. https://doi.org/10.3390/s20123585

Adla, S., Rai, N. K., Karumanchi, S. H., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors. *Sensors, 20*(2), 363. https://doi.org/10.3390/s20020363

Hidayat, M. N., Hazarika, H., & Kanaya, H. (2024). Calibration and performance evaluation of cost-effective capacitive moisture sensor in slope model experiments. *Sensors, 24*(24), 8156. https://doi.org/10.3390/s24248156

Fernandes Genovez, J. G., Gripp, A. R., Pinto Duque, A. C. L., Felix, R. W., Esteves, F. A., & Martins, R. L. (2025). Enhancing the accuracy of the low-cost capacitive soil moisture sensor SEN0193 for Internet of Things applications. *Brazilian Archives of Biology and Technology, 68*. https://doi.org/10.1590/1678-4324-2025240380

Radi, Murtiningrum, Ngadisih, Muzdrikah, F. S., Nuha, M. S., & Rizqi, F. A. (2018). Calibration of capacitive soil moisture sensor (SKU:SEN0193). En *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528624

Pereira, R. M., Sandri, D., & da Silva Júnior, J. J. (2022). Evaluation of low-cost capacitive moisture sensors in three types of soils in the Cerrado, Brazil. *Revista Engenharia na Agricultura, 30*, 262–272. https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.14017

Kulmány, I. M., Bede-Fazekas, Á., Beslin, A., Giczi, Z., Milics, G., Kovács, B., Kovács, M., Ambrus, B., Bede, L., & Vona, V. (2022). Calibration of an Arduino-based low-cost capacitive soil moisture sensor for smart agriculture. *Journal of Hydrology and Hydromechanics, 70*(3), 330–340. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0014

Al-Rawi, M. A. M. (2024). Low-cost soil moisture sensors' assessment for their accuracy after calibration through the gravimetric method. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics, 56*(1), 353–369. https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.32

Agustirandi, B., Inayah, I., Aminah, N. S., & Budiman, M. (2024). Analysis comparison, calibration, and application of low-cost soil moisture in smart agriculture based on Internet of Things. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control, 22*(5), 1221–1230. https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v22i5.25703

Rahman, M. M. (2017). *Relationships between moisture content and dielectric constant for subgrade and subbase of pavement courses* [Tesis de maestría, Universiti Teknologi Malaysia].

Schwamback, D., Persson, M., Berndtsson, R., Bertotto, L. E., Kobayashi, A. N. A., & Wendland, E. C. (2023). Automated low-cost soil moisture sensors: Trade-off between cost and accuracy. *Sensors, 23*(5), 2451. https://doi.org/10.3390/s23052451

Nagahage, E. A. A. D., Nagahage, I. S. P., & Fujino, T. (2019). Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. *Agriculture, 9*(7), 141. https://doi.org/10.3390/agriculture9070141

ASTM International. (2015). *Standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses* (ASTM D1241).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Materiales para subbases* (N·CMT·4·02·001/16). Instituto Mexicano del Transporte.

Geldart, D., Abdullah, E. C., Hassanpour, A., Nwoke, L. C., & Wouters, I. (2006). Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. *China Particuology, 4*(3–4), 104–107. https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60247-4

Arduino. (2026, 15 de septiembre). *Arduino Due: User manual*. https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000062-datasheet.pdf

Triola, M. F. (2009). *Estadística* (10.ª ed.). Pearson Educación.

Al-Hashemi, H. M. B., & Al-Amoudi, O. S. B. (2018). A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology, 330*, 397–417. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003

Orangi, A., Narsilio, G. A., & Ryu, D. (2019). A laboratory study on non-invasive soil water content estimation using capacitive based sensors. *Sensors, 19*(3), 651. https://doi.org/10.3390/s19030651

Strypsteen, G., Persson, M., Miroshnychenko, M., & Rakonjac, N. (2026). Field performance and calibration strategies for low-cost capacitive soil moisture sensors. *Sensors, 26*(11), 3291. https://doi.org/10.3390/s26113291

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Disminución de carga por viento en pared de invernadero mediante la modificación de perfil aerodinámico

Reduction of wind load on greenhouse walls by modifying the aerodynamic profile

Nava-Gómez, L.A.[a], Carrera-Escobedo, J.L.[b], Chávez-Romero, R.[a]*

[a] Programa de Ingeniería Mecánica; Universidad Autónoma de Zacatecas; C.P. 98000, Zacatecas, Zacatecas.
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3774-2335, https://orcid.org/0000-0003-4095-1516*
[b] Departamento de Ingeniería Mecatrónica; Universidad Politécnica de Zacatecas; C.P.99010, Fresnillo, Zacatecas.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1761-8096.
narm2596@gmail.com; jlcarrera200@gmail.com; rchavez@uaz.edu.mx*

Innovación tecnológica: Se realiza un análisis computacional de fluidos de las cargas de viento ambientales sobre la estructura de un invernadero rústico para mejorar su comportamiento.

Área de aplicación industrial: En la disminución de costos de la construcción y mantenimiento de invernaderos rústicos e industriales.

Recibido: 21 enero 2026
Aceptado: 21 julio 2026

Abstract

This paper presents a computational fluid dynamics (CFD) analysis of structural issues and tearing of plastic sheeting in a rustic greenhouse. The aerodynamic profile was modified to increase the greenhouse's service life by reducing normal loads on its side walls. The modified aerodynamic profile stabilizes the structure under wind loads and reduces costs associated with replacing plastic sheeting. The analysis shows that the total wind thrust force reaches a minimum of 999 N when the windward wall is inclined at 60° relative to the ground. This inclination is therefore recommended for exterior greenhouse side walls to improve their durability under high wind speeds.

Keywords: Rustic greenhouse, CFD, wind loads, aerodynamic profile.

Resumen

En el presente trabajo se expone un análisis CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para resolver problemas estructurales y de desgarramiento de cubierta plástica presentes en un invernadero rústico. Mediante la modificación del perfil aerodinámico del invernadero se pretende incrementar su vida útil al disminuir cargas normales de las paredes laterales. Un mejor perfil aerodinámico estabiliza la estructura ante cargas de viento y disminuye costos relacionados con el reemplazo de películas plásticas. Del análisis se observa que la fuerza total de empuje del viento tiene un mínimo de 999N cuando la pared que recibe las cargas de viento tiene una inclinación de 60° respecto del piso. Por lo que se recomienda dar esta inclinación a las paredes laterales externas de los invernaderos para aumentar la vida útil de los mismos ante condiciones de viento a altas velocidades.

Palabras clave: Invernadero rústico, CFD, cargas de viento, perfil aerodinámico.

1. Introducción

En el presente trabajo se realiza un análisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) por medio de un software especializado. Con este análisis se busca resolver problemas tanto estructurales como de desgarramiento de cubierta plástica que presenta un invernadero rústico. El invernadero a analizar está ubicado en el municipio de Guadalupe en la localidad de San Ramón, del Estado de Zacatecas, México, ver Figura 1.

Este invernadero ha sufrido daños estructurales por las cargas laterales que provocan las rachas de viento, lo que también ha generado una frecuente pérdida de las capas plásticas que protegen al cultivo, así como la deformación de una las caras laterales poniendo en riesgo la producción y la integridad tanto de la estructura del invernadero como del personal que permanezca en su interior.

En la literatura técnica, el estudio de flujos sobre cuerpos como los invernaderos se ha abordado mediante dos vertientes complementarias que son la experimentación a escala en túneles de viento y las simulaciones numéricas de mecánica de fluidos computacional. Dentro de los estudios experimentales se puede mencionar el trabajo realizado por Moriyama et al. (2008) quienes realizan una investigación experimental sobre los coeficientes de presión del viento (Cp) en invernaderos de estructura de tubos conocidos como pipe houses, los cuales tienen una estructura similar a los que se analizan en este estudio. Los autores encontraron que la distribución del valor del Cp cambia significativamente según la dirección del viento y que la combinación de alta succión externa y cambios en la presión interna genera grandes fuerzas de levantamiento que pueden causar el colapso de la estructura. Estudios como el de Kwon et al. (2016) muestran que el margen de error que se obtiene entre los resultados de las simulaciones y las mediciones en la experimentación son de alrededor del 4% lo cual puede ser considerado como un error pequeño. Por su parte, Liang et al. (2023) encontraron un error de 14% cuando intentaron replicar los resultados obtenidos por Richards y Hoxey (2012) con el modelo $\kappa - \varepsilon$ realizable.

Las circunstancias ya descritas permiten observar un diseño poco cuidadoso de la estructura del invernadero. Sin embargo, antes de pensar en realizar cambios costos en la estructura, se considera que el problema

puede resolverse realizando una mejora al diseño del perfil aerodinámico de la misma. Este rediseño lograría una disminución de las cargas por viento, reduciendo costos de mantenimiento por cambio de película plásticas y alargando la vida útil del invernadero en general. Por lo anterior, el presente trabajo se plantea el objetivo de evaluar la disminución de la carga de presión que se obtiene al modificar el perfil de la pared de barlovento de un invernadero típico de la región centro-norte de México. La hipótesis correspondiente para este objetivo es: la modificación del ángulo de inclinación de la pared de barlovento permite disminuir la carga que el viento produce sobre la misma.



Figura 1. Invernadero rústico analizado.

2. Antecedentes

Un invernadero es una construcción agrícola, con una cubierta traslúcida que tiene por objetivo modificar y controlar los principales factores ambientales que intervienen en el crecimiento y desarrollo de diferentes especies para su producción constante.

Aunque se tienen diferentes normativas respecto de la construcción de invernaderos, tales como, NMX-E-255-CNCP-2013, UNE-EN 13031-1, IS14462(1997), PNS/PAES415 por mencionar solo algunas, existe una cantidad importante de invernaderos llamados rústicos que son construidos sin atender dichas normativas, por lo que sus estructuras no siempre resisten las diversas cargas a las que se ven sometidas.

Los invernaderos son susceptibles de sufrir daños por varios factores ambientales como la radiación solar o el viento. Contra la radiación solar se suelen hacer mejoras al utilizar películas plásticas especiales para resistir la radiación solar en presencia de condiciones de alta humedad. Por otra parte, en lo que respecta al daño producido por las ráfagas de viento lo acostumbrado es reforzar las estructuras y cimentaciones de los invernaderos, lo que típicamente implica un nivel análisis y gasto considerable (Abid et al., 2025; Bárzaga et al., 2017; Gutiérrez-Castillo, 2023; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015).

En lo que respecta a cargas por vientos en invernaderos, algunos estudios se pueden encontrar en los trabajos de Castillo Méndez y Rojano Aguilar (2017), López Bautista et al. (2016) y Ojeda-Bustamante y Flores-Velázquez (2015), donde se calculan las cargas de viento en la estructura o en la película plástica; también existen análisis de flujos de viento y cambios de presión dentro de los invernaderos considerando varios fenómenos físicos relacionados (Abid et al., 2025; Cabascango-Álvarez, 2019; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015; Rafael, 2014). En el trabajo de Santoyo Guerrero y Ramírez-Mata (2017) se hace una

consideración de cargas posibles y se determina si la estructura será capaz de soportar dichas cargas; de manera similar, se analiza en los trabajos de Bárzaga et al. (2017) y Manzo Reyes et al. (2020). Amador et al. (2021) realizaron un estudio comparativo entre los coeficientes de presión (Cp) obtenidos mediante túneles de viento y simulaciones de dinámica de fluidos computacional, CFD y los establecidos por la normativa Eurocódigo EN1991-1-4 para cubiertas de naves industriales bajas. En este estudio, los autores toman como válidos sin diferencia alguna a la información proveniente de estudios numéricos y la que se obtuvo de estudios experimentales.

Wang et al. (2021) realizaron una revisión de la literatura en la que analizan los métodos y factores críticos para estimar los coeficientes de presión del viento (Cp) en invernaderos. Los principales métodos son la experimentación en campo a escala real, experimentación a escala en túneles de viento y simulación numérica mediante CFD. Los autores del artículo de revisión indican que existe una alta concordancia y validación entre los resultados numéricos y los experimentales, lo cual posiciona a la simulación por computadora como una herramienta precisa para el diseño estructural. Finalmente, concluyen que la simulación numérica mediante CFD es un método fiable, eficiente y visualmente claro que complementa y coincide satisfactoriamente con las pruebas experimentales.

Adicionalmente, el comportamiento del flujo de viento sobre invernaderos y estructuras similares también se ha caracterizado de forma experimental mediante ensayos en túnel de viento; por ejemplo, en el trabajo de Kwon et al. (2016) se midieron los coeficientes de presión de viento de cuatro tipos de invernaderos de un solo vano en función de la dirección del viento, la pendiente del techo y el radio de curvatura, mientras que en el trabajo de Moriyama et al. (2008) se ensayó un modelo rígido a escala 1:20 de un invernadero tipo túnel para analizar la influencia de las aberturas laterales sobre los coeficientes de presión internos y externos. Estos resultados experimentales han servido, a su vez, como referencia de validación para modelos numéricos, tal como se reporta en el trabajo de Kim et al. (2019), donde se comparan coeficientes de presión obtenidos mediante simulación de grandes escalas (LES) con mediciones de túnel de viento.

Sin embargo, hasta este punto no se ha encontrado en la literatura especializada alguna propuesta de cambios en el perfil del invernadero para soportar cargas de viento sin modificaciones estructurales. En el presente trabajo un cambio en el perfil aerodinámico del invernadero se considera como alternativa, para disminuir los daños estructurales sin hacer cambios sustanciales en la estructura del invernadero rústico ya existente. Esta mejora, consiste en modificar la inclinación de las paredes del invernadero donde las cargas por viento son más recurrentes, la inclinación óptima se cuantifica por medio del método de elementos finitos.

3. Metodología

3.1. Características del invernadero rústico.

Para el presente estudio se ha considerado un invernadero rústico con techumbre parabólica como el que se muestra en la Figura 1. El invernadero se encuentra localizado en la localidad de San Ramón, en el municipio Guadalupe del Estado de Zacatecas, México, con coordenadas (22.682833, -102.552528). La localidad se encuentra a una altura de 2285 metros sobre el nivel del mar con una temperatura y presión atmosférica promedio de 20°C y 0.765 atm.

El invernadero se ve afectado por ráfagas de viento cuyas velocidades máximas se alcanzan en el mes de abril y son registradas por la Red de Monitoreo Agroclimático del Estado de Zacatecas del INIFAP, que tiene una estación en el mismo municipio. La velocidad máxima alcanzada es de 12 m/s (43.2 km/h) con dirección predominante del viento viniendo desde el suroeste. En la Figura 2 se muestra una imagen satelital del invernadero rústico analizado y su ubicación exacta, además se indica la dirección predominante del viento y la cara con mayores afectaciones.



Figura 2. Vista satelital de invernadero rústico analizado.

En este trabajo se realiza un análisis CFD, con el fin de predecir la interacción entre la pared del invernadero y las cargas de viento. Mediante este análisis se pretende modificar el diseño aerodinámico del invernadero e incrementar su vida útil, dando estabilidad a su estructura y disminuyendo costos por reemplazo de películas plásticas.

3.2. Ecuaciones relacionadas con el CFD

El modelo utilizado para modelar matemáticamente el flujo de aire alrededor del invernadero consta de la ecuación de continuidad, ec (1), y las ecuaciones de Navier-Stokes ecs. (2), (3) y (4). Debido a la variación casi aleatoria de las velocidades se utiliza un esquema con valores promedio de velocidad el cual causa la aparición de nuevos términos que usualmente son tratados mediante modelos de turbulencia. En este trabajo se selecciona el modelo $\kappa - \varepsilon$ estándar, ya que es uno de los más utilizados y validados en problemas de flujo turbulento y subsónico, con κ como la energía cinética de turbulencia y ε como tasa de disipación de la turbulencia. Se utiliza este modelo en estado estable ya que ha sido validado en repetidas ocasiones como se describe en estudios previos (Cengel & Cimbala, 2015; Launder & Spalding, 1972; Ojeda-Bustamante & Flores-Velázquez, 2015; Ricci, 2025; Versteeg & Malalasekera, 2007). Específicamente el modelo $\kappa - \varepsilon$ estándar fue utilizado en el modelado de un invernadero por Liang et al. (2023), encontrando una diferencia del 20% entre los valores obtenidos en un túnel de viento y los obtenidos con el modelo.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

$$-\frac{\partial(p)}{\partial x} + div(\mu\ grad\ u) + S_{Mx} = 0 \quad \textbf{(Ec. 2)}$$

$$-\frac{\partial(p)}{\partial y} + div(\mu\ grad\ v) + S_{My} = 0 \quad \textbf{(Ec. 3)}$$

$$-\frac{\partial(p)}{\partial z} + div(\mu\ grad\ w) + S_{Mz} = 0 \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

$$div(\rho k U) = div\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} grad\ k\right] + 2\mu_t S_{ij}.S_{ij} - \rho\varepsilon \quad \textbf{(Ec. 5)}$$

$$div(\rho\varepsilon U) = div\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} grad\ \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}2\mu_t S_{ij}.S_{ij} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon}{k} \quad \textbf{(Ec. 6)}$$

Donde:
u, *v*, *w* son las componentes de la velocidad del fluido en la dirección de los ejes *x*, *y*, *z* respectivamente.
ρ es la densidad del fluido
p es la presión
S_{MX}, S_{MY}, S_{MZ}, son las fuentes de momentum en la dirección de los ejes *x*, *y*, *z* respectivamente.
μ es la viscosidad dinámica del fluido
μ_t es la viscosidad dinámica turbulenta
U es el vector de velocidades promedio
S_{ij} es la tasa de deformación
k es la energía cinética turbulenta
ε es la velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta.

3.3. Condiciones de la simulación

Las propiedades cinemáticas del aire, tales como densidad y viscosidad dinámica son calculadas por medio de un software CFD a partir de la temperatura y presión del aire que, de acuerdo a la ubicación del invernadero, son de 20°C y 0.765 atm.

Se considera que la entrada del viento es desde la parte derecha del dominio computacional, con una velocidad media de 12 m/s (aproximadamente 43 km/h), ver Figura 3. En cuanto a la intensidad de turbulencia, depende de la rugosidad de la superficie del terreno donde se ubica el invernadero (Ruiz, 2018), de 0.05 para este caso, ya que se trata de una superficie plana y sin obstáculos, acorde a lo descrito en otros estudios (Barber, 2006; Lak-woo, 2015; Rafael, 2014). La escala de longitud se configuró en 0.01m.

La parte superior de la Figura 3 muestra el sólido tridimensional utilizado para las simulaciones numéricas, el cual tiene dimensiones de de 7.0 m de ancho por 12.0 m de largo, una altura máxima de 3.52 m y mínima en la cara a barlovento de 2.0 m. En la parte inferior de la Figura 3 se muestra el dominio computacional, aquí mismo se observa que se considera el invernadero y el suelo como sólidos interactuando con el resto del volumen que es ocupado por aire. Las dimensiones en la Figura 3 aparecen en centímetros.

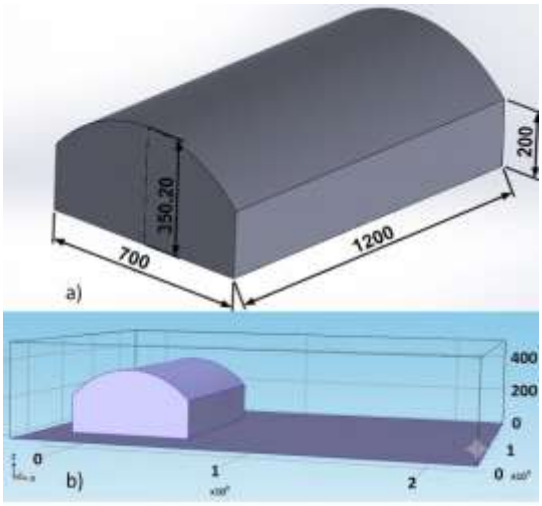


Figura 3. Modelado computacional del invernadero, a) sólido tridimensional, b) dominio computacional.

El mallado es del tipo no estructurado, tetraédrico libre. Para verificar la independencia de los resultados con el tamaño de la malla, se generan varios mallados con diferentes densidades y se calculan las presiones máximas hasta encontrar convergencia en la simulación, ver Figura 4. Los tamaños de malla utilizados fueron generados automáticamente al configurar el tamaño de malla como extremadamente gruesa, más gruesa, gruesa, normal y fina. El resultado se estabiliza en tamaño de malla normal y fina, de los cuales se utilizó la opción de tamaño normal para que la demanda computacional sea la más baja y con buenos resultados. El porcentaje de variación entre los valores de presión para la malla normal y la gruesa es de 0.325% la cual es casi 10 veces menor que la que se obtiene entre las mallas extremadamente gruesa y más gruesa, motivo por el cual se considera que no se obtendrán beneficios significativos si se sigue disminuyendo el tamaño de la malla. La variación no monótona que se observa puede deberse según se explica en el libro de Roache (2009) a los cambios bruscos en las fronteras de regiones de flujo cuando se utiliza un modelo de turbulencia RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), dicho en otras palabras, la causa del comportamiento podría ser el cambio brusco en la dirección del aire al encontrarse de frente con la pared del invernadero, en conjunto con el uso de un modelo RANS de turbulencia. De acuerdo al mismo autor, otra posible causa es el gran tamaño de las mallas extra gruesas y gruesa.

Para resolver el problema no lineal se utilizó el método iterativo de Newton-Raphson. El problema completo se aborda con un enfoque totalmente acoplado. Esto significa que la presión y la temperatura se resuelven simultáneamente en cada iteración, en lugar de hacerlo de forma segregada (una variable a la vez). Este enfoque es más robusto para problemas con fuerte acoplamiento entre las ecuaciones. En el núcleo de cada iteración de Newton, se debe resolver un sistema de ecuaciones lineales a gran escala. Para ello, se emplea el solver directo PARDISO. El proceso iterativo de Newton continúa hasta que se cumple un criterio de convergencia. En este modelo, la tolerancia del solver no lineal se ha fijado en 10^{-4}. La solución numérica de este sistema de ecuaciones diferenciales parciales (EDPs) acopladas y no lineales se obtiene mediante el Método de los Elementos Finitos. El dominio geométrico se divide en un número finito de elementos más pequeños. Para este modelo, se utiliza una malla no estructurada de tetraedros con funciones de forma lineales. Las ecuaciones se resolvieron mediante el software COMSOL Multiphysics 5.3.

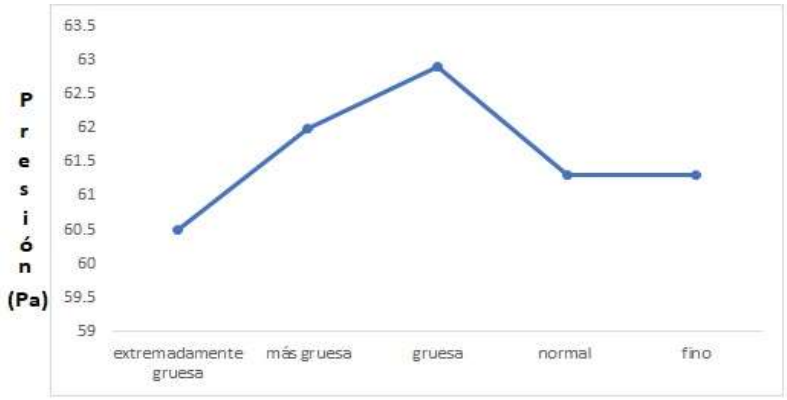


Figura 4. Variación de la presión máxima según el tamaño de la malla.

El mallado resultante se observa en la Figura 5 y cuenta con las siguientes características:

Número de grados de libertad resueltos 31722
Número de elementos de vértice 16
Número de elementos de arista: 298
Número de elementos de contorno: 3496
Número de elementos: 30619

También en la Figura 5 se muestran las condiciones de frontera. La cara de la derecha es la entrada de aire, la cual se configuró a 12 m/s. Las caras frontal, superior y posterior se configuran como contornos abiertos, la cara inferior se configura como una pared con la condición no deslizamiento y la cara lateral izquierda se configura como salida.

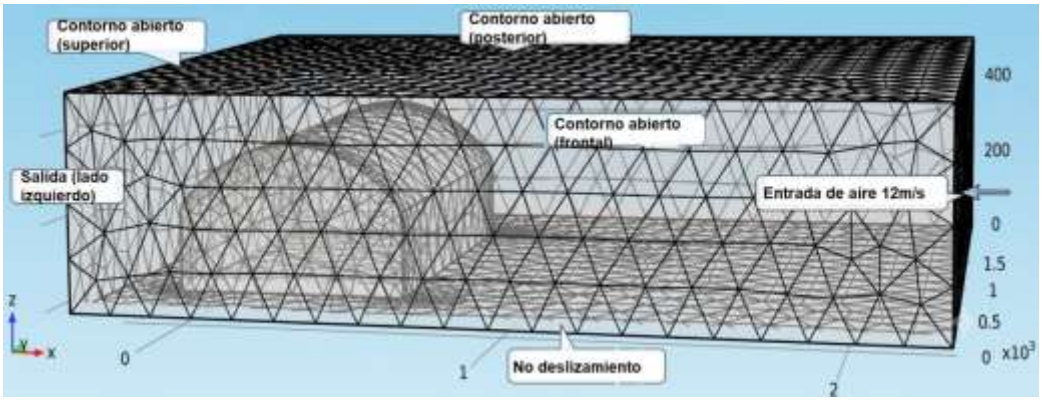


Figura 5. Mallado del dominio computacional y condiciones de frontera.

4. Discusión de resultados

En la Figura 6 se muestran las líneas de flujo del viento de las simulaciones con el perfil inicial de a) 90°, b) 45° y c) 15°. Se puede observar que entre menor sea el ángulo, el flujo del viento pasa sobre el invernadero con cambios menos bruscos en la dirección de su velocidad. Lo anterior implica que, entre más pequeño sea el ángulo, menor será la resistencia que opone la pared al viento (o barlovento), haciéndola más aerodinámica. Asimismo, se evidencia la formación de vórtices en la pared de sotavento, fenómeno que propicia la aparición de regiones de baja presión. Este comportamiento es consistente con los resultados reportados por López Bautista et al. (2016), Liang et al. (2023) y Kwon et al. (2016), quienes observaron patrones similares de generación de vórtices y distribución de bajas presiones en la pared de sotavento de las configuraciones analizadas.

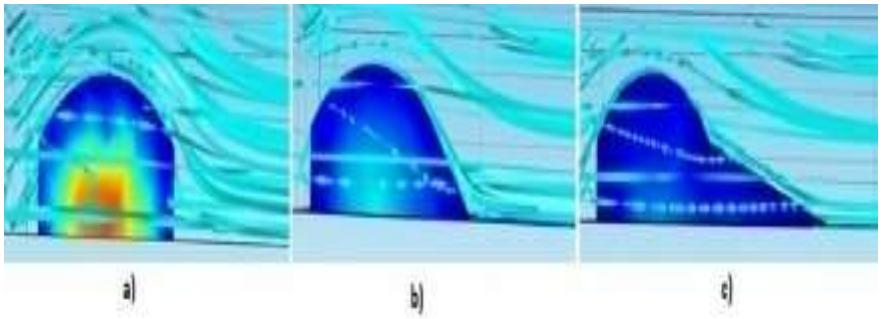


Figura 6. Líneas de flujo del viento sobre el invernadero.

Los resultados mostrados en la Figura 6 relativos a la pared de barlovento se refuerzan con lo que se muestra en la Figura 7, en la cual los contornos de presión en la pared que recibe predominantemente el impacto del flujo del viento. También se puede observar en esta figura que la presión máxima que se genera sobre la pared disminuye al modificar la estructura del invernadero, empezando en a) $61.6Pa$, pasando por b) $54.8Pa$ y finalmente cayendo hasta c) $40.7Pa$. Si se usan los coeficientes de presión obtenidos por López Bautista et al. (2016) la presión en el inciso a) sería de 53 Pa, un valor cercano al obtenido en este estudio cuya diferencia puede deberse a la diferencia en la forma física de los invernaderos considerados en los diferentes estudios o a que los estudios consideran diferentes velocidades del viento. Por otra parte, Aissa et al. (2024) reportan coeficientes de presión de 1 y ligeramente mayores, con lo cual se podría predecir una presión tan alta como 66 Pa. De esta manera, se puede decir que los resultados encontrados en este estudio están en el rango de lo esperado. En cualquier caso, tanto el estudio de López Bautista et al. (2016) como el de Aissa et al. (2024) y el presente coinciden en que las cargas positivas máximas se encuentran en la pared de barlovento.

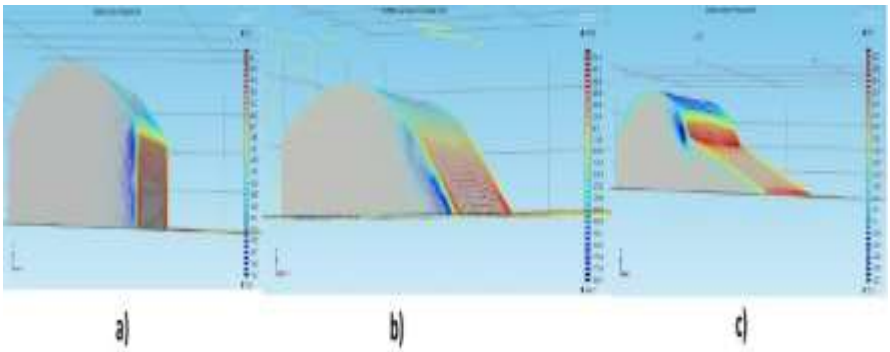


Figura 7. Contornos de presión. a) Pared a 90° b) Pared a 45° c) Pared a 15°.

Usando el método estándar de integración numérica, es posible integrar la distribución de presión sobre la cara a barlovento a fin de encontrar la fuerza total ejercida sobre el invernadero. Las fuerzas resultantes se muestran en la Tabla 1, donde se puede apreciar que la fuerza depende tanto de la presión como de la superficie y que, al disminuir el ángulo de inclinación de la pared, se incrementa la superficie de la misma, por lo que la fuerza total en la cara aumenta, aunque el ángulo de inclinación disminuya. Se encontró que la fuerza tiene un mínimo cuando el ángulo de la pared es de 60°.

Tabla 1. Carga de viento en la pared del invernadero.

Ángulo	90º	75º	65º	**60º**	55º	45º	30º	15º
Fuerza total (N)	1104	1022	1005	999	1003	1032	1309	1406
% Inc fuerza	0.00	-7.43	-8.97	-9.51	-9.15	-6.52	18.57	27.36
% Inc área pared	0.00	3.33	10.42	15.42	22.08	41.25	189.17	286.25

Del análisis se aprecia que al inclinar la pared lateral a 60° respecto del piso la fuerza del viento sobre la cara de barlovento disminuiría 9.51% a costa de un incremento del área de la cara de un 15.42%. Con los datos obtenidos se puede obtener un coeficiente de presión de 0.76, el cual puede ser útil para fines de comparación con otros estudios o bien con normas técnicas.

Inclinaciones mayores de la pared lateral generan fuerzas totales mayores ya que, aunque la presión disminuye, el área aumenta, lo que implica que además de la película plástica también deben agregarse soportes para que sostengan dicha película plástica sin deformarse por su propio peso y por la presión de las cargas de viento, lo que se traduciría en costos adicionales. Los resultados obtenidos corresponden a una velocidad del viento de 12 m/s y a la dirección predominante registrada en el sitio de estudio. Para otras velocidades, es de esperarse que el patrón general del flujo alrededor del invernadero permanezca similar, sin embargo, la magnitud de las presiones y de la fuerza resultante aumentará aproximadamente con el cuadrado de la velocidad del viento. Por otra parte, si cambia la dirección del viento las regiones de máxima presión se moverán hacia otras superficies del invernadero. En consecuencia, los valores cuantitativos aquí obtenidos son representativos de la condición crítica correspondiente a la dirección predominante del viento en la zona de estudio, mientras que otras orientaciones requerirían simulaciones específicas. Finalmente, el costo de las modificaciones necesarias para disminuir la carga por viento y por ende incrementar la vida útil se pueden estimar si se considera el costo actual del plástico y el perfil tubular y la mano de obra. Se estima que el costo del plástico es de aproximadamente 270 pesos (unos 15 dólares), el perfil tubular ronda los 1000 pesos (58 dólares). La mano de obra es más difícil de cotizar, sin embargo, una costumbre común suele ser cobrar por este concepto tanto como se haya gastado en insumos, por lo cual, el precio total de las modificaciones puede estimarse en 2540 pesos (147 dólares). Hay que considerar que también se incrementa el área protegida en la que se puede cultivar. La reducción esperada en la frecuencia de sustitución de la cubierta plástica, la disminución de intervenciones de mantenimiento y el incremento de la vida útil de la estructura son aspectos que constituyen una línea de investigación futura para evaluar la rentabilidad de la propuesta.

El presente trabajo expone algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el modelo numérico no fue validado mediante mediciones experimentales propias. En su lugar, la consistencia del modelo se evaluó mediante la comparación con resultados experimentales y numéricos previamente reportados para invernaderos de geometría similar, observándose una concordancia satisfactoria.

En segundo lugar, las simulaciones se realizaron considerando un flujo tridimensional en estado estacionario mediante las ecuaciones RANS y el modelo de turbulencia estándar $k-\varepsilon$. Esta aproximación permite obtener el campo medio de velocidades y presiones, sin embargo, no reproduce explícitamente

fenómenos transitorios como el desprendimiento periódico de vórtices.

Finalmente, el estudio se desarrolló para la velocidad máxima y la dirección predominante del viento registradas en la localidad analizada. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como representativos de dicha condición de diseño y no necesariamente de otras condiciones meteorológicas. Estudios futuros podrán incorporar simulaciones transitorias mediante LES o DES, diferentes velocidades y direcciones del viento, así como una validación experimental que permita cuantificar con mayor precisión la capacidad predictiva del modelo.

5. Conclusiones

En el presente estudio se modeló matemáticamente el comportamiento del aire sobre la pared de barlovento de un invernadero rústica con techumbre parabólica con el fin de minimizar la fuerza que el viento ejerce sobre la estructura. Se encontró que la presión que se ejerce por el viento sobre la pared disminuye siempre que disminuye el ángulo de la pared, sin embargo, la fuerza resultante no disminuye siempre, sino que encuentra un mínimo cuando el ángulo de la pared es de 60°. Lo anterior se puede explicar si se considera que la superficie de la pared se incrementa al disminuir el ángulo de la pared.

Al modificar el perfil aerodinámico de un invernadero rústico las cargas debidas al viento disminuyen hasta un 9.51% con un incremento del área de pared del 15.42%. Está disminución puede traducirse en mayor estabilidad de la estructura del invernadero, sin tener que recurrir al reforzamiento de la estructura actual del invernadero.

Para el análisis CFD, el tamaño de malla se definió por medio de un análisis de sensibilidad donde al probar diversos tamaños de malla se encontró un grado de estabilidad en el cálculo de las presiones máximas por carga de viento al utilizar las opciones automáticas de mallado normal y fino del software utilizado.

Este análisis puede ser utilizado para el diseño de invernaderos más ligeros y por ende más económicos, con comportamientos más estables ante condiciones de viento a alta velocidad. Este rediseño puede alargar la vida útil de los invernaderos y reducir la contaminación del medio ambiente por el desgarre y reposición de películas plásticas, que, por lo general, son resistentes a rayos UV y por lo tanto con periodos de biodegradación muy grandes.

Si bien en este trabajo no se presenta una validación experimental, los resultados obtenidos muestran una buena concordancia con distribuciones de presión y cargas reportadas previamente para invernaderos de geometría similar. Esta consistencia con la literatura permite pensar que el modelo físico utilizado es adecuado, sin embargo, no constituye por sí misma una validación del modelo.

6. Agradecimientos

Se agradece a los propietarios del Rancho el 18, los hermanos Luis Alberto y Jorge González Hernández por las facilidades otorgadas para la realización del presente trabajo.

7. Referencias

Abid, H., Ketata, A., Lajnef, M., Chiboub, H., & Driss, Z. (2025). Enhancing climate control and management in arid conditions: A numerical study on the impact of roof pitch angle on greenhouse climates. *Journal of Engineering Research*, *13*, 1716–1731.

Aissa, M., Dadda, B., Boutelhig, A., & Laouar, S. (2024). Numerical investigation of aerodynamic behaviors inside and outside a tunnel greenhouse. *Journal of Renewable Energies*, *1*(1), 15–29. https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1378

Amador, M. A., Fernández Lorenzo, I., López Llanusa, A., & Parnás, V. B. E. (2021). Estudio comparativo de coeficientes de presión normativos y experimentales en cubiertas de naves industriales. *Ingeniería y Desarrollo*, *39*(2), 298–314. https://doi.org/10.14482/inde.39.2.725.4

Barber, T. (2006). Aerodynamic ground effect: A case study of the integration of CFD and experiments. *International Journal of Vehicle Design*, *40*(4).

Bárzaga, J., Morales, Y., Mena, E., Beltrán, R., & Morales-Leslie, J. (2017). Análisis numérico a un invernadero tipo túnel bajo cargas de vientos fuertes en Cuba. *UTCiencia. Ciencia y Tecnología al Servicio del Pueblo*, *4*(2), 62–70.

Cabascango-Álvarez, M. J. (2019). *Modelamiento del flujo de aire forzado en un invernadero* [Tesis, Universidad Técnica del Norte].

Castillo Méndez, J. C., & Rojano Aguilar, A. (2017). Simulación de la cubierta plástica de invernadero usando elementos finitos. En *III Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2017*. Puebla, México.

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2015). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*. McGraw-Hill.

Gutiérrez-Castillo, A. (2023). *Diseño de estabilidad estructural en invernaderos considerando acero y madera en el distrito La Yarada Los Palos – Tacna* [Tesis, Universidad Privada de Tacna].

Kim, R., Lee, I., Yeo, U., & Lee, S. (2019). Estimating the wind pressure coefficient for single-span greenhouses using a large eddy simulation turbulence model. *Biosystems Engineering*, *188*, 114–135. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.009

Kwon, K., Kim, D., Kim, R., Ha, T., & Lee, I. (2016). Evaluation of wind pressure coefficients of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land using a large-sized wind tunnel. *Biosystems Engineering*, *141*, 58–81. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.007

Lak-woo, K. (2015). *Evaluation of wind pressure coefficients of greenhouses using wind tunnel test and numerical model* [Tesis, Seoul National University].

Launder, E., & Spalding, B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press.

Liang, Z., He, G., Li, Y., Gao, Z., Ren, X., Wu, Q., Zhao, S., & Xu, J. (2023). Analysis of wind pressure coefficients for single-span arched plastic greenhouses located in a valley region using CFD. *Agronomy*, *13*(2), 553. https://doi.org/10.3390/agronomy13020553

López Bautista, V., Villaseñor Perea, C. A., López Canteña, G. de J., Carrillo García, M., & Cervantes Osornio, R.

(2016). Análisis de coeficientes de la fuerza del viento y comportamiento del flujo sobre un modelo de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *7*(4), 821–832.

Manzo Reyes, J. L., Vargas Ferrer, J., & Mayoral Arzaba, E. H. (2020). Diseño y simulación de invernadero germinador con uniones mecánicas mediante la comparación de un invernadero real usando SolidWorks Simulation y Flow Simulation. En *Innovación en biotecnología 2* (pp. 57–72). Red Iberoamericana de Academias de Investigación A.C.

Moriyama, H., Sase, S., Uematsu, Y., & Yamaguchi, T. (2008). Wind pressure coefficient of a pipe-framed greenhouse and influence of the side gable openings using a wind tunnel. *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan*, *38*(4), 237–248.

Ojeda-Bustamante, W., & Flores-Velázquez, J. (2015). *Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Rafael, G. R. (2014). *Análisis de flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos* [Tesis, Universitat Politècnica de València].

Ricci, A. (2025). Review of OpenFOAM applications in the computational wind engineering: From wind environment to wind structural engineering. *Meccanica*, *60*, 1695–1735.

Richards, P., & Hoxey, R. (2012). Pressures on a cubic building—Part 1: Full-scale results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *102*, 72–86.

Roache, P. J. (2009). *Fundamentals of verification and validation*. Hermosa Publishers.

Ruiz, C. G. R. (2018). *Evaluación de modelos computacionales en CFD para la predicción del comportamiento del viento alrededor de edificios* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes].

Santoyo Guerrero, L. M., & Ramírez-Mata, J. L. (2017). Simulación y análisis estructural de invernadero para cultivo de hortalizas. *Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable*, *3*(9), 60–65.

Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Pearson Education Limited.

Wang, C., Nan, B., Wang, T., Bai, Y., & Li, Y. (2021). Wind pressure acting on greenhouses: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *14*(2), 1–8. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211402.5261

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Development of a low-cost integrated PWM controller and battery management system for a formula-type electric vehicle prototype

Desarrollo de un controlador PWM integrado de bajo costo y sistema de gestión de baterías para un prototipo de vehículo eléctrico tipo fórmula

López-Meraz, R.A.[a]*, Carmona-Valdés, J.C.[b], Méndez-Ramírez, C.T.[a], López-González, C.[c]

[a] Unidad de Ingeniería y Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Xalapa, México, C.P. 91000. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3236-3709*, https://orcid.org/0009-0001-3877-1703.

[b] Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3004, 04510, Cd. De México, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8278-5193.

[c] Unidad de Ingeniería Universidad Veracruzana, Blvd. Adolfo Ruíz Corines No. 306, Poza Rica, México C.P. 93240. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2519-0114.

raullopez03@uv.mx*; julio.carmona0822@gmail.com; cmendez@uv.mx; carolinalog85@gmail.com

Technological innovation: Development of integrated controllers for electric vehicles.

Industrial application area: Electric mobility and sustainable transport systems.

Received: October 17, 2025
Accepted: August 24, 2026

Resumen

Este artículo presenta el diseño, implementación y validación experimental de un controlador integrado de bajo costo para un prototipo de vehículo eléctrico tipo fórmula. El sistema combina un módulo de control de velocidad basado en modulación por ancho de pulso (PWM) con un sistema de gestión de baterías (BMS) dentro de una arquitectura modular unificada, orientada a entornos académicos y de Formula SAE. El controlador, desarrollado con componentes comerciales accesibles, genera una señal sinusoidal de frecuencia variable mediante la comparación entre una referencia sinusoidal y una portadora triangular, que gobierna una etapa inversora con IGBTs. En paralelo, el BMS supervisa en tiempo real el voltaje, la corriente y la temperatura de un banco de 40 celdas Sony VTC6, incorporando funciones básicas de protección y balanceo pasivo. Los resultados experimentales muestran la generación estable de PWM para el accionamiento de un motor de 0.5 HP, así como una buena concordancia entre la corriente teórica, la medida por amperímetro y la obtenida con un sensor de efecto Hall, además de una respuesta térmica coherente durante una descarga de 1.5C. Se incluye una comparación funcional con controladores y BMS comerciales de referencia y se discute el alcance del prototipo como

plataforma de bajo costo para el desarrollo e integración de estrategias de control y supervisión en vehículos eléctricos tipo fórmula.

Palabras clave: Controlador PWM para motor eléctrico; Diseño modular de potencia; Gestión de baterías de ion-litio; Onda sinusoidal de frecuencia variable.

Abstract

This article presents the design, implementation, and experimental validation of a low-cost integrated controller for a formula-type electric vehicle prototype. The proposed system combines a PWM-based speed-control module with a battery management system (BMS) within a unified modular architecture intended for academic and Formula SAE environments. The controller, built from commercially available components, generates a variable-frequency sinusoidal waveform by comparing a sinusoidal reference with a triangular carrier, which drives an IGBT-based inverter stage. In parallel, the BMS monitors in real time the voltage, current, and temperature of a 40-cell Sony VTC6 lithium-ion battery pack, implementing basic protection and passive balancing functions. Experimental results demonstrate stable PWM generation for driving a 0.5 HP motor, good agreement between theoretical current, ammeter measurements and a Hall-effect sensor, and a consistent thermal response during a 1.5C discharge condition. A functional comparison with reference commercial controllers and BMS platforms is included, and the scope of the prototype is discussed as a low-cost platform for the integration of control and supervision strategies in formula-type electric vehicles.

Key words: PWM motor drive controller; Modular power electronics design; Lithium-ion battery management; Variable-frequency sinusoidal waveform.

I. Introduction

Formula vehicles are designed to achieve optimal performance in high-speed circuit tests, under strict safety and performance criteria defined by the Society of Automotive Engineers (SAE) for both dynamic and static events (Formula SAE, 2022). In a battery electric vehicle (BEV), the overall architecture can be understood through two main aspects: the power system and the dynamic analysis system, where the former is responsible for delivering the mechanical power demanded by the driving cycle and the latter studies the vehicle dynamics in motion (Patel et al., 2021). The power system typically comprises three main elements: the energy storage system, usually based on lithium-ion batteries; the energy management and control system; and the mechanical propulsion system, which generally includes an AC electric motor (Emadi *et al*., 2008; Nam, 2018; Patel *et al*., 2021). Within this structure, the controller is the essential element that connects the lithium batteries to the motor, acting as an inverter that transforms the DC power supplied by the accumulator into AC power while managing the operating point according to the driver's demand (UniTek Industrie Elektronik GmbH, 2012).

There are two widely used approaches to control traction motors in electric vehicles. The first focuses on directly managing the current supplied to the motor windings through vector control or similar advanced

strategies (Giri, 2013; Nam, 2018). The second relies on pulse-width modulation (PWM) in an electronic controller to regulate the frequency of the AC input and thus control the motor speed (UniTek Industrie Elektronik GmbH, 2012; Lu *et al*., 2011; Al-Ogaili *et al*., 2019; Brandstetter, P., 2012). Lu *et al*. (2011) show that induction-motor speed can be modulated using PWM strategies, while Al-Ogaili *et al*. (2019) employ sinusoidal PWM to improve charging efficiency. In addition, Birbir *et al*. (2019) designed a single-phase full-bridge inverter using PWM technology and a peripheral-interface microcontroller, achieving harmonic reduction through appropriate modulation. These works support the use of sinusoidal PWM as a practical and well-understood basis for variable-frequency motor drives in electric-vehicle applications. Complementing these contributions, recent reviews on harmonic behavior in inverter systems emphasize that waveform quality and harmonic content depend critically on the combination of modulation index, switching frequency, device characteristics and output filtering (Dewan and Straughen, 1975; Ghaderi et al., 2016; Khalid et al., 2019).

On the energy-storage side, most commercial traction controllers are optimized either for relatively low voltages and currents or for specific power levels, and only a limited number of solutions integrate detailed cell-monitoring capabilities in a single compact platform (Orion BMS, 2018; Victron Energy Blue Power, 2020). As a result, it is often difficult for university teams and low-budget projects to find affordable devices that combine traction control and battery supervision in a transparent and repairable way. At the same time, the literature on battery management systems (BMS) for electric vehicles highlights that, irrespective of architecture, every BMS must at least supervise cell voltage, charge and discharge current, and cell temperature, and must implement appropriate protection and balancing strategies (Manandhar *et al*., 2020; Krishna *et al*., 2024; Formula SAE, 2022). In a recent review, Ali *et al*., (2025) provide a comprehensive analysis of BMS technologies for electric vehicles, emphasizing thermal management, charging strategies and emerging functionalities as key factors in ensuring safety and extending battery life (Ali *et al*., 2025). Other surveys on energy and battery management for electric vehicles underline the need for coordinated strategies that integrate energy-flow control, state-of-charge estimation, and fault handling within a unified framework (Liu *et al*., 2022; Munsi & Chaoui, 2024). In parallel, specific works on racing and Formula-type applications discuss the requirements for robust, lightweight BMS architectures that can be integrated into compact accumulators for high-performance use (Bať a & Mikle, 2019).

In this context, the National Autonomous University of Mexico (UNAM), through the Faculty of Engineering and the UNAM Motorsports team, participates in the Formula SAE competition, which brings together around one hundred universities worldwide to design, build, and test formula-type electric vehicles under the international engineering standards proposed by SAE (Formula SAE, 2022; Enepaq, 2023). The design process must simultaneously consider the selected traction motor—in this case an EMBRAX 208 machine—and the characteristics of the available lithium-ion cells, such as the Sony/Murata VTC6 modules, whose electrical and thermal limits become the central pillar of both the controller and the BMS design (Enepaq, 2023; Davide, 2010; Victron Energy Blue Power, 2020). Although it is common to find both low-voltage and high-voltage controllers, these are not always designed to withstand discharge currents near 200 A or to expose a cell-level monitoring interface suitable for academic

experimentation. Therefore, developing a controller that not only regulates speed through PWM but also integrates cell-supervision capabilities represents a significant advantage for specialized mobility applications and for low-power converters coupled to cell-based storage systems (Emadi et al., 2008; Orion BMS, 2018; Ali et al., 2025).

Since the controller is a critical component in the vehicle design, two existing commercial units—the Bamocar D3 400-400 and the Sevcon Gen5 Size 9—were used as functional references to define target capabilities in terms of current, voltage, communication interfaces, and operating modes (BorgWarner, s.a.; UniTek Industrie Elektronik GmbH, 2012).

Table 1 summarizes the main characteristics of these two commercial controllers, which are not intended to be matched in every industrial feature, but rather to provide realistic reference values for current capability, voltage range, communication options and operating modes when defining the design objectives of the proposed prototype.

Table 1. Bamocar and Sevcon comparison.

Feature	Bamocar D3 400 400	Sevcon Gen5 Size 9
Manufacturer	Unitek	Sevcon
Controller Type	AC Motor / BLDC	AC Motor / BLDC
Maximum Output Current	400 A	550 A
Maximum Input Voltage	400 VDC	116 VDC
Maximum Power	Up to 150 kW (depending on version)	200 kW
Communication Interface	CAN, RS232	CAN, USB
Sensor Support	Resolver, Encoder	Resolver, Encoder
Operation Modes	Speed Control, Torque Control	Speed Control, Torque Control
Approximate Weight	9 kg	6 kg
Efficiency	~95%	~95%
IP Protection Rating	IP65	IP67
Common Applications	High-performance electric vehicles	Commercial electric vehicles
Operating Temperature	-20 °C to 85 °C	-40 °C to 85 °C
Switching Frequency	Programmable, up to 16 kHz	Programmable, up to 20 kHz
Size	More compact	More robust
Additional Features	Advanced vector control, regenerative braking	Multiple regenerative braking configurations

Likewise, the Orion 2 BMS and the N3-BMS from Lithium Balance were considered as conceptual references to identify the minimum supervision and protection functions required of a BMS in this context (Orion BMS, 2018). However, limitations in the availability of detailed technical information and hardware encouraged the development of an open, easy-to-repair architecture based on commercially accessible components, suitable for iterative prototyping within the UNAM Motorsports environment rather than for immediate industrial deployment (Emadi *et al*., 2008; Manandhar *et al*., 2020).

The article therefore focuses on the development and experimental validation of a low-cost, modular prototype capable of integrating motor-control and battery-monitoring functions within a common laboratory platform. The proposed system does not seek to reproduce the power capability, advanced control functions, environmental protection, reliability, or certification level of commercial traction

controllers and BMS platforms. Instead, its novelty lies in combining a sinusoidal PWM motor-control stage with cell-voltage, pack-current, and module-temperature monitoring, basic protection logic, and passive balancing in an open and repairable architecture tailored to a formula-type electric-vehicle prototype.

On the control side, the prototype implements a sinusoidal PWM strategy using an ATMEGA328P microcontroller, external memory, and high-speed comparators to generate the switching signals required by an IGBT-based power stage (Microchip, 2020; AG Electronics, 1998; Texas Instruments, 2014, 2023; Dewan & Straughen, 1975; Ghaderi *et al*., 2016). On the battery-management side, the BMS acquires and supervises cell voltages, pack current, and module temperatures using multiplexers, differential amplifiers, galvanic-isolation devices, and Hall-effect sensors, considering the safety requirements defined by Formula SAE (Formula SAE, 2022; Avago Technologies, 2020; Manandhar *et al*., 2020; Ali *et al*., 2025). The two subsystems remain conceptually separated and interact through alarm and protection signals.

Accordingly, the contribution of this work is not a fully vehicle-qualified traction controller, but an experimentally validated, transparent, and adaptable testbed for studying the functional interaction between PWM-based traction control, battery monitoring, protection strategies, and passive balancing. This low-cost platform is intended to support iterative prototyping, engineering education, and the development of subsequent control and supervisory strategies in Formula SAE and related electric-mobility applications (Emadi *et al*., 2008; Giri, 2013; Nam, 2018; Ali *et al*., 2025).

II. Materials and methods

2.1 Case study

The National Autonomous University of Mexico (UNAM), through the Faculty of Engineering and its UNAM Motorsports team, participates in the international Formula SAE competition, where more than one hundred universities develop and test electric formula-type vehicles under strict safety and performance regulations (Formula SAE, 2022). The design of the powertrain for the vehicle must simultaneously satisfy the competition rules, the characteristics of the selected motor and the limitations of the available energy-storage system. In this project, the system is based on an EMBRAX 208 AC motor and a lithium-ion battery pack assembled from Sony/Murata VTC6 cells, whose electrical, thermal and operating-current limits determine the main design criteria for both the controller and the battery management system (Enepaq, 2023; Davide, 2010; Victron Energy Blue Power, 2020). The project development was carried out following the process described in Figure 1. To design the elements of interest, in addition to considering the SAE regulations, it is necessary to consider both the EMBRAX 208 engine and the available cells.

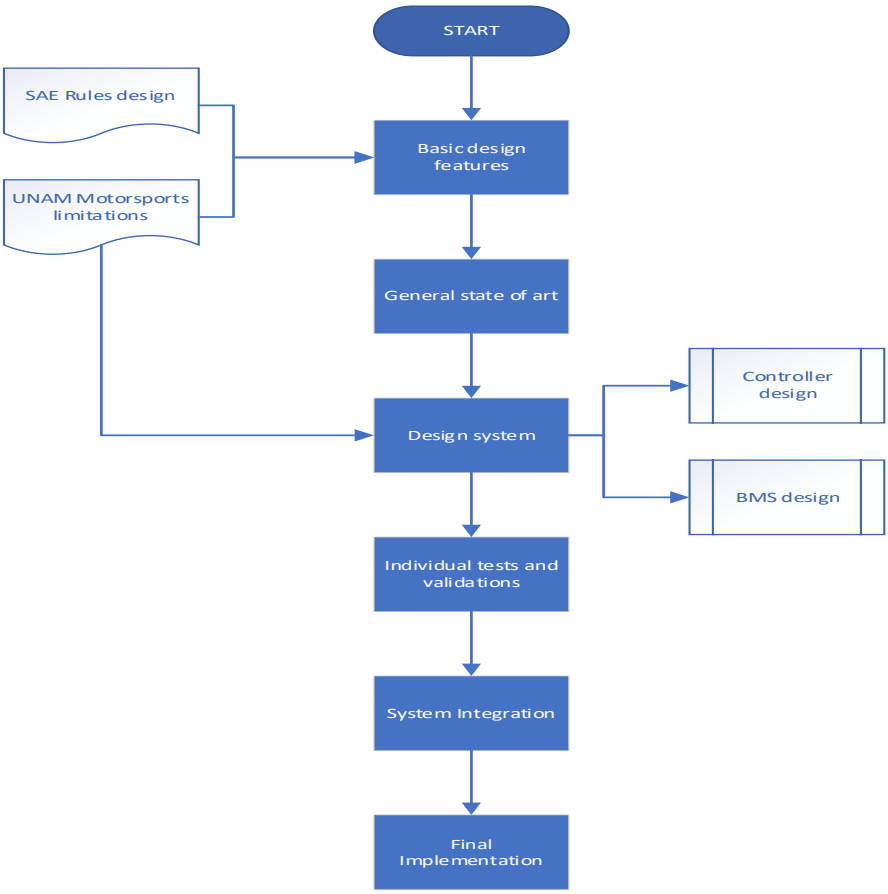


Figure 1. General design proposed for the implementation of the systems.

The accumulator used in the prototype tests is configured as an 80s8p arrangement of VTC6 cells, although for the purposes of controller and BMS validation a subset of 40 cells is employed to form a low-voltage battery with a nominal voltage of 14.4 V and a capacity of up to 31 Ah (Enepaq, 2023). The key parameters extracted from the VTC6 data sheet—such as nominal capacity, nominal voltage, maximum charge and discharge currents, and permissible temperature range—constitute the central pillar around which the proposed monitoring and protection strategy is defined (Enepaq, 2023; Davide, 2010). Table 2 summarizes these specifications and provides the reference envelope required to design both the PWM-based controller and the BMS measurement and protection circuits.

The laboratory tests reported in this study were conducted using a scaled-down 40-cell array to limit electrical risk and facilitate instrumentation during the initial validation phase. This reduced configuration was not intended to replicate the total voltage, stored energy, current capacity, thermal mass, or fault conditions of the final 80s8p battery pack. Instead, it was used to validate the operating principle of the BMS measurement chain—including voltage acquisition, pack current sensing, temperature monitoring, data logging, and basic protection logic—under laboratory conditions.

Therefore, the results obtained with the 40-cell array can be extrapolated to the complete battery pack only regarding the functional level of the monitoring architecture: the same measurement, protection, and balancing principles can be replicated for the full pack,

provided that the number of sensing channels, galvanic isolation requirements, voltage levels, wiring, protection devices, and thermal management provisions are appropriately scaled. The experimental results should not be interpreted as a direct validation of the complete 80s8p pack under vehicle operating conditions. Validation at the pack's final voltage and current ratings—including dynamic load testing and evaluation under fault conditions—remains necessary for vehicle-level implementation.

Table 2. Sony VTC6 Specifications.

Item			**Nominal**		**Note**
Nominal Capacity			3120mAh		Discharge at 0.2ltA, 2.0 V cutoff after Standard charge
Nominal Voltage			3.6V		
Charge Voltage			4.2V		
Energy Density			631Wh/l		
Item			**Rating**		**Note**
Rated Capacity			3000mAh		Discharge at 0.2ltA, 2.0V cutoff after Standard charge
Maximum Charge Voltage			4.25V		
Cutoff Voltage			2V		
Continuous Maximum Charge Current			5A 6A		Continuous Pulse
Continuous Maximum Discharge Current			30A 15A		With 80 deg temperature cut Without 80 deg temperature cut
Allowable Environment Temperature		Charge	0 – 60°C		Refer to the cell temperature spec of 2.8 for cell surface temperature
		Discharge	-20 – 60°C		
Weight			46.6 ± 1.5 g		
Temperature Range / Cell Surface Temperature Range			**Upper Limited Charging Voltage**	**Maximum Charging Current**	**Charging Current Recommendation**
1	Low Charging Temperature Range	0°C≤T<10°C	A	4.25V	2A	1A
			B	4.15V	4A	2A
2	Standard Charging Temperature Range	10°C≤T≤45°C		4.25V	5A	3A
3	High Charging Temperature Range	45°C<T≤60°C		4.20V	5A	2A

The above information defines the central design constraints for both the controller and the BMS. In practice, while low- and high-voltage commercial controllers are widely available, they are not conceived to operate close to the 200 A discharge levels required by the target application, nor to expose an open cell-monitoring interface suitable for academic experimentation. For this reason, the initial development of the present prototype treated the controller and the BMS as two parallel subsystems, linked only through alarm and protection signals,

with the explicit aim of later integrating them into a single modular architecture.

2.2 Fundamentals and principles

Even when two electronic subsystems are intended to be integrated into a single physical platform, it is essential to develop them separately at the conceptual level before defining their coupling strategy. For this reason, the proposed system is decomposed into a controller block and a BMS block. The operating principle of the controller is based on PWM theory to generate a sinusoidal waveform of variable frequency from a DC source, whereas the BMS focuses on the acquisition and supervision of cell-level and pack-level variables that determine the safe operating area of the accumulator (Dewan and Straughen, 1975; Emadi *et al*., 2008).

From the controller perspective, the traction-drive function is implemented as a single-phase inverter whose switches are driven by PWM signals obtained from the comparison between a sinusoidal reference and a triangular carrier. This approach is consistent with classical PWM techniques and with the implementation commonly found in commercial controllers such as the Bamocar family, where dedicated hardware generates both the triangular and sinusoidal waveforms and compares them to obtain the switching pattern (Dewan and Straughen, 1975; UniTek Industrie Elektronik GmbH, 2012). The modulation strategy is defined by the frequency index $m_f = {}^{F_c}/_{F_r}$, which must be greater than 21 to avoid the excessive growth of harmonic components in low-order periods, and by the modulation index $m_a = {}^{A_r}/_{A_c}$, which relates the amplitudes of the reference and carrier signals and is used to adjust the output-voltage level (Dewan and Straughen, 1975; Ghaderi *et al*., 2016). A proper selection of m_f, m_a and the output filter is fundamental to obtain a waveform that approximates the desired sinusoidal output while keeping harmonic distortion within acceptable limits (Ghaderi *et al*., 2016; Palmas-Peláez and García-Vite, 2013).

From the BMS point of view, the operating principle is oriented toward the safe management of the lithium-ion battery pack used in the vehicle. The literature on electric-vehicle BMS consistently identifies cell voltage, pack and segment currents, and cell or module temperature as the core variables that must be monitored to prevent overcharge, over-discharge, overcurrent and thermal runaway (Manandhar *et al*., 2020; Ali *et al*., 2025). In addition, Formula SAE regulations explicitly require that at least 80% of the cells be monitored in terms of temperature and that the accumulator be equipped with adequate provisions for current interruption in case of fault (Formula SAE, 2022). Commercial platforms such as the Orion 2 BMS implement these requirements using multiplexer-based voltage measurement, isolated differential amplifiers and microcontroller-based processing, which serve as a conceptual reference for the present design (Orion BMS, 2018; Victron Energy Blue Power, 2020).

2.2.1 Control area

The most important function of the control area is the generation of PWM pulses that will drive the power switches of the inverter. According to PWM theory, there are two implementation-friendly methods for generating such pulses. The first, known as digital partitioning, relies on a microcontroller that creates a base frequency and then distributes time slots among the different outputs. The second, adopted in this work, consists of comparing two analog signals: a sinusoidal reference and a triangular carrier whose frequency satisfies the condition $m_f > 21$ (Dewan and Straughen, 1975). Figure 2 illustrates this method,

showing the comparison of the reference and carrier signals using a high-speed operational-amplifier comparator and the resulting PWM signal (Dewan and Straughen, 1975).

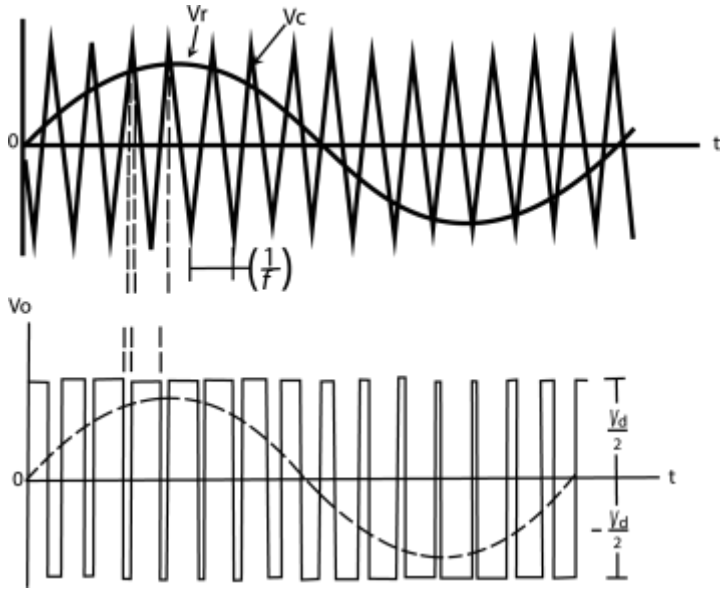


Figure 2. Representation of signal comparison using a high-speed operational amplifier for pulse generation (a) Reference and control signals (b) Voltage Va, PWM pulses (Dewan and Straughen, 1975).

In the proposed prototype, the ATMEGA328P microcontroller is used together with an external EEPROM to generate both the sinusoidal and triangular waveforms (Microchip, 2020; AG Electronics, 1998). A list of hexadecimal values corresponding to discretized samples of the reference and carrier signals is stored in the memory; these values are then sequentially read and converted into analog voltages by the digital-to-analog converter associated with the microcontroller. The sampling rate of the memory is controlled by an NE555 timer, whose configuration includes a variable resistor that can be linked to the accelerator pedal through a Wheatstone-bridge arrangement, allowing the effective PWM frequency to change as a function of the driver demand (Texas Instruments, 2014; Dewan and Straughen, 1975).

To perform the comparison between the reference and carrier signals, two OPA814 high-speed operational amplifiers are used in comparator mode, considering that the device can handle comparison frequencies up to hundreds of megahertz (Texas Instruments, 2023). One amplifier compares the triangular signal with the sinusoidal waveform at phase 0°, while the second compares the triangular signal with the sinusoidal waveform shifted by 180°. This arrangement allows the system to obtain two complementary PWM signals without requiring the amplifier to process negative voltages. Figure 3 shows the schematic diagram of the generation of both carrier and reference waves from the EEPROM and DAC, and Figure 4 presents the resulting PWM waveforms corresponding to the two phases and their unified output (Dewan and Straughen, 1975; UniTek Industrie Elektronik GmbH, 2012).

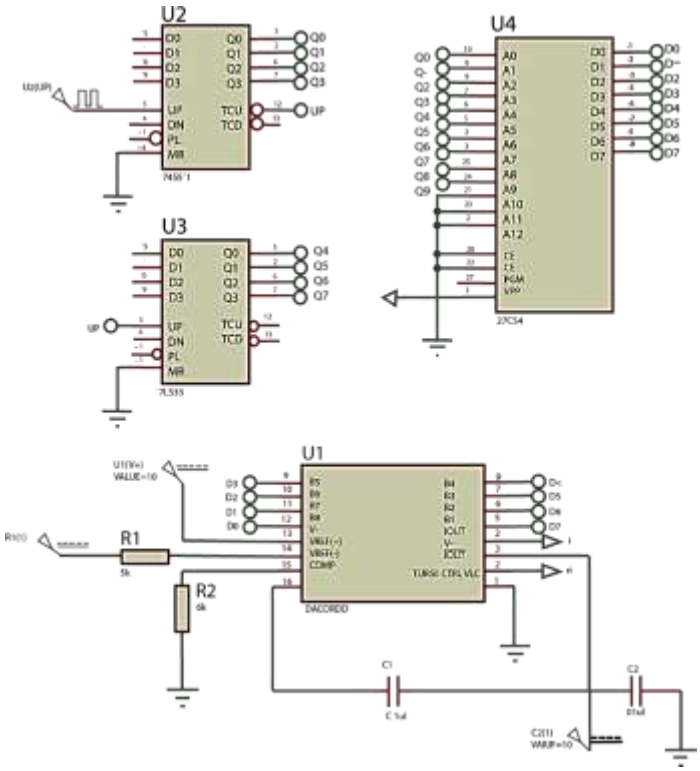


Figure 3. Schematic diagram of the generation of both carrier and reference waves from the reading of a 27C64 EEPROM memory and a DAC digital-to-analog converter.

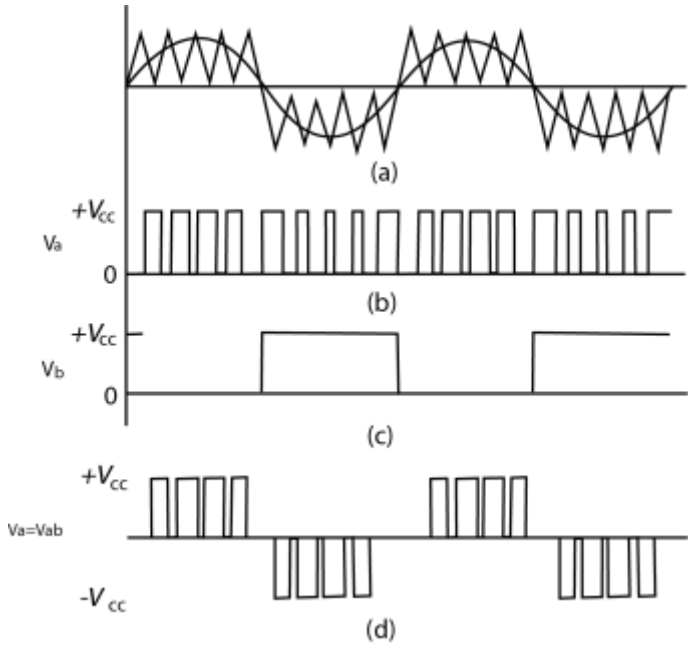


Figure 4. Generation of the PWM signal for the odd and even switches is done from two different phases of the sine wave. (a) First positive half cycle of phase 0 and the negative half cycle of phase 180, these phases are compared with the generated triangular signal. (b) The voltage Va represents the initial comparison between the sine wave in phase 0 and the triangular signal. (c) The output voltage Vb represents the comparison during the negative half cycle of phase 180. (d) Unified PWM signal Va-Vb.

2.2.2 Power zone

The power zone is responsible for converting the PWM control signals into the high-current, high-voltage output required to drive the motor. In a PWM inverter, this stage is mainly composed of semiconductor switches that open and close at the PWM frequency to synthesize the desired output waveform (Dewan and Straughen, 1975; Ghaderi *et al*., 2016). The choice of switching device depends on the voltage and current levels to be handled, as well as on switching-speed requirements and thermal constraints. Although TRIACs and thyristors are widely used in power systems due to their bidirectional conduction capability and robustness, their relatively slow switching speed can introduce significant waveform distortion in PWM applications, especially in systems where regenerative braking or high switching frequencies are required (Ghaderi *et al*., 2016; Emadi *et al*., 2008).

Given the expected operating current—around 96 A for the target track and vehicle configuration, as estimated by the UNAM Motorsports team using energy-based calculations of the required mechanical work—and the required switching frequency, the design adopts IGBT transistors as the main switching devices (Emadi *et al*., 2008; Mouser Electronics, 2020). Specifically, the FGH60N60SFD model is selected because it combines adequate current-carrying capacity, high switching speed and local market availability (Mouser Electronics, 2020). Figure 5 shows the connection of the IGBTs, the motor and the 336 V accumulator, highlighting the power section components and their relation to the control and BMS subsystems.

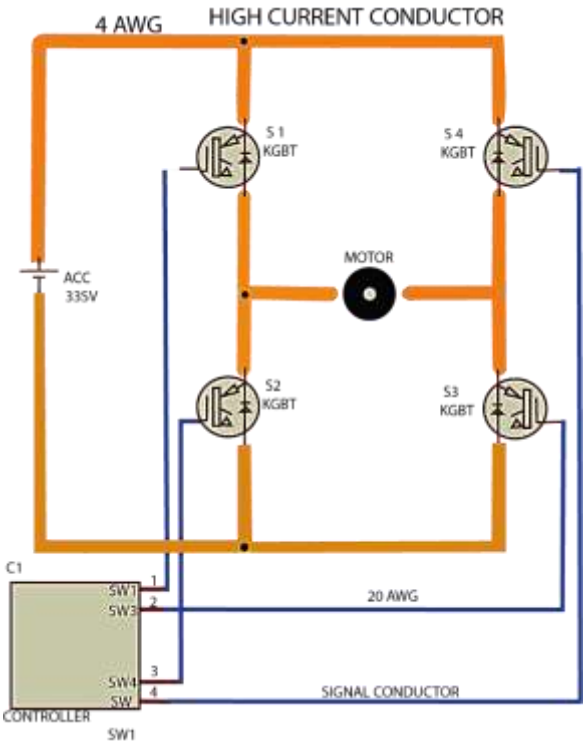


Figure 5. Representation of the power section with the assigned IGBTs and the connection to the motor and the 336 V accumulator. The components connected to the orange wire represent the power section.

To protect the IGBTs and limit current surges associated with switching events, a filtering and current-limiting stage based on inductors is included in the power zone (Ghaderi *et al*., 2016). The inductors are designed to saturate at around 100 A, slightly above the estimated nominal current, so that they can effectively limit transient current spikes without unduly restricting steady-state operation. Proper selection of the inductance value and saturation current is essential, since these parameters influence both the dynamic behavior of the inverter and the harmonic content of the output waveform (Ghaderi *et al*., 2016).

2.2.3 BMS Measurements

The design of the BMS begins with the definition of the accumulator architecture and the selection of the cells, as these choices determine the voltage and energy capacity of

the packas well as the critical variables that must be monitored (Patel et al., 2021). For the UME-23 vehicle, the accumulator employs an 80s8p configuration of VTC6 cells, but the prototype discussed in this article uses 40 cells for laboratory-scale testing (Enepaq, 2023). According to Formula SAE rules and general BMS practice, the variables that must be monitored as a minimum are cell voltage, charge and discharge current, and cell temperature, with at least 80% of the cells covered by the temperature-measurement system (Formula SAE, 2022; Ali et al., 2025).

Direct measurement of every individual cell voltage using separate ADC channels would require a microcontroller with an impractically large number of analog inputs and would hinder efforts to keep the system compact and low-cost. For this reason, the proposed BMS adopts a multiplexed measurement strategy like that used in commercial systems such as the Orion 2 BMS, where a sequential multiplexer connects groups of cells to a differential amplifier that calculates their individual voltages (Orion BMS, 2018; Victron Energy Blue Power, 2020). In the present design, an ADG507A 8×2 multiplexer is used to measure up to four cells at a time, together with a THS4561IDGKT differential amplifier that processes the voltage difference between two nodes corresponding to the multiplexer outputs. Figure 6 depicts the connection scheme used to obtain cell-voltage data and the capacitive isolation network required to preserve system integrity, while Figure 7 illustrates typical correct and incorrect multiplexer connections, highlighting the importance of maintaining proper ordering of the input pins.

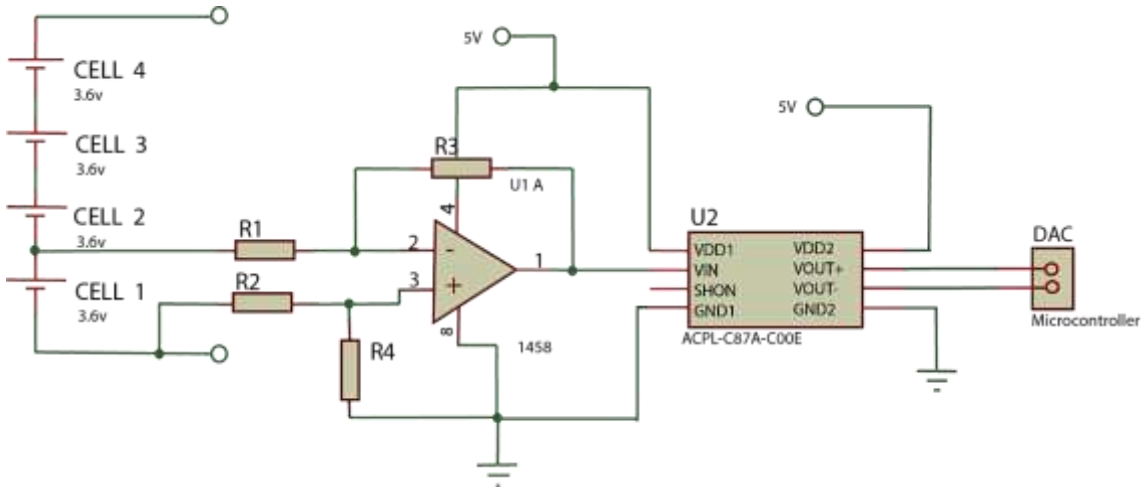


Figure 6. Connection schematic designed to obtain cell voltage data, along with the necessary capacitive isolation to ensure system integrity.

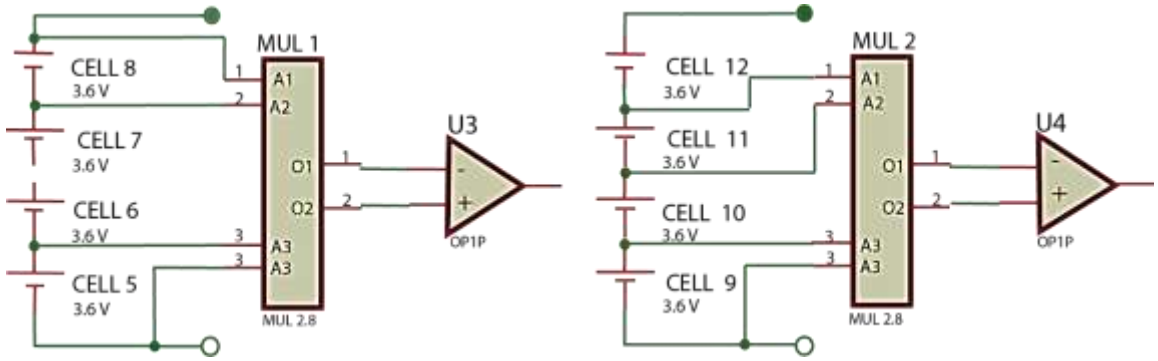


Figure 7. Schematic of the incorrect connection of input pins to the multiplexer with the cells (far left) and one with a correct connection (far right).

To ensure galvanic isolation between the high-voltage battery domain and the low-voltage measurement and control circuits, the differential-amplifier outputs are coupled to the microcontroller through ACPL-C87A isolation devices (Avago Technologies, 2020). This arrangement allows the microcontroller to safely monitor the cell voltages while respecting the creepage and clearance distances mandated by Formula SAE and general safety practices (Formula SAE, 2022; Avago Technologies, 2020). Because monitoring 80 cells requires a significant number of analog channels, the design combines the internal ADC pins of an ATMEGA328P with external ADC expansion as needed, ensuring that every cell in the series string can be measured within the required update interval (Microchip, 2020).

Discharge-current measurement can be implemented either at the level of individual cells or modules or at the total pack output (Emadi *et al.*, 2008). Although per-cell or per-module measurement provides more granular control and enables selective disconnection of sections in case of overcurrent, it also increases sensor count, wiring complexity, cost and mass. For the present prototype, a simpler architecture is adopted: a single Hall-effect current sensor located at the output of the accumulator measures the total discharge current and triggers a cut-off mechanism if the current exceeds the allowable limit, thereby protecting both the cells and the driver (Emadi *et al.*, 2008). The selected model, ACS758LCB-050B-PFF-T, offers adequate current range for the experimental setup and is readily available on the local market.

In terms of charge-current measurement and balancing, several techniques can be found in the literature, including cell disconnection and reconnection, cell bypass and charge-current adjustment using external power converters (Victron Energy Blue Power, 2020; Davide, 2010). The present design opts for a relatively simple current-bypass balancing approach, in which each parallel branch can be shunted by a resistor and an electronic relay once the corresponding cell voltage reaches a predefined threshold (Davide, 2010). Figure 8 shows the balancing circuit employed, where the Panasonic AQY282S solid-state relay and a resistor form a bypass path that limits the balancing current to approximately 100 mA, in line with recommendations for typical lithium-ion applications (Davide, 2010).

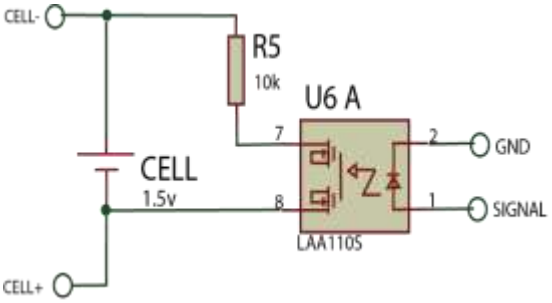


Figure 8. Balance circuit.

For temperature measurement, the UME-23 project takes advantage of the temperature sensors already integrated in the Enepaq VTC6 modules (Enepaq, 2023). The differential-voltage signal from these sensors is extracted through the J11 connectors specified by the manufacturer and conditioned so that it can be acquired by the BMS microcontroller. In accordance with Formula SAE requirements, the BMS is configured so that an over-temperature condition detected in the monitored cells can lead to an accumulator isolation relay (AIR) opening event, interrupting the current flow and protecting the system (Formula SAE, 2022).

Once voltage, current and temperature measurements are acquired, they are processed by the microcontroller and stored on an SD card for subsequent analysis. Communication between the measurement microcontroller and a second microcontroller dedicated to data logging is implemented via TXD and RXD serial lines, and the SD-card expansion module is connected as shown in Figure 9 (Manandhar *et al.*, 2020). This arrangement allows the system to record large numbers of measurements during discharge tests and to perform off-line analysis of cell behavior, current profiles and thermal response, which is essential for validating the prototype and for refining the design of future iterations.

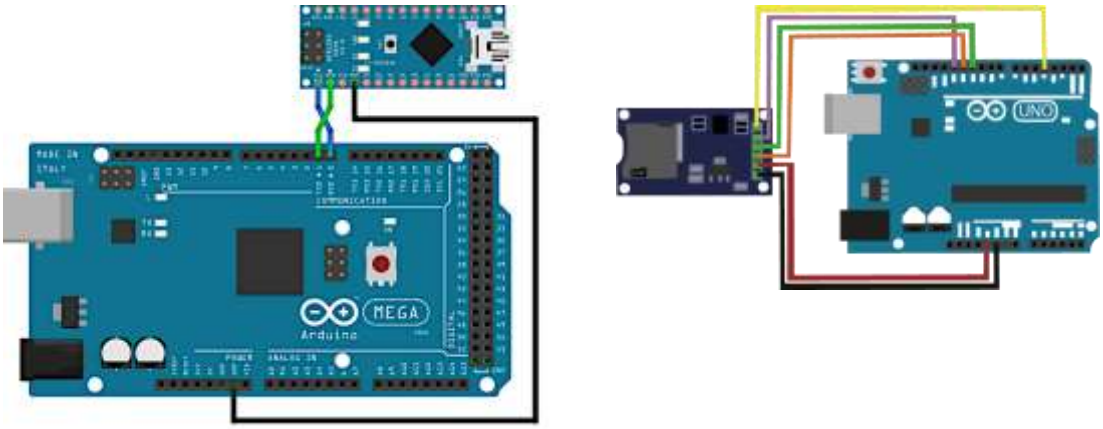


Figure 9. Microcontroller connection for communication and data storage.

III. Results

The results are divided into two main subsections. The first one corresponds to the controller and focuses on the generation of PWM pulses and their ability to drive a single-phase inverter for motor-speed control. The second one presents the performance of the BMS, emphasizing voltage, current and temperature measurements and their consistency with the expected behavior of the lithium-ion cells used in the prototype.

3.1 Controller

The implementation of the controller was evaluated from two complementary perspectives. First, the quality and behavior of the PWM signals generated in the control area were analyzed as the effective switching frequency was varied according to the driver

demand. Second, the ability of the power stage to supply current to a 0.5 HP motor while adjusting its speed was assessed under laboratory conditions.

To examine PWM generation, an oscilloscope was connected at the output of the comparator stage, and the input resistance associated with the accelerator pedal was adjusted to emulate different driver demands. As described in Section 2.2.1, the PWM signal is obtained by comparing a sinusoidal reference and a triangular carrier whose frequency is determined by the NE555-controlled sampling of the EEPROM data (Dewan & Straughen, 1975; Texas Instruments, 2014; Microchip, 2020; AG Electronics, 1998). Figure 10 illustrates the PWM signal generated in a positive cycle. Negative cycles are attenuated because the amplifier cannot reproduce negative voltages.

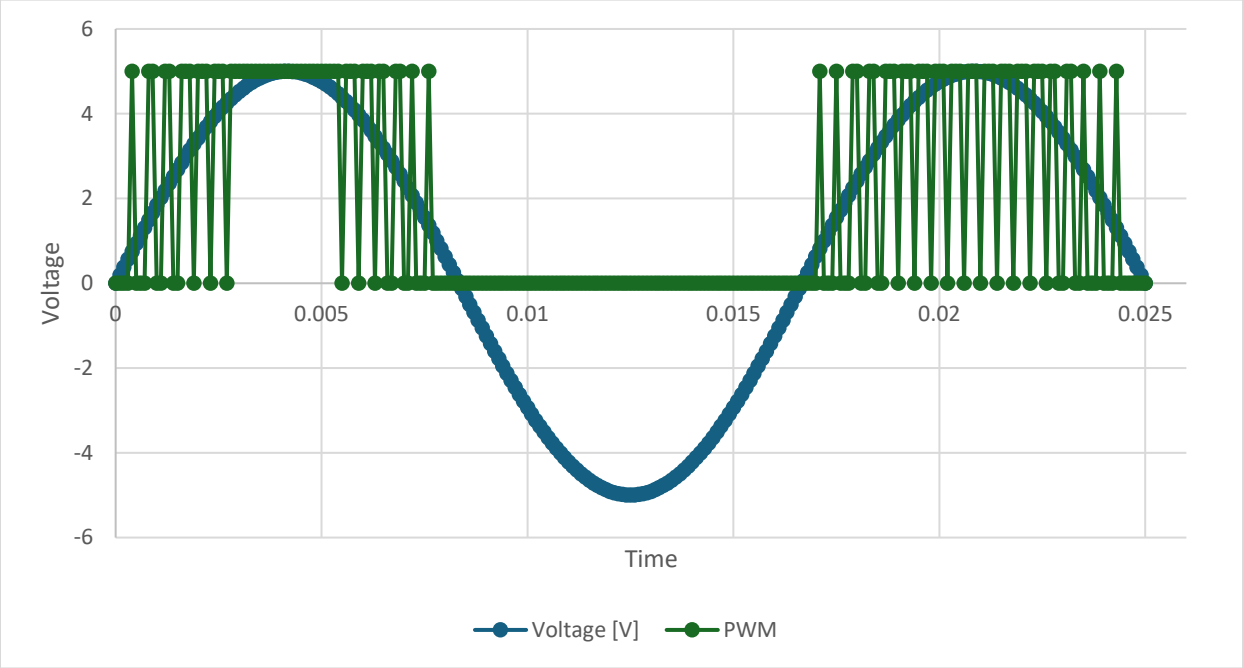


Figure 10. The carrier signal is shown along with the train of PWM pulses generated from it. The carrier is offset by 5 V to allow visualization of both the input and output signals.

Figure 10 illustrates the PWM signal corresponding to a positive half-cycle of the sinusoidal reference. In this configuration, the carrier signal is represented in blue and shifted by 5 V so that the comparison between input and output can be observed on a single oscilloscope screen. At an output frequency of 60 Hz, the PWM pattern comprises approximately ten pulses per cycle, as determined during the ATMEGA-based tests. Although this number of pulses is not sufficient to generate a highly refined sine wave, it is adequate for achieving the nominal motor speed of 1500 rpm and demonstrates the feasibility of the proposed PWM generation scheme using low-cost hardware.

Given that the available experimental setup lacked a power quality analyzer or instrumentation capable of directly measuring total harmonic distortion (THD) or performing spectral analysis, Figure 11 is included solely as an analytical and illustrative representation of the operating principle of sinusoidal pulse-width modulation (SPWM).

The figure was constructed based on the control principle implemented in the prototype, wherein a sinusoidal reference signal is compared with a triangular carrier signal to generate the switching pulses that drive the inverter stage. The first panel depicts idealized reference and carrier signals; the second shows the idealized PWM switching pattern resulting from their comparison; and the third qualitatively illustrates the expected effect of the output filtering stage—namely, the attenuation of high-frequency switching components and the resulting signal's tendency toward the sinusoidal fundamental component at the motor terminals. This representation follows the classical principles of sinusoidal PWM modulation described in power electronics literature (Dewan and Straughen, 1975) and aligns with the use of PWM switching strategies in electric drive applications (Ghaderi *et al*., 2016; Emadi *et al*., 2008).

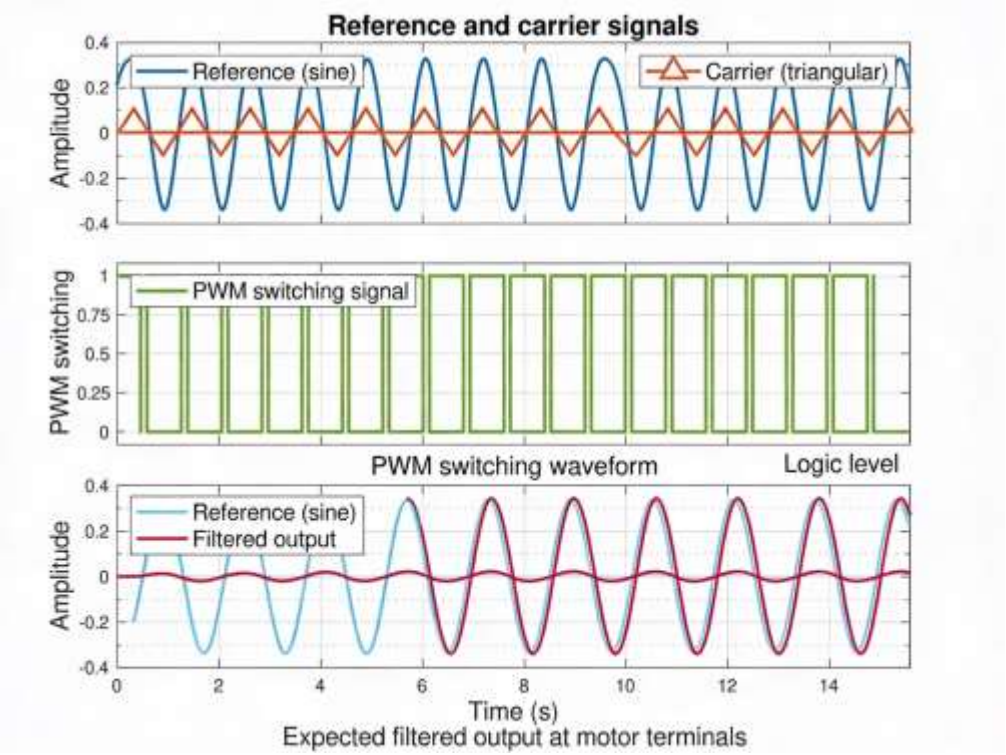


Figure 11. Analytical and illustrative representation of the sinusoidal PWM generation principle and the expected qualitative effect of output filtering. The first panel shows the sinusoidal reference signal and the triangular carrier used to generate PWM; the second illustrates the idealized PWM switching pattern resulting from their comparison; and the third represents the qualitative trend of the filtered output signal toward the sinusoidal fundamental component at the motor terminals.

Consequently, Figure 11 is limited to facilitating the physical interpretation of the PWM pulses experimentally observed in Figure 10 and to explaining, based on classical SPWM theory, that the harmonic components associated with switching are concentrated around the carrier frequency and its sidebands. Quantitative harmonic characterization—including direct THD measurement and spectral analysis under representative load conditions—is identified as future work.

From the power-stage perspective, the inverter based on FGH60N60SFD IGBTs was able to supply the current required by the 0.5 HP motor under the tested laboratory conditions. The inductive filtering stage,

designed to saturate at approximately 100 A, was intended to limit transient current surges during switching events and to contribute to the protection of the IGBTs; however, its transient performance was not quantitatively characterized in the present experimental campaign (Mouser Electronics, 2020; Ghaderi *et al.*, 2016). Although the experimental program did not include a full efficiency characterization, the observed operation indicates that the selected switching devices and filter configuration are suitable for the current levels tested in the laboratory setup. Their performance at the final voltage and current ratings of the target application requires further validation.

3.2 BMS

When evaluating the BMS, several critical aspects must be considered to ensure that voltage, current and temperature are measured accurately and that the resulting information is useful for both protection and post-test analysis. The experimental validation focuses on three main elements: the response of the voltage-measurement circuit to intentional disconnection events, the consistency of the current-measurement subsystem, and the thermal behavior of the monitored module under a 1.5C discharge condition.

For voltage-measurement tests, the BMS was connected to a sample arrangement of the storage system based on the UME-23 module architecture. Figure 12 shows the connection of the module to the main accumulator relays. At a certain point during testing, this connection was intentionally interrupted to verify whether the BMS could detect the fault and open the accumulator isolation relay (AIR) as required by safety regulations (Formula SAE, 2022). Figure 12 shows the connection of the cells of the storage system.

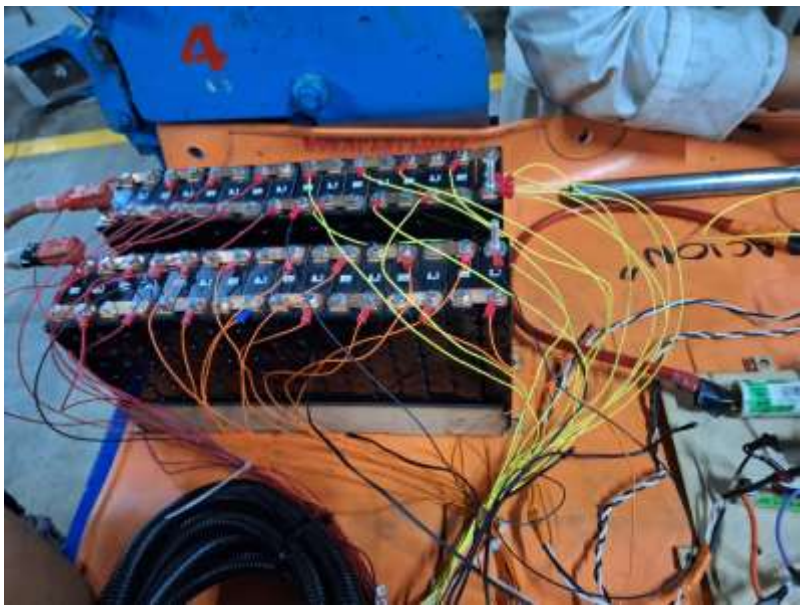


Figure 12. Sample connection of a complete module to the general relays of the storage system. The BMS monitors the module voltages and can trigger the opening of the AIR in case of fault.

The BMS successfully detected the interruption and commanded the opening of the AIR, confirming the correct operation of the voltage-measurement and fault-detection chain under the tested conditions. Due to the limited capacity of the prototype BMS board, tests were carried out with a reduced number of cells, but the measurement principle remains the same for the complete 80s8p configuration.

For current-measurement validation, the prototype used a resistive-load test derived from the low-voltage 40-cell accumulator. Three resistances (180 Ω, 5 Ω and 1 Ω) were selected to generate different current levels, and for each case the theoretical current, the current measured by a reference ammeter, and the current reported by the Hall-effect sensor (ACS758LCB-050B-PFF-T) were recorded (Emadi *et al*., 2008; MOUSER ELECTRONICS, 2020). These results are summarized in Table 3.

Table 3. Comparison of theoretical current, ammeter reading, and Hall-sensor measurement for different resistive loads.

180 Ohm		
Theoretical	**Ammperemeter**	**Hall sensor**
0.07	0.1	0.06
0.07	0.1	0.06
0.07	0.1	0.06
5 Ohm		
Theoretical	**Ammperemeter**	**Hall sensor**
2.4	2.5	2.42
2.4	2.6	2.42
2.4	2.5	2.42
1 Ohm		
Theoretical	**Ammperemeter**	**Hall sensor**
12	12.1	12.05
12	12.1	12.05
12	12.2	12.05

Figure 13 emphasizes the strong agreement between the theoretical current values and the experimental measurements obtained from both the ammeter and the Hall-effect sensor for the three resistive loads. As the resistance increases from 1 Ω to 5 Ω and 180 Ω, the current magnitude decreases by more than one order of magnitude, which is consistent with the expected behavior and supports the validity of the proposed model. This graphical summary therefore clarifies the trend already reported in Table 3 and provides a more intuitive visual representation.

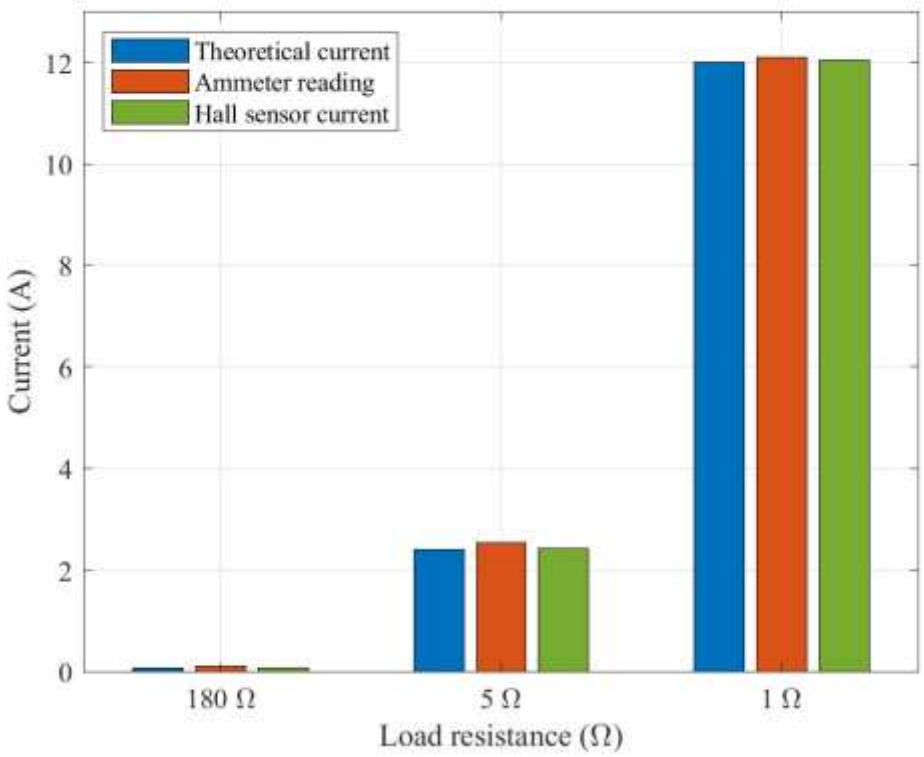


Figure 13. Comparison of theoretical current, ammeter reading, and Hall-sensor measurement for resistive loads of 180 Ω, 5 Ω and 1 Ω.

Overall, the comparison among theoretical values, ammeter readings, and Hall-effect sensor measurements supports the internal consistency of the experimental setup and the suitability of the measurement scheme for the initial validation of the prototype. For representative current conditions—loads of 5 Ω and 1 Ω—the Hall-effect sensor exhibited relative deviations from the theoretical values of approximately 0.8% and 0.4%, respectively. In contrast, for the 180 Ω load, the absolute difference of 0.01 A is more informative because the low current magnitude amplifies the relative error.

Previous experimental studies have utilized resistive and inductive loads to characterize SPWM inverters and have demonstrated the utility of comparing measured electrical variables against the theoretical or simulated behavior of the converter (Aihsan, *et al*., 2020; Kamal & Al-Fattah, 2025). Furthermore, the use of Hall-effect current sensors—including the ACS758—for current acquisition in experimental inverter setups has been documented, supporting their application as an isolated measurement alternative in power electronics systems (Tamrakar, *et al*., 2023).

Figure 13 shows that the Hall-effect sensor closely follows both the theoretical current and the ammeter reading across the three test points. The agreement is particularly strong at the moderate and high current levels associated with the 5 Ω and 1 Ω loads, which supports the suitability of the selected Hall sensor as a low-cost current-monitoring device in the integrated BMS architecture (Emadi *et al*., 2008).

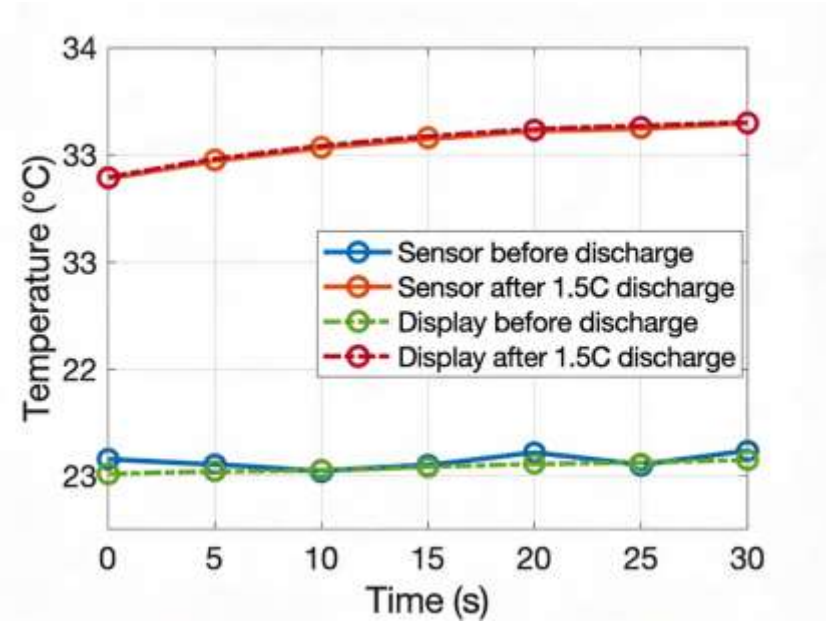


Figure 14. Temporal evolution of temperature before discharge and after the 1.5C discharge condition, showing both the display-based readings and the sensor-based measurements.

The thermal behavior of the monitored module was evaluated by comparing the temperature readings obtained before discharge with those measured after a 1.5C discharge condition. These data are summarized in Table 4, which reports both the values shown on the module display and the temperatures recorded by the sensors connected to the BMS.

Table 4. Temperature readings before discharge and after a 1.5C discharge condition, obtained from the module display and the BMS sensors.

	Before discharge		**After discharge 1.5C (120s)**	
Data time	**Display temp.**	**Sensor temp.**	**Display temp.**	**Sensor temp.**
0	23	23.2	32	32.4
5	23	23.4	33	32.7
10	23	23.5	33	32.8
15	24	23.7	32	32.8
20	23	23.2	34	33.2

25	23	23.2	33	33.1
30	23	23.5	33	33.4

The temperature data from Table 4 are digitized and represented as a time series to make the evolution of the thermal variables more explicit.

Figure 14 indicates that both measurement sources follow a consistent trend and that the thermal rise associated with the 1.5C discharge condition is clearly detectable by the BMS. The maximum temperatures remain within the allowable range specified in the VTC6 data sheet for the tested conditions, and the BMS would have been able to trigger a protection event if the temperature had approached unsafe limits (Enepaq, 2023; Davide, 2010; Victron Energy Blue Power, 2020).

Overall, the experimental results show that the sinusoidal PWM strategy implemented with commercially accessible hardware can provide an appropriate actuation signal for the traction motor, achieving the expected current levels for the tested resistive loads. In parallel, the BMS architecture proves capable of reliably measuring and processing the key electrical and thermal variables of the battery pack under laboratory-scale operating conditions, consistent with the monitoring and protection functions reported in the literature and with the relevant safety-oriented requirements for electric-vehicle applications (Formula SAE, 2022; Emadi et al., 2008; Ali et al., 2025).

The maximum temperature rise following the 1.5C discharge was approximately 10°C relative to the initial condition, remaining within the range specified in the VTC6 cell datasheet for continuous discharge operation. This quantitative thermal behavior confirms that, under the laboratory conditions employed, the module operates within a safe zone, maintaining sufficient margins relative to the over-temperature limits established by the manufacturer.

These results should be interpreted within the functional scope of the laboratory prototype rather than as a direct performance comparison with commercial traction controllers or industrial BMS platforms. As summarized in Table 1, commercial controllers such as the Bamocar D3 400/400 and Sevcon Gen5 Size 9 are designed for substantially higher voltage, current, and power levels and incorporate advanced features such as robust communication interfaces, motor-feedback support, regenerative-braking options, environmental protection, and vehicle-oriented reliability functions.

In contrast, the present prototype was evaluated using a 0.5 HP motor and a reduced battery arrangement under laboratory-scale conditions. Its contribution is not to match commercial products in power capability, efficiency, environmental protection, reliability, or certification, but to provide a modular and repairable experimental platform in which PWM-based motor control, cell-voltage monitoring, pack-current sensing, temperature monitoring, alarm logic, and basic protection functions can be studied together. Accordingly, the results demonstrate functional feasibility at laboratory scale and establish a basis for subsequent validation under the voltage, current, thermal, dynamic-load, and safety conditions required for vehicle-level implementation.

IV. Conclusion

This work presented the design, implementation, and laboratory validation of a low-cost single-phase inverter with sinusoidal PWM speed regulation and an integrated BMS for a formula-type electric vehicle. The proposed controller, built from readily available components, was able to generate an appropriate actuation signal for the traction motor, achieving current levels and waveforms that are consistent with the theoretical model for the tested resistive loads.

The additional current-comparison analysis confirmed a close agreement between the theoretical values and the measurements obtained from both the ammeter and the Hall-effect sensor, which supports the correctness of the sizing and the adequacy of the control strategy. This comparison also clarifies the relationship between load resistance and current magnitude, providing a more transparent link between the design assumptions and the experimental results.

Regarding the energy-storage system, the developed BMS architecture proved capable of monitoring the key electrical and thermal variables of the battery pack under laboratory-scale operating conditions. The temperature measurements obtained from the dedicated sensors and from the module display showed a consistent thermal evolution before and after the 1.5C discharge test, indicating that the proposed measurement chain is reliable for detecting relevant temperature variations.

From a safety and standards perspective, the experimental validation indicates that the proposed controller–BMS integration satisfies the key measurement, protection, and monitoring requirements typically considered in electric-vehicle applications, such as those in Formula SAE regulations. In addition, the prototype provides a practical platform for studying inverter control, battery-pack monitoring, and safety-oriented design in electric-mobility systems, and it establishes a basis for future developments toward more advanced implementations

Future work will focus on extending the validation to dynamic driving cycles closer to real track conditions, refining the harmonic characterization of the output waveform through direct THD and spectral measurements, integrating onboard communication and data-logging capabilities, and developing a validated MATLAB/Simulink model to assess harmonic behavior, efficiency, and system response under representative operating conditions.

From an industrial implementation perspective, the presented prototype is not intended to replace the commercial traction controllers and BMS units used in production electric vehicles or established racing equipment. Its main limitations regarding industrial implementation include the absence of formal certifications, validation restricted to laboratory tests with static loads, the lack of dynamic driving cycle testing, and the omission of advanced diagnostic strategies and high-level CAN communication. However, the proposed modular architecture replicates the key functional blocks of a real traction system—PWM inverter, cell-level monitoring, balancing, and thermal protection—using readily available components. This makes it a suitable foundation for future iterations to incorporate communication modules, vector control strategies, and robustness checks that bring the design closer to meeting industrial product requirements.

From an electrical-safety perspective, the laboratory prototype incorporates galvanic

isolation between the battery measurement domain and the low-voltage control electronics, together with voltage, current, and temperature monitoring. The protection logic is designed to command accumulator isolation through the AIR when a monitored variable reaches its configured threshold. These features provide a safety-oriented basis for laboratory operation; however, they do not constitute verification of compliance with automotive functional-safety, insulation-coordination, electromagnetic-compatibility, or vehicle-level fault-tolerance requirements.

V. References

AG Electronics. (1998). *AM27C64 CMOS EPROM* [Data sheet]. https://agelectronica.lat/pdfs/textos/A/AM27C64.pdf

Aihsan, M. Z., Yusof, A. M., Ahmad, N. I., Saifizi, M., Habibah, H. M., Rahman, D. H. A., & Mustafa, W. A. (2020). Performance analysis of unipolar SPWM inverter: Resistive load and inductive load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *932*(1), Article 012074. https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012074

Ali, A. O., Abdelrehim, O., Saafan, M. M., Elmarghany, M. R., & Hamed, A. M. (2025). Comprehensive review of battery management systems for electric vehicles: Thermal management, charging strategies, and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, *658*, Article 238269. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238269

Al-Ogaili, A., Aris, I., Verayiah, R., Ramasamy, A., Marsadek, M., Rahmat, N. A., Hoon, Y., Aljanad, A., & Al-Masri, A. N. (2019). A three-level universal electric vehicle charger based on voltage-oriented control and pulse-width modulation. *Energies*, *12*(12), Article 2375. https://doi.org/10.3390/en12122375

Avago Technologies. (2020). *ACPL-C87A precision optically isolated voltage sensor* [Data sheet]. https://www.mouser.com/datasheet/2/678/avgo_s_a0002428009_1-2290947.pdf

Bať a, M., & Mikle, D. (2019). Battery management system hardware design for a student electric racing car. *IFAC-PapersOnLine*, *52*(27), 310–315. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.737

Birbir, Y., Yurtbasi, K., & Kanburoglu, V. (2019). Design of a single-phase SPWM inverter application with PIC microcontroller. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *22*(2), 592–599. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.11.014

BorgWarner. (n.d.). *AC motor controller Gen5 Size 9 reference manual* [Manual]. Sevcon.

Brandstetter, P., & Kříček, T. (2012). Speed and current control of permanent magnet synchronous motor drive using IMC controllers. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, *12*(4), 3–10. https://doi.org/10.4316/AECE.2012.0400

Davide, A. (2010). *Li-ion BMS: How much balancing current do you need?* [White paper]. Li-Ion BMS. https://liionbms.com/php/wp_balancecurrent.php

Dewan, S. B., & Straughen, A. (1975). *Power semiconductor circuits*. Wiley-Interscience.

Emadi, A., Lee, Y. J., & Rajashekara, K. (2008). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on*

Industrial Electronics, 55(6), 2237–2245. https://doi.org/10.1109/TIE.2008.922768

Enepaq. (2023). *Li-ion building block with Sony/Murata VTC6: Battery module with temperature sensor* [Data sheet]. https://enepaq.com/wp-content/uploads/2023/09/VTC6-Sony-Murata-Li-ion-Battery-Module-With-Temperature-Sensor-Datasheet-Tesla-Battery-Sponsorship-Formula-SAE-Electric-Formula-Student-Battery-Pack.pdf

Formula SAE. (2022). *Formula SAE rules and series resources*. https://www.fsaeonline.com

Ghaderi, A., Umeno, T., & Sugai, M. (2016). An altered PWM scheme for single-mode seamless control of AC traction motors for electric drive vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63*(3), 1385–1394. https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2498901

Giri, F. (2013). *AC electric motors control: Advanced design techniques and applications*. Wiley.

Kamal, M. D. A., & Al-Fattah, J. (2025). The experimental study of an SPWM-based controller in an inverter. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering, 6*(2), 446–456. https://doi.org/10.30880/eeee.2025.06.02.054penerbit.uthm.edu

Khalid, A. H., Rahman, M. M., & Amin, M. R. (2019). Effects of modulation index on harmonics of SP-PWM inverter-fed universal motor. *International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9*(6), 5409–5419. https://doi.org/10.11591/ijece.v9i6.pp5409-5419

Krishna, G., Singh, R., Gehlot, A., Almogren, A., Altameem, A., Ur Rehman, A., & Hussen, S. (2024). Advanced battery management system enhancement using IoT and ML for predicting remaining useful life in Li-ion batteries. *Scientific Reports, 14*, Article 30394. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80719-1

Liu, W., Placke, T., & Chau, K. T. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports, 8*, 4058–4084. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016

Lu, X., Chen, S., Wu, C., & Li, M. (2011). The pulse width modulation and its use in induction motor speed control. In *Proceedings of the 2011 Fourth International Symposium on Computational Intelligence and Design* (pp. 195–198). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISCID.2011.150

Manandhar, D., Manandhar, N., & Phan, P. (2020). *Modular battery management system (BMS)* [Capstone technical report, University of Virginia]. https://libraetd.lib.virginia.edu/downloads/4q77fs08g

Microchip Technology. (2020). *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P: megaAVR data sheet*. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf

Mouser Electronics. (2020). *FGH60N60SFD IGBT: Field stop* [Data sheet]. https://www.mouser.mx/datasheet/2/308/1/FGH60N60SMD_D-2313587.pdf

Munsi, M. S., & Chaoui, H. (2024). Energy management systems for electric vehicles: A comprehensive review of technologies and trends. *IEEE Access, 12*, 55942–55972. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3371483

Nam, K. (2018). *AC motor control and electrical vehicle applications*. CRC Press.

Orion BMS. (2018). *Orion BMS 2 operational manual*. https://www.orionbms.com/manuals/pdf/OrionBMS2_OperationalManual.pdf

Palmas-Peláez, J. A., & García-Vite, P. (2013). Minimización de la distorsión armónica de una modulación PWM aplicada a un inversor conectado a la red eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 10*(2), 186–195. https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.03.006

Patel, N., Bhoi, A. K., Padmanaban, S., & Holm-Nielsen, J. B. (Eds.). (2021). *Electric vehicles: Modern technologies and trends*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9251-5

Tamrakar, E., Patel, R., Kumar, A., Kumar Sahu, A., Ruchira, R. (2023). Experimental investigation and power quality analysis of solar micro-inverter for different operating conditions. *E3S Web of Conferences, 405*, Article 02024. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340502024

Texas Instruments. (2014). *xx555 precision timers* [Data sheet]. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/se555.pdf

Texas Instruments. (2023). *OPA814 600-MHz, high-precision, unity-gain stable, FET-input operational amplifier* [Data sheet]. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa814.pdf

UniTek Industrie Elektronik GmbH. (2012). *BAMOCAR-D3 digital battery-motor-controller manual*. https://www.unitek-industrie-elektronik.de

Victron Energy. (2020). *Lithium battery manual*. https://www.victronenergy.com/upload/documents/Lithium_Battery_Manual.pdf

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Eficiencia técnica del emprendimiento universitario como parte de la Tercera Misión. Caso: Universidades Públicas Federales de México

Technical efficiency of university entrepreneurship as part of the Third Mission. Case: Public Federal Universities in Mexico

González-Cadena, M.[a]*, Pedraza-Amador, E.M.[a], Coronado-Meneses, M.[a], Vázquez-Rojas, A.M.[b]

[a] Escuela Superior de Tizayuca; Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; 43800, Tizayuca, Hidalgo. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0808-956X*, https://orcid.org/0000-0002-7182-2437, https://orcid.org/0000-0003-1171-516X.

[b] Instituto de Ciencias Económico Administrativas Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Circuito La Concepción Km 2.5, Col. San Juan Tilcuautla. San Agustín Tlaxiaca Hidalgo, México C.P. 42160. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2907-5383.

maribel_gonzalez4257@uaeh.edu.mx*; elbam@uaeh.edu.mx; myriam_coronado3187@uaeh.edu.mx; angelica_vazquez4048@uaeh.edu.mx

Innovación Tecnológica: Aplicación del DEA como herramienta cuantitativa para medir el emprendimiento universitario en las Universidades Públicas Federales.

Área de aplicación industrial: Emprendimiento universitario.

Recibido: 06 agosto 2026
Aceptado: 01 septiembre 2026

Abstract

Public Federal Universities (PFUs) have incorporated, in addition to teaching and research entrepreneurship, knowledge transfer, and social commitment activities, thanks to their academic capacity, infrastructure, and funding. Nevertheless, measuring how efficiently universities manage these entrepreneurial activities remains a challenge (González-Cadena et al., 2024). This study examines the technical efficiency of PFUs in Mexico within their Third Mission, under the hypothesis that they exhibit moderately high levels of technical efficiency in their entrepreneurial activities due to their funding, academic capacity, and infrastructure. The study applies Data Envelopment Analysis (DEA) (Charnes et al., 1978), a non-parametric technique, through the CCR and BCC models, drawing on statistical yearbooks and annual reports from 2024. Inputs included student enrollment, full-time professors, and state subsidies, while outputs included intellectual property, external users of facilities, and cultural and artistic events. Findings show that 85.71% of the seven PFUs are located on the production frontier in both models; only the UAAAN obtained a score of 0.8989 under the CCR model and 0.9126 under the BCC model, meaning it could raise

its outputs without additional resources. These results support the initial hypothesis and confirm that Mexican PFUs have the institutional conditions to carry out entrepreneurship efficiently as part of their Third Mission. Future lines of research include incorporating new indicators and applying the DEA methodology to other higher education subsystems.

Keywords: Entrepreneurship, Data Envelopment Analysis; Public Federal Universities; Efficiency; Third Mission.

Resumen

Las Universidades Públicas Federales (UPF) han incorporado a su labor, además de la docencia e investigación, actividades de emprendimiento, transferencia del conocimiento y compromiso social, apoyadas a su capacidad académica, infraestructura y financiamiento. No obstante, la evaluación de la eficiencia del emprendimiento universitario continúa siendo limitada (González-Cadena, et al., 2024). Por ello, este estudio tiene como objetivo cuantificar la eficiencia técnica de las UPF en México en sus actividades de emprendimiento dentro de la Tercera Misión, bajo la hipótesis de que presentan niveles moderadamente altos de eficiencia técnica en sus actividades de emprendimiento, debido al financiamiento, la capacidad académica y la infraestructura con que cuentan. Se emplea la técnica no paramétrica del Análisis Envolvente de Datos (DEA, por sus siglas en inglés) (Charnes et al., 1978), mediante los modelos CCR y BCC, ambos con orientación a los *outputs*, utilizando datos de anuarios estadísticos e informes rectorales del 2024. Los *inputs* considerados fueron la matrícula, profesores de tiempo completo y subsidio otorgado; los *outputs* incluyeron propiedad intelectual, usuarios externos que hicieron uso de las instalaciones y eventos culturales y artísticos. Los hallazgos muestran que el 85.71% de las siete UPF se ubican en la frontera de producción en ambos modelos; solamente la UAAAN obtuvo 0.8989 en CCR y 0.9126 en BCC, lo que indica que podría mejorar sus resultados sin recursos adicionales. Estos resultados son consistentes con la hipótesis planteada y sugieren que las UPF mexicanas cuentan con las condiciones institucionales para llevar a cabo el emprendimiento de manera eficiente como parte de su Tercera Misión. Para futuras líneas de investigación se sugiere la incorporación de nuevos indicadores y aplicar la metodología del DEA en otros subsistemas de educación superior.

Palabras clave: Emprendimiento, Análisis Envolvente de Datos, Universidades Públicas Federales, Eficiencia, Tercera Misión.

1.Introducción

La misión de las Universidades Públicas Federales (UPF) busca dar respuesta a las demandas de la sociedad, por medio de la generación, aplicación y transferencia del conocimiento y de tecnología con un sentido social (Chávez et al., 2025). Asimismo, la formación emprendedora se puede contribuir al desarrollo de la intención emprendedora de los estudiantes, especialmente cuando las instituciones incorporan educación orientada al emprendimiento (Zhang et al., 2014). Por lo tanto, las universidades tienen un papel importante en la formación de estudiantes para que puedan identificar oportunidades y desarrollar ideas innovadoras. Esto ha permitido que las universidades sean reconocidas por sus resultados; particularmente, las UPF, que son el objeto de este estudio, destacan por su capacidad académica y por las actividades que tienen relación con el emprendimiento, la

innovación y el compromiso social. Para cumplir esta misión denominada "Tercera Misión", Bueno y Casani (2007) plantean tres dimensiones que permiten su cumplimiento:

> La primera es el emprendimiento como generador de valor, riqueza y empleo; la segunda, fundamentada en la transferencia y valorización del conocimiento. Finalmente, la tercera relacionada con el compromiso social que tienen las IES, con la finalidad de coadyuvar al desarrollo económico y social de la sociedad (Pág. 47).

Además, los autores advierten que los indicadores que ayudan a medir el avance del desarrollo de la Tercera Misión en las Instituciones de Educación Superior (IES) pueden diversificarse debido a que no existe un conjunto único de variables adecuado para todas las instituciones, debido al tamaño de la universidad, el financiamiento con que cuentan; la estructura organizacional, la oferta educativa y la ubicación geográfica, lo que origina diferentes resultados e ignorar estas particularidades puede generar que la evaluación no muestre con precisión el trabajo que ha hecho con respecto a esta misión.

Para medir el avance de la Tercera Misión en las Instituciones de Educación Superior (IES), autores como Molas-Gallart et al. (2002); Laredo (2007); la Comisión Europea (2012) y González-Cadena et al. (2024) han propuesto un conjunto de indicadores que no solo coadyuvan a la medición del desempeño institucional, sino que permite reconocer capacidades institucionales, rendimiento obtenido y el grado de compromiso con la región y la transferencia de conocimiento, pero, de acuerdo con De la Torre (2016), estos indicadores pueden variar dependiendo del tamaño de las universidades, el financiamiento disponible, la estructura organizacional y la ubicación geográfica, lo que puede generar resultados diferentes entre las instituciones.

En este sentido, en México se han establecido políticas públicas orientadas a impulsar el desarrollo económico, tecnológico y social del país por medio de la promoción de actividades de emprendimiento, innovación y compromiso social que deben realizar las IES. Esta relevancia se acentúa en contextos de desaceleración económica, debido a que el desempleo y la inflación suelen fungir como detonantes de la actividad emprendedora, la cual encuentra en dichos escenarios condiciones para su desarrollo (Ramírez-Urquidy, 2022).

Actualmente, las UPF han integrado a sus Programas de Desarrollo Institucional, tareas relacionadas con el emprendimiento, la innovación y el compromiso social, por ejemplo, en sus programas educativos incorporan asignaturas vinculadas con la responsabilidad social y la ética profesional (Hirsch Adler y Pérez-Castro, 2018), con el propósito de formar estudiantes con principios del bien común. Al mismo tiempo, han incrementado sus actividades que coadyuvan al favorecimiento de la investigación y el desarrollo tecnológico, en cumplimiento de lo establecido en los Programas Sectoriales de Educación desde el período 2007-2012. De este modo, este trabajo de investigación tiene como objetivo medir la eficiencia técnica de las UPF en México con relación a las actividades de emprendimiento que realizan dentro de su tercera misión.

Si bien la innovación y el compromiso social son dimensiones importantes dentro de la Tercera Misión en las UPF, su cálculo afronta limitaciones metodológicas; en función de la disponibilidad homogeneidad de información. En cambio, respecto del emprendimiento, se cuenta con información consolidada, disponible en los anuarios

estadísticos e informes rectorales del ejercicio 2024, a partir de la cual se integró la base de datos utilizada en este estudio (véase apartado de Materiales y Métodos). Esto permitió realizar una evaluación de la eficiencia técnica mediante el Análisis Envolvente de Datos (DEA, por sus siglas en inglés, *Data Envelopment Analysis*).

Las IES tienen un papel clave en la creación, consolidación y permanencia de los ecosistemas de emprendimiento (Padilla, 2024), al contribuir a la formación de los estudiantes para hacer frente a los desafíos del mundo contemporáneo y promover el crecimiento social y económico de la región (Chávez et al., 2025). En consecuencia, la evaluación de la eficiencia permite conocer la situación que guardan las UPF para transformar sus recursos en resultados palpables.

Lo anterior no significa que las dimensiones de innovación y compromiso social sean menos importantes dentro de la Tercera Misión; sin embargo, se delimita el análisis del emprendimiento, debido a la disponibilidad y homogeneidad de la información necesaria para su medición.

El análisis de las otras dimensiones puede ser abordado en futuras investigaciones.

En este sentido, el análisis de la eficiencia técnica de las UPF en esta investigación se realiza a través del DEA. Con base en la delimitación del estudio, se establece como hipótesis de investigación que las UPF en México presentan niveles relativamente altos de eficiencia técnica en sus actividades de emprendimiento, considerando la disponibilidad de recursos financieros y capacidades institucionales destinadas al desarrollo de dichas actividades.

Universidades Públicas Federales (UPF), como unidades de análisis

Las IES comprenden un conjunto amplio de instituciones que integran el sistema de educación superior; dentro del cual se encuentran las UPF, que constituyen el objeto de análisis de esta investigación. De acuerdo con la Secretaría de Educación Pública (SEP, 23 de abril de 2015), estas universidades conforman un subsistema con características propias: autonomía universitaria, financiamiento íntegramente federal, personalidad jurídica de organismo descentralizado del Estado y capacidad para otorgar grados en todos los niveles (Baca et al., 2019). Las UPF desarrollan proyectos de investigación en áreas estratégicas como energía, salud pública y sismología (Lomelí, 2024); a la vez, promueven la extensión cultural y la difusión del conocimiento hacia la sociedad.

En la Tabla 1 se muestran las IES que conforman este grupo de universidades.

Tabla 1. UPF en México.

Nombre	Siglas
Universidad Nacional Autónoma de México	UNAM
Instituto Politécnico Nacional	IPN
Universidad Autónoma Metropolitana	UAM
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro	UAAAN
Universidad Autónoma de Chapingo	UACh
Universidad Nacional Abierta y a Distancia de México	UnADM
Universidad Pedagógica Nacional	UPN
El Colegio de México	COLMEX
Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C.	CIDE

Fuente: Universidades Públicas Federales. Educación Superior (SEP, 2015).

Cabe señalar que, aunque el Formato 911 de la SEP reporta 48 instituciones bajo este subsistema de UPF, esta cifra corresponde a escuelas, facultades y unidades académicas contabilizadas de forma individual. Para este trabajo de investigación, las unidades de análisis se definen a nivel de institución matriz. Bajo este criterio, inicialmente se identifican nueve universidades; sin embargo, la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de México (UnADM) y el Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C. (CIDE) fueron excluidas posteriormente por la ausencia de información necesaria para la estimación del DEA. En consecuencia, el análisis empírico se realizó con siete UPF.

En materia presupuestal, el subsidio federal asignado a estas universidades para el ejercicio fiscal 2024 superó los ochenta y cuatro mil millones de pesos (DOF, 2023). Además, estas instituciones muestran resultados relevantes en materia de calidad académica. De acuerdo con Hernández y Hernández (2023), el 73.81% de la matrícula de las UPF se encontraba inscrita en programas reconocidos por su calidad durante el ciclo 2020-2021.

Según datos del Programa Nacional de Educación Superior (SEP, 2023), las UPF concentran casi el 9.24% de la matrícula nacional, lo que equivale a 471,641 estudiantes. Además, estas instituciones tienen una participación importante en las actividades científicas del país, tanto por la presencia de investigadores dedicados a actividades de investigación como por su producción científica (RICYT, 2024).

Igualmente, las UPF se han distinguido por su reconocimiento a nivel internacional. Por ejemplo, la UNAM se posicionó en el lugar 93 a nivel mundial del ranking *QS World University Ranking* (2024). En el *Times Higher Education Latin America University Ranking* (2024), la UNAM se colocó en la posición 15; mientras que la UAM en la 40 y el IPN en el 50. Por su parte, en el *Academic Ranking of World Universities (Shanghai Ranking, 2024*), la UNAM se sitúa en el rango 201-300 y el IPN en el 601-700, siendo las únicas universidades mexicanas que se encuentran en este listado.

Con base en lo anterior, se definió como objeto de estudio a las UPF identificadas en las fuentes institucionales consultadas. Por la importancia de estas universidades en nuestro país, se considera que, para este trabajo de investigación, las unidades de análisis son las UPF. Sin embargo, la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de México (UnADM) y el Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C. (CIDE) fueron excluidas del estudio, debido a la ausencia de información necesaria para la estimación del DEA.

Selección de *inputs* y *outputs*

Una vez, que se han seleccionado las unidades de análisis se decide emplear los indicadores propuestos por González-Cadena et al. (2024) para evaluar el desempeño de las UPF, en términos de emprendimiento, por medio del DEA. Se selecciona este sistema de indicadores porque permite evaluar actividades relacionadas con el emprendimiento universitario considerando, además, capacidades asociadas a la Primera y Segunda Misión.

De acuerdo con González-Cadena et al. (2024), los *inputs* son los recursos con que cuentan las IES para llevar a cabo sus actividades (capacidades de la Primera y Segunda Misión). En la Tabla 2 se muestran los indicadores seleccionados y su definición muestran los indicadores seleccionados y su definición

Tabla 2. Selección de *inputs.*

Input	Definición
Matrícula	Número de alumnos inscritos durante un ciclo escolar en una institución
Profesores de tiempo completo (investigador)	Personas que participan en las tareas propias de un proyecto de investigación.
Subsidio en educación	Asignación que otorga el gobierno federal o el estatal a las IES.

Fuente: Elaboración propia con base en González-Cadena et al. (2024).

Con relación a los *outputs*, representan los resultados obtenidos por las unidades de decisión término que hace referencia a todo tipo de organización, para evitar el uso de palabras como empresas y firmas, en el cual a su interior se toman decisiones (DMU por sus siglas en inglés *Decision Making Unit*), a partir de la transformación de los recursos utilizados (Rodríguez, 2009). Para medir el emprendimiento, se consideran como *outputs* las variables proxy propuestas por González-Cadena et al. (2024). En la Tabla 3 se exhiben los *outputs* seleccionados para este trabajo de investigación.

Tabla 3. Selección de *outputs.*

Output	Definición
Propiedad Intelectual	Número total de marcas, diseños industriales, derecho de autor y modelo de utilidad registrados por las UPF
Usuarios externos que hicieron uso de las instalaciones	Número de usuarios externos que utilizan la infraestructura de las UPF
Eventos culturales y artísticos	Número de actividades culturales y artísticas que son organizadas por las UPF para su comunidad y gente externa

Fuente: Elaboración propia con base en González-Cadena et al. (2024).

2. Materiales y Métodos

El DEA es una herramienta metodológica no paramétrica que permite medir la eficiencia técnica de las DMUs. Esta técnica se fundamenta en la programación lineal que coadyuva a construir una frontera de producción eficiente, posibilitando, al mismo tiempo, la integración de diferentes insumos (*inputs*) y productos (*outputs*). Originalmente, el DEA se consideraba una técnica robusta que proporciona la separación de DMUs eficientes de las ineficientes en escenarios exógenos complejos (Charnes et al., 1981); no obstante, estudios recientes subrayan su flexibilidad para realizar comparaciones en instituciones, otorgando información importante para la toma de decisiones, el uso eficiente de recursos y de mejores prácticas (Rodríguez, 2003).

En el caso de la evaluación de la eficiencia en las IES, el DEA se ha posicionado como una herramienta clave en los últimos años para cuantificar el desempeño de instituciones que emplean varios *inputs* y *outputs* (Johnes et al., 2008). Asimismo, Johnes et al. (2024) indican que los métodos de estimación de frontera se adaptan fácilmente a diversos escenarios en el sector de la educación superior, lo que permite que los resultados obtenidos puedan ser utilizados por las IES con resultados no tan favorables.

Bajo esta lógica se observa que existen trabajos enfocados en el uso del DEA para medir la eficiencia en las universidades (Beasley, 1990; Johnes, 2006 y Salas-Velasco, 2020). También existen trabajos que

emplean modelos del DEA más robustos, como los modelos en dos etapas (Almeida et al., 2025; Wolszczak-Derlacz et al., 2011 y Zhu et al., 2021), comprobando que existen resultados significativos en el desempeño institucional. Sin embargo, el uso del DEA para medir la eficiencia en las IES con relación a las actividades de la Tercera Misión y, en especial en la dimensión del emprendimiento, continúa siendo escaso, lo que representa un vacío en la literatura y evidencia la pertinencia de este trabajo de investigación.

La información se recopiló mediante una revisión documental de fuentes secundarias del año 2024. Se consultaron los anuarios estadísticos e informes rectorales publicados por las UPF consideradas en el estudio. Posteriormente, la información se organizó y se sistematizó para su uso en el cálculo de los modelos del DEA.

3. Método

Elección del Modelo DEA

Antes de aplicar la metodología del DEA, es necesario establecer su orientación, la cual puede dirigirse hacia los *inputs* o hacia los *outputs*. La orientación hacia los *inputs* busca disminuir proporcionalmente el uso de los recursos manteniendo un nivel determinado de productos; mientras que la orientación hacia los *outputs* procura maximizar los productos a partir de un nivel dado de recursos (Farrel, 1957).

La eficiencia estimada por medio del DEA es de carácter relativo, ya que cada DMU se evalúa respecto al conjunto de unidades analizadas y a la frontera eficiente que se desarrolla a partir de los *inputs* y *outputs* considerados (Charnes et al., 1978).

La primera, conocida como Medida de eficiencia técnica orientada al *input* (ET1), busca reducir al máximo el consumo de *inputs* para un nivel dado de *outputs*. Como se observa en la Figura 1, la unidad eficiente se localiza sobre la isocuanta L(y) (Vázquez, 2011).

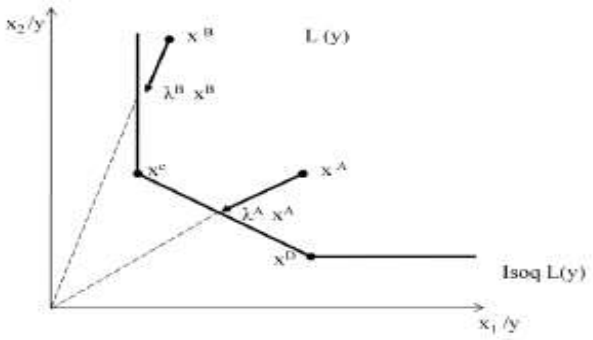


Figura 1. Medida de eficiencia técnica orientada al *input.*
Fuente: Vázquez (2011).

La segunda, la Medida de eficiencia técnica orientada al *output* (ET0), busca incrementar al máximo los *outputs* manteniendo constante el nivel de *inputs* disponible. Tal como se observa en la Figura 2, esta eficiencia se representa sobre la isocuanta P(x) (Vázquez, 2011).

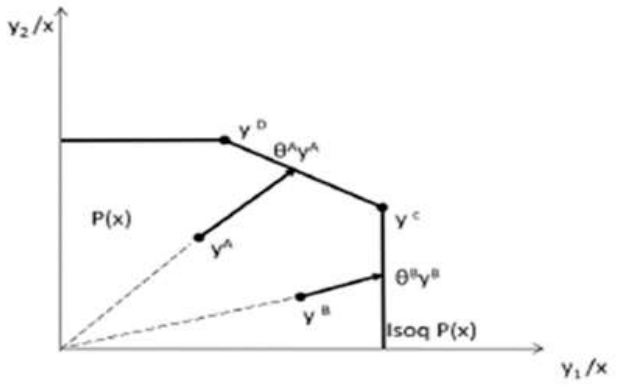


Figura 2. Medida de eficiencia técnica orientada al *output.*
Fuente: Vazquez (2011).

Definida la orientación del modelo, el siguiente paso es establecer el tipo de rendimiento a escala que regirá el análisis, para lo cual, se considera el Modelo de Rendimiento Constante a Escala (CCR) de Charnes et al. (1978) y el Modelo de Rendimiento Variable a Escala (BCC) de Banker et al. (1984).

Modelo de Rendimiento Constante a Escala (CCR): reconoce una escala de operación constante y ofrece medidas de eficiencia proporcional; a diferencia del modelo BCC, que no incorpora factores como el tamaño de la institución o su volumen de producción.

$$\max h_0 = \frac{\sum_{r=1}^{s} u_t y_{r0}}{\sum_{i=1}^{m} v_i \; x_{i0}}$$

Sujeto a:

$$\frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^{m} v_i \; x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_{r\,vi} \geq 0 \; r=1,\dots, m$$

Fuente: Charnes et al. (1978) en Cáceres, Kristjanpoller y Tabilo (2014).

El detalle completo de las variables del modelo puede consultarse en Charnes et al. (1978), retomado por Cáceres, Kristjanpoller y Tabilo (2014).

Modelo de Rendimiento a Escala (BCC): considera la posibilidad de existencia de ineficiencias debidas a la escala actual de operación. Sin embargo, presenta una limitación muy importante sobre la tecnología de la producción (Vázquez, 2011).

Este modelo se orienta a los *outputs,* buscando maximizar las salidas sin alterar el nivel de *inputs* empleados, bajo el supuesto de rendimientos variables a escala, tal como se expresa a continuación:

$$max \; \emptyset_0 \; + \; \varepsilon \left(\sum_{i=1}^{m} s_i^+ + \sum_{r=1}^{s} s_r^- \right)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \, x_{ij} \; + \; s_i^+ \; = x_{i0};\; i = 1, 2\dots, m$$
$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \, y_{rj} \; - \; s_r^- \; = \theta_0 \, y_{r0};\; r = 1, 2\dots, s$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \; = 1$$

$$\lambda_j \geq 0;\; s_i^+ \geq 0;\; s_r^- \geq 0$$

Fuente: Banker et al. (1984).

Para una descripción exhaustiva de las restricciones, supuestos y variables que integran este modelo, se recomienda revisar directamente a Banker et al. (1984).

Vázquez et al. (2026) identifican que, en estudios relacionados con la medición de la eficiencia en la educación superior, se aplica el DEA con orientación a los *outputs*, debido a que las instituciones presentan un mínimo grado de control sobre sus insumos y requieren maximizar los productos, sin tratar de disminuir los *inputs*. Bajo esta consideración, en el presente estudio se adopta una orientación a los *outputs* para las UPF analizadas.

El cálculo de la eficiencia técnica se realizó mediante el software DEAP versión 2.1, desarrollado por Coelli (1996). Se estimaron los modelos CCR y BCC, ambos con orientación a los *outputs*.

4.Resultados

Los resultados obtenidos empleando los modelos CCR y BCC muestran niveles elevados de eficiencia técnica en las siete UPF analizadas. En ambos modelos, seis universidades (85.71%) se situaron en la frontera de producción, mientras que la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) presentó una eficiencia menor a la unidad, con valores de 0.8989 en el modelo CCR y de 0.9126 en el modelo BCC.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la eficiencia técnica de las UPF con relación a sus actividades de emprendimiento (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Eficiencia técnica de las UPF con relación al emprendimiento.

Universidad	CCR	BCC	Eficiencia de escala
UNAM	1.0000	1.0000	1.0000
IPN	1.0000	1.0000	1.0000
UAM	1.0000	1.0000	1.0000
UAAAN	0.8989	0.9126	0.9850
UACh	1.0000	1.0000	1.0000
UPN	1.0000	1.0000	1.0000
COLMEX	1.0000	1.0000	1.0000
Mean	**0.9856**	**0.9875**	

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos mediante DEAP 2.1 (Coelli, 1996).

En cuanto al promedio de la eficiencia técnica, el modelo CCR presentó una media de 0.9856, y en el modelo BCC alcanzó una media de 0.9875, lo que representa niveles elevados de eficiencia técnica y de escala. La diferencia entre las medias de eficiencia técnica obtenidas en ambos modelos fue de 0.0019, lo que indica una variación reducida en las estimaciones. En este sentido, la consideración de los rendimientos variables a escala cambia de manera limitada la eficiencia técnica estimada para las UPF analizadas.

5.Discusión

Los hallazgos obtenidos muestran que seis de las siete UPF analizadas se sitúan dentro de la frontera eficiente con relación a sus actividades de emprendimiento. El promedio de eficiencia técnica fue de 0.9856 en el modelo CCR y de 0.9875 en el modelo BCC, lo que evidencia un desempeño relativamente elevado en la transformación de los recursos empleados en productos asociados con el emprendimiento universitario. Por lo tanto, los resultados son consistente con la hipótesis planteada, al mostrar que la mayoría de las

UPF analizadas presentan niveles parcialmente alta de eficiencia.

Por otra parte, la reducida diferencia entre los modelos CCR y BCC constituyen un resultado relevante, debido a que exhibe que la incorporación de rendimientos variables a escala cambió de manera limitada la eficiencia técnica estimada. El incremento del promedio de 0.9856 a 0.9875 significa una variación de 0.0019. Esto sugiere que, para las UPF analizadas, las diferencias en eficiencia no parecen estar determinadas de manera importante por las condiciones de escala. El modelo BCC permite, en este sentido, complementar la evaluación al tomar en cuenta la posibilidad de ineficiencias relacionas con la escala de operación (Cheng et al., 2024).

La UAAAN presentó valores de eficiencia inferiores a la unidad en ambos modelos (0.8989 en CCR y 0.9126 en BCC). La mejora observada indica que una parte de la brecha respecto de la frontera puede estar relacionada con las condiciones de escala; no obstante, el DEA no permite identificar por sí mismo las causas institucionales que originan esta diferencia. Por ello, el resultado debe considerarse como una oportunidad para analizar con mayor profundidad la manera en que esta universidad transforma sus recursos disponibles en productos relacionados con el emprendimiento.

Los resultados aportan, desde la perspectiva de la Tercera Misión, la evidencia sobre la capacidad de las UPF para transformar recursos en productos relacionados con el emprendimiento. Clark (1998) destaca la transformación de las universidades hacia estructuras y culturas con mayor orientación al emprendimiento. En este marco, los hallazgos obtenidos permiten observar el desempeño relativo de las UPF en una de las dimensiones de la Tercera Misión, especialmente en un contexto en que la evaluación del emprendimiento universitario continúa siendo limitada.

Asimismo, el uso del DEA permitió evaluar de manera simultánea varios *inputs* y *outputs* sin requerir la especificación previa de una función de producción. Esto ha favorecido en la evaluación del desempeño de las IES que utilizan diversos recursos para generar resultados académicos, de investigación y de vinculación (Johnes et al., 2008; Johnes et al., 2024). En el presente estudio, esta metodología permitió establecer una frontera de producción relativa y distinguir las instituciones que se encuentran sobre de aquellas que tienen una diferencia respecto al conjunto analizado.

Como este estudio es de tipo transversal y corresponde al año 2024, los resultados presentados exhiben un desempeño de las universidades en un momento determinado. Por lo tanto, no es posible identificar la evolución de la eficiencia en un período más amplio. Además, el número reducido de DMUs e indicadores puede limitar la capacidad discriminatoria del DEA (Cooper et al., 2007; Dyson et al., 2001). Por ello, los resultados deben entenderse como una medida de eficiencia relativa dentro del conjunto de las UPF y no como una clasificación absoluta del desempeño institucional.

Finalmente, este trabajo contribuye a evidenciar las capacidades de las UPF para producir actividades relacionadas con el emprendimiento, como parte de su Tercera Misión. No obstante, es necesario considerar que para futuras investigaciones se incluyan nuevas variables (relacionadas con empresas *spin-off,* transferencia tecnológica o comercialización de la propiedad intelectual) con la finalidad de contar con una evaluación más integral de esta dimensión de la actividad universitaria.

6.Conclusiones

Este trabajo de investigación aporta evidencia empírica sobre el análisis del emprendimiento universitario desde una perspectiva de eficiencia técnica, por medio de la aplicación de una técnica no paramétrica como es el DEA a las UPF. Esta aproximación permitió valorar de manera conjunta los insumos y productos, generando una referencia comparativa sobre la capacidad institucional para transformar los recursos destinados a las actividades de emprendimiento.

El principal conocimiento derivado del estudio consiste en mostrar que el desempeño favorable en la mayoría de las UPF no depende exclusivamente de la cantidad de recursos o productos registrados, sino de la relación que se establece entre ambos. Desde esta perspectiva, la eficiencia constituye un elemento complementario para comprender las diferencias existentes entre instituciones y para identificar aquellas que pueden ser referentes dentro del grupo de DMUs estudiado.

Los hallazgos obtenidos respaldan la pertinencia del uso de herramientas de análisis cuantitativo para el estudio del emprendimiento universitario. Esto permite generar información que pueda coadyuvar a la toma de decisiones o al fortalecimiento de procesos relacionados con esta dimensión.

Por último, esta investigación no se cierra en el uso de los indicadores empleados; al contrario, abre la posibilidad de incorporar nuevos indicadores; además el empleo de análisis de tipo longitudinal y técnicas complementarias que permitan ampliar la capacidad de evaluación y, a la vez, realizar estudios comparativos.

7.Referencias

1. González-Cadena, M., Vázquez-Rojas, A. M., Coronado-Meneses, M. y Pedraza Amador, E.M. (2024). Indicadores de la Tercera Misión en las universidades públicas mexicanas. *Acta Universitaria. 34, e4016,* 1-17. https://doi.org/10.15174/au.2024.401
2. Charnes, A. Cooper, W. & Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision-Making Units. *European Journal of Operational Research, 2(6),* 429-444.https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8
3. Chávez, K.J., Boscán, M. y Calanchez, A. (2025). Emprendimiento universitario y desarrollo sostenible: un enfoque desde la teoría del comportamiento planificado. *Revista Producción Limpia. 20 (1).* 39-54. https://doi.org/10.22507/pml.v20n1a3631
4. Zhang, Y., Duysters, G., & Cloodt, M. (2014). The role of entrepreneurship education as a predictor of university students' entrepreneurial intention. *International Entrepreneurship and Management Journal, 10(3),* 623–641. https://doi.org/10.1007/s11365-012-0246-z
5. Bueno E., y Casani F. (2007). La Tercera Misión de la Universidad Enfoques e Indicadores Básicos para su Evaluación. *Revista Economía Industrial, 366,* 43-59. http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/366/43.pdf
6. Molas-Gallart, J., Salter, A., Patel, P., Scott, A. & Duran, X., (2002). Measuring Third Stream Activities. *Science and Technology Policy Research.* 1-48. https://www.academia.edu/RegisterToDownload#Download
7. Laredo, P. (2007). *Toward a third mission for universities. UNESCO Regional*

Seminar Globalizing Knowledge: European and North American Regions and Policies addressing the Priority Issues of other UNESCO Regions. Paris, France. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000157815

8. Comisión Europea [CE]. (2012). *Libro Verde. El fomento y la medición de la tercera misión en las instituciones de educación superior*. https://consellosocial.udc.es/blogpresidente/wp-content/uploads/2015/02/Green-paper-p-C.pdf
9. De la Torre, E. (2016). *Tipologías de Universidades: Relevancia de la Tercera Misión para la Políticas y Estrategias Universitarias en el Nuevo Marco de la Educación Superior.* [Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales].
10. Ramírez-Urquidy, M. (2022). Economic downturns and regional entrepreneurship dynamics in México: trends and policy implications. *Problemas del Desarrollo, 53(209),* 115-157. https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2022.209.69753
11. Hirsch Aldler, A. y Pérez-Castro, J. (Coords.2018). *Ética profesional y responsabilidad social Universitaria: experiencias institucionales*. Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación, UNAM
12. Padilla A. (2024). *Hablan del rol de las universidades en el emprendimiento.* https://www.uag.mx/es/mediahub/hablan-del-rol-de-las-universidades-en-el-emprendimiento/2024-04
13. Secretaria de Educación Pública [SEP] (2015). *Instituciones de Educación Superior*. https://www.gob.mx/sep/acciones-y-programas/instituciones-de-educacion-superior
14. Baca, S., Lamoy, C., Polin, M. y Torres M.F. (2019). Planeación, Programación y Rendición de Cuentas del Presupuesto de las Universidades Públicas en México: *Razones, Resultados y Retos Integralia*. https://integralia.com.mx/web/wp-content/uploads/2019/08/EstudioCrisisFinancieraDeUniversidadesPublicas.pdf
15. Lomelí, V (2024). *La Universidad Nacional ante los retos del desarrollo soberano: Informe de gestión y prospectiva 2024-2030*. UNAM. https://www.dgcs.unam.mx/
16. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2023, diciembre). Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal 2024. Diario Oficial de la Federación [DOF]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/884752/PEF_2024.pdf
17. Hernández Santiago, P. y Hernández Ortiz, L. A. (2023). Estado actual de la calidad de la educación superior en México. Los programas de nivel licenciatura acreditados. *Revista de la Educación Superior, 52(207),* 1-30. https://doi.org/10.36857/resu.2023.207.2564
18. Secretaria de Educación Pública [SEP] (2023) *Programa Nacional de Educación Superior 2023-2024*. Avances enero 2023-junio 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/946696/11_PRONALES_AyR2324.pdf#:~:text=%E2%80%A2%20En%20el%20ciclo%202023%2D2024%2C%20la%20matr%C3%ADcula,

qué%20pas%C3%B3%20del%2042.1%25%20al%2043.8%25. %20%E2%80%A2

19. Red de Indicadores de Ciencia Tecnología Iberoamericana e Interamericana [RICYT]. (2024). *El Estado de la Ciencia: Principales Indicadores de Ciencia y Tecnología iberoamericanos/interamericanos.* https://www.ricyt.org/
20. QStars. (2024).*World University Rankings 2024: Top global universities.* https://www.topuniversities.com/world-university-rankings/2024
21. The Times Higher Education World University Rankings [THE]. (2024). *World University Rankings 2024*. https://www-timeshighereducation-com.translate.goog/world-university-rankings/2024/world-ranking?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc&_x_tr_hist=true
22. Shanghai Ranking (2024). *2024 Academic Ranking of World Universities.* https://www.shanghairanking.com/rankings/arwu/2024
23. Rodríguez L. G. (2009). *Generación de metodología, aplicando Data Envelopment Analysis (DEA), en el diseño de indicadores de eficiencia y productividad para la función de extensión de la Universidad Nacional de Colombia*. [Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas].
24. Charnes, A., Cooper, W. & Rhodes, E. (1981). Evaluating Program and Managerial Efficiency: An Application of Data Envelopment Analysis to Program Follow Through. *Management Science, 27(6),* 668-697. https://doi.org/10.1287/mnsc.27.6.668
25. Rodríguez, L. G. (2003). Medición de la eficiencia relativa en dos subsectores de la economía colombiana desde 1993 a 2002 utilizando Data Envelopment Analysis (D.E.A.). Innovar, *Revista de Ciencias Administrativas y Sociales, 22*,121-144.http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=818
26. Clark, B.R. (1998). *Creating Enterpreneurial Universities: Organizational Pathways of Transformation.* IAU Press/Pergamon
27. Johnes, J & L. Yu (2008). Measuring the research performance of Chinese higher education institutions using data envelopment analysis. China Economic Review 19(4), 679-696.https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1043951X08000679
28. Johnes, J. & Perez-Esparrells C. (2024), The quest for efficiency in higher education in England: lessons learned for developed economies. *International Transactions in Operational Research, 32 (5),* 1-30. https://doi.org/10.1111/itor.13583
29. Beasley J. E. (1990). Comparing university departments. *Omega, 18(2),* 171–183. https://doi.org/10.1016/0305-0483(90)90064-G
30. Johnes, G. (2006). Data envelopment analysis and its application to the measurement of efficiency in higher education. *Economics of Education Review*. *25(3),* 273–288. https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2005.02.005
31. Salas-Velasco, M. (2020). The technical efficiency of universities: Evidence from Europe using DEA. *Educational Research for Policy and Practice, 19.*159–180.

https://doi.org/10.1007/S10671-019-09254-5

32. . Almeida, J. P. L. de, Anjos, F. H. dos, Moreira, M. F., Bermejo, P. H. de S., Prata, D. N., & Rodrigues, W. (2025). University efficiency evaluation using data envelopment analysis: future research agenda. *Cogent Education, 12(1).* https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2445964
33. Wolszczak-Derlacz, J., & Parteka, A. (2011). Efficiency of European public higher education institutions: A two-stage multicounty approach. *Scient metrics, 89(3),* 887–917. https://doi.org/10.1007/s11192-011-0484-9
34. Zhu, J., Cook, W. D., & Tone, K. (2021). *Data envelopment analysis: A handbook of models and methods* (2nd ed.). Springer
35. Farrell, M.J, (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A. (General). 120(3),* 253-290. https://doi.org/ 10.2307/2343100
36. Vázquez R. M.A. (2011*). Eficiencia técnica y cambio de productividad en la educación superior pública: un estudio aplicado al caso español (2000-2009).* [Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
37. Banker, R.D., Charnes, A. & Cooper W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science. 30(9),* 1078-1092. http://www.jstor.org/stable/2631725
38. Cáceres, H., Kristjanpoller, R. W. y Tabilo, A. J. (2014). Análisis de la eficiencia técnica y su relación con los resultados de la evaluación de desempeño en una Universidad chilena. Innovar, *Revista de Ciencias Administrativas y Sociales. 24(54),* 199-217. https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/46720/48095
39. Vázquez R. M.A. (2026). Eficiencia de la educación superior tecnológica en México: una aplicación del Análisis Envolvente de Datos. [*Manuscrito presentado para publicación*]. UNAM
40. Coelli, T. (1996). A guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) *Program. Centre for Efficiency and Productivity Analysis, University of New England, Australia*. http://www.owlnet.rice.edu/~econ380/DEAP.PDF
41. Cheng, Z., Xueyuan, D, Tao, M., Libo, X, Haibo, F., Gang, L., Sihang P., Jiarong, L., & Zeqi G. (2024). Investment efficiency analysis using DEA-BCC model under variable returns to scale. *Frontiers in Energy Research. (12),* 1-16 https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1450270
42. Cooper, W. W., Seiford, L. M. y Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver software* (2nd ed.). Springer.https://doi.org/10.1007/978-0-387-45283-8
43. Dyson, R. G., Allen, R., Camanho, A. S., Podinovski, V. V., Sarrico, C. S., y Shale, E. A. (2001). Pitfalls and protocols in DEA. *European Journal of Operational Research. 132(2),* 245–259. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00149-1

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Rendimiento escolar, inteligencia emocional y resiliencia en escolares de una primaria del Estado de Campeche, México

Academic Performance, Emotional Intelligence, and Resilience in Elementary School Students in the State of Campeche, Mexico

Sánchez-Domínguez, J., López-Cisneros, M.A., Villanueva-Echavarría, J., Torres-Zapata, Á.*

Facultad de Ciencias de Salud, Campus III; Universidad Autónoma del Carmen; C.P. 24153; Ciudad del Carmen, Campeche, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6462-0968, https://orcid.org/0000-0002-9384-5752, https://orcid.org/0000-0001-6227-4793, https://orcid.org/0000-0002-6066-3258*. jsanchez@pampano.unacar.mx; malopez@delfin.unacar.mx; jvillanueva@pampano.unacar.mx; macronutriente@hotmail.com*

Innovación tecnológica: Generación de conocimiento aplicado para el diseño de estrategias psicoeducativas orientadas al fortalecimiento de la inteligencia emocional, la resiliencia y el rendimiento escolar en educación básica.

Área de aplicación industrial: Sector educativo, psicopedagógico y programas de promoción de la salud y bienestar infantil.

Recibido: 18 mayo 2026
Aceptado: 29 agosto 2026

Abstract

One of the functions of education is to develop well-rounded and competent individuals capable of responding to societal demands. In Mexico, only one in three basic education students possesses minimum competencies in reading, mathematics, and science, according to the OECD (2023), with no historical improvements observed in academic performance. Scientific evidence indicates that psychological variables such as emotional intelligence and resilience favor the educational process and students' academic performance. A quantitative, non-experimental, cross-sectional study with a descriptive-correlational scope was conducted. The objective was to explore the relationship between academic performance (AP), emotional intelligence (EI), and resilience among 171 students at a public elementary school. AP was determined by grade point average; the BarOn ICE: NA emotional intelligence inventory and the School Resilience Scale were administered. The results highlight positive and statistically significant associations among the three variables. EI and resilience showed a moderate to high correlation (r = 0.52; p < 0.001), while both were positively and moderately related to AP (r = 0.45 and r = 0.40). If considered by the educational institution,

these findings regarding the association among the studied variables could contribute to the design of strategies for developing and strengthening emotional skills, thereby supporting student performance in the classroom and their overall mental health.

Keywords: Academic performance, Emotional intelligence, Resilience, Basic education.

Resumen

Una de las funciones de la educación es formar sujetos íntegros y competentes para responder a las demandas sociales. En México, sólo uno de cada tres estudiantes de educación básica cuenta con competencias mínimas en lectura, matemáticas y ciencias, sin observarse mejoras históricas en el rendimiento escolar. La evidencia científica señala que variables psicológicas como la inteligencia emocional y la resiliencia favorecen el proceso educativo y el aprovechamiento de los estudiantes en la escuela. Se realizó un estudio de enfoque cuantitativo, diseño no experimental, de tipo transversal y de alcance descriptivo-correlacional, el objetivo fue explorar la relación entre el RE, la IE y la resiliencia en 171 alumnos de una primaria pública. El RE se determinó mediante el promedio de calificaciones, se aplicó el Inventario de inteligencia emocional de Baron Ice: NA y la Escala de resiliencia escolar. Dentro de los resultados se destacan asociaciones positivas y estadísticamente significativas entre las tres variables. La IE y la resiliencia mostró una correlación de “moderada” a “alta” ($r = 0.52$; $p < 0.001$), mientras que ambas se relacionaron de manera “positiva” y “moderada” con el RE ($r = 0.45$ y $r = 0.40$). Si los resultados sobre el nivel de asociación entre las variables estudiadas en la presente investigación son tomados en cuenta por parte de la institución escolar, estos podrían contribuir al diseño de mecanismos para el desarrollo y fortalecimiento de habilidades emocionales ayudando al desempeño del alumno dentro del aula y a su salud mental en general.

Palabras clave: Rendimiento escolar, Inteligencia emocional, Resiliencia, Educación básica.

I. Introducción

Una función imprescindible de la educación escolar es la formación de sujetos íntegros capaces de responder a las demandas sociales que conducen al desarrollo de la civilización (Villareal & Zayas-Pérez, 2021)[1]. Para Torres-Zapata et al. (2024)[2] y Gust et al. (2024)[3] la eficacia del sistema educativo de un país se relaciona con el desarrollo económico y constituye una herramienta para reducir problemas sociales y mejorar el bienestar de sus ciudadanos; contrariamente, una nación con bajos índices académicos suele presentar rezago en el progreso y deficiencias en la calidad de vida. De ahí el interés de muchos gobiernos por mejorar sus políticas educativas y con ello el rendimiento escolar (RE) en sus niveles educativos (Sánchez et al., 2025)[4].

Según los resultados reportados por el Programme for International Student Assessment (PISA) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) realizada durante el 2022 en México, sólo uno de cada tres escolares pertenecientes a educación obligatoria demostró contar con el mínimo de competencias en las áreas de lectura, matemáticas y ciencias (Torres-Zapata et al. 2025)[5], colocando a este país en el lugar 35 de los 37 valorados (Palafox,

2023)[6]. En este sentido, un estudio llevado a cabo por Márquez (2017)[7] para analizar los resultados obtenidos en la misma prueba entre el 2000 y el 2015, el autor concluyó que los índices de rezago han sido similares a lo largo de los años, reiterando que el sistema educativo mexicano no ha presentado históricamente mejoras significativas en el RE de sus estudiantes, según esta evaluación internacional.

Considerando la definición más consensuada en la literatura especializada que concibe el RE como un medio que permite verificar el grado de aprendizaje adquirido por los estudiantes en las diferentes áreas del conocimiento (Resett, 2021)[8], algunos autores advierten que este constructo se ha tomado en los sistemas educativos de diferentes países como un indicador importante para conocer de modo concreto el impacto de algunas medidas estratégicas orientadas a la mejora de la calidad educativa, entre las cuales se encuentran las políticas educacionales y los modelos educativos (Pérez, 2023)[9].

Según Pérez (2023)[9] el bajo RE demostrado por las evaluaciones internacionales en estudiantes mexicanos ha generado una creciente preocupación e interés en los principales agentes educativos. En el caso de los gobernantes, se analiza la posibilidad de optimizar las políticas educacionales (Pita, 2020)[10], en cuanto al profesorado, se estima que requieren una mejora en su formación pedagógica que garantice de algún modo la transmisión del conocimiento de manera efectiva (Reza, 2022)[11]. En este mismo tenor, especialistas en temas educacionales reiteran la importancia que tiene el apoyo de los padres en el aprendizaje de sus hijos (Pilligua et al., 2024)[12], sobre todo porque durante los primeros años de vida familiar se desarrollan un conjunto de habilidades sociales, cognitivas y psicológicas, que posteriormente se ponen en funcionamiento en la escuela (Estrada-Reyes et al., 2025)[13].

Siguiendo con lo antes descrito, durante largo tiempo y casi en exclusividad el estudio del RE estuvo asociado a la capacidad intelectual [CI] (Sánchez & Pozo, 2023)[14] tras demostrar reiteradamente el valor predictivo de este factor sobre el éxito académico (Acosta et al. 2022)[15]. De acuerdo con Chávez et al. (2024)[16] las evidencias científicas han revelado que la mayoría de los estudiantes que presentan rezago en sus estudios o un RE disminuido suelen también manifestar un bajo CI. En este mismo orden de ideas, si bien las variables relacionadas con las capacidades cognitivas han demostrado en repetidas ocasiones estar fuertemente relacionadas con el desempeño académico en todos los niveles educativos, existen otros factores en el estudiantado como los emocionales y conductuales que en las últimas décadas han revelado también estar asociados al RE (Chávez & Salazar, 2024)[17].

Es relevante mencionar que algunos investigadores escolares han logrado identificar que dentro de las variables psicológicas que median el RE existen dos grupos, las que influyen negativamente y aquellas cuya incidencia es positiva (Suárez & Castro, 2022)[18], dentro de las primeras, algunas pesquisas realizadas en educación elemental han revelado que alumnos con niveles altos de ansiedad suelen presentar un menor rendimiento en la escuela (Colunga et al., 2021; Meneses et al., 2024)[19,20], en este sentido, otras investigaciones que han evaluado variables emocionales como autoestima y autoconcepto en poblaciones similares, concluyen que índices disminuidos en estos factores limita las habilidades ejecutivas y el bienestar psicológico, causando a su vez una disminución en el RE (Pérez, 2022; Gutiérrez & Martín, 2021)[21,22].

En el contexto de lo antes señalado, para Perpiñá et al. (2021)[23] dentro de los elementos subjetivos que favorecen el proceso educativo y por ende el RE de los alumnos se encuentra la inteligencia emocional (IE), constructo que ha sido descrito cómo la capacidad de identificar, reconocer, comprender y regular las emociones tanto en sí mismo como en los demás (Goleman, 2018; Zerón, 2023)[24,25]. Según Sánchez et al. (2022)[26] el adecuado manejo de las emociones contribuye significativamente en la adaptación del estudiante en la escuela, sobre todo en los grados iniciales, contribuyendo con ello a un mejor RE.

Dentro de la literatura científica encargada de determinar la relación entre la IE y el RE estudios concuerdan una correlación positiva fuerte entre las variables (Sánchez, 2021; Jacome et al., 2024; Rodríguez, 2024)[27,28,29], no obstante, algunas investigaciones como la desarrollada por Pérez et al. (2022)[30] con infantes españoles, los autores reportaron una asociación muy débil, en este mismo contexto, otras pesquisas entre ellas la emprendida por Rivas (2022)[31] y la desarrollada por Pérez et al. (2025)[32] han concluido que estas variables no son interdependientes. Para Arntz y Trunce (2019)[33] los datos sobre la correlación entre IE y el RE aún son discordantes y, por ende, controversiales, situación que permite suponer la necesidad de continuar con investigaciones al respecto.

Desde una perspectiva teórica, la relación entre la IE y el RE puede explicarse a partir del papel que desempeñan las competencias emocionales en la adaptación del estudiante a las demandas del contexto educativo. La capacidad para identificar, comprender y regular las propias emociones puede favorecer el manejo de situaciones académicas que generan tensión, frustración o presión, así como facilitar la interacción con docentes y compañeros. Estos procesos pueden contribuir a mantener una adecuada disposición hacia el aprendizaje y favorecer un desempeño académico más consistente. En este sentido, la IE puede considerarse un recurso socioemocional que, en interacción con las condiciones del entorno escolar, podría estar relacionado con el rendimiento de los estudiantes (Sánchez et al., 2022; Jacome et al., 2024)[26,28].

Por otro lado, Redondo y Martínez (2024)[34] en una revisión sobre la literatura acerca de los factores emergentes vinculados al proceso de enseñanza-aprendizaje en escolares de educación básica, el autor concluyó que la evidencia científica propone a la resiliencia como un elemento importante asociado al RE. Al respecto Saavedra y Castro (2023)[35] refieren que derivado del interés que se ha suscitado en el presente siglo sobre la resiliencia en los seres humanos, han surgido diversos modos de definirla, de tal manera que estas concepciones podrían tomarse como integrativas y no excluyentes. En el sentido más general y en el marco de las ciencias humanas, la resiliencia puede ser entendida como la capacidad de afrontar, sobreponerse y adaptarse eficazmente a las condiciones adversas a la que se está expuesto en los diferentes ámbitos biopsicosociales (Saldarriaga et al., 2022)[36].

En el contexto escolar la resiliencia es conceptualizada como la capacidad del estudiante para afrontar, imponerse y superar las adversidades que ponen en riesgo o amenazan el proceso continuo de su éxito educativo (Gutiérrez & Vera, 2023)[37]. En este sentido, las pesquisas dirigidas a analizar la relación entre la resiliencia y el RE no son del todo definitorias, aunque algunas han demostrado que el desarrollo de las habilidades de resiliencia se asocia significativamente a un mayor RE (Suárez & Castro, 2022; Valdiviezo & Rivera, 2022)[18,38], otros estudios similares como el desarrollado por Sánchez y Jiménez (2022)[26]

reportan que la asociación entre las variables no es significativa. En esta misma línea de ideas en una investigación emprendida por Hernández et al. (2024)[39] los autores reportaron no encontrar correlación, sugiriendo que ser resiliente no garantiza un buen RE.

A través de una perspectiva adaptativa, la resiliencia puede relacionarse con el RA debido a que permite al estudiante afrontar situaciones adversas y mantener recursos personales orientados hacia la consecución de sus objetivos. En el contexto educativo, la capacidad para responder de manera adaptativa ante dificultades académicas, familiares o sociales puede favorecer la continuidad de la participación escolar y la persistencia ante los desafíos del aprendizaje. Por tanto, la resiliencia podría constituir un recurso individual asociado con la capacidad del estudiante para mantener un desempeño académico adecuado aun cuando se encuentre expuesto a condiciones adversas (Suárez & Castro, 2022; Valdiviezo & Rivera, 2022)[18,38].

La IE y la resiliencia pueden entenderse como recursos socioemocionales relacionados con la adaptación del estudiante ante las demandas del contexto escolar. Mientras que la IE comprende procesos vinculados con el reconocimiento, comprensión y regulación de las emociones, la resiliencia implica recursos para afrontar y superar situaciones adversas. Ambos constructos pueden interactuar en la respuesta del estudiante ante las exigencias académicas y contribuir a la manera en que enfrenta dificultades, regula sus respuestas emocionales y mantiene su disposición hacia el aprendizaje. Desde esta perspectiva, se plantea que la IE y la resiliencia constituyen variables relacionadas entre sí y, a su vez, asociadas con el RE, configurando un marco conceptual que permite analizar conjuntamente la relación entre los tres constructos en escolares de educación primaria (Saldarriaga et al., 2022)[36].

En síntesis, las investigaciones llevadas a cabo para conocer la correlación entre las variables implicadas en la presente pesquisa han obtenido resultados discordantes, ante esta situación es importante continuar llevando a cabo trabajos que generen evidencias más contundentes, que, a la postre, contribuya a la implementación efectiva de estrategias de apoyo a la población infantil escolar (Jacome et al., 2024)[28]. En este contexto, y con el propósito de contribuir a esta falta de un resultado homogéneo, en el presente artículo se muestran los hallazgos de un estudio cuyo objetivo fue examinar la relación entre el RE, la IE y la resiliencia, en 171 escolares de una primaria pública urbana del Estado de Campeche, México. Según el sexo fueron 85 hombres y 86 mujeres, 94 pertenecientes a 5to grado y 77 a sexto, de acuerdo con la edad al momento de la recolección de datos, 111 de los escolares contaban con 10 años y 60 de ellos con 11 años.

2. Materiales y métodos

Se realizó un estudio de enfoque cuantitativo, diseño no experimental, de tipo transversal y de alcance descriptivo-correlacional, con escolares de una institución de educación primaria de tipo público, ubicada en el sureste de México. La población estuvo constituida por 190 alumnos, correspondientes a la totalidad de estudiantes inscritos en quinto y sexto grado de la institución objeto de estudio. Para llevar a cabo la selección de los participantes se empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, incluyendo a los alumnos únicamente de esos grados que decidieran colaborar. La participación fue voluntaria previa autorización del padre o tutor y del estudiante, excluyéndose aquellos que decidieron no colaborar y siendo eliminados de la investigación a los que por

algún motivo no completaron adecuadamente el proceso de recolecta de información. Después de todo lo anterior, la muestra participante en el estudio quedó constituida por 171 alumnos.

Instrumentos

a.- Rendimiento escolar

Para determinar el RE se analizaron las boletas de notas proporcionadas por la institución previa autorización de los padres o tutores de los participantes, en principio se identificó el promedio de calificaciones globales obtenidas por los escolares hasta el momento de recolección de datos, posteriormente este fue clasificado mediante las siguientes categorías: RE "excelente", puntaje entre 9.0-10.0, los estudiantes que se ubican en este rango son aquellos que han demostrado las habilidades y competencias requeridas con suma eficiencia en el grado en el que se encuentran; RE "bueno", entre 8.0-8.9, son los alumnos que han demostrado los conocimientos, habilidades, actitudes y valores requeridos con efectividad; RE "regular", entre 7.0-7.9, caracteriza a los alumnos que muestran algunas dificultades menores para demostrar los conocimientos, habilidades, actitudes y valores requeridos y un RE "suficiente", 6.0-6.9, se refiere al aprendiz que tiene los conocimientos, habilidades, actitudes y valores mínimos requeridos de acuerdo con los criterios empleados por Sánchez y Pozo (2023)[14] en escolares de educación primaria en México. Este procedimiento se seleccionó debido a su aplicación previa en población escolar mexicana y a su pertinencia para el análisis del RE como variable cuantitativa y categórica. Las calificaciones oficiales se utilizaron como indicador del desempeño académico de los participantes, al corresponder con el sistema de evaluación empleado en su contexto educativo habitual.

b.- Inventario de Inteligencia Emocional de Baron Ice:

Este instrumento se empleó para valorar la IE en los participantes, fue inicialmente estandarizado y validado por Bar-On (Bar-On, & Parker)[40] y posteriormente traducida y adaptada al castellano en su versión corta de 30 ítems por Ugarriza y Pajares (2005)[41] en Perú, es un instrumento autoadministrado que evalúa la IE en sujetos entre los 7 y 18 años, su formato de respuesta es tipo Likert de 4 puntos: "muy rara vez" =1, "rara vez" = 2, "a menudo" = 3, "muy a menudo" = 4. La calificación del instrumento para determinar el nivel de IE global es determinada por la sumatoria directa de los puntajes obtenidos en todos los reactivos, interpretándose mediante las siguientes pautas: mayor de 110 = IE "nivel alto", los infantes que alcanzan este rango de puntuación son aquellos con las capacidades para identificar sus emociones, expresarlas adecuadamente y comprenderse a sí mismos. De igual manera, los niños y niñas que obtienen estos puntajes poseen las habilidades de actualizar y llevar una vida regularmente saludable y feliz; entre 90-109 = IE "nivel medio", el alumno que puntúa en este rango presenta capacidad emocional y social adecuada; menor de 90 = IE "nivel bajo", estos infantes se caracterizan por presentar una capacidad emocional y social mal poco desarrollada, presentando dificultades relacionadas con la autoconciencia, interpersonales y desadaptativas. El tiempo estimado para su contestación es de 10 a 15 minutos. De acuerdo con Ugarriza y Pajares (2005)[41] los coeficientes de confiabilidad son bastante satisfactorios, otros estudios realizados para determinar su consistencia interna han reportado niveles de fiabilidad entre 0.60 y 0.85 de alfa de Cronbach (Parreño & Martínez, 2023; Vallejos et al, 2022)[42,43].

c.- Escala de Resiliencia Escolar

Para medir el nivel global de resiliencia, se utilizó la Escala de resiliencia escolar desarrollada y validada por Saavedra y Castro (2009)[44] en una muestra de infantes chilenos. Es un instrumento autoadministrado que puede aplicarse en sujetos de entre 9 y 14 años. Está constituido por 27 ítems con 5 alternativas de respuesta cada uno tipo Likert: muy de acuerdo = 5, de acuerdo = 4, ni de acuerdo ni en desacuerdo = 3, en desacuerdo = 2, muy en desacuerdo = 1. La calificación total se obtiene mediante la sumatoria directa, con un puntaje máximo de 135 y un mínimo de 27. Para interpretar el puntaje global obtenido, la escala cuenta con baremos que convierten el resultado global (Tabla 1). De acuerdo con Saavedra y Castro (2009)[44], el instrumento mostró una confiabilidad de 0.88 y una validez de 0.78. Como antecedente complementario, Valdez y Soto (2014)[45] reportaron resultados relacionados con resiliencia en una población mexicana distinta; esta referencia no se utiliza como evidencia principal de validación de la escala en escolares, sino únicamente como antecedente complementario de aplicación del constructo.

Tabla 1. Baremos de la escala para la interpretación del nivel de resiliencia.

Puntaje global	Resiliencia	Interpretación
Menos de 102	Muy bajo	Muy poca capacidad personal para hacer frente a los factores adversos
103-107	Bajo	Poca posibilidad para afrontar la adversidad y recuperarse de ella, acarreándoles problemas de aprendizaje
108-114	Medio	Capacidad moderada para aprender de los otros, clara definición de sí mismo y respuestas alternativas para superar adversidades escolares
115-117	Alto	Alta capacidad para resistir, recuperarse y superar exitosamente eventos académicos adversos.
Más de 118	Muy alto	Muy alta capacidad de superar exitosamente las dificultades escolares mediante el desarrollo y fortalecimiento de respuestas adaptativas efectivas.

Fuente: Saavedra y Castro (2009)[44]; Tufiño (2018)[46]; Marenco et al. (2023)[47].

Procedimiento

La investigación se desarrolló en un período comprendido entre los meses de agosto y diciembre de 2024. En agosto del 2024 se llevaron a cabo ante la administración de la institución destino los permisos correspondientes para la recolección de los datos. Durante el mes de septiembre del mismo año se efectuaron tres reuniones: la primera con la administración de la institución escolar y personal docente de 5to y 6to grado; la segunda con los padres de familia o tutores de los posibles participantes y la tercera con los escolares eventuales colaboradores. Las tres reuniones estuvieron estructuradas de la misma forma: una exposición explicativa por parte de los investigadores señalando el enfoque del estudio, alcance, tiempo de duración y el rol que tendría cada participante en las actividades diseñadas en el proyecto. En cada sesión y a cada colaborador se le hizo entrega de una carta de consentimiento informado para su firma y con ello autorizar por escrito su inclusión dentro del estudio.

En el periodo comprendido de octubre y noviembre, después de obtener todas las autorizaciones por escrito, con apoyo del personal docente se programó la aplicación de los instrumentos en el espacio del aula de clases, mediante sesiones de 40 minutos con

cada grupo participante. Para el mes de diciembre y con ayuda de la directiva de la institución se obtuvieron los Kardex académicos de los participantes para el posterior procesamiento y clasificación de los promedios de calificaciones.

Análisis de datos

Para el análisis de la información recabada se utilizó estadística descriptiva que permitió caracterizar las variables principales del estudio. Consecutivamente, se analizaron las relaciones entre el RE, la IE y la resiliencia, todas consideradas variables cuantitativas continuas. Previamente, se comprobó empleando la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk la distribución de los datos, lo que permitió definir el uso de pruebas paramétricas. Posteriormente, mediante la prueba de correlación de Pearson se determinó la fuerza y dirección de las asociaciones entre las variables, y para comparar las medias y determinar la existencia de diferencias significativas según el nivel de IE se realizó un ANOVA de un factor. El procesamiento de datos se llevó a cabo mediante el Statistical Package for the Social Sciences (SPSS), versión 21.

Antes de los análisis se realizó una revisión de la base de datos para verificar la integridad de los registros, la correspondencia entre las variables y la presencia de valores faltantes o extremos. Asimismo, se revisó la consistencia de las puntuaciones utilizadas en los análisis. Para la interpretación de las asociaciones y del análisis de varianza se consideró la naturaleza transversal del estudio y la procedencia de los participantes de grupos escolares.

Consideraciones éticas

En lo relativo a la ética de la investigación, se protegió la privacidad de los participantes manteniendo al resguardo la información obtenida. siendo empleada solamente con fines de investigación. No se recopilaron datos que permitieran identificar a los estudiantes. El protocolo del estudio fue valorado y aprobado en la Comisión de Ética del Cuerpo Académico “Nutrición Aplicada y Educación” (Folio PI-011-2024/II).

III. Resultados y discusión

3.1 Resultados

Al analizar los datos sobre el RE (Tabla 2) se observó que la población estudiada obtuvo una media general de 8.31 puntos, con la mayoría de los valores concentrados en el nivel de “bueno”, seguida de “excelente”. La dispersión de los datos fue “baja”, como lo indica la desviación estándar de 0.91, y aún menor dentro de cada categoría. La asimetría negativa del conjunto total (-0.39) sugiere una ligera inclinación hacia calificaciones más altas, mientras que la categoría “excelente” presentó asimetría positiva (0.54), lo que refleja una mayor concentración de valores en la parte baja de su rango. La curtosis negativa en todas las categorías indica una distribución más aplanada, con pocos valores extremos.

En general, en cuanto al RE los resultados revelan que la mayor parte de los examinados se ubicaron en un RA en niveles de “bueno” y “excelente”, con baja variabilidad y una distribución estable, lo que refleja un desempeño académico favorable y consistente con los criterios institucionales de acreditación. Los resultados descritos indican que la mayoría de los estudiantes que participaron en el estudio han demostrado adquirir los conocimientos, habilidades, actitudes y valores requeridos en su formación escolar, demostrando con ello resultados satisfactorios en su aprovechamiento dentro de la escuela.

Tabla 2. Resultados descriptivos sobre el RE.

Nivel de RE	Media	DE	Asimetría	Curtosis	n (%)
Suficiente (6–6.9)	6.40	0.23	0.15	-0.43	12 (7%)
Regular (7–7.9)	7.39	0.26	-0.10	-1.12	36 (21%)
Bueno (8–8.9)	8.35	0.27	0.10	-1.28	73 (43%)
Excelente (9–10)	9.36	0.29	0.54	-0.63	50 (29%)
Total	8.31	0.91	-0.39	-0.40	171 (100%)

Fuente: Elaboración propia a partir de los Kardex de los participantes.

En el proceso de análisis en los resultados sobre la IE (Tabla 3), se observa un promedio general de 110.70, lo que indica una tendencia hacia el nivel "alto". En este sentido, la media más baja correspondió a los estudiantes con nivel "bajo" (80.35), mientras que la más alta se registró en el grupo con IE de nivel "alto" (121.03). La dispersión fue mayor en nivel "bajo" (DE = 11.73) y menor en el nivel "medio" (DE = 6.01), lo que sugiere mayor heterogeneidad entre quienes presentan una IE con índice "bajo". La asimetría negativa en los niveles "bajo" y "medio" (-1.72 y -0.22, respectivamente) indica concentración de valores en el extremo superior del rango, mientras que la asimetría positiva en nivel de "alto" (0.32) sugiere mayor presencia de puntajes en el límite inferior.

En términos generales, un 59% (n = 101) de los participantes mostró un nivel de IE "alto", un 31% (n = 53) se ubicó en el nivel "medio" y el 10% (n = 17) con un índice de IE "bajo", lo que evidencia un predominio de competencias emocionales favorables en la muestra, lo que sugiere que la mayor parte de los participantes cuentan con las capacidades para el reconocimiento y expresión de sus emociones, que les permite enfrentar adecuadamente las circunstancias y situaciones de la vida cotidiana.

Tabla 3. Resultados descriptivos de IE.

Nivel de IE	Media	DE	Asimetría	Curtosis	*f* (%)
IE bajo (<90)	80.35	11.73	-1.72	1.70	17 (10.00%)
IE medio (90–109)	100.75	6.01	-0.22	-1.37	53 (31.00%)
IE alto (>110)	121.03	6.40	0.32	-0.59	101 (59.00%)
Total	110.70	15.31	-0.96	1.25	171 (100.00%)

Fuente: Elaboración propia a partir de resultado del instrumento Baron Ice: NA (Ugarriza & Pajares, 2005).

Respecto a la resiliencia, al analizar los resultados se identificó una media general de 110.70, con una tendencia predominante hacia el nivel medio-alto (Tabla 4). La mayor proporción de estudiantes se ubicó en los niveles "alto" y "muy alto" (49% en conjunto), mientras que solo un 37% presentó niveles de muy bajo o bajo. La dispersión fue más amplia en los niveles extremos "muy bajo" y "muy alto", lo que evidencia mayor variabilidad en estos grupos. La curtosis y la asimetría mostraron valores heterogéneos según el nivel, destacando que los índices de "medio" y "alto" presentaron distribuciones más equilibradas y homogéneas. En conjunto, los resultados reflejan que la mayoría de los estudiantes poseen una sólida capacidad de afrontamiento ante las dificultades académicas y sociales.

Tabla 4. Resultados descriptivos de resiliencia escolar

Nivel de resiliencia	Media	DE	Asimetría	Curtosis	F (%)
Muy bajo (<102)	90.0	10.7	-2.0	4.8	45 (26.00)
Bajo (103–107)	105.3	1.4	-0.5	-0.9	18 (11.00)
Medio (108–114)	111.2	2.1	0.0	-1.5	24 (14.00)
Alto (115–117)	116.1	0.8	-0.1	-1.2	16 (9.00)
Muy alto (>118)	124.4	4.8	0.6	-0.5	68 (40.00)
Total	110.70	15.30	-1.00	1.20	171 (100.00)

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del instrumento RE de Saavedra y Castro (2009).

La distribución de las puntuaciones globales de las principales variables cuantitativas se presenta en la Figura 1. Los diagramas de caja permiten complementar los estadísticos descriptivos mediante la representación de la mediana, el rango intercuartílico, la dispersión de las puntuaciones y la presencia de posibles valores atípicos en el rendimiento escolar, la inteligencia emocional y la resiliencia escolar.

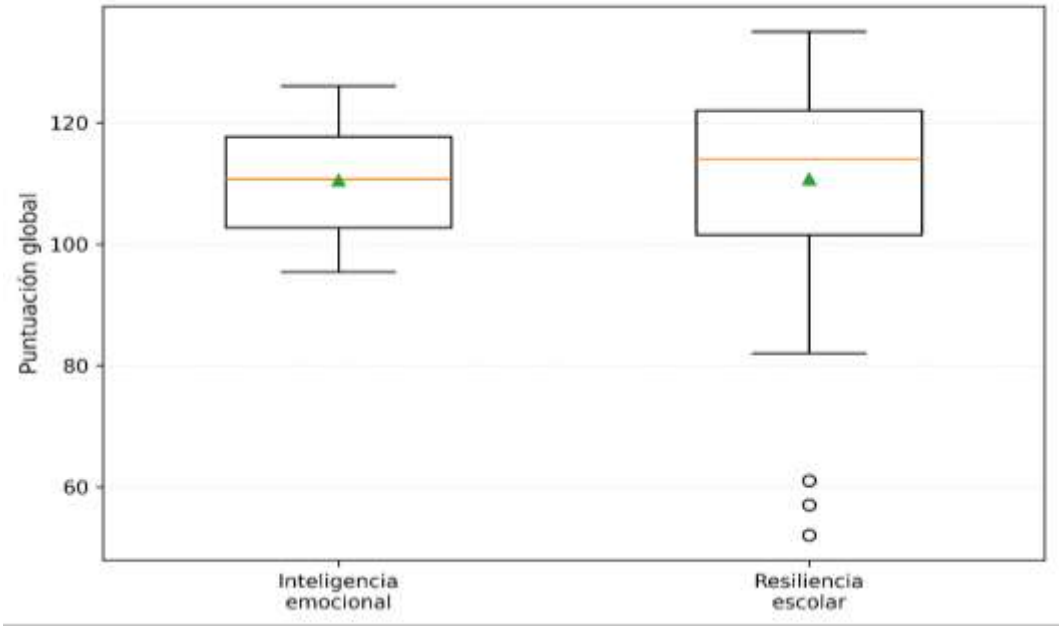


Figura 1. Distribución de las puntuaciones de inteligencia emocional y resiliencia escolar.

El análisis de las variables del estudio en sus puntuaciones globales mediante la correlación de Pearson (Tabla 5) reveló asociaciones positivas y estadísticamente significativas entre las tres. La IE y la resiliencia mostraron una correlación de moderada a alta ($r = 0.52$; $p < 0.001$), mientras que ambas se relacionaron de manera positiva y moderada con el RE ($r = 0.45$ y $r = 0.40$, respectivamente). Estos resultados indican que mayores puntuaciones de IE y resiliencia se asociaron con mayores puntuaciones de RE en los participantes del estudio.

Tabla 5. Matriz de correlaciones de Pearson.

Variables	r	p	Tipo de relación
RE-IE	0.45	< 0.001	Positiva moderada
RE- Resiliencia	0.40	0.001	Positiva moderada
IE - Resiliencia	0.52	< 0.001	Positiva moderada–alta

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de los instrumentos.

El análisis de correlación de Pearson mostró las asociaciones entre rendimiento escolar, inteligencia emocional y resiliencia escolar. Los coeficientes de correlación y sus niveles de significancia se presentan en la Tabla 5.

Para complementar estos resultados, se incorporaron gráficos de dispersión que permiten visualizar la dirección y el comportamiento de las asociaciones entre las variables analizadas (Figuras 2, 3 y 4).

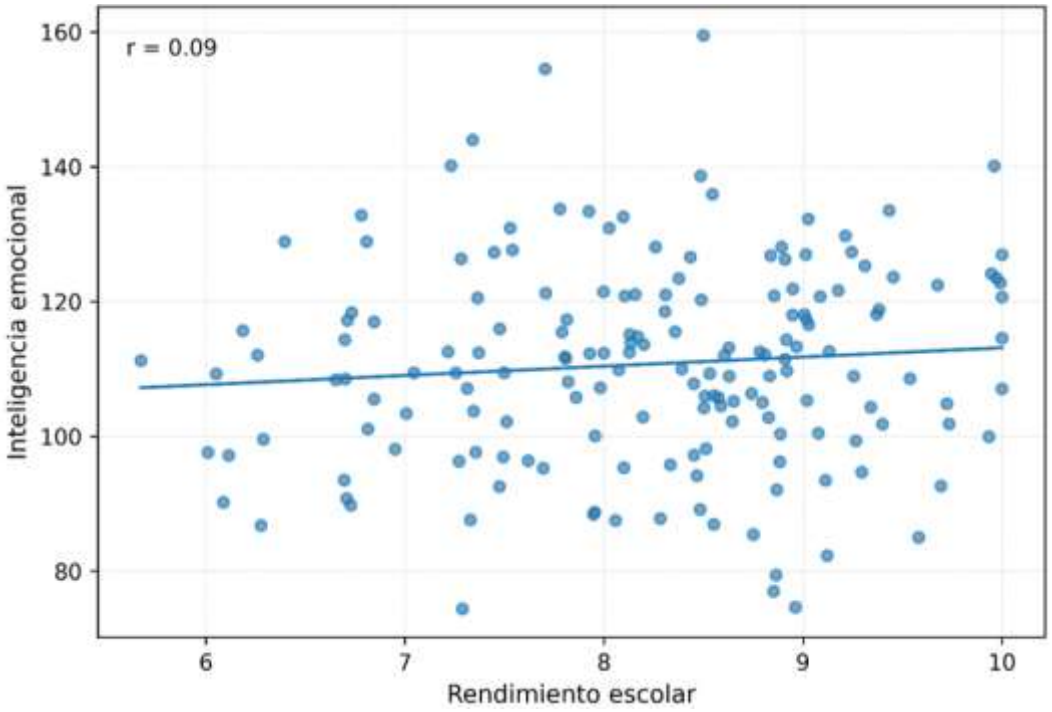


Figura 2. Relación entre en RE e IE.

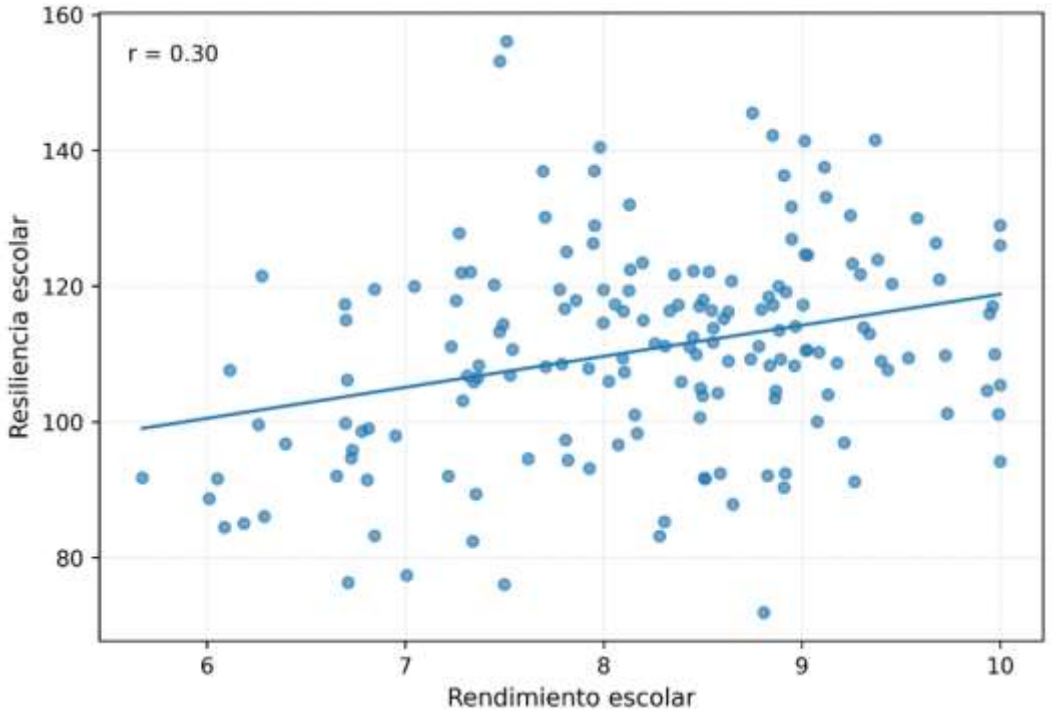


Figura 3. Relación entre el RE y RE.

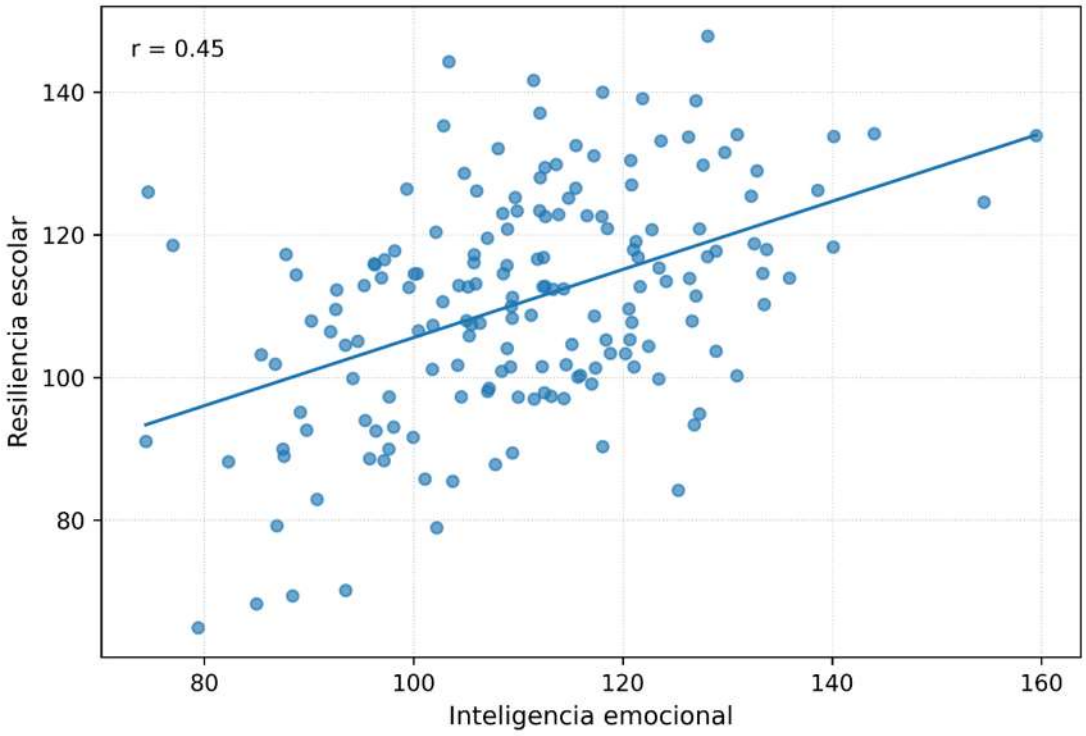


Figura 4. Relación entre IE y RE.

La prueba de ANOVA de un factor mostró diferencias estadísticamente significativas en el RE según el nivel de IE, F (2,168) = 8.19, $p < 0.001$. Los estudiantes con un nivel alto de IE presentaron la mayor puntuación media de RE (M = 8.65, DE = 0.82), seguidos de aquellos con un nivel medio (M = 8.25, DE = 0.79) y bajo (M = 7.92, DE = 0.88). En conjunto, estos resultados muestran una tendencia ascendente en las puntuaciones medias de RE conforme aumenta el nivel de IE.

3.2 Discusión

Al analizar los datos obtenidos sobre el nivel de RE en los participantes se determinó que la mayoría se ubicó en los niveles de "bueno" y "excelente", lo que sugiere que la mayor parte de los estudiantes han demostrado contar de modo eficaz con los conocimientos, habilidades, actitudes y valores requeridos para su grado escolar. Estos resultados concuerdan con los reportados por Resett (2021)[8] que, al llevar a cabo una investigación en una muestra de 82 niños de una escuela primaria privada en Argentina, reportó que en promedio las calificaciones se ubicaron en índices categorizados como "muy bueno". Otro estudio realizado en México por Sánchez y Guerra (2024)[48] también reportó datos similares al de la presente investigación. Contrariamente los hallazgos reportados por Jiménez (2024)[49] en estudiantes peruanos y por Sánchez y Zacarias (2024)[50] en estudiantes mexicanos resultaron ser porcentualmente menores al encontrado en la actual pesquisa.

Si bien, los resultados sobre el RE obtenidos en la presente investigación difieren con los datos reportados históricamente por la evaluación PISA implementada por la OCDE y con lo referido recientemente por Sánchez y Guerra, (2024)[48] y Palafox (2023)[6] en estudios similares, es necesario advertir que esta discrepancia entre resultados deberían tomarse con cautela, toda vez que a diferencia de la prueba PISA que valora la capacidad de

un alumno para movilizar y aplicar sus competencias en distintos contextos, el RE medido en esta investigación fue mediante las notas académicas, las cuales por definición reflejan el grado de aprendizaje adquirido por los estudiantes en las diferentes áreas del conocimiento en un nivel escolar específico (Resett, 2021)[8].

Al examinar los resultados de la IE en la presente investigación estos revelaron que el 59.00% de la población se ubicó en la categoría de "alto" coincidiendo con los descubrimientos reportados por Moya et al. (2024)[51] quienes al evaluar a un grupo de 31 escolares ecuatorianos de educación elemental identificaron porcentajes muy cercanos. Otro estudio realizado por Valenzuela y Portillo (2018)[52] en una población similar, pero de Sonora, México, los autores valoraron tres elementos constituyentes de la IE en 58 estudiantes, encontrando que en todos los componentes alcanzaron porcentajes significativos, en percepción emocional un 58.18%, en comprensión emocional un 56.91% y en regulación emocional un 56.69%. Los datos anteriores fueron similares a los reportados por Godoy y Moreno (2021)[53] tras valorar las mismas tres dimensiones de la IE en una población conformada por 450 estudiantes chilenos.

Las evidencias sobre IE encontrado en la presente pesquisa contrarían los datos del estudio realizado por Rivas (2022)[31] en 48 estudiantes peruanos, el autor reportó que solo 4.2% de los alumnos valorados presentó un nivel "alto" de IE, mientras que el nivel "medio" alcanzó el mayor porcentaje, con 91.7%, mientras que en la presente investigación en este nivel se situó un 31.00% de los participantes. Como se señaló anteriormente, los antecedentes sobre los niveles de IE en escolares de educación básica han mostrado resultados diversos, con mayores porcentajes concentrados generalmente entre los niveles medio y alto. Estos hallazgos respaldan la importancia de continuar estudiando las características socioemocionales de los escolares y su relación con el desempeño académico, sin asumir efectos causales (Roa, 2025)[54].

En lo que respecta a los resultados obtenidos sobre la resiliencia en los participantes, aunque un 40% se sitúo en los niveles de "muy alto", un 37.0% se ubicó entre los niveles de "muy bajo" y "bajo", este último dato resulta ligeramente mayor con los reportados por Estrada et al. (2022)[55] quienes al evaluar a 142 estudiantes peruanos los autores determinaron que un 26.0% de ellos presentaron resiliencia en los mismos niveles de "bajo". Otro estudio realizado en este mismo país amazónico y que discrepa con los de la presente pesquisa fue el realizado por Manrique (2025)[56] quien al valorar a un grupo de 72 alumnos encontró que solo un 12.3% reportó resiliencia en esta categoría, descubrimiento que había sido confirmado previamente por Farfán et al. (2023)[57] quienes al evaluar a 80 alumnos también residentes de Perú reportaron que únicamente un 8.7% se ubicó en nivel "bajo". Según Marenco et al. (2023)[47] los estudiantes que puntúan en estas categorías suelen presentar serias dificultades para afrontar las adversidades propias de las situaciones escolares, así como, mínimas capacidades de contrarrestar sus efectos adversos, condiciones que en muchos casos contribuye a un RE con nivel bajo.

Al explorar la relación entre el RA y la IE en la presente investigación se determinó la existencia de una correlación significativa de tipo "positiva moderada" este dato coincide con otros estudios realizados en poblaciones similares en: México (Valenzuela & Portillo, 2018 y Sánchez, 2021)[52,27]; Ecuador (Cholango & Guerrero, 2024; Jacome et al., 2024)[58,28]; Perú (Pariona & Porta, 2019)[59]. Por el contrario, entre los estudios que han reportado asociaciones muy débiles entre

estas dos variables tenemos: en España (Fontanillas-Moneo et al., 2022)[60]; en Perú (Rivas, 2022)[31] y en Bolivia (Caba & Guarachi, 2023)[61].

La asociación positiva observada entre la IE y el RE coincide con lo reportado en estudiantes españoles por Perpiñá et al. (2021)[23] y con los de Caba y Guarachi (2023)[61] en alumnos bolivianos. No obstante, las comparaciones deben realizarse con cautela debido a las diferencias en las características de las muestras, los instrumentos empleados y los procedimientos utilizados para valorar el rendimiento académico y la IE. Por tanto, la coincidencia de los resultados respalda la existencia de una asociación entre ambas variables en población escolar, aunque las diferencias metodológicas impiden asumir que los resultados sean directamente equivalentes.

La evidencia científica sobre la relación entre IE y RE no es uniforme en todas las poblaciones. Aunque diversos estudios muestran una asociación entre ambas variables, la magnitud y significancia de estas relaciones pueden variar según las características de la población, el contexto educativo y los instrumentos utilizados. Estas diferencias metodológicas y contextuales deben considerarse al interpretar los resultados del presente estudio.

Al analizar la relación entre el RE y la resiliencia se observó una relación positiva moderada entre las variables, coincidiendo con los datos reportados en otros estudios como el realizado por Suárez y Castro (2022)[18] en escolares chilenos y con el de Boman (2022)[62] llevado a cabo en diversas poblaciones asiáticas. Sin embargo, difieren ligeramente con los hallazgos de Baldeón (2022)[63] quienes reportaron correlaciones muy bajas entre estas dos variables en alumnos peruanos. Por su parte, Hernández et al. (2024)[39] en un estudio realizado en estudiantes panameños no encontraron diferencias significativas contrariando por completo los datos encontrados en la presente pesquisa.

La asociación positiva entre RE y resiliencia encontrada en el presente estudio deben interpretarse considerando las diferencias metodológicas entre ambos estudios, particularmente en las características de las poblaciones, los instrumentos utilizados para valorar la resiliencia y los indicadores empleados para representar el RE. En este sentido, aunque los resultados presentan una dirección semejante, las diferencias en el contexto y en los procedimientos de medición aconsejan interpretar la magnitud de las asociaciones con cautela. Dicho lo anterior, las investigaciones sobre la asociación entre RE y resiliencia no muestran resultados uniformes, lo que sugiere que esta relación podría estar vinculada con características familiares y situaciones escolares específicas, tal como señalan Redondo y Martínez (2024)[34].

Así mismo, los resultados obtenidos en la presente pesquisa sobre la relación entre IE y resiliencia, fueron los de mayor significancia, ubicándose en el nivel de moderada alta, coincidiendo con los datos reportados en otros estudios (Rubiños-Vizcarra et al., 2021; Lugo, 2020)[64,65] ambas investigaciones en alumnos peruanos y el realizado por Quevedo y de la Peña (2018)[66] en estudiantes colombianos. Dicho esto, se confirma que la mayor parte de las investigaciones en estudiantes de primaria coinciden en la correlación entre IE y Resiliencia, no obstante, la población de educación básica ha sido el menos explorada en comparación con los niveles de bachillerato y universitario (Fernández, 2020)[67].

La relación positiva observada entre IE y resiliencia también encuentra respaldo en investigaciones realizadas con población

escolar. Rubiños-Vizcarra et al. (2021)[64] analizaron ambas variables en estudiantes de educación primaria, proporcionando un antecedente directamente relacionado con los constructos estudiados en la presente investigación. No obstante, la comparación de los resultados debe considerar las posibles diferencias en las características de los participantes, los instrumentos de medición y las condiciones de aplicación. En consecuencia, la asociación identificada en este estudio puede interpretarse como evidencia de una relación entre ambos recursos socioemocionales en escolares de quinto y sexto grado, sin establecer una relación causal entre ellos.

Limitaciones del estudio

El estudio presenta como limitación el empleo de un muestreo intencional y la participación de escolares pertenecientes a una sola institución pública de educación primaria, específicamente de los grados quinto y sexto. La recolección de información se realizó durante el periodo de septiembre a diciembre de 2024, por lo que los resultados representan las características y condiciones de la población estudiada durante dicho periodo y no permiten establecer conclusiones sobre la evolución del RE, la IE y la resiliencia a lo largo de un ciclo escolar completo.

Asimismo, la muestra no fue diseñada para representar a la población escolar del Estado de Campeche, por lo que los hallazgos deben interpretarse dentro del contexto de la institución participante. Se recomienda que futuras investigaciones incorporen muestras probabilísticas, mayor diversidad de instituciones y periodos de seguimiento más amplios que permitan valorar la estabilidad de las variables estudiadas a lo largo del ciclo escolar. Su diseño no experimental y de corte transversal limita establecer relaciones causales o direccionalidad temporal entre las variables analizadas. Se sugiere que se lleven a cabo investigaciones futuras a gran escala, en poblaciones de contextos distintos.

Por otro lado, no se incorporaron otras variables psicosociales relevantes o condiciones contextuales, que podrían estar asociadas con los resultados obtenidos. Asimismo, no se estimó de manera específica la confiabilidad interna de los instrumentos en la muestra estudiada; por ello, las propiedades psicométricas consideradas corresponden a los antecedentes reportados para las versiones utilizadas. Investigaciones posteriores deberán estimar la confiabilidad de los instrumentos en muestras escolares mexicanas con características semejantes.

Asimismo, debido a las características de la población estudiada y al contexto específico en el que se desarrolló la investigación, los resultados deben interpretarse dentro del ámbito de la educación primaria y no extrapolarse directamente a contextos industriales o productivos. Su principal utilidad se relaciona con el ámbito educativo, donde los hallazgos pueden contribuir al diseño y fortalecimiento de estrategias orientadas al desarrollo de competencias socioemocionales, resiliencia y RE.

Por tanto, debido a que los participantes pertenecían a grupos escolares, las observaciones podrían presentar cierto grado de dependencia intragrupo. En el presente estudio no se realizó un modelo multinivel ni un ajuste estadístico específico por aula o clúster; por ello, esta condición debe considerarse una limitación y ser atendida en investigaciones posteriores mediante procedimientos que permitan estimar y controlar el efecto de agrupamiento.

Aunque los resultados presentan utilidad potencial para el ámbito psicopedagógico, el presente estudio no contempló el diseño, implementación ni validación de una

estrategia o protocolo de intervención. En consecuencia, los resultados deben considerarse como evidencia diagnóstica y asociativa que puede orientar el desarrollo posterior de estrategias dirigidas al fortalecimiento de la IE y la resiliencia en escolares, cuya eficacia deberá ser evaluada mediante investigaciones de intervención.

VI. Conclusiones

Derivado de los resultados obtenidos en la presente investigación, se identificaron asociaciones positivas y estadísticamente significativas entre el RE, la IE y la resiliencia. La IE y la resiliencia mostraron asociaciones positivas con el RE, mientras que ambas variables también presentaron una asociación positiva entre sí. En lo que respecta a la relación entre resiliencia y RE, los estudios previos no han mostrado resultados comunes ni consensuados, lo que indica la necesidad de continuar desarrollando investigaciones en diferentes poblaciones y a mayor escala. Es importante destacar que, de acuerdo con la revisión de la literatura llevada a cabo para la presente investigación, en México no se encontraron estudios similares después de la pandemia por COVID-19 que midieran la correlación entre la IE y la resiliencia.

Los resultados alcanzados en el presente estudio reiteran la importancia de continuar generando evidencia científica sobre estas variables y sobre su relación con el RE y otros factores asociados al RE. En este sentido, los hallazgos pueden aportar información útil para orientar futuras estrategias psicopedagógicas dirigidas al desarrollo de habilidades socioemocionales; sin embargo, la eficacia de dichas estrategias deberá ser evaluada mediante estudios de intervención, ya que el presente diseño transversal no permite establecer relaciones causales.

V. Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección General de Investigación y postgrado de la Universidad Autónoma del Carmen.

VI. Referencias bibliográficas

1. Villareal, E., & Zayas-Pérez, F. (2021). Desarrollo humano y Educación: una perspectiva de la educación enfocada al desarrollo humano. *Vértice universitario, 23*(90), 28-39. https://doi.org/10.36792/rvu.vi90.31

2. Torres-Zapata, Á., Acuña-Lara, J., Rivera-Domínguez, J., & Brito-Cruz, T. (2024). Transición de la educación presencial a online: Explorando su influencia en la deserción escolar. RIIIT Divulgación, *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica.* https://riiit.com.mx/apps/site/idem.php?

3. Gust, S., Hanushek, E., & Woessmann, L. (2024). Global universal basic skills: Current deficits and implications for world development. *Journal of Development Economics, 166,* https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2023.103205

4. Sánchez, J., Telumbre, J. Hernández, A. & Torres, A. (2025). Factores psicológicos y su relación con rendimiento escolar en educación primaria. *Interdisciplinaria, Revista de psicología y ciencias afines, 42*(2), 640-662. https://doi.org/10.16888/interd.2025.42.2.30

5. Torres-Zapata, Á., Sánchez-Domínguez, J., & Brito-Cruz, T. (2025). Conductas disruptivas, reprobación y rendimiento escolar en adolescentes del nivel medio superior. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH, 16,* e2584. https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v16i0.2584

6. Palafox, J. (2023). PISA 2022 “PISA 2000, 2018 y 2022. Origen, prepandemia y postpandemia”. *Voces De La educación, 8*(16), 216–267. https://www.revista.vocesdelaeducacion.com.mx/index.php/voces/article/view/720

7. Márquez, A. (2017). A 15 años de PISA: resultados y polémicas. Perfiles educativos, 39(156), 3-15. https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2017.156.58280

8. Resett, S. (2021). Relación entre la atención y el rendimiento escolar en niños y adolescentes. *Revista costarricense de psicología, 40*(1), 3–22. https://doi.org/10.22544/rcps.v40i01.01

9. Pérez, H. (2023). Evaluación por Competencias, Rendimiento Escolar y Calidad Educativa: una Revisión desde sus Fundamentos Teóricos. *Ciencia Latina, 7*(4), 5038-5061. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7329

10. Pita, B. (2020). Políticas Públicas y Gestión Educativa. *Civilizar, 20*(39), 139–152. https://doi.org/10.22518/jour.ccsh/2020.2a09

11. Reza, R. (2022). El Impacto de la Actuación Docente en el Rendimiento Escolar: Mirada del Profesorado de Química. *Ciencia Latina, 6*(6), 14276-14291. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.9947

12. Pilligua, J., Ramos, O., Suárez, B., Yánez, J., & Zambrano, N. (2024). El Entorno Familiar y su Influencia en el Rendimiento Escolar de los Estudiantes. *Estudios y Perspectivas 4*(1), 1060–1088. https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i1.147

13. Estrada-Reyes, C., Pérez-Jaimes, A., Brito-Cruz, T., & Torres-Zapata, Á. (2025). Redes sociales y estado nutricional: Un estudio en niños en edad escolar. *RIIIT Divulgación, Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica.* https://riiit.com.mx/apps/site/idem.php?module=Catalog&action=ViewItem&id=6216&item_id=85675

14. Sánchez, J., & Pozo, M. (2023). Capacidad intelectual, visomotricidad y emociones en escolares de primaria con Bajo rendimiento. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores, 10*(2), 1-20. https://doi.org/10.46377/dilemas.v2i10.3542

15. Acosta, A., Mejía, W., & González, A. (2022). IQ and academic performance in a group of first semester psychology students. *Pensamiento Americano, 15*(29), 153-167. https://doi.org/10.21803/penamer.15.29.450

16. Chávez, B., Grimaldo, E., Castillo, A., & Rodríguez, I. (2024). Perfil cognitivo de estudiantes con bajo rendimiento intelectual. Asociaciones entre inteligencia y creatividad. *Actualidades investigativas en educación, 24*(1), 1–25. https://doi.org/10.15517/aie.v24i1.55592

17. Chávez, A., & Salazar, G. (2024). Relación entre inteligencia emocional y rendimiento académico en adolescentes: aportes para la práctica educativa. *Revista Caribeña de Investigación Educativa, 8*(1), 145–165. https://doi.org/10.32541/recie.2024.v8i1.pp145-165

18. Suárez, X., & Castro, N. (2022). Competencias socioemocionales y resiliencia de estudiantes de escuelas vulnerables y su relación con el rendimiento académico. *Revista de Psicología, 40*(2), 879-904. https://doi.org/10.18800/psico.202202.009

19. Colunga, C., Ángel, M., Vázquez, J., Vázquez, C. & Colunga, B. (2021). Relación entre ansiedad y rendimiento académico en alumnado de secundaria. *Revista de estudios e investigación en psicología y educación, 8*(2), 229-241. https://doi.org/10.17979/reipe.2021.8.2.8457

20. Meneses, K., Yánez, A., Carranza, C., & Zevallos, D. (2024). La relación entre ansiedad y rendimiento académico en los estudiantes ecuatorianos de 15 años. *Pensamiento Educativo, 61*(1), 1–14. https://doi.org/10.7764/PEL.61.1.2024.6

21. Pérez, K. (2022). Influencia del estado emocional en el bajo rendimiento académico de los adolescentes. *Revista Estudios Psicológicos, 2*(3), 7-21. https://doi.org/10.35622/j.rep.2022.03.001

22. Gutiérrez, P., & Martín, J. (2021). Implicaciones de la autoestima y el autoconcepto en el bienestar psicológico de los adolescentes españoles. *MLS Psychology Research, 4*(2). 53-69. https://doi.org/10.33000/mlspr.v4i2.668

23. Perpiñá, G., Sidera, F., & Serrat, E. (2021). Rendimiento académico en educación primaria: relaciones con la Inteligencia Emocional y las Habilidades Sociales. *Revista de Educación*, 395 (1): 291-319. https://recyt.fecyt.es/index.php/Redu/article/view/90454

24. Goleman, D. (2018). Inteligencia emocional. Madrid. Kairós.

25. Zerón, A. (2023). Inteligencia artificial, inteligencia emocional e inteligencia intestinal. Revisita ADM, 80(3), 126–128. https://doi.org/10.35366/111428

26. Sánchez, J, & Jiménez, M. (2022). Evaluación de las habilidades básicas del desarrollo en educación preescolar. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores, 10* (1), 1-22. https://doi.org/10.46377/dilemas.v10i1.3249

27. Sánchez, E. (2021). Adicción a internet, resiliencia y rendimiento escolar en adolescentes de Pucallpa. *Revista Psicológica Herediana, 14*(1), 1–11. https://doi.org/10.20453/rph.v14i1.4028

28. Jacome, S., Santander, M., Muñóz, K., Ramírez, M., Monard, C., & Vaca, G. (2024). El impacto de la inteligencia emocional en el rendimiento académico de los estudiantes de educación básica. *South Florida Journal of Development, 5*(11), 1-23. https://doi.org/10.46932/sfjdv5n11-013

29. Rodríguez, J. (2024). Inteligencia Emocional como Factor Determinante en el Rendimiento Académico en Estudiantes. *Revista Tecnológica-Educativa Docentes 2.0, 17*(1), 400-411. https://doi.org/10.37843/rted.v17i1.496

30. Pérez, A., Torres, Á., Lara, C., Estrada, C., Brito, T., & Sánchez, M. (2022). Inteligencia emocional y rendimiento académico en estudiantes universitarios. Estado actual del conocimiento. *RECUS: Revista Electrónica Cooperación Universidad Sociedad, 7*(3), 19–25. https://doi.org/10.33936/recus.v7i3.3470

31. Rivas, C. (2022). Inteligencia emocional y rendimiento escolar en estudiantes de nivel primaria de una institución educativa del distrito Gorgor (Tesis de maestría). Universidad Cesar Vallejo. https://hdl.handle.net/20.500.12692/98603

32. Pérez, M., Castro, M., Gamarra, M., & Chacón, R. (2025). ¿Se asocia el autoconcepto y la inteligencia emocional con los hábitos saludables y el rendimiento escolar?: Un modelo estructural según sexo. *Revista de Investigación Educativa, 43,* 1-19. https://doi.org/10.6018/rie.590051

33. Arntz, J. & Trunce, S. (2019). Inteligencia emocional y rendimiento académico en estudiantes universitarios de nutrición. *Investigación en educación médica, 8*(31), 82-91. https://doi.org/10.22201/facmed.20075057e.2019.31.18130

34. Redondo, V., & Martínez, F. (2024). Revisión sistemática sobre la relación

resiliencia-rendimiento académico del alumnado en educación obligatoria: análisis de evaluaciones a gran escala. *Aula Abierta, 53(*1), 37–45. https://doi.org/10.17811/rifie.20419

35. Saavedra, E., & Castro, A. (2023). Métodos para evaluar la resiliencia en niños, niñas, jóvenes y adultos: herramientas para la investigación en Educación y Resiliencia. *Revista Iberoamericana ConCiencia, 8*(Especial), 77-90. https://doi.org/10.32654/ConCiencia/eds.especial-5

36. Saldarriaga, O., Ledesma, M., Malpartida, J., & Diaz, J. (2022). Resiliencia docente en las escuelas públicas de Lima Metropolitana – Perú. *Revista De Ciencias Sociales, 28*(1), 261-274. https://doi.org/10.31876/rcs.v28i1.37690

37. Gutiérrez, J. & Vera, J. (2023). Resiliencia académica de adolescentes, factores asociados y metodología empleada: una revisión sistemática. *Rastros, 25*(1), 1-29. https://doi.org/10.16925/2382-4921.2023.01.04

38. Valdiviezo, M., & Rivera, J. (2022). La inteligencia emocional en la educación, una revisión sistemática en América Latina y el Caribe. *Revista peruana de investigación e innovación educativa, 2*(2), 1-10. https://doi.org/10.15381/rpiiedu.v2i2.22931

39. Hernández, M., Sanjur, A., & Montes, N. (2024). Resiliencia y rendimiento académico en estudiantes de Educación Básica General. *Revista Ecuatoriana de Psicología, 7*(18), 114–124. https://doi.org/10.33996/repsi.v7i18.113

40. Bar-On, R., & Parker, J. (2018). EQ-i:YV. Inventario de inteligencia emocional de BarOn: Versión para jóvenes (R. Bermejo García, C. Ferrándiz García, M. Ferrando Prieto, M. D. Prieto Sánchez, & M. Sáinz Gómez, adaptadoras). TEA Ediciones.

41. Ugarriza, N., & Pajares, L. (2005). La evaluación de la inteligencia emocional a través del inventario de BarOn ICE: NA, en una muestra de niños y adolescentes. *Persona, 8,* 11-58. https://doi.org/10.26439/persona2005.n008.893

42. Parreño, M., & Martínez, A. (2023). Inteligencia emocional y adaptación conductual en adolescentes de acogimiento institucional y apoyo escolar: estudio comparado. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades, 21,* 124-139. https://doi.org/10.37135/chk.002.21.08

43. Vallejos, J., Rosario, F., Cárdenas, R., Cuenca, N., Dioses, J., & Jaimes, C. (2022). Inteligencia emocional Propuesta de una versión abreviada del Inventario de Inteligencia Emocional Bar-On: NA-29. Lima: Universidad Cesar vallejo.

44. Saavedra, E. & Castro, A. (2009). Escala de Resiliencia Escolar. Santiago, Chile: CEANIM.

45. Valdez, A., & Soto, M. (2014). Resilience among siblings of a disabled patient. *Rev Mex Med Fis Rehab, 26*(1),18-23.

46. Tufiño, E. (2018). Funcionamiento familiar, resiliencia escolar y ansiedad ante el examen en estudiantes de una institución educativa privada de San Juan de Lurigancho (Tesis de maestría). Universidad Nacional Federico Villareal. https://hdl.handle.net/20.500.13084/2785

47. Marenco, A., Cervantes, D., & Rambal, L. (2023). Perfiles de resiliencia asociados al engagement académico y al apoyo social en estudiantes universitarios. *Interdisciplinaria Revista de Psicología y Ciencias Afines, 40*(2). 231-243. https://doi.org/10.16888/interd.2023.40.2.14

48. Sánchez, J. & Guerra, A. (2024). Desorden de Integración Sensorial y Rendimiento escolar en educación primaria.

Dilemas contemporáneos: educación, política y valores. 12 (1), 1-22. https://doi.org/10.46377/dilemas.v12i.4394

49. Jiménez, K. (2024). Evaluación de la relación parental y el rendimiento escolar en niños de primaria. *Universidad, Ciencia y Tecnología, 28*(esp.), 49-57. https://doi.org/10.47460/uct.v28ispecial.771

50 Sánchez, J., & Zacarias, J. (2024). Madurez en lectoescritura y rendimiento escolar en alumnos de primer grado de primaria. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 12 (1), 1-21. https://doi.org/10.46377/dilemas.v12i.4401

51. Moya, E., Jara, R., Jara, S., Jara, M., & Betancourt, O. (2024). La Influencia de la Inteligencia Emocional en el Rendimiento Académico en Estudiantes de Educación Básica. C*iencia Latina, 8*(4), 6685-6698. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12860

52. Valenzuela, A., & Portillo, S. (2018). La inteligencia emocional en educación primaria y su relación con el rendimiento académico. *Revista Electrónica Educare, 22*(3), 228-242. https://dx.doi.org/10.15359/ree.22-3.11

53 Godoy, I., & Moreno, M. (2021). Estudio sobre la inteligencia emocional en educación primaria. *Revista Fuentes, 23*(2). https://doi.org/10.12795/revistafuentes.2021.12108

54. Roa, L. (2025). Inteligencia emocional y rendimiento académico en estudiantes de educación básica: Una revisión sistemática. *Revista Ciencia & Sociedad, 5*(3), 433-450. https://cienciaysociedaduatf.com/index.php/ciesocieuatf/article/view/147

55. Estrada, E., Zuloaga, M., Mamani, H., Gallegos, N., Huaypar, K., Paredes, Y., & Quispe, R. (2022). Clima social familiar y resiliencia en estudiantes peruanos de educación primaria. *AVFT, 41* (3): 1-8. https://doi.org/10.5281/ZENODO.6944952

56. Manrique, J. (2025). Niveles de resiliencia en estudiantes de sexto grado de educación primaria. (2025). *Revista InveCom, 6*(2), 1-13. https://doi.org/10.5281/zenodo.15871745

57. Farfán, M., Lavilla, W., Paredes, A., Paredes, Y., & Quispe, R. (2023). Resiliencia y niveles de logro de aprendizaje en los estudiantes peruanos de educación primaria. *Revista Universidad y Sociedad, 15*(3), 395-403. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202023000300395&lng=es&tlng=es.

58. Cholango, E., & Guerrero, M. (2024). El Impacto de la Inteligencia Emocional en el Rendimiento Académico y la Adaptación Social en Estudiantes de Educación Primaria. *Ciencia Latina 8*(4), 8965-8982. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13040

59. Pariona, B. & Porta, E. (2019). Inteligencia emocional y rendimiento académico de los estudiantes de educación primaria (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Huancavelica. https://repositorio.unh.edu.pe/items/bb699c0a-61ef-45ab-8f9a-ed81e77bb28b

60. Fontanillas-Moneo, J., Torrijos Fincias, P., & Rodríguez-Conde, M. (2022). Relación entre inteligencia emocional y rendimiento académico en la educación secundaria. *Revista Española de Orientación y Psicopedagogía, 33*(2), 102–118. https://doi.org/10.5944/reop.vol.33.num.2.2022.34362

61. Caba, A., & Guarachi, M. (2023). Relación entre inteligencia emocional y rendimiento académico en estudiantes de 4° y 5° de primaria en dos colegios de Cochabamba en la gestión 2023. *Revista Simón Rodríguez, 3*(6), 11-20. https://doi.org/10.62319/simonrodriguez.v.3i6.23

62. Boman, B. (2022). Educational achievement among East Asian schoolchildren 1967–2020: A thematic review of the literature. *International Journal of Educational Research Open, 3*(100168), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2022.100168

63. Baldeón, R. (2022). Resiliencia y rendimiento académico en estudiantes del IV y V ciclo de educación primaria de una institución educativa pública de Potracancha – Huánuco (Tesis de maestría). Universidad Marcelino Champagnat. https://hdl.handle.net/20.500.14231/3465

64. Rubiños-Vizcarra, M., Gutiérrez-Álvarez, D., Rodríguez-Moreno, R., & Valverde-Zavaleta, S. (2021). Inteligencia Emocional y Resiliencia en Estudiantes de Educación Primaria, Pueblo Nuevo-2021. *Polo del Conocimiento, 6*(12), 1334-1353. https://doi.org/10.23857/pc.v6i12.3439

65. Lugo, M. (2020). Inteligencia emocional y resiliencia en los estudiantes del IV Ciclo de educación primaria de la Institución Educativa Particular San Francisco de Asís - Ate (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, Lima, Perú.

66. Quevedo, N., & de la Peña, C. (2018). Estudio en aulas hospitalarias: relación entre resiliencia, inteligencia emocional y habilidades motrices. *Revista de Pedagogía, 39* (104), 127-146. https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_ped/article/view/15706

67. Fernández, M. (2020). Revisión sistemática sobre la relación entre inteligencia emocional y resiliencia en población infanto-juvenil (Tesis de maestría). Universitat Oberta de Catalunya. https://hdl.handle.net/10609/123426

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Evaluación de métodos físicos para la extracción y calidad del agua recuperada de residuos agroalimentarios

Evaluation of physical methods for the extraction and quality assessment of water recovered from agri-food waste

Cano-Gómez, C.I.[1], Wong-Arguelles, C.[2], Muñiz-Márquez, D.B.[1], Hinojosa-López, J.I.[1], Soni-Aradillas, C.G.[1], Mata-Guzmán, R.[1], Hernández-Hernández, J.[1], Wong-Paz, J.E.[1]*

[1] Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 79080, Cd. Valles, San Luis Potosí, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8308-7038, https://orcid.org/0000-0002-8070-1194, https://orcid.org/0000-0002-8751-2388,

[2] Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, Cd. Valles, S.L.P., México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9637-5023, https://orcid.org/0000-0002-5866-2678*.

christian.cano@uaslp.mx; cynthia.wong@tecvalles.mx; diana.marquez@uaslp.mx; jessica.hinojosa@uaslp.mx; a294857@alumnos.uaslp.mx; a301179@alumnos.uaslp.mx; a324167@alumnos.uaslp.mx; jorge.wong@uaslp.mx*

Innovación tecnológica: Recuperación y valorización de agua contenida en residuos agroalimentarios de mercados municipales mediante métodos físicos de extracción, con evaluación integral de calidad fisicoquímica y microbiológica para su reutilización no potable.

Área de aplicación industrial: Gestión y aprovechamiento de residuos agroalimentarios; tratamiento y reutilización de agua no potable; agricultura y riego indirecto; producción de bioinsumos líquidos; economía circular aplicada a sistemas agroalimentarios y agroindustria.

Recibido: 22 enero 2026
Aceptado: 18 julio 2026

Abstract

Agri-food waste generated in municipal markets represents an environmental concern due to its high volume, rapid degradation, and inadequate disposal practices. Nevertheless, the high moisture content of fruit and vegetable residues makes them a promising feedstock for water recovery through low-cost and easily implementable physical processes. This study aimed to evaluate the recovery yield and the physicochemical and microbiological quality of water obtained from agri-food waste generated in a local market in Ciudad Valles, San Luis Potosí, Mexico, in order to determine its feasibility for non-potable applications under current Mexican regulations. A six-month monitoring period was conducted using biweekly sampling of discarded residues collected from local vendors. The collected waste was classified according to frequency and generation volume, and four representative residues were selected: tomato, carrot, melon, and watermelon.

For each residue, samples of 1,000 ± 0.1 g were processed in triplicate using two physical extraction methods: mechanical pressing and grinding. Extraction yield (% w/w) and optical density at 600 nm were determined as indicators of water recovery efficiency and suspended solids/turbidity, respectively. The obtained extracts were subsequently clarified by vacuum filtration and centrifugation. Physicochemical parameters were assessed, including pH, electrical conductivity, turbidity, total dissolved solids, alkalinity, total hardness, nitrogen compounds, fluorides, and trace metals. Microbiological quality was evaluated by determining total and fecal coliforms, the presence of *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., and *Giardia lamblia*. Results were compared with the Mexican standards NOM-127-SSA1-2021 and NOM-003-SEMARNAT-1997. Water recovery performance depended on the type of residue and the extraction method applied. Mechanical pressing showed higher efficiency for soft matrices such as tomato, whereas grinding improved water release from more compact tissues such as melon and watermelon. Optical density values tended to be slightly higher in ground extracts, suggesting increased carryover of suspended particles. Physicochemical characterization revealed slightly acidic pH values, high turbidity, and elevated concentrations of nitrogen compounds. In addition, trace metals such as Cr, Mn, and Ni were detected at levels exceeding the maximum permissible limits established by NOM-127-SSA1-2021. Microbiological analysis indicated the presence of total and fecal coliforms in all samples and *E. coli* only in carrot extract, while *Salmonella* spp. and *Giardia lamblia* were not detected. Although the recovered water does not meet drinking water quality criteria, its composition suggests potential for non-potable reuse, particularly for indirect agricultural applications or as a base for liquid bioinputs, provided that complementary treatments such as disinfection and metal removal are implemented.

Keywords: agri-food waste, water recovery, physicochemical analysis, microbiological quality, sustainable valorization.

Resumen

La generación de residuos agroalimentarios en mercados municipales representa un problema ambiental debido a su alta disponibilidad, rápida degradación y disposición inadecuada. Sin embargo, su elevado contenido de humedad convierte a estos materiales en una fuente potencial para la recuperación de agua mediante métodos físicos de bajo costo y fácil implementación. El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento de recuperación y la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua obtenida a partir de residuos agroalimentarios generados en un mercado local de Ciudad Valles, San Luis Potosí, México, con el fin de determinar su viabilidad para usos no potables conforme a la normativa mexicana vigente. Durante un periodo de seis meses se realizó un muestreo quincenal de residuos descartados por comerciantes, clasificándolos por frecuencia y volumen de generación. Con base en esta caracterización se seleccionaron residuos representativos de tomate, zanahoria, melón y sandía. Cada muestra (1,000 ± 0.1 g) se procesó por triplicado mediante dos métodos físicos de extracción: prensado mecánico y trituración. Se determinó el rendimiento de extracción (% p/p) y la densidad óptica a 600 nm como indicador indirecto de turbidez y sólidos suspendidos. Posteriormente, los extractos fueron clarificados mediante

filtración al vacío y centrifugación, y se analizaron parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos totales disueltos, alcalinidad, dureza, compuestos nitrogenados, fluoruros y metales) y microbiológicos (coliformes totales y fecales, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y *Giardia lamblia*), comparando los resultados con la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-003-SEMARNAT-1997. Los rendimientos obtenidos dependieron del tipo de residuo y del método aplicado, observándose mayor eficiencia del prensado mecánico en matrices blandas como el tomate, mientras que la trituración favoreció la recuperación en residuos más compactos como melón y sandía. La densidad óptica mostró valores ligeramente superiores en los extractos obtenidos por trituración. El análisis fisicoquímico evidenció pH ligeramente ácido, turbidez elevada y concentraciones significativas de compuestos nitrogenados, además de la presencia de metales como Cr, Mn y Ni por encima de los límites de la NOM-127-SSA1-2021. En el análisis microbiológico se detectaron coliformes totales y fecales en todas las muestras y *E. coli* únicamente en el extracto de zanahoria, mientras que *Salmonella* spp. y *Giardia lamblia* estuvieron ausentes. Aunque el agua recuperada no cumple criterios de potabilidad, sus características sugieren potencial de aprovechamiento en usos agrícolas indirectos o como base para bioinsumos líquidos, siempre que se apliquen tratamientos complementarios de desinfección y control de metales.

Palabras clave: residuos agroalimentarios, recuperación de agua, análisis fisicoquímico, calidad microbiológica, valorización sostenible.

1. Introducción

La generación de residuos agroalimentarios en mercados municipales representa un problema ambiental relevante debido a su alto volumen, rápida degradación y disposición inadecuada. En México, estos residuos están constituidos principalmente por frutas y hortalizas descartadas por razones comerciales, lo que contribuye a la contaminación ambiental y al desperdicio de recursos asociados a su producción (Martínez et al., 2024a). A nivel global, se estima que cerca del 45% de las frutas y verduras producidas se pierden o desperdician, implicando un uso ineficiente del agua y la energía involucradas en los sistemas agroalimentarios (Angeles-Segoviano et al., 2023).

Debido a su elevada humedad (75–95 %), los residuos vegetales constituyen una fuente potencial para la recuperación de agua mediante procesos físicos simples. Estudios previos han demostrado que métodos como el prensado mecánico y la trituración permiten recuperar fracciones líquidas de manera eficiente, con bajo consumo energético y sin el uso de reactivos químicos, lo que los hace compatibles con esquemas de economía circular y valorización de residuos (Tedesco et al., 2021).

La creciente presión sobre los recursos hídricos en México, donde más del 70% del agua disponible se destina a la agricultura, refuerza la necesidad de explorar fuentes alternativas de agua no convencional (Bautista-Capetillo et al., 2025). En este contexto, la recuperación de agua a partir de residuos agroalimentarios representa una estrategia complementaria que permite reducir la carga ambiental de estos desechos y, simultáneamente, generar corrientes líquidas con potencial de reutilización agrícola o biotecnológica (Lee et al., 2024).

El presente estudio evalúa la recuperación y caracterización del agua obtenida a partir de

residuos agroalimentarios generados en un mercado local de Ciudad Valles, San Luis Potosí, mediante métodos físicos de extracción. Se analizan los rendimientos y la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua recuperada, con el objetivo de determinar su viabilidad para usos no potables, particularmente en aplicaciones agrícolas indirectas, conforme a la normativa mexicana vigente. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 es el marco jurídico vigente en México que establece los límites permisibles de calidad para el agua destinada al uso y consumo humano. Si se pretende evaluar la viabilidad de potabilizar el agua obtenida de residuos agroalimentarios generados en un mercado local, es indispensable contrastar sus parámetros fisicoquímicos con esta norma para garantizar la protección de la salud pública y prevenir enfermedades crónicas o agudas. En cambio, la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público; por lo tanto, permite evaluar el agua obtenida desde la perspectiva de la economía circular y reutilización de subproductos industriales. Al buscar reintroducir este recurso al ciclo antropogénico, la legislación mexicana obliga a cumplir con los límites establecidos en esta norma para garantizar que no represente un riesgo para la salud pública o los ecosistemas.

2. Materiales y métodos

2.1 Recolección y caracterización del material vegetal

La recolección de residuos agroalimentarios se realizó en el mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí, México, durante un periodo de seis meses (febrero-julio 2025) mediante muestreo quincenal. Los residuos seleccionados correspondieron a frutas y hortalizas descartadas por daño mecánico, madurez avanzada o defectos estéticos, se excluyó el material que presentaba signos evidentes de putrefacción, mal olor intenso, crecimiento fúngico visible o contaminación externa. El material recolectado fue trasladado al Laboratorio de Investigación en Alimentos de la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca (UASLP). Para obtener muestras representativas, se aplicó el método de cuarteo conforme a la NOM-AA-015-1985. Con base en la frecuencia y volumen de generación, se seleccionaron cuatro residuos vegetales predominantes, los cuales se emplearon como materia prima en las etapas experimentales subsecuentes.

Las muestras no fueron sometidas a desinfección química previa, con el fin de conservar las condiciones reales del residuo generado en el mercado y evaluar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua recuperada bajo un escenario representativo. Únicamente se retiró manualmente material extraño visible cuando fue necesario. Las muestras se procesaron en un periodo no mayor de 4 h.

2.2 Métodos de extracción

Los residuos vegetales seleccionados se segmentaron manualmente en piezas de entre 2 y 5 cm, para facilitar su manejo y extracción. Posteriormente, se pesaron 1,000 ± 0.1 g de cada tipo de residuo en una balanza analítica (Ohaus, Pioneer PA214, USA), procesándose cada muestra por triplicado.

Se compararon dos métodos físicos de extracción para determinar su eficiencia: prensado mecánico y trituración. El primer método consistió en la extracción directa de la fracción líquida mediante prensado mecánico. Se empleó una prensa mecánica manual de laboratorio modelo YZQ-6A, equipada con cubeta de acero inoxidable, placa compresora y bolsa de nylon grado alimentario. Los residuos fueron cortados manualmente en fragmentos de 2–5 cm y se procesaron 1,000 ± 0.1 g por corrida. La

muestra se colocó dentro de la bolsa de nylon y se distribuyó uniformemente en la cubeta interior del equipo, cuya capacidad útil fue de 5.43 L. La presión fue aplicada manualmente mediante el sistema de rosca trapezoidal y mango en forma de T, girando lentamente en sentido horario hasta alcanzar el límite físico de presión manual o hasta observar una reducción significativa del flujo de extracción. El tiempo de prensado fue de aproximadamente 10–30 min, dependiendo del tipo de residuo vegetal.

El segundo método consistió en la extracción por trituración mediante un Extractor Metálico Tipo Turmix (Modelo 7000, México) equipado con presionador de frutas y verduras, tapa, disco rallador de acero inoxidable, canastilla metálica perforada y recipiente colector. Los residuos fueron presegmentados en piezas de 5–8 cm y se procesaron hasta 1,000 g por corrida. La muestra se introdujo por porciones a través de la abertura superior del equipo y se empujó de forma controlada hacia el disco rallador mediante el presionador. La trituración se realizó en ciclos de 30–45 s hasta obtener una pulpa fluida homogénea. El tiempo total de trituración fue de aproximadamente 10–30 min por cada 1,000 g de muestra, dependiendo de la textura del residuo. Los extractos obtenidos por ambos métodos fueron conservados a 4 ± 1 °C y analizados en un periodo máximo de 12 h posterior a la extracción.

Como limitación metodológica, la presión exacta de prensado, el tamaño de poro de la bolsa de nylon, la velocidad real del extractor y la distribución de tamaño de partícula de la pulpa no fueron cuantificados instrumentalmente. No obstante, se estandarizaron las condiciones operativas mediante la masa inicial de muestra, el tamaño de corte, el tiempo de operación, el criterio de reducción del flujo en prensado y la obtención de una pulpa homogénea en trituración.

El rendimiento de extracción (% p/p) se calculó conforme a la Ecuación 1, considerando la relación entre la masa del líquido extraído y la masa inicial del residuo vegetal:

$$Rendimiento\ (\%) = \frac{m_{liquído\ recuperado}}{m_{muestra\ inicial}} x100. \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Asimismo, se midió la densidad óptica del extracto mediante un espectrofotómetro Vis (Thermo Scientific™ Genesys 50, USA) a 600 nm, como parámetro complementario para estimar la concentración de sólidos suspendidos y carga orgánica total.

Ambos métodos fueron comparados con base en sus rendimientos de extracción y su densidad óptica. Los resultados fueron procesados estadísticamente para determinar diferencias significativas ($p < 0.05$).

2.3 Análisis fisicoquímico

Con base en los rendimientos obtenidos, se seleccionó una muestra representativa por cada tipo de residuo (sandía, melón, zanahoria y tomate) correspondiente al método de extracción que presentó el mayor rendimiento de recuperación de agua. Estas muestras fueron utilizadas para las etapas analíticas posteriores, tanto fisicoquímicas como microbiológicas.

Las muestras seleccionadas fueron sometidas a un tratamiento previo de depuración para eliminar partículas sólidas y compuestos coloidales que pudieran interferir con los análisis. Cada muestra fue filtrada con bomba de vacío (Rocker 300, USA) utilizando papel de celulosa Whatman No. 1, y posteriormente centrifugada durante 15 minutos a 4000 rpm

en una centrífuga BioBase (China). El sobrenadante clarificado fue recolectado y almacenado en recipientes de vidrio a 4 ± 1 °C hasta su análisis.

Se determinaron los parámetros físicos: pH, turbidez, color aparente, olor, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD); y los parámetros químicos: alcalinidad, dureza total ($CaCO_3$), fluoruros, nitratos, nitritos, metales y metaloides (Pb, Cd, Cr, Zn, Ni, Mn, Al, Mg, Ca).

Las determinaciones se realizaron mediante el fotómetro multiparamétrico para agua y aguas residuales modelo HI 83399 (Hanna Instruments, Italia), con los métodos específicos para cada parámetro de acuerdo con la Tabla 1. Los valores de pH, CE y STD se determinaron con un medidor multiparamétrico Oakton PC2700 (USA). Todos los análisis se efectuaron por triplicado.

Tabla 1. Métodos y rangos de concentración de parámetros químicos del fotómetro multiparamétrico HI 83399.

Parámetro	Método	Rango
Alcalinidad	Colorimétrico	0 a 500 mg/L ($CaCO_3$)
Dureza total	Adaptado de Método 130.1 de EPA	0 a 250 mg/L ($CaCO_3$)
Fluoruros	Adaptado del Método SPADNS de Métodos estandarizados para el análisis de agua y agua residual 18th edición.	0 a 2 mg/L (F^-)
Nitratos	Adaptado del Método de Reducción de Cd	0 a 30 mg/L (NO_3^--N)
Nitritos	Adaptado del Método de Diazotización 354.1 de la EPA	0 a 600 mg/L (NO_2^- -N)
Nitrógeno Total	Ácido cromotrópico	0 a 150 mg/L (N)
Calcio	Oxalato	0 a 400 mg/L (Ca^{2+})
Magnesio	Calmagita	0 a 150 mg/L (Mg_2^+)
Aluminio	Aluminón	0 a 1 mg/L (Al_3^+)
Manganeso	PAN	0 a 300 mg/L (Mn)
Níquel	PAN	0 a 1 mg/L (Ni)
Cromo	Adaptado del método difenilcarbohidrazida D1687 (ASTM)	0 a 300µg/L (Cr VI)
Zinc	Colorimétrico del zincon	0 a 3 mg/L (Zn)

2.4 Análisis microbiológico

El análisis microbiológico se realizó sobre las mismas muestras utilizadas para la caracterización fisicoquímica. Se evaluaron coliformes totales y fecales mediante la técnica del número más probable (NMP), así como la presencia de *Escherichia coli*, *Salmonella spp*. y quistes de *Giardia lamblia*, conforme a la NOM-210-SSA1-2014.

Los resultados se expresaron en NMP/100 mL o como presencia/ausencia, según correspondiera, y se interpretaron con base en los límites normativos aplicables.

2.5 Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como media ± desviación estándar. Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, seguido de una prueba de comparación múltiple de medias (Tukey), considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$. El análisis estadístico se realizó utilizando Graphpad prism 10.

3. Resultados

3.1 Clasificación de los residuos agroalimentarios recolectados

Durante seis meses de muestreo quincenal en el mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí, se recolectaron y clasificaron los residuos agroalimentarios descartados por los comerciantes locales. Los residuos identificados se agruparon en función de su origen vegetal y frecuencia de aparición, obteniéndose una distribución porcentual que se muestra en la Figura 1.

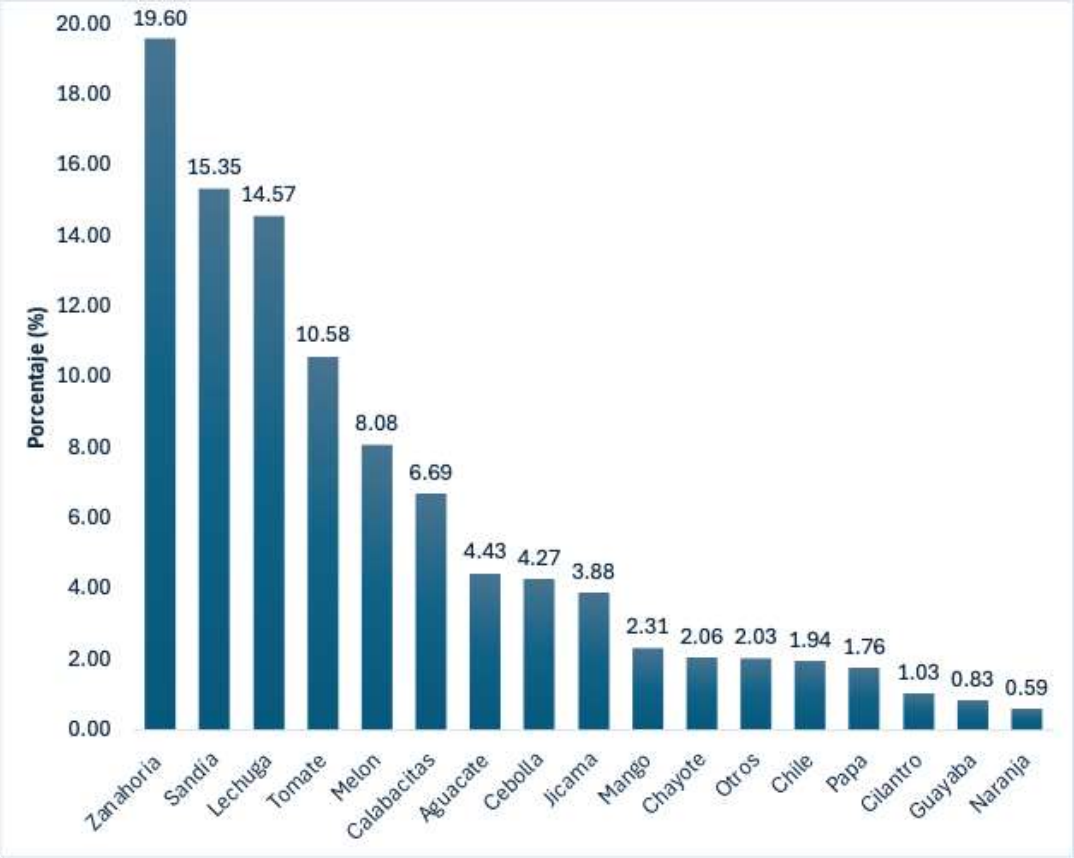


Figura 1. Distribución porcentual de los residuos agroalimentarios recolectados en el mercado municipal de Ciudad Valles, San Luis Potosí.

Los resultados evidenciaron que los residuos con mayor proporción fueron zanahoria (19.60%), sandía (15.35%), lechuga (14.57%) y tomate (10.58%), los cuales en conjunto representaron más del 60% del total recolectado durante el periodo de estudio. En menor proporción se registraron melón (8.08%), calabacita (6.69%), aguacate (4.43%) y cebolla (4.27%), mientras que otros residuos como jícama, mango, chayote, chile y papa presentaron frecuencias inferiores al 3%.

A partir de estos resultados, se seleccionaron cuatro tipos de residuos representativos: tomate, sandía, melón y zanahoria, para las fases experimentales de extracción de agua recuperada.

3.2 Métodos de extracción

Se evaluó el rendimiento de extracción de agua a partir de los cuatro residuos vegetales seleccionados (tomate, sandía, melón y zanahoria) mediante dos métodos físicos: prensado mecánico y trituración. Los extractos líquidos obtenidos se muestran en la Figura 2, donde se aprecia la variación en el aspecto y color del líquido extraído según el tipo de residuo y el método aplicado.



Figura 2. Extractos obtenidos de los residuos vegetales.

Los rendimientos obtenidos presentaron variaciones significativas entre métodos y tipos de residuo. En el prensado mecánico, los valores más altos se registraron para el tomate (80.5–81.5 %) y el melón (61.5–65.0 %), mientras que la zanahoria mostró los valores más bajos (40.5–43.5 %). En contraste, el método de trituración alcanzó rendimientos superiores en sandía (76.5–80.0 %) y melón (64.0–69.0 %), superando ligeramente al prensado en estos casos. Los valores promedio de rendimiento obtenidos se presentan en la Figura 3.

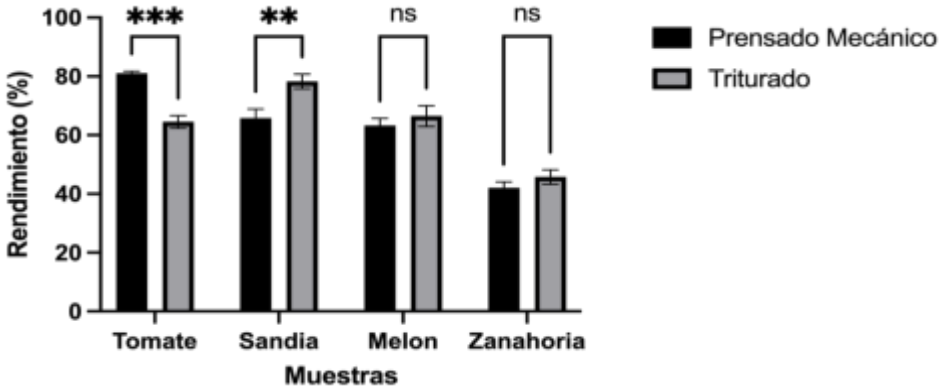


Figura 3. Rendimiento promedio de extracción de agua (% p/p) a partir de residuos de tomate, zanahoria, melón y sandía mediante prensado mecánico y trituración. Los valores corresponden a la media ± desviación estándar (n = 3). * indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, ANOVA de dos vías, prueba de Tukey).

De acuerdo con los valores observados, el rendimiento promedio del método de prensado mecánico osciló entre 40% y 81%, mientras que el método de trituración presentó un rango de 44% a 78%.

De manera complementaria, se evaluó la densidad óptica (DO) del líquido extraído como parámetro indicativo de la turbidez y la concentración de sólidos suspendidos. Los resultados se ilustran en la Figura 4. En general, no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre los métodos de extracción; sin embargo, se registraron valores ligeramente superiores en las muestras obtenidas por trituración, particularmente en sandía, melón y zanahoria.

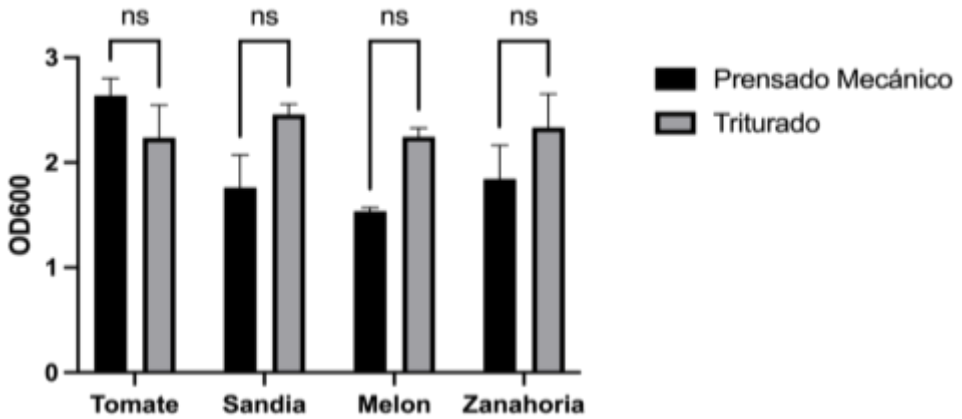


Figura 4. Densidad óptica (600 nm) del líquido recuperado de residuos agroalimentarios mediante prensado mecánico y trituración. Los valores representan la media ± desviación estándar (n = 3). No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre métodos ($p > 0.05$).

Los valores de DO oscilaron aproximadamente entre 1.5 y 2.6 unidades de absorbancia a 600 nm, con tendencia a valores mayores en los líquidos provenientes del método de trituración. En contraste, los líquidos obtenidos por prensado mecánico mostraron valores menores de DO, especialmente en tomate y melón.

3.3 Análisis fisicoquímico

Previo a los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, los extractos líquidos obtenidos mediante prensado mecánico y trituración fueron sometidos a postratamiento mediante filtración al vacío y centrifugación. Los rendimientos finales de recuperación de agua clarificada variaron en función del tipo de residuo y del método de extracción empleado. En todos los casos, el primer valor corresponde al prensado mecánico y el segundo a la trituración: tomate 62.79 y 41.10 %, sandía 64.56 y 55.93 %, melón 50.60 y 33.93 %, y zanahoria 38.05 y 35.20 %, respectivamente. Estos resultados indican que, después del postratamiento, el prensado mecánico presentó los mayores rendimientos finales de agua clarificada en los cuatro residuos evaluados.

En cuanto a la densidad óptica posterior al postratamiento, también se observaron diferencias entre métodos. El primer valor corresponde al prensado mecánico y el segundo a la trituración: tomate 0.64 y 0.44 UA, sandía 0.19 y 0.30 UA, melón 0.14 y 0.12 UA, y zanahoria 1.09 y 0.37 UA, respectivamente. Estos valores fueron menores que los obtenidos en los extractos crudos, lo que evidencia la reducción de sólidos suspendidos, partículas finas y material coloidal durante la filtración al vacío y la centrifugación, tal como se muestra en la Figura 5.

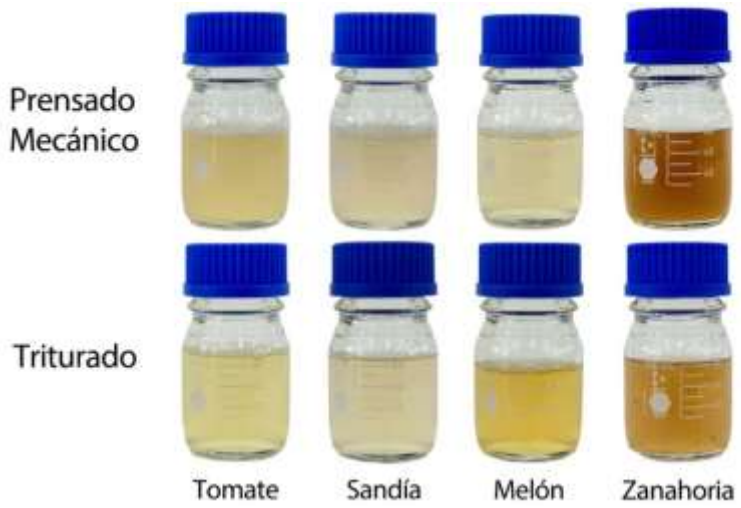


Figura 5. Extractos obtenidos del post-tratamiento de ambos métodos de extracción.

Con base en los rendimientos finales posteriores al postratamiento, se seleccionó el prensado mecánico como método de obtención de los extractos destinados a la caracterización fisicoquímica y microbiológica.

Los resultados obtenidos se agrupan en tres categorías: parámetros físicos, parámetros químicos y contenido de metales, presentados en las Tablas 2, 3 y 4, respectivamente. Estos se compararon con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua y Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Los parámetros físicos analizados incluyeron pH, CE, turbidez y STD. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.

El pH de las muestras presentó valores comprendidos entre 4.61 y 6.65, con los valores más bajos en la muestra de tomate y los más altos en sandía. La conductividad eléctrica varió entre 854 y 5,136 µS/cm, mientras que los STD se situaron en el rango de 1,129 a 3,090 ppm.

La turbidez mostró valores elevados en todas las muestras, con un rango de 42.1 a 479.5 NTU, siendo las muestras de melón y sandía las que presentaron los valores más altos.

Tabla 2. Parámetros físicos del agua recuperada a partir de residuos agroalimentarios.

Parámetro	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
pH	4.6125*	6.475*	6.193*	6.65	6.5 a 8.5	-
Cond. E. (µS/cm)	854	4,331*	1,866*	5,136*	1000	-
Turbidez (NTU)	219.5*	42.1*	479.5*	89.475*	4	-

Los valores que no cumplen o exceden los límites máximos permisibles se indican con * para fines comparativos normativos.

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes a los parámetros químicos evaluados: alcalinidad, dureza total ($CaCO_3$), nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-), nitrógeno total, fluoruros y STD.

La alcalinidad varió entre 150.75 y 855 mg/L, con valores mayores en la muestra de zanahoria. La dureza total se situó entre 164.25 y 206.25 mg/L. En cuanto a los compuestos nitrogenados, los nitritos oscilaron entre 6.25 y 21.5 mg/L, y los nitratos entre 4 y 36 mg/L. El nitrógeno total presentó valores de 66 a 340.5 mg/L, siendo la muestra de zanahoria la que registró la mayor concentración.

Las concentraciones de fluoruros variaron entre 0.005 y 1.915 mg/L, con los valores más elevados en las muestras de tomate y sandía.

Tabla 3. Parámetros químicos del agua recuperada.

Parámetro (mg/L)	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
Alcalinidad	235.25	855	150.75	234	-	-
Dureza total como $CaCO_3$	165	164.25	187.5	206.25	**500**	-
Nitritos	10.75*	21.5*	6.25*	8.5*	**0.9**	-
Nitratos	4	6.5	5.5	36*	**11.0**	-
Nitrógeno total	99.5	340.5	66	115.5	-	-
STD	1,623*	2,149*	1,129*	3,090*	**1000**	20-30
Fluoruros	1.915*	1.887*	0.005	1.28*	**1.5**	-

Los valores que exceden los límites máximos permisibles se indican con * para fines comparativos normativos.

El contenido de metales analizado incluyó aluminio (Al), calcio (Ca), cromo (Cr), magnesio (Mg), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn), cuyos valores se resumen en la Tabla 4.

El aluminio (Al) se detectó en concentraciones entre 0 y 0.0825 mg/L, mientras que el calcio (Ca) presentó valores de 35 a 99.0 mg/L. El cromo (Cr) osciló entre 0.16 y 0.5318 mg/L, siendo este último valor el más alto, registrado en la muestra de sandía.

El magnesio (Mg) se encontró en el rango de 33.25 a 90.75 mg/L, mientras que el manganeso (Mn) varió entre 0.114 y 0.3 mg/L. El níquel (Ni) se detectó en concentraciones de 0 a 1.0 mg/L, y el zinc (Zn) en valores de 0.0325 a 0.5025 mg/L.

Tabla 4. Concentración de metales en el agua recuperada.

Parámetro (mg/L)	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
Aluminio	0.005	0	0.0825*	0.0025	0.20	-
Calcio	99	93.75	37.75	35	-	-
Cromo	0.16*	0.423*	0.247*	0.5318*	0.05	1.50
Magnesio	33.25	42.5	90.75	34	-	-
Manganeso	0.114	0.171*	0.3*	0.185*	0.15	-

Níquel	0.0619	0	1*	0.7720*	0.07	4
Zinc	0.3175	0	0.0325	0.5025	-	20

Los valores que exceden los límites máximos permisibles se indican con * para fines comparativos normativos.

En conjunto, los resultados fisicoquímicos evidenciaron diferencias cuantitativas entre las muestras analizadas, reflejando la influencia del tipo de residuo agroalimentario en la composición del agua recuperada.

3.4 Análisis microbiológico

El análisis microbiológico se efectuó sobre las mismas muestras de agua recuperada utilizadas en los análisis fisicoquímicos, correspondientes a la fracción líquida con mayor rendimiento por tipo de residuo. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, siguiendo los métodos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-210-SSA1-2014, que regula la determinación de microorganismos indicadores y patógenos en agua y hielo para uso y consumo humano.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5, la cual resume los valores detectados para coliformes totales (NMP/100 mL), coliformes fecales (NMP/100 mL), *Escherichia coli* (presencia/ausencia), *Salmonella spp*. (presencia/ausencia) y quistes de *Giardia lamblia* (número de quistes/20 L), comparados con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 5. Resultados microbiológicos del agua recuperada.

Parámetro microbiológico	Unidades	Tomate	Zanahoria	Melón	Sandía	NOM-127-SSA1-2021	NOM-003-SEMARNAT-1997
Coliformes totales	NMP/100 mL	4*	22*	>1100*	>1100*	<1.1 ó No detectable	-
Coliformes fecales	NMP/100 mL	5*	7*	30*	73*	<1.1 ó No detectable	240-1000
Escherichia coli	Ausencia o Presencia/100 mL	ausencia	Presencia*	ausencia	ausencia	ausencia	-
***Salmonella* spp.**	Presencia o Ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	-
Giardia lamblia	Quistes/20L	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	ausencia	Ausencia

Los valores que exceden los límites máximos permisibles se indican con ***** para fines comparativos normativos.

Los resultados mostraron presencia de coliformes totales en todas las muestras, con valores de 4 NMP/100 mL en tomate, 22 NMP/100 mL en zanahoria y valores superiores a 1100 NMP/100 mL en melón y sandía. En el caso de los coliformes fecales, se detectaron concentraciones de 5 NMP/100 mL en tomate, 7 NMP/100 mL en zanahoria, 30 NMP/100 mL en melón y 73 NMP/100 mL en sandía.

Para *Escherichia coli*, únicamente se detectó presencia en la muestra de zanahoria, mientras que en tomate, melón y sandía se registró ausencia. La detección de *Salmonella* spp. resultó negativa en todas las muestras. Asimismo, no se detectaron quistes de *Giardia lamblia* en ninguna de las muestras analizadas. Estos resultados indican la presencia de microorganismos indicadores de

contaminación fecal en el agua recuperada, aunque sin detección de *Salmonella* spp. ni *Giardia lamblia* bajo las condiciones evaluadas.

4. Discusión

La caracterización de residuos agroalimentarios recolectados en el mercado municipal de Ciudad Valles mostró una predominancia de frutas y hortalizas de alta rotación comercial, destacando zanahoria, sandía, lechuga y tomate como los residuos más frecuentes. Este comportamiento concuerda con reportes previos que describen a los mercados urbanos como puntos críticos de generación de residuos orgánicos con elevada humedad y rápida biodegradabilidad, lo que representa tanto un reto ambiental como una oportunidad para su valorización (Martínez et al., 2024; Peña-Ortiz et al., 2025).

La composición observada también coincide con tendencias reportadas en otros contextos, donde los residuos de frutas y vegetales constituyen la fracción dominante de los desechos orgánicos y se caracterizan por alto contenido de agua y materia volátil, atributos relevantes para estrategias de aprovechamiento físico y biotecnológico (Asquer et al., 2013; Gupta et al., 2023; Morales-Polo et al., 2019).

En el contexto nacional, los resultados aquí presentados son consistentes con la caracterización de la fracción orgánica de residuos municipales reportada en Saltillo, Coahuila, por Martínez et al., (2024), donde los residuos procedentes de mercados centrales representaron el 25.78% del total y mostraron una composición rica en carbohidratos y fibras vegetales.

En conjunto, estos resultados confirman que la fracción orgánica vegetal de los mercados locales no solo representa la mayor proporción de los residuos sólidos urbanos, sino que constituye una materia prima estratégica para procesos de valorización, como la recuperación de agua, compostaje o digestión anaerobia. Además, la estacionalidad observada en la disponibilidad de ciertos residuos coincide con lo reportado en otros mercados latinoamericanos, donde la variabilidad temporal influye directamente en el tipo y volumen de residuos generados (Mozhiarasi et al., 2019).

En este estudio, el rendimiento de recuperación de agua dependió del tipo de residuo y del método de extracción empleado, lo cual es consistente con la influencia de la estructura celular, textura del tejido vegetal y distribución del agua libre e intracelular. El prensado mecánico resultó más eficiente en matrices blandas, mientras que la trituración favoreció la liberación de agua en materiales más compactos. Estas diferencias pueden atribuirse a las características estructurales de cada residuo vegetal, particularmente a la textura del tejido, la proporción de agua libre e intracelular y el contenido de fibra. En matrices blandas como el tomate, el prensado mecánico favoreció la liberación de agua debido a que la compresión directa permite extraer con mayor facilidad la fracción líquida disponible en el tejido parenquimático. En cambio, en residuos con tejidos más compactos o con mayor resistencia estructural, como melón, sandía y zanahoria, la trituración promovió una mayor disrupción de las paredes celulares y una reducción del tamaño de partícula, facilitando la liberación del agua retenida dentro de la matriz vegetal. Por ello, los porcentajes de extracción no dependieron únicamente del contenido de humedad del residuo, sino también de la forma en que cada método interactuó con la organización celular, la fibra y la resistencia mecánica del material. Esta tendencia se ha descrito en investigaciones previas, donde la eficiencia de extracción se relaciona directamente con el grado de

disrupción de la pared celular y con la resistencia mecánica del tejido vegetal (Montenegro-Landívar et al., 2021; Rifna et al., 2023). Además, el uso de métodos físicos simples se considera una alternativa viable para esquemas de valorización con bajo requerimiento energético y menor complejidad operativa, particularmente cuando se busca escalabilidad en contextos locales (Baykus et al., 2024; Teigiserova et al., 2021).

La densidad óptica del líquido recuperado tendió a ser mayor en las muestras obtenidas por trituración. Esta diferencia puede explicarse por el grado de ruptura del tejido vegetal producido por cada método. El prensado mecánico favorece principalmente la salida de la fracción líquida mediante compresión, con una menor incorporación de partículas finas. En cambio, la trituración provoca una mayor disrupción celular y reducción del tamaño de partícula, lo que incrementa el arrastre de sólidos suspendidos, pigmentos, pectinas y fracciones coloidales. Por esta razón, los extractos obtenidos por trituración tendieron a presentar valores más altos de absorbancia a 600 nm, especialmente en residuos con tejidos más compactos o con mayor contenido de material estructural. Este comportamiento ha sido reportado en extractos obtenidos mediante procesos de alta disrupción, donde el aumento de turbidez se asocia con la presencia de partículas finas, pectinas y material orgánico disperso (Salahuddin et al., 2021). Aunque esta característica puede representar una limitante para aplicaciones que requieran mayor claridad del agua, también puede interpretarse como un indicador de mayor contenido de compuestos orgánicos potencialmente aprovechables, dependiendo del uso final del líquido recuperado (Lee et al., 2024; Tedesco et al., 2021).

Desde el punto de vista fisicoquímico, el agua recuperada mostró un perfil heterogéneo, las diferencias observadas entre los cuatro residuos evaluados pueden atribuirse a la composición natural de cada matriz vegetal. Cada residuo presenta proporciones distintas de ácidos orgánicos, sales minerales, sólidos solubles, compuestos nitrogenados, fibra, pigmentos y metabolitos solubles, los cuales son liberados en diferente magnitud durante la extracción y el postratamiento. Por ello, las diferencias entre tomate, zanahoria, melón y sandía no deben interpretarse como variaciones aleatorias, sino como resultado de la heterogeneidad composicional propia de cada residuo agroalimentario. Al contrastar los resultados analíticos obtenidos de los extractos (melón, sandía, tomate y zanahoria) con los límites máximos permisibles vigentes en la NOM-127-SSA1-2021, se identifican desviaciones críticas que impiden clasificar este recurso como apto para consumo humano sin un tratamiento avanzado previo. El agua obtenida de estos residuos vegetales presenta una carga química (especialmente nitritos, cromo, níquel y fluoruros) que la hace no apta para el consumo humano directo, requiriendo procesos específicos para la remoción de metales pesados y compuestos nitrogenados antes de cualquier consideración de reúso potable.

Los valores de pH obtenidos indican una naturaleza ligeramente ácida. De acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, el rango permisible para reúso de agua tratada en servicios públicos es de 5 a 10; por lo que el valor obtenido en la muestra de tomate (4.61) se encuentra fuera del límite inferior permisible, lo que restringiría su uso sin un tratamiento previo de neutralización (Romero et al., 2014). La marcada acidez, especialmente en el tomate, puede deberse a la presencia natural de ácidos orgánicos (como el cítrico y el málico) inherentes al fruto (Becerra-Castro et al., 2015). Aunque estos valores se encuentran fuera del rango establecido para potabilidad, reflejan condiciones típicas de matrices vegetales y

pueden influir en la estabilidad del sistema durante almacenamiento o tratamiento, debido a su efecto inhibitorio parcial sobre ciertos grupos microbianos (Othman et al., 2021).

En cuanto a la conductividad eléctrica, el extracto de sandía presentó la mayor conductividad eléctrica, con 5,136 µS/cm. Este valor fue superior a los intervalos de 1,237 a 2,355 µS/cm reportados para aguas residuales tratadas mediante lagunas de oxidación y lodos activados. Una conductividad elevada podría representar un riesgo de salinidad para el suelo y los cultivos, debido a que dificulta la absorción de agua y nutrientes (Valeria et al., 2020). La NOM-003-SEMARNAT-1997 no establece un límite máximo permisible para este parámetro.

En contraste, la turbidez elevada indica una carga significativa de partículas suspendidas y coloides orgánicos, lo cual representa un factor limitante para usos directos sin tratamiento. Los valores registrados, especialmente en melón y sandía, exceden drásticamente los límites de la NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece un valor promedio mensual máximo de 20 a 30 mg/L de sólidos suspendidos para servicios al público con contacto directo o indirecto. Sin embargo, en aplicaciones agronómicas indirectas esta fracción puede aportar materia orgánica y micronutrientes, como se ha señalado en estudios donde aguas derivadas de residuos vegetales presentan componentes coloidales con potencial de retorno al suelo (Vazquez-Aguilar et al., 2022). Adicionalmente, las concentraciones elevadas de compuestos nitrogenados observadas en el agua recuperada sugieren la liberación de nitrógeno orgánico y formas inorgánicas asociadas a la degradación de proteínas y otros metabolitos del tejido vegetal. Este patrón coincide con reportes de efluentes hortofrutícolas donde el nitrógeno total puede alcanzar valores altos debido a la composición intrínseca del material y a su rápida transformación bioquímica (Qin et al., 2022). Aunque estos parámetros exceden límites de potabilidad, también representan una ventaja potencial para usos agrícolas indirectos, ya que pueden funcionar como fuente de nutrientes, siempre que se controle el riesgo sanitario y químico (Hassan et al., 2022).

En cuanto a la alcalinidad, el valor de la zanahoria (855 mg/L) actúa como un tampón del pH, lo cual puede ser favorable para la estabilidad del sistema, pero valores excesivos pueden alterar el pH del suelo a largo plazo (Barba et al., 2010). El calcio (73.5 - 99 mg/L) y el magnesio (33.25 - 90.75 mg/L) son nutrientes esenciales, pero su acumulación contribuye a la salinidad y dureza del agua, lo que puede degradar la estructura del suelo (Becerra-Castro et al., 2015). Respecto a los fluoruros, los valores detectados por encima de límites normativos en algunas muestras podrían relacionarse con la disponibilidad de este ion en suelos agrícolas o con prácticas de fertilización, tal como se ha documentado en sistemas hídricos con presencia natural o antropogénica de fluoruro (Martínez-Acuña et al., 2016).

Para los resultados de compuestos nitrogenados, a pesar de que no existe un límite máximo permisible por la NOM-003-SEMARNAT-1997, la FAO (2013), establece que el nitrógeno es un nutriente valioso que puede permitir un ahorro en fertilizantes químicos. Sin embargo, concentraciones superiores a 66 mg/L son potencialmente fitotóxicas, pudiendo causar un crecimiento foliar excesivo, retraso en la maduración y mala calidad del fruto (Valeria et al., 2020). Asimismo, los nitratos (hasta 36 mg/L) representan un riesgo de contaminación de acuíferos por lixiviación (Becerra-Castro et al., 2015; Sklarz et al., 2013).

En cuanto a metales traza, la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece "*el agua residual tratada reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la Tabla 3 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*". El valor máximo en sandía de 0.5318 mg/L de Cr no excede el límite máximo permisible (1 mg/L). Salazar-Peralta, et. al. (2022), estudiaron aguas residuales provenientes de la industria con valores mayores de 1.5 mg/L de Cr (VI), lo cual evidencia que no tienen el tratamiento adecuado para su descarga y manejo. El cromo es un metal pesado que puede acumularse en el suelo y ser absorbido por las plantas, representando un riesgo de toxicidad en la cadena alimentaria (FAO, 2013). Mientras que el manganeso se encuentra dentro de los límites de riego comunes (≤0.3 mg/L), el níquel en concentraciones de 1.0 mg/L es motivo de vigilancia, ya que los metales pesados no se eliminan con tratamientos convencionales y tienden a la bioacumulación (Becerra-Castro et al., 2015). El Zn se encuentra dentro de los límites aceptables para riego, donde se permiten niveles de hasta 2.0 mg/L en algunas normativas internacionales y hasta 10 mg/L en efluentes tratados en México.

La presencia de Cr, Mn y Ni podría estar asociada con la composición natural de los residuos, la acumulación previa en los tejidos vegetales, el contacto con superficies metálicas o la contaminación ambiental. La presencia de metales pesados en los residuos orgánicos de cultivos como la zanahoria, el melón, la sandía y el tomate es el resultado de procesos de bioacumulación directa o indirecta a través de la cadena alimentaria (Clemens et al., 2016). Estos contaminantes pueden provenir de fuentes naturales, como la erosión de depósitos minerales y rocas volcánicas, o el lixiviado de suelos que contienen metales de forma primaria. Sin embargo, la actividad humana es una fuente crítica; el uso de aguas residuales industriales (de refinerías, acereras, curtiembres o la industria electrónica) y domésticas para el riego aporta metales como plomo, cadmio, cromo y níquel (OMS, 2011). Asimismo, las prácticas agrícolas intensivas introducen metales mediante la aplicación de plaguicidas y el uso excesivo de fertilizantes, los cuales pueden contener trazas de elementos (Alengebawy et al., 2021). Hallazgos similares han sido reportados en estudios sobre contaminación por metales en aguas y matrices asociadas a actividades agroindustriales (Mendoza-Mora et al., 2023; Ponce-Hernández et al., 2025). Por ello, cualquier esquema de reutilización requiere estrategias de remoción o control de metales cuando el destino sea agrícola o industrial.

El agua obtenida de estos residuos sólidos vegetales posee un alto valor fertilizante debido a su contenido de N, minerales y materia orgánica; no obstante, el incumplimiento de la normativa en parámetros como turbidez, nitrógeno total y cromo implica que no es apta para reúso directo ni descarga sin previo tratamiento (García Garduño et al., 2026; Martinez-Lopez et al., 2014). Se recomienda una dilución significativa o procesos como la coagulación-floculación para reducir la turbidez y procesos biológicos o de oxidación avanzada para degradar la carga orgánica y nitrogenada, con el fin de mejorar su compatibilidad con aplicaciones agrícolas (FAO, 2013).

En el componente microbiológico, la detección de coliformes y la presencia de *Escherichia coli* en al menos una de las muestras indican contaminación microbiológica asociada a la manipulación, almacenamiento o carga microbiana propia del residuo vegetal. Este resultado coincide

con reportes donde los residuos orgánicos húmedos favorecen el crecimiento de microorganismos indicadores, especialmente cuando existe contaminación cruzada durante el manejo (Mazari-Hiriart et al., 2008). La ausencia de *Salmonella* spp. y *Giardia lamblia* es un hallazgo favorable, aunque no elimina la necesidad de tratamientos complementarios si se pretende reutilizar el agua recuperada, particularmente en escenarios agrícolas donde el contacto con cultivos o suelo pueda representar un riesgo sanitario. Se ha reportado que procesos terciarios de desinfección, como cloración o radiación UV, pueden reducir de manera efectiva microorganismos indicadores en aguas destinadas a riego (Christou et al., 2014).

A partir de los resultados obtenidos, la interpretación del agua recuperada debe diferenciarse según el posible destino de uso. En términos de potabilidad, las muestras evaluadas no cumplen con los criterios establecidos para agua de uso y consumo humano, debido a la presencia de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fuera de los límites de referencia, por lo que no deben considerarse aptas para consumo humano sin tratamientos avanzados de potabilización, desinfección y control de metales.

En relación con el reúso no potable, los resultados sugieren que el agua recuperada podría representar una corriente líquida de interés dentro de esquemas de economía circular; sin embargo, su aprovechamiento no puede plantearse como uso directo. Para este escenario sería necesario integrar tratamientos complementarios orientados a la reducción de turbidez, control de sólidos, ajuste de pH, remoción o control de metales y desinfección, además de verificar el cumplimiento normativo según el tipo de reúso considerado.

Para un posible uso agrícola indirecto, la presencia de compuestos nitrogenados, sales minerales y materia orgánica puede representar un aporte potencial de nutrientes. No obstante, este uso debe considerarse únicamente como una posibilidad condicionada, ya que se requiere evaluar previamente la salinidad, fitotoxicidad, acumulación de metales, estabilidad química y microbiológica, así como el efecto sobre suelo y cultivos. Por lo tanto, los resultados obtenidos no demuestran la aptitud agrícola directa del agua recuperada, sino que justifican estudios posteriores de validación.

Finalmente, en cuanto a su posible empleo como base para bioinsumos líquidos, la composición del agua recuperada podría ser de interés por su contenido de materia orgánica y nutrientes; sin embargo, su formulación requeriría procesos específicos de estabilización, control microbiológico, estandarización de composición, evaluación de vida útil e inocuidad. En consecuencia, el presente estudio debe interpretarse como una caracterización preliminar del potencial de valorización del agua recuperada, no como una validación final de uso. Se recomienda ampliar el alcance del estudio mediante la inclusión de un análisis riguroso de parámetros críticos adicionales, tales como la concentración de metales pesados y otros contaminantes emergentes característicos de los residuos agroindustriales. Asimismo, para fortalecer la viabilidad y transferibilidad del proyecto a escala real, es fundamental incorporar un estudio económico detallado que evalúe los costos de inversión, operación y el retorno financiero de la tecnología propuesta. Los estudios posteriores deberán incluir análisis confirmatorios de metales, evaluación de contaminantes emergentes y un análisis económico que considere los costos de inversión y operación, así como la viabilidad del proceso a escala real.

5. Conclusiones

La recuperación de agua a partir de residuos agroalimentarios generados en mercados locales mostró viabilidad técnica mediante métodos físicos simples, con rendimientos dependientes del tipo de residuo y del mecanismo de extracción aplicado. El prensado mecánico presentó mejor desempeño en matrices blandas, mientras que la trituración favoreció la liberación de agua en tejidos más compactos, lo que confirma que la selección del método debe ajustarse a las características estructurales del material vegetal.

El agua recuperada presentó limitaciones importantes para su uso potable y para cualquier aplicación directa, debido a la presencia de turbidez elevada, compuestos nitrogenados, metales traza y contaminación microbiológica indicadora. Por lo tanto, los resultados obtenidos no permiten afirmar su aptitud inmediata para reúso, sino que evidencian la necesidad de tratamientos complementarios de clarificación, ajuste fisicoquímico, desinfección y control de metales, además de validación analítica mediante métodos confirmatorios cuando corresponda. En conjunto, los resultados respaldan la valorización de residuos agroalimentarios como una estrategia sostenible para reducir el impacto ambiental de su disposición y generar corrientes líquidas reutilizables, contribuyendo a esquemas locales de economía circular y aprovechamiento alternativo del recurso hídrico.

En este sentido, el agua recuperada debe considerarse como una corriente líquida con potencial de valorización condicionado, particularmente para escenarios de reúso no potable, uso agrícola indirecto o formulación de bioinsumos líquidos. No obstante, dichos usos requieren estudios adicionales de estabilidad, inocuidad, toxicidad o fitotoxicidad, riesgo sanitario y desempeño agronómico antes de su implementación. En conjunto, los resultados respaldan la recuperación de agua como una estrategia preliminar de economía circular, pero no como una alternativa de aplicación directa sin tratamiento y validación posterior.

6. Agradecimientos

Proyecto financiado por el FIDEICOMISO 23871, número de proyecto 2024-02-2387116, administrado por el Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología (COPOCYT).

7. Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

8. Referencias

1. Martínez RDS, Jiménez LD, Juárez OA, Hernández SC. 2024. Characterization of municipal solid waste with the perspective of biofuels and bioproducts recovery in Northeast Mexico. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 26(6):3665–80
2. Angeles-Segoviano M, Hernández-Vázquez B. 2023. Differentiation of food preservation methods to avoid waste. *Horticulture International Journal*. Volume 7(Issue 1):1–4
3. Tedesco DEA, Scarioni S, Tava A, Panseri S, Zuorro A. 2021. Fruit and Vegetable Wholesale Market Waste: Safety and Nutritional Characterisation for Their Potential Re-Use in Livestock Nutrition. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9478*. 13(16):9478
4. Bautista-Capetillo C, Pineda-Martínez H, Flores-Chaires LA, Pineda-Martínez LF. 2025.

Agriculture Resilient at Three Irrigation Modules of Zacatecas, Mexico: Water Scarcity and Climate Variability. *Agronomy 2025, Vol. 15, Page 800*. 15(4):800

5. Lee A, Lan JCW, Jambrak AR, Chang JS, Lim JW, Khoo KS. 2024. Upcycling fruit waste into microalgae biotechnology: Perspective views and way forward. *Food Chemistry: Molecular Sciences*. 8:100203
6. Martínez RDS, Jiménez LD, Juárez OA, Hernández SC. 2024. Characterization of municipal solid waste with the perspective of biofuels and bioproducts recovery in Northeast Mexico. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 26(6):3665–80
7. Peña-Ortiz Z, Beristain-Cardoso R, Cervantes-Zepeda I, García-Mondragón D, Gallego-Alarcón I, González-Blanco G. 2025. Physical, chemical and bromatological characterization of the organic fraction of urban solid waste: Potential and possible applications. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 41:297–309
8. Gupta PJ, Trivedi MJ, Soni HP. 2023. Proximate Analysis of Vegetable and Fruit Waste Collected from the Kadi Vegetable Market, Gujarat. *Biosci. Biotechnol. Res. Asia*. 20(2):673–79
9. Morales-Polo C, Cledera-Castro M del M, Soria BYM. 2019. Biogas Production from Vegetable and Fruit Markets Waste—Compositional and Batch Characterizations. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 6790*. 11(23):6790
10. Asquer C, Pistis A, Scano E. 2013. Characterization of fruit and vegetable wastes as a single substrate for the anaerobic digestion. *Environ. Eng. Manag. J.*
11. Mozhiarasi V, Raghul R, Speier CJ, Benish PM, Weichgrebe D, Srinivasan S V. 2019. Composition Analysis of Major Organic Fractions of Municipal Solid Waste Generated from Chennai. *Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies: 7th IconSWM—ISWMAW 2017: Volume 1*, pp. 143–52
12. Montenegro-Landívar MF, Tapia-Quirós P, Vecino X, Reig M, Valderrama C, et al. 2021. Fruit and vegetable processing wastes as natural sources of antioxidant-rich extracts: Evaluation of advanced extraction technologies by surface response methodology. *J. Environ. Chem. Eng.* 9(4):
13. Rifna EJ, Misra NN, Dwivedi M. 2023. Recent advances in extraction technologies for recovery of bioactive compounds derived from fruit and vegetable waste peels: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 63(6):719–52
14. Teigiserova DA, Tiruta-Barna L, Ahmadi A, Hamelin L, Thomsen M. 2021. A step closer to circular bioeconomy for citrus peel waste: A review of yields and technologies for sustainable management of essential oils. *J. Environ. Manage.* 280:111832
15. Baykus G, Unluturk S. 2024. Cold Pressed vs. Centrifugal Juice: Comparison in Terms of the Juice Yield, Physicochemical and

Phytochemical Properties. *Food Science and Engineering*, pp. 145–54
16. Salahuddin M, Basri M, Nadiah N, Shah AK, Sulaiman A, et al. 2021. Progress in the Valorization of Fruit and Vegetable Wastes: Active Packaging, Biocomposites, By-Products, and Innovative Technologies Used for Bioactive Compound Extraction. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3503*. 13(20):3503
17. Romero S, Villagomez A, Trasviña D, García J, Gallegos R, et al. 2014. Treatment And Use Of Wastewater In Mexicali, Baja California, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 181:591–601
18. Becerra-Castro C, Lopes AR, Vaz-Moreira I, Silva EF, Manaia CM, Nunes OC. 2015. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environ. Int.* 75:117–35
19. Othman YA, Al-Assaf A, Tadros MJ, Albalawneh A. 2021. Heavy Metals and Microbes Accumulation in Soil and Food Crops Irrigated with Wastewater and the Potential Human Health Risk: A Metadata Analysis. *Water 2021, Vol. 13, Page 3405*. 13(23):3405
20. Valeria F, Pardo G, Del M, Jacobo-Salcedo R, Cueto-Wong JA, et al. 2020. Caracterización de aguas residuales tratadas de la comarca lagunera y su viabilidad en el riego agrícola. *Rev. Mex. De Cienc. Agric.* 11(1):189–201
21. Vazquez-Aguilar C, Suarez-García SM, PÉREZ-DURAN MA, Reyes-Hernandez G. 2022. Comparative study of the physicochemical and microbiological parameters of two artesian wells in the community of San Pedro, Frontera, Centla, Tabasco. *ECORFAN Journal-Ecuador*, pp. 26–32
22. Qin Y, Li H, Ma S, Li K, Zhang X, et al. 2022. Recovery and utilization of phosphorus from fruit and vegetable wastewater. *Sci. Rep.* 12:
23. Hassan J, Rajib MMR, Sarker U, Akter M, Khan MNEA, et al. 2022. Optimizing textile dyeing wastewater for tomato irrigation through physiochemical, plant nutrient uses and pollution load index of irrigated soil. *Scientific Reports 2022 12:1*. 12(1):10088-
24. Barba LE, Torres P, Rodríguez Victoria JA, Marmolej LF, Pizarro CA. 2010. Influencia de la incorporación de lixiviados sobre la biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales domésticas. *Ingeniería e Investigación*. 30(1):75–79
25. Martínez-Acuña MI, Mercado-Reyes M, Alegría-Torres JA, Mejía-Saavedra JJ. 2016. Preliminary human health risk assessment of arsenic and fluoride in tap water from Zacatecas, México. *Environ. Monit. Assess.* 188(8):
26. FAO. 2013. Reutilización del agua y agricultura: Beneficios para todos?
27. Sklarz MY, Zhou M, Chavez DLF, Yakirevich A, Gillor O, et al. 2013. Effect of Treated Domestic Wastewater on Soil Physicochemical

and Microbiological Properties. *J. Environ. Qual.* 42(4):1226–35

28. Peralta AS, Salazar JAP, Salazar UP, Chávez RH. 2022. Tratamiento fisicoquímico de agua residual proveniente del proceso de cromatizado. *Científica*. 26(2):1–9
29. Clemens S, Ma JF. 2016. Toxic Heavy Metal and Metalloid Accumulation in Crop Plants and Foods. *Annu. Rev. Plant Biol.* 67:489–512
30. *Guías para la calidad del agua de consumo humano (4º ED.); 2011 - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud*. www.paho.org
31. Alengebawy A, Abdelkhalek ST, Qureshi SR, Wang MQ. 2021. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*. 9(3):42
32. Mendoza-Mora F, Cruz-Cárdenas G, Silva JT, Ochoa-Estrada S, Álvarez-Bernal D. 2023. Evaluation of the physical and chemical quality and trace elements of water in Cupatitzio River, Michoacán. *Tecnología y ciencias del agua*. 14(5):364–412
33. Ponce-Hernández A, Carranza-Álvarez C, Ceballos-Maldonado JG, Rubio-Gómez JA, Martínez-Soto D. 2025. Overview of the heavy metal contamination in Mexico: sources of the contamination and issues in human health. *Environ. Geochem. Health*. 47 3(3):
34. Martinez-Lopez A, Padrón-Hernández W, Rodríguez-Bernal OF, Chiquito-Coyotl O, Escarola-Rosas MA, et al. 2014. Alternativas actuales del manejo de lixiviados. . 9(1):37–47
35. García Garduño EM, Linares-Hernández I, Castillo-Suárez LA. 2026. La segunda vida del agua: el arte de reciclar el recurso más esencial. *Revista Digital Universitaria*. 27(2):
36. Mazari-Hiriart M, Ponce-de-León S, López-Vidal Y, Islas-Macías P, Amieva-Fernández RI, Quiñones-Falconi F. 2008. Microbiological Implications of Periurban Agriculture and Water Reuse in Mexico City. *PLoS One*. 3(5):e2305
37. Christou A, Maratheftis G, Eliadou E, Michael C, Hapeshi E, Fatta-Kassinos D. 2014. Impact assessment of the reuse of two discrete treated wastewaters for the irrigation of tomato crop on the soil geochemical properties, fruit safety and crop productivity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 192:105–14

Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Efecto del Thidiazuron sobre el crecimiento vegetativo y la productividad de higuera (*Ficus carica* L.) bajo condiciones áridas

Effect of thidiazuron on the vegetative growth and productivity of fig (*Ficus carica* L.) under arid conditions

Ruisanchez-Ortega, Y.[a,c]*, Núñez-Ramírez, F.[b], Romero-Félix, C.S.[c], Ruelas-Islas, J.R.[c], Buelna-Tarín, S.[c], Salomón-Torres, R.[a], Valle-Gough, R.[b], Olivas-López, C.A.[a], Samaniego-Sandoval, L.[a]

[a] Universidad Estatal de Sonora. C.P. 83455, San Luis Rio Colorado. Sonora. México. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4317-3330*, https://orcid.org/0000-0002-6486-2131, https://orcid.org/0000-0002-2327-4608.

[b] Instituto de Ciencia Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, C.P. 21705, Mexicali, Baja California. México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5405-3875, https://orcid.org/0000-0002-0376-946X.

[c] Facultad de Agronomía Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, C.P. 81110, Sinaloa. México. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4317-3330*, https://orcid.org/0000-0002-8336-447X, https://orcid.org/0000-0002-8833-6929, https://orcid.org/0000-0001-7239-7594.

yohandri.ruisanchez@ues.mx*; fidel.nunez@uabc.edu.mx; celiaromero@uas.mx; chuyitaruelas@favf.mx; buelnatarin@gmail.com; ricardo.salomon@ues.mx; raul.gough@ues.mx; yoyo1982ok@gmail.com; laura.samaniego@ues.mx

Innovación tecnológica: Se presenta la evaluación de regulador del crecimiento vegetal en el cultivo de higuera.

Área de aplicación industrial: En el área de la agricultura, noroeste de México**.**

Recibido: 30 junio 2026
Aceptado: 05 octubre 2026

Abstract

Thidiazuron (TDZ) is a plant growth regulator with cytokinin activity whose use in fig trees under field conditions has been scarcely studied. This study aimed to evaluate the effects of different TDZ doses on the vegetative growth and yield components of *Ficus carica* L. cv. Black Mission during the 2024 and 2025 growing seasons in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico. A completely randomized design with three treatments (0, 0.75 and 1.00 mL L^{-1}) and four replicates was used. One application was performed per growing season in May, when the plants exhibited active vegetative growth and the fruits were at an early developmental stage. Shoot length and diameter, number of leaves, representative leaf area, number of fruits, average fruit weight, and yield were evaluated. The 0.75 mL L^{-1} dose promoted shoot elongation, whereas shoot diameter showed a

transient response and representative leaf area was not significantly affected by TDZ. Treated plants exhibited fewer leaves during the first 21 days after application. Both TDZ concentrations significantly increased average fruit weight and yield compared with the control, with no significant differences between concentrations for these variables. The 1.00 mL L^{-1} concentration produced the highest number of fruits. The year and the dose × year interaction did not significantly affect the yield variables. These results indicate that TDZ has the potential to improve the productivity of 'Black Mission' figs under the evaluated conditions.

Keywords: Cytokinins; vegetative growth; fig; growth regulators; yield.

Resumen

El Thidiazuron (TDZ) es un regulador del crecimiento con actividad citocinínica cuyo uso en higuera bajo condiciones de campo ha sido escasamente estudiado. El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes dosis de TDZ sobre el crecimiento vegetativo y los componentes del rendimiento de *Ficus carica* L. cv. Black Mission durante los ciclos agrícolas 2024 y 2025 en el Valle de Mexicali, Baja California, México. Se utilizó un diseño completamente al azar con tres tratamientos (0, 0.75 y 1.00 mL L^{-1}) y cuatro repeticiones. Se realizó una aplicación por ciclo durante mayo, cuando las plantas presentaban crecimiento vegetativo activo y frutos en desarrollo temprano. Se evaluaron longitud y diámetro del brote, número de hojas, área de una hoja representativa, número de frutos, peso promedio del fruto y rendimiento. La dosis de 0.75 mL L^{-1} favoreció la elongación del brote, mientras que el diámetro mostró una respuesta transitoria y el área de la hoja representativa no fue afectada significativamente por el TDZ. Las plantas tratadas presentaron menor número de hojas durante los primeros 21 días posteriores a la aplicación. Ambas concentraciones de TDZ incrementaron significativamente el peso promedio del fruto y el rendimiento respecto al testigo, sin diferencias entre ellas para estas variables. La concentración de 1.00 mL L^{-1} produjo el mayor número de frutos. El año y la interacción dosis × año no afectaron significativamente las variables productivas. Estos resultados indican que el TDZ presenta potencial para mejorar la productividad de 'Black Mission' bajo las condiciones evaluadas.

Palabras claves: *Citocininas; crecimiento vegetativo; higuera; reguladores del crecimiento; rendimiento.*

Introducción

La higuera (*Ficus carica* L.) es un frutal cultivado en regiones mediterráneas, subtropicales y semiáridas, cuyos frutos se destinan tanto al consumo fresco como al procesamiento. En 2024, la producción mundial de higo alcanzó aproximadamente 1.34 millones de toneladas, concentrándose principalmente en Turquía, Egipto, Argelia, Marruecos e Irán, con Turquía como principal productor mundial, con alrededor del 28% del volumen total (FAOSTAT, 2026). En México, su cultivo constituye una actividad hortícola emergente con posibilidades de expansión, particularmente en las regiones áridas y semiáridas del noroeste del país. Sin embargo, el desarrollo de este sistema productivo enfrenta limitaciones relacionadas con la disponibilidad de tecnologías de manejo agronómico validadas localmente. Una revisión reciente sobre la producción de higo en México identificó vacíos de

conocimiento relacionados específicamente con sistemas de poda, uso de reguladores de crecimiento vegetal y manejo poscosecha, aspectos que limitan el desarrollo de recomendaciones técnicas adaptadas a las condiciones regionales (Ruisanchez-Ortega et al., 2026).

Entre los cultivares establecidos comercialmente en México, 'Black Mission' presenta particular relevancia productiva y constituye el cultivar predominante en plantaciones comerciales del noroeste del país, particularmente en Baja California y Sonora (Ruisanchez-Ortega et al., 2026). Su importancia agronómica también se refleja en investigaciones recientes realizadas en México, donde se ha evaluado su respuesta productiva a diferentes estrategias de fertilización y sistemas de manejo (Muñoz-Rocha et al., 2025). En este contexto, la evaluación de prácticas orientadas a mejorar su crecimiento y rendimiento resulta pertinente para los sistemas comerciales establecidos en regiones áridas del noroeste mexicano.

Entre estas estrategias, el empleo de reguladores de crecimiento vegetal representa una alternativa para modificar determinados procesos asociados con el desarrollo vegetativo y reproductivo de los frutales. El Thidiazuron (TDZ) es un compuesto derivado de fenilurea con elevada actividad citocinínica, cuya respuesta fisiológica depende de factores como la concentración utilizada, el tejido tratado y el estado de desarrollo de la planta (Ali et al., 2022). El TDZ ha mostrado efectos sobre diferentes procesos reproductivos y productivos en especies frutales bajo condiciones de campo. En peral (*Pyrus* spp.), su aplicación durante la floración incrementó el cuajado y el rendimiento y, dependiendo del cultivar, también el tamaño del fruto (Pasa et al., 2017). Asimismo, en kiwi (*Actinidia* spp.), tratamientos con TDZ han promovido incrementos en la masa y el tamaño del fruto (Famiani et al., 2007). Estos antecedentes evidencian que la respuesta al TDZ puede expresarse en diferentes componentes del crecimiento y la productividad de especies frutales, aunque su magnitud depende de la especie, cultivar, concentración y momento de aplicación.

En *F. carica*, la sensibilidad de los tejidos a reguladores con actividad citocinínica ha sido demostrada en estudios de propagación in vitro. Parab et al. (2021), al evaluar concentraciones de TDZ entre 5 y 30 mM en yemas apicales de *F. carica* var. Black Jack cultivadas in vitro, observaron respuestas diferenciales en la inducción de brotes, registrándose el mayor número de brotes con 20 mM de TDZ. Aunque estos resultados corresponden a condiciones in vitro y a concentraciones que no son directamente comparables con aplicaciones foliares en campo, evidencian la capacidad de los tejidos de higuera para responder al TDZ.

A pesar del potencial del TDZ como regulador del crecimiento vegetal, la información disponible sobre su aplicación foliar en plantas adultas de *F. carica* bajo condiciones de campo continúa siendo limitada, particularmente respecto a sus efectos simultáneos sobre el crecimiento vegetativo y los componentes del rendimiento. Esta brecha adquiere especial importancia en el noroeste de México, donde se ha señalado la necesidad de generar información sobre el uso de reguladores de crecimiento adaptada a los sistemas regionales de producción de higo (Ruisanchez-Ortega et al., 2026). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes dosis de Thidiazuron sobre el crecimiento vegetativo y los componentes del rendimiento de *Ficus carica* L. cv. Black Mission durante dos ciclos agrícolas bajo condiciones de campo

en el Valle de Mexicali, Baja California, México.

Materiales y equipos

La investigación se realizó durante los ciclos agrícolas 2024 y 2025 en una huerta comercial de la empresa Figs and Dates, ubicada en el Valle de Mexicali, Baja California, México (32.533422° N, 115.131355° O; Figura 1). El cultivo se estableció en condiciones de campo abierto sobre un suelo clasificado como Xerosol, con pH de 8.13, conductividad eléctrica de 1.65 dS m^{-1}, contenido de materia orgánica de 0.95%, nitrógeno disponible de 60.2 mg kg^{-1}, fósforo de 11.4 mg kg^{-1} y potasio intercambiable de 0.49 cmol(+) kg^{-1}.

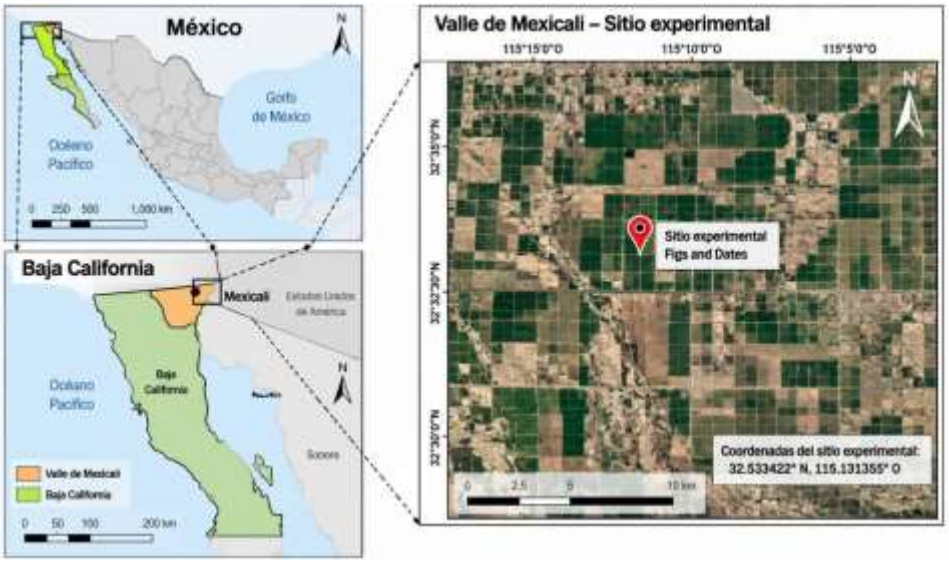


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio experimental en el Valle de Mexicali, Baja California, México (32.533422° N, 115.131355° O).

Para caracterizar el ambiente durante el desarrollo del cultivo se consideraron los registros de temperatura del aire, humedad relativa y precipitación correspondientes a los ciclos agrícolas 2024 y 2025 (CONAGUA, 2025). Durante el periodo comprendido entre mayo y octubre, correspondiente a la aplicación de los tratamientos y desarrollo de la cosecha, la temperatura media fue de 24.3 °C en 2024 y 23.7 °C en 2025. Las temperaturas medias mensuales oscilaron entre 19.7 y 27.7 °C en 2024 y entre 20.5 y 26.7 °C en 2025. La información climática se utilizó únicamente con fines descriptivos y para contextualizar las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolló el estudio, por lo que estas variables no fueron consideradas como factores dentro del diseño experimental ni del análisis estadístico.

Se utilizaron plantas de higuera (*F. carica* L.) variedad Black Mission de dos años de edad, establecidas a una densidad de 1,666 plantas ha^{-1} (2 × 3 m). Esta variedad se caracteriza por su elevada adaptación a condiciones áridas y por producir frutos de epidermis violeta oscura con alta aceptación comercial (García Ruíz, 2015). Las plantas presentaban crecimiento uniforme, ausencia de daños severos ocasionados por plagas o enfermedades y recibieron un manejo agronómico homogéneo durante todo el periodo experimental.

Métodos experimentales

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA), con tres tratamientos correspondientes a diferentes

dosis de Thidiazuron (TDZ): T1, 0 mL L^{-1} (testigo); T2, 0.75 mL L^{-1}; y T3, 1.00 mL L^{-1}, con cuatro repeticiones por tratamiento. Los tratamientos fueron asignados aleatoriamente a 12 parcelas experimentales distribuidas dentro de un sector de la huerta con condiciones homogéneas de suelo, topografía y manejo agronómico. Cada parcela experimental ocupó una superficie de 54 m² (18 m de largo × 3 m de ancho) y constituyó una unidad experimental independiente.

Cada unidad experimental estuvo integrada por cinco plantas, para un total de 60 plantas en el experimento (3 tratamientos × 4 repeticiones × 5 plantas). Para la toma de datos se utilizaron las tres plantas centrales de cada unidad experimental, mientras que las dos plantas ubicadas en los extremos se consideraron plantas de borde, con el propósito de reducir posibles efectos derivados de la proximidad entre parcelas. De esta manera, se evaluaron 36 plantas útiles en total. Las tres plantas centrales constituyeron unidades de observación o submuestras dentro de cada parcela, mientras que la parcela de cinco plantas constituyó la unidad experimental para determinar el efecto de los tratamientos.

El producto utilizado fue Charger-Plex® (AgroScience, Jalisco, México), formulado con 42.5% de Thidiazuron (TDZ) como ingrediente activo. El TDZ es un regulador del crecimiento vegetal derivado de fenilurea con actividad citocinínica (Nisler, 2018). Se realizó una única aplicación por ciclo agrícola, el 15 de mayo de 2024 y el 14 de mayo de 2025. Al momento de la aplicación, las plantas se encontraban en crecimiento vegetativo activo, con brotes que presentaban aproximadamente 12 hojas completamente expandidas por rama. Los frutos se encontraban en una etapa temprana de desarrollo, caracterizada por coloración verde, consistencia firme y crecimiento activo, correspondiente aproximadamente a la transición entre la fase I de rápido crecimiento y la fase II de crecimiento lento de la curva doble sigmoidea característica del desarrollo del fruto de *F. carica* L. (Jusoh & Ding, 2023).

La solución se preparó de acuerdo con la concentración correspondiente a cada tratamiento (0, 0.75 y 1.00 mL L^{-1} del producto comercial), utilizando agua ajustada a pH 6.0 y Surfacid® como surfactante a una concentración de 1 mL L^{-1}. La aplicación se realizó mediante aspersión foliar con una mochila manual de 15 L equipada con una boquilla regulable de cono hueco (hollow cone), operada a una presión de 20 psi y con un volumen de aplicación equivalente a 300 L ha^{-1}. La aspersión se dirigió uniformemente sobre brotes, hojas y frutos presentes, evitando el escurrimiento de la solución.

En ambos ciclos, las aplicaciones se efectuaron entre las 06:00 y 07:00 h, con una temperatura ambiente aproximada de 25 °C. Durante la aplicación no se registraron precipitaciones ni condiciones ambientales adversas que pudieran comprometer la deposición del producto sobre la superficie vegetal.

El sistema de riego empleado fue por goteo, utilizando cuatro emisores por planta de 8 L h^{-1} (gasto total 32 L h^{-1} por planta) distribuidos alrededor de la planta a 30 cm entre sí. La aplicación del agua se distribuyó en tres periodos: brotación (120 L $planta^{-1}$ $semana^{-1}$), cuajado-engorde-envero (200 L $planta^{-1}$ $semana^{-1}$) y maduración (100 L $planta^{-1}$ $semana^{-1}$). La fertilización consistió en 416.5 kg N ha^{-1}, 333.2 kg P ha^{-1}, 500 kg K ha^{-1}, 250 kg Ca ha^{-1} y 125 kg Mg ha^{-1}, la cual se aplicó a través del sistema de riego.

Las variables vegetativas evaluadas fueron longitud del brote (cm), diámetro del brote (mm), número de hojas (u) y área foliar de una hoja representativa (cm²). En cada una de

las 36 plantas útiles se seleccionó un brote representativo, el cual fue identificado al inicio del periodo de evaluación y utilizado de manera permanente para todas las mediciones posteriores. Las evaluaciones se realizaron a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación (dda), de manera que cada brote fue medido repetidamente a través del tiempo.

La longitud del brote se determinó desde la base del brote hasta el ápice utilizando una regla graduada; el diámetro se midió con un vernier digital en la porción media del mismo brote; y el número de hojas correspondió al total de hojas completamente expandidas presentes en el brote seleccionado. Para estimar el área de la hoja, en cada brote seleccionado se eligió una hoja representativa ubicada en la porción media del brote completamente expandida. La hoja seleccionada se identificó y se utilizó para las evaluaciones posteriores a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación (dda). El área de la hoja (cm^2) se estimó de manera no destructiva a partir de sus dimensiones lineales. Se registraron el largo (L), desde la base de la lámina hasta el ápice, y el ancho máximo (A), perpendicular al eje longitudinal. El área se calculó mediante la expresión:

$$\boldsymbol{AF = L * A * K}$$

Donde AF corresponde al área estimada de la hoja (cm^2), L al largo de la hoja (cm), A al ancho máximo de la hoja (cm) y K al coeficiente de corrección. Para *Ficus carica* L. cv. Black Mission se utilizó K = 0.66, de acuerdo con Khamis et al. (2006). El empleo de dimensiones lineales permite realizar estimaciones no destructivas del área de la hoja (Urteaga, 2021).

Las variables productivas evaluadas fueron número de frutos por planta (frutos $planta^{-1}$), peso promedio del fruto (g), rendimiento acumulado por planta (kg $planta^{-1}$) y rendimiento por unidad de superficie (t ha^{-1}). Las cosechas se realizaron sucesivamente entre el 5 de junio y el 20 de octubre de cada ciclo agrícola (2024 y 2025), recolectando los frutos conforme alcanzaron la madurez comercial.

El número de frutos por planta correspondió al total acumulado de frutos cosechados durante dicho periodo. El rendimiento acumulado por planta (kg $planta^{-1}$) se determinó mediante la suma de la masa fresca de los frutos obtenidos en las cosechas sucesivas. El peso promedio del fruto (g) se calculó a partir de la relación entre la masa fresca acumulada de los frutos cosechados y el número total de frutos registrados por planta. Finalmente, el rendimiento por unidad de superficie (t ha^{-1}) se estimó a partir del rendimiento promedio acumulado por planta y la densidad de plantación de 1,666 plantas ha^{-1}.

Los valores obtenidos de las plantas evaluadas dentro de cada parcela se promediaron para generar un único valor por unidad experimental para cada variable y fecha de evaluación. Previo al análisis de varianza, se verificó la normalidad de los residuos mediante la prueba de Anderson-Darling y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene.

Las variables de crecimiento vegetativo longitud y diámetro del brote, número de hojas y área foliar evaluadas a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación (dda) se analizaron separadamente para cada fecha mediante análisis de varianza (ANOVA), considerando los efectos de la dosis de TDZ, el año y la interacción dosis × año. Debido a que las evaluaciones sucesivas correspondieron a las mismas unidades experimentales, el análisis se restringió a las comparaciones entre tratamientos dentro de cada fecha; por tanto, no se realizaron inferencias estadísticas sobre el efecto del

tiempo ni sobre interacciones que involucraran este factor.

Las variables productivas se analizaron mediante un análisis de varianza considerando los efectos de la dosis de TDZ, el año y la interacción dosis × año. Cuando la interacción dosis × año no fue significativa, el efecto de la dosis se interpretó a partir de las medias marginales obtenidas considerando ambos años de evaluación. Cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Los resultados se expresaron como media ± error estándar. Los análisis se realizaron con Minitab® 19 (Minitab LLC, State College, PA, EE. UU.).

Resultados y discusión

Crecimiento vegetativo

En la Tabla 1 se presentan los efectos de las diferentes dosis de Thidiazuron (TDZ) sobre la longitud y el diámetro del brote de higuera cv. Black Mission a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación (dda), considerando además los efectos del año de evaluación y de la interacción dosis × año.

La longitud del brote presentó diferencias significativas entre las dosis de TDZ a los 7 y 21 dda ($P < 0.001$), mientras que a los 14 dda no se detectaron diferencias significativas ($P = 0.070$). A los 7 dda, el testigo y 0.75 mL L^{-1} presentaron valores similares (14.23 y 14.29 cm, respectivamente), ambos superiores a 1.00 mL L^{-1} (13.05 cm). A los 21 dda, 0.75 mL L^{-1} produjo la mayor longitud del brote (39.84 cm), superando significativamente al testigo (35.85 cm) y a 1.00 mL L^{-1} (35.45 cm), entre los cuales no se detectaron diferencias significativas. Esto representó un incremento de 11.1% respecto al testigo. El año y la interacción dosis × año no afectaron significativamente esta variable en ninguno de los momentos evaluados.

El diámetro del brote presentó diferencias significativas entre las dosis de TDZ únicamente a los 14 dda ($P = 0.022$), mientras que a los 7 y 21 dda no se detectaron diferencias significativas ($P = 0.268$ y $P = 0.149$, respectivamente). A los 14 dda, el testigo presentó el mayor diámetro del brote (4.03 mm), significativamente superior a los tratamientos con 0.75 y 1.00 mL L^{-1} de TDZ, ambos con 3.90 mm y sin diferencias entre ellos. El año y la interacción dosis × año no afectaron significativamente esta variable en ninguno de los momentos evaluados.

Tabla 1. Efecto del Thidiazuron (TDZ) sobre la longitud y el diámetro del brote de higuera (*Ficus carica* L.) cv. Black Mission.

Tratamientos	Longitud del brote (cm)			Diámetro del brote (mm)		
Dosis TDZ	**7 dda**	**14 dda**	**21 dda**	**7 dda**	**14 dda**	**21 dda**
0 mL L^{-1}	14.23 ± 0.20 a	23.61 ± 0.18	35.85 ± 0.11 b	2.19 ± 0.05	4.03 ± 0.03 a	4.13 ± 0.05
0.75 mL L^{-1}	14.29 ± 0.21 a	24.09 ± 0.28	39.84 ± 0.16 a	2.11 ± 0.03	3.90 ± 0.04 b	4.01 ± 0.03
1.00 mL L^{-1}	13.05 ± 0.20 b	23.55 ± 0.17	35.45 ± 0.13 b	2.13 ± 0.01	3.90 ± 0.01 b	4.00 ± 0.04
Año						
2024	13.86 ± 0.18	23.75 ± 0.15	36.38 ± 0.10	2.12 ± 0.02	3.93 ± 0.02	4.03 ± 0.04
2025	13.87 ± 0.15	23.74 ± 0.14	36.39 ± 0.11	2.16 ± 0.04	3.95 ± 0.03	4.06 ± 0.02
Significancia						
Dosis (D)	< 0.001	0.070	< 0.001	0.268	0.022	0.149
Año (A)	0.987	0.981	0.959	0.365	0.613	0.571
D × A	0.980	0.988	0.960	0.983	0.978	0.871

Nota: Los valores corresponden a media ± error estándar. Medias seguidas por letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre dosis de TDZ según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Las columnas sin letras corresponden a efectos no significativos de la dosis ($P > 0.05$). D = dosis; A = año; D × A = interacción dosis × año; dda = días después de la aplicación.

La respuesta observada confirma que el crecimiento del brote de higuera puede ser modificado por reguladores con actividad citocinínica. En este sentido, Parab et al. (2021) observaron bajo condiciones in vitro que la respuesta de yemas apicales de *F. carica* var. Black Jack varió en función del regulador del crecimiento utilizado. Aunque estos resultados no son directamente comparables con plantas establecidas en campo, respaldan la sensibilidad de los tejidos de *F. carica* a reguladores con actividad citocinínica. En el presente estudio, esta respuesta se manifestó como una mayor elongación del brote con 0.75 mL L^{-1} de TDZ a los 21 dda. Desde el punto de vista agronómico, el incremento en la longitud del brote observado con 0.75 mL L^{-1} evidencia una mayor respuesta vegetativa temprana; sin embargo, este efecto debe interpretarse conjuntamente con el número de hojas y los componentes productivos antes de atribuirle una ventaja de manejo.

La reducción transitoria del diámetro del brote observada con TDZ a los 14 dda, junto con la mayor elongación registrada con 0.75 mL L^{-1} a los 21 dda, sugiere una respuesta diferencial de los componentes del crecimiento vegetativo. Este comportamiento es congruente con la capacidad del TDZ para modificar procesos de crecimiento y desarrollo vegetal y con la dependencia de sus efectos respecto a la concentración y al estado fisiológico del tejido (Ali et al., 2022). Sin embargo, debido a que las diferencias en diámetro no persistieron hasta los 21 dda, el efecto debe interpretarse como una respuesta transitoria y no como una modificación sostenida del grosor del brote.

El número de hojas fue afectado significativamente por la dosis de TDZ en los tres momentos de evaluación ($P < 0.001$), registrándose los mayores valores en el testigo. A los 21 dda, las aplicaciones de 0.75 y 1.00 mL L^{-1} redujeron el número de hojas en 15.1 y 9.2 %, respectivamente, en comparación con el testigo. En contraste, el área de la hoja representativa no presentó diferencias significativas entre las dosis de TDZ en ninguna de las fechas evaluadas ($P > 0.05$). El año y la interacción dosis × año tampoco mostraron efectos significativos sobre estas variables (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto del Thidiazuron (TDZ) sobre el número de hojas y el área de la hoja representativa de higuera (*Ficus carica* L.) cv. Black Mission.

Tratamientos	**Número de hojas**			**Área de la hoja (cm^2)**		
Dosis TDZ	**7 dda**	**14 dda**	**21 dda**	**7 dda**	**14 dda**	**21 dda**
0 mL L^{-1}	14.57 ± 1.60 a	18.25 ± 2.40 a	19.40 ± 1.80 a	154.16 ± 12.05	167.31 ± 12.62	182.78 ± 12.57
0.75 mL L^{-1}	13.71 ± 2.00 b	14.81 ± 1.80 c	16.48 ± 2.45 b	160.14 ± 12.03	171.70 ± 12.62	180.55 ± 12.55
1.00 mL L^{-1}	14.02 ± 1.40 b	17.01 ± 1.57 b	17.62 ± 3.10 b	155.15 ± 12.00	166.94 ± 12.39	178.11 ± 12.42
Año						
2024	14.00 ± 1.30	16.57 ± 1.90	17.70 ± 1.50	156.38 ± 11.55	168.54 ± 9.76	180.34 ± 11.97
2025	13.20 ± 1.60	16.81 ± 2.10	17.96 ± 1.90	156.59 ± 10.50	168.76 ± 10.14	180.61 ± 11.62
Significancia						
Dosis (D)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.220	0.499	0.568
Año (A)	0.308	0.394	0.224	0.945	0.952	0.568
D × A	0.894	0.996	0.813	0.902	0.984	0.964

Nota: Los valores corresponden a media ± error estándar. Medias seguidas por letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre dosis de TDZ según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Las columnas sin letras corresponden a efectos no significativos de la dosis ($P > 0.05$). D = dosis; A = año; D × A = interacción dosis × año; dda = días después de la aplicación.

La disminución del número de hojas en las plantas tratadas con TDZ, particularmente considerando que 0.75 mL L^{-1} promovió una mayor elongación del brote a los 21 dda, evidencia que los componentes del crecimiento vegetativo respondieron de manera diferencial al regulador. Este comportamiento podría estar asociado con

modificaciones en el patrón de crecimiento del brote relacionadas con la actividad citocinínica del TDZ, cuya respuesta puede variar en función de la concentración aplicada y de la sensibilidad del tejido vegetal (Kumar et al., 2024; Nisler, 2018).

Sin embargo, los resultados obtenidos no permiten establecer el mecanismo fisiológico responsable. Desde el punto de vista agronómico, la mayor elongación acompañada de un menor número de hojas indica que el efecto del TDZ sobre el crecimiento vegetativo no debe interpretarse únicamente a partir de la longitud del brote.

Debido a que se determinó el área de una hoja representativa y no el área foliar total por brote o planta, estos resultados no permiten establecer si la reducción del número de hojas produjo cambios en el área foliar total ni realizar inferencias directas sobre la capacidad fotosintética de las plantas.

Componentes del rendimiento

En la Tabla 3 se presenta el efecto de las diferentes dosis de TDZ sobre el número acumulado de frutos por planta, peso promedio del fruto, rendimiento acumulado por planta y rendimiento por unidad de superficie durante los ciclos agrícolas 2024 y 2025.

La dosis de TDZ afectó significativamente el número de frutos por planta ($P = 0.001$), el peso promedio del fruto, el rendimiento por planta y el rendimiento por unidad de superficie ($P < 0.001$). La concentración de 1.00 mL L^{-1} produjo el mayor número de frutos (431 frutos $planta^{-1}$), seguida de 0.75 mL L^{-1} (420 frutos $planta^{-1}$) y del testigo (414 frutos $planta^{-1}$), con diferencias significativas entre los tres tratamientos. Esto representó un incremento de 4.1% en el número de frutos con 1.00 mL L^{-1} respecto al testigo. El año y la interacción dosis × año no afectaron significativamente esta variable.

El peso promedio del fruto también aumentó significativamente con la aplicación de TDZ. Las concentraciones de 0.75 y 1.00 mL L^{-1} alcanzaron 31.21 y 33.19 g $fruto^{-1}$, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellas, pero ambas superiores al testigo (26.15 g $fruto^{-1}$). De manera similar, el rendimiento acumulado por planta fue de 13.06 y 13.62 kg $planta^{-1}$ con 0.75 y 1.00 mL L^{-1}, respectivamente, frente a 10.77 kg $planta^{-1}$ en el testigo. El rendimiento por unidad de superficie siguió el mismo comportamiento, con 21.76, 22.69 y 17.94 t ha^{-1}, respectivamente. En términos relativos, 1.00 mL L^{-1} incrementó el peso promedio del fruto en 26.9% y el rendimiento en 26.5% respecto al testigo. El año y la interacción dosis × año no mostraron efectos significativos sobre estas variables.

Tabla 3. Efecto del Thidiazuron (TDZ) sobre los componentes del rendimiento de higuera (*Ficus carica* L.) cv. Black Mission.

Tratamientos Dosis TDZ	Número de frutos $planta^{-1}$ (u)	Peso promedio del fruto (g)	Kg $planta^{-1}$	t ha^{-1}
0 mL L^{-1}	414 ± 13.35 c	26.15 ± 0.23 b	10.77 ± 1.40 b	17.94 ± 2.30 b
0.75 mL L^{-1}	420 ± 13.34 b	31.21 ± 0.21 a	13.06 ± 1.10 a	21.76 ± 1.83 a
1.00 mL L^{-1}	431 ± 13.30 a	33.19 ± 0.25 a	13.62 ± 1.38 a	22.69 ± 2.28 a
Año				
2024	421 ± 12.70	30.09 ± 0.19	12.42 ± 1.10	20.70 ± 1.90
2025	422 ± 12.72	30.27 ± 0.20	12.54 ± 1.08	20.90 ± 2.10
Significancia				
Dosis (D)	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Año (A)	0.712	0.517	0.450	0.450
D × A	0.988	0.936	0.894	0.894

Nota: Los valores corresponden a media ± error estándar. Medias seguidas por letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre dosis de TDZ según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Las columnas sin letras corresponden a efectos no significativos de la dosis ($P > 0.05$). D = dosis; A = año; D × A = interacción dosis × año.

El incremento del rendimiento observado con la aplicación de TDZ estuvo asociado principalmente con el mayor peso promedio del fruto, debido a que el aumento relativo de esta variable con 1.00 mL L^{-1} (26.9%) fue considerablemente mayor que el registrado en el número de frutos por planta (4.1%). Esta respuesta coincide con antecedentes en otras especies frutales. En kiwi (*Actinidia deliciosa* 'Hayward'), Famiani et al. (2007) observaron incrementos significativos en el peso del fruto con la aplicación de TDZ. Asimismo, en uva de mesa 'Shine Muscat', tratamientos que incluyeron TDZ en combinación con GA_3 incrementaron el peso y tamaño de las bayas (Choi et al., 2023; Wang et al., 2020). En peral, Pasa et al. (2017) reportaron incrementos en el cuajado y rendimiento y, dependiendo del cultivar, en el tamaño del fruto. En conjunto, estos antecedentes indican que la respuesta productiva al TDZ puede expresarse mediante diferentes componentes del rendimiento y que su magnitud depende de la especie, cultivar, concentración y estrategia de aplicación.

El mayor peso del fruto observado con TDZ podría estar relacionado con su actividad citocinínica, considerando que las citocininas participan en la regulación de la división y expansión celular, procesos determinantes del crecimiento y tamaño final del fruto (Zhao et al., 2021; Ordoñez Trejo et al., 2023; Bu et al., 2025). No obstante, en el presente estudio estos procesos fisiológicos no fueron evaluados directamente, por lo que el incremento en el peso del fruto debe interpretarse como una respuesta asociada a la aplicación de TDZ y no como evidencia directa de un mecanismo fisiológico específico.

Desde el punto de vista agronómico, ambas concentraciones de TDZ incrementaron el peso promedio del fruto y el rendimiento respecto al testigo; sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre 0.75 y 1.00 mL L^{-1} para estas variables. Por lo tanto, bajo las condiciones evaluadas, los resultados evidencian una respuesta productiva favorable a la aplicación de TDZ, pero no permiten establecer superioridad de 1.00 mL L^{-1} sobre 0.75 mL L^{-1} en términos de peso del fruto o rendimiento.

Conclusiones

La concentración de 0.75 mL L^{-1} de TDZ favoreció la elongación del brote, mientras que el diámetro presentó una respuesta transitoria y el área de la hoja representativa no fue afectada significativamente. Ambas concentraciones de TDZ redujeron el número de hojas durante los primeros 21 días posteriores a la aplicación. En las variables productivas, 0.75 y 1.00 mL L^{-1} incrementaron significativamente el peso promedio del fruto y el rendimiento respecto al testigo, sin diferencias significativas entre ambas concentraciones para estas variables, mientras que 1.00 mL L^{-1} produjo el mayor número de frutos por planta. El año y la interacción dosis × año no afectaron significativamente las variables productivas. Bajo las condiciones evaluadas en el Valle de Mexicali, estos resultados muestran que el TDZ tiene potencial para mejorar la productividad de 'Black Mission'; sin embargo, la ausencia de diferencias en rendimiento entre las dos concentraciones evaluadas no permite establecer una concentración óptima.

Referencias

Ali, H. M., Khan, T., Khan, M. A., & Ullah, N. (2022). The multipotent thidiazuron: A mechanistic overview of its roles in callogenesis and other

plant cultures in vitro. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, *69*(6), 2624-2640. https://doi.org/10.1002/bab.2311

Bu, H., Sun, X., Hu, Y., Gu, G., Yang, Y., & Yu, W. (2025). Research Advances in the Regulation of Fruit Size: An Integrated Perspective of Genetic, Hormonal, Epigenetic, and Environmental Control. *Biology*, *14*(12), 1643. https://doi.org/10.3390/biology14121643

Choi, S., Ban, S., & Choi, C. (2023). The Impact of Plant Growth Regulators and Floral Cluster Thinning on the Fruit Quality of 'Shine Muscat' Grape. *Horticulturae*, *9*(3), 392. https://doi.org/10.3390/horticulturae9030392

CONAGUA. (2025). *Servicio Meteorológico Nacional*. https://smn.conagua.gob.mx/es/

Famiani, F., Proietti, P., Pilli, M., Battistelli, A., & Moscatello, S. (2007). Effects of application of thidiazuron (TDZ), gibberellic acid (GA3), and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on fruit size and quality of *Actinidia deliciosa* 'Hayward'. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, *35*(3), 341-347. https://doi.org/10.1080/01140670709510200

FAOSTAT. (2026). *Crop production, yield, harvested area (Global, National—Annual)—FAOSTAT - «FAO catalog»*. https://data.fao.org/catalog/iso/d24a448b-3b62-4c09-8c1d-4a39bb599876?utm_source=chatgpt.com

García Ruíz, M. T. (2015). *Caracterización morfológica y genética de variedades mexicanas de higo (Ficus carica L.)*. http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2570

Jusoh, N. A. M., & Ding, P. (2023). Morphometrics and structural changes of fig (*Ficus carica* L. var. Ipoh Blue Giant) syconium during growth, maturation and on-tree ripening. *Scientia Horticulturae*, *321*, 112347. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112347

Khamis, M. A., Bakry, Kh. A., El-Sayed, M. E., & El-Husseiny, A. M. (2006). Evaluation of some fig cultivar in egypt. 1- Vegetative growth and nutritional status. *ResearchGate*, *1*(2), 87-104.

Kumar, A., Rajan, R., Pandey, K., Ramprasad, R. R., Kaur, G., Vamshi, T., & Singh, T. (2024). Impact of new generation plant growth regulators on fruit crops – A Review. *Horticultural Science*, *51*(1), 1-22. https://doi.org/10.17221/166/2022-HORTSCI

Muñoz-Rocha, B. G., Zermeño-González, A., Ramírez-Rodríguez, H., Betancour-Galindo, R., & Hernández-Pérez, A. (2025). Bocashi y fertilización NPK afectan la producción de higuera cv. Black Mission. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *12*(2). https://doi.org/10.19136/era.a12n2.4179

Nisler, J. (2018). *TDZ: Mode of Action, Use and Potential in Agriculture | Springer Nature Link* (pp. 37-59). Springer, Singapore.

https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-8004-3_2

Parab, A. R., Chew, B. L., Yeow, L. C., & Subramaniam, S. (2021). Organogenesis on apical buds in common fig (*Ficus carica*) var. Black Jack. *Electronic Journal of Biotechnology*, *54*, 69-76. https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2021.10.001

Pasa, M. S., Silva, C. P. D., Carra, B., Brighenti, A. F., Souza, A. L. K. D., & Petri, J. L. (2017). Thidiazuron (TDZ) increases fruit set and yield of 'Hosui' and 'Packham's Triumph' pear trees. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, *89*, 3103-3110. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170644

Ruisanchez-Ortega, Y., Núñez-Ramírez, F., Romero-Félix, C. S., del Rosario Ruelas-Islas, J., Buelna-Tarín, S., Valle-Gough, R., Samaniego-Gámez, B. Y., & Salomón-Torres, R. (2026). Trends and prospects for *Ficus carica* L. production in Mexico. *Discover Plants*, *3*(1), 300. https://doi.org/10.1007/s44372-026-00760-4

Urteaga, O. (2021). Non-Destructive leaf area estimation in fruits: Update and state of the art. *evista FAVE - Ciencias Agrarias, 2*, *20*, 77-90.

Wang, W., Khalil-Ur-Rehman, M., Wei, L.-L., Nieuwenhuizen, N. J., Zheng, H., & Tao, J.-M. (2020). Effect of Thidiazuron on Terpene Volatile Constituents and Terpenoid Biosynthesis Pathway Gene Expression of Shine Muscat (*Vitis labrusca* × *V. vinifera*) Grape Berries. *Molecules*, *25*(11), 2578. https://doi.org/10.3390/molecules25112578