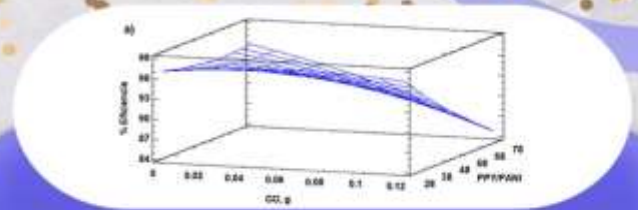




Dispositivo autónomo para el cálculo del ISR en personas físicas

Ramírez-Rosas, J.G., Arroyo-Díaz, S.A., Ortiz-Carranco, A., de la Calleja-Mora, J.



Composito de Óxido de Grafeno/Polianilina/Polipirrol como Anticorrosivo de Cobre en presencia de agua al 3.5% de NaCl aplicando MSR

Arguëlles-Ojeda, J.L., Ovando-Medina, V.M.



Biodegradation of organochlorine compounds with the *Pseudomonas chlororaphis* strain in liquid medium as the only carbon source

Bautista-Bautista, O., Sánchez-Minutti, L., Ortega-Sánchez, E., Dinarín-Tellez-Girón, J., García-Dávila, J.



Desarrollo de una aplicación móvil para el aprendizaje de las lenguas indígenas: Mazahua y Hñahñu

Castillo-Alarcon, I., Sampedro-Mendoza, A., Cásares-García, L., López-Morales, V., Franco-Arcega, A., Cruz-Olguin, J.M., Ojeda-Misses, M.A.



BIO-POTS
Plantando un futuro sostenible

Bio-Pots: Innovación de macetas biodegradables, basado en un modelo de negocio en economía circular

Suárez-Colores, Z.P., Barrios-Reyes, I., Alaníz-Lara, G.Y., Dolores-Ruiz, E., Salazar-Gómez, J.F.



Análisis y Comparación de Algoritmos No Supervisados para Detectar Riesgo de Deserción Estudiantil

Romero-Rodríguez Wendy J. Gpe., García-De-LaRosa Luis Armando, González-Paramo Angélica



Teledetección del incremento de la agricultura protegida y factores que la han impulsado en San Salvador el Verde, Puebla (2010-2022)

Sánchez-Olarte, J., Guevara-Brindis, J., Méndez-Espinoza, J.A.

Cintillo Legal

RIIT REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, Vol. 14, No. 79. Marzo - Abril 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://riit.com.mx/>, correo electrónico: publicacionesriit@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 Camporeddondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, Tel. (844) 414 85 82, fecha de última modificación: 01 Marzo 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
Dispositivo autónomo para el cálculo del ISR en personas físicas Ramírez-Rosas, J.G., Arroyo-Díaz, S.A., Ortiz-Carranco, A., de la Calleja-Mora, J.	1 – 17
Composito de Óxido de Grafeno/Polianilina/Polipirrol como Anticorrosivo de Cobre en presencia de agua al 3.5% de NaCl aplicando MSR Arguelles-Ojeda, J.L., Ovando-Medina, V.M.	18 – 34
Biodegradation of organochlorine compounds with the <i>Pseudomonas chlororaphis</i> strain in liquid medium as the only carbon source Bautista-Bautista, O., Sánchez-Minutti, L., Ortega-Sánchez, E., Tellez-Girón, J.D., Garcia-Dávila, J.	35 – 48
Desarrollo de una aplicación móvil para el aprendizaje de las lenguas indígenas: Mazahua y Hñähñu Castillo-Alarcon, I., Sampedro-Mendoza, A., Cásares-García, L., López-Morales, V., Franco-Árcega, A., Cruz-Olguín, J.M., Ojeda-Misses, M.A.	49 – 74
Bio-Pots: Innovación de macetas biodegradables, basado en un modelo de negocio en economía circular Suárez-Colores, Z.P., Barrios-Reyes, I., Alaniz-Lara, G.Y., Dolores-Ruiz, E., Salazar-Gómez, J.F.	75 – 92
Análisis y Comparación de Algoritmos No Supervisados para Detectar Riesgo de Deserción Estudiantil Romero-Rodríguez, W.J.G., García-De-La Rosa, L.A., González-Páramo, A.	93 – 113
Teledetección del incremento de la agricultura protegida y factores que la han impulsado en San Salvador el Verde, Puebla (2010-2022) Sánchez-Olarte, J., Guevara-Brindis, J., Méndez-Espinoza, J.A.	114 - 131



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Dispositivo autónomo para el cálculo del ISR en personas físicas Autonomous Device for Income Tax (ISR) Calculation in Individuals

Ramírez-Rosas, J.G.^{a*}, Arroyo-Díaz, S.A.^b, Ortiz-Carranco, A.^c, de la Calleja-Mora, J.^d

^a Ingeniería Financiera; Universidad Politécnica de Puebla; C.P. 72640, Juan C. Bonilla, Puebla (<http://orcid.org/0000-0003-0664-3843>).

^b Ingeniería en Mecatrónica; Universidad Politécnica de Puebla; C.P. 72640, Juan C. Bonilla, Puebla (<https://orcid.org/0000-0003-4970-5450>).

^c Ingeniería en Tecnologías de la Información; Universidad Politécnica de Puebla; C.P. 72640, Juan C. Bonilla, Puebla (<https://orcid.org/0000-0001-7835-6339>).

^d Departamento de Posgrado; Universidad Politécnica de Puebla; C.P. 72640, Juan C. Bonilla, Puebla (<https://orcid.org/0000-0002-6846-3162>).

jose.ramirez@uppuebla.edu.mx^{*}; araceli.ortiz@uppuebla.edu.mx; salvador.arroyo@uppuebla.edu.mx;
jorge.delacalleja@uppuebla.edu.mx

Innovación tecnológica: Dispositivo autónomo para el cálculo del ISR en personas físicas.

Aplicación industrial: Área de contabilidad en pymes y despachos contables.

Recibido: 08 septiembre 2025

Aceptado: 16 enero 2026

Abstract

The purpose of this work is to present the development and evaluation of an autonomous physical device designed to calculate ISR for individuals without relying on an internet connection or data storage, thereby differentiating it from current mobile applications. The prototype integrates a processing board connected to a screen and an alphanumeric keyboard, powered by a 9-volt battery. This configuration allows for simple interaction, independent of an internet connection, with the additional advantage of not storing data, thus ensuring the privacy of the user's tax information. To assess the quality of the device, the ISO/IEC 25002:2024 standard was applied, which provides a structured framework for measuring the quality of systems, software, data, and services in the field of information and communication technologies (ICT). The analysis focused on seven characteristics: functionality, usability, reliability, performance, security, maintainability, and portability. Validation was carried out under controlled laboratory conditions with the participation of ten individuals who interacted with the prototype by performing different tax calculations. The results, obtained through a 5-point Likert scale, demonstrated favorable performance in most dimensions: functionality (4.8), reliability (4.7), portability (4.8), performance (5.0), and usability (4.5). Regarding processing times, the averages were 6.70 seconds for decennial tax, 7.39 for

biweekly, 8.18 for monthly, 15.09 for business activity regime, 15.44 for rental regime, 6.70 for simplified trust regime, and 6.42 for dividend tax (all values are in seconds). These values reflect relevant differences in computational load depending on the type of tax calculation. Nevertheless, areas for improvement were identified. Security received a score of 3.6, highlighting the need to implement advanced data protection mechanisms, such as encryption and authentication. Likewise, maintainability obtained the lowest score (2.9), since updates to tax rates and tables currently require manual processes. In conclusion, the prototype represents a pioneering technological innovation in Mexico, as no such device currently exists. It has the potential to facilitate tax compliance for individuals through an autonomous, reliable, and low-cost tool.

Keywords: Income tax, autonomous device, tax compliance.

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito exponer el desarrollo y evaluación de un dispositivo físico autónomo diseñado para el cálculo del ISR en personas físicas sin dependencia a conexión a internet ni almacenamiento de datos diferenciándose de aplicaciones móviles actuales. El prototipo integra una placa de procesamiento conectada a una pantalla y un teclado alfanumérico, alimentados mediante una pila de 9 voltios. Esta configuración permite una interacción sencilla, independiente de conexión a internet, con la ventaja adicional de no almacenar datos, garantizando así la privacidad de la información fiscal del usuario. Para evaluar la calidad del dispositivo se empleó la norma ISO/IEC 25002:2024, la cual proporciona un marco estructurado para medir la calidad de sistemas, software, datos y servicios en el ámbito de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). El análisis se centró en siete características: funcionalidad, usabilidad, confiabilidad, rendimiento, seguridad, mantenibilidad y portabilidad. La validación se realizó en condiciones controladas de laboratorio, con la participación de diez personas que interactuaron con el prototipo ejecutando distintos cálculos impositivos. Los resultados obtenidos mediante una escala Likert de 5 puntos evidenciaron un desempeño favorable en la mayoría de las dimensiones: funcionalidad (4.8), confiabilidad (4.7), portabilidad (4.8), rendimiento (5.0) y usabilidad (4.5). En cuanto a los tiempos de procesamiento, el promedio fue de 6.70 segundos para el impuesto decenal, 7.39 para el quincenal, 8.18 para el mensual, 15.09 en el régimen de actividad empresarial, 15.44 en arrendamiento, 6.70 en el régimen simplificado de confianza y 6.42 en dividendos. Estos valores reflejan diferencias relevantes en la carga computacional asociada a cada tipo de cálculo fiscal. No obstante, se identificaron áreas de mejora. La seguridad obtuvo una calificación de 3.6, lo que subraya la necesidad de implementar mecanismos de protección de datos, tales como encriptación y autenticación. Asimismo, la mantenibilidad fue la dimensión con menor puntuación (2.9), debido a que las actualizaciones de tarifas y tablas fiscales requieren procedimientos manuales. En conclusión, el prototipo representa una innovación tecnológica pionera en México dado a que hasta este momento no existe un prototipo como tal, con potencial para facilitar el cumplimiento fiscal de personas físicas mediante una herramienta autónoma, confiable y de bajo costo.

Palabras clave: ISR, Dispositivo autónomo, Cumplimiento fiscal.

Introducción

La actividad fiscal de las personas, particularmente en el contexto mexicano, se ha vuelto cada vez más compleja con el paso del tiempo. El cálculo correcto de los impuestos requiere no solo conocimientos técnicos especializados, sino también una comprensión integral de la legislación fiscal vigente y de diversos lineamientos complementarios, como los establecidos en las resoluciones misceláneas fiscales. Esta complejidad representa un desafío significativo para los contribuyentes, especialmente para las personas físicas con actividad empresarial o profesional, así como para aquellas que cuentan con colaboradores a su cargo y deben efectuar la retención del Impuesto Sobre la Renta (ISR). En este contexto, el cumplimiento adecuado de las obligaciones fiscales puede resultar no solo complicado, sino también demandante en términos de tiempo y recursos.

Ante la creciente complejidad del cumplimiento fiscal, se han desarrollado diversas alternativas tecnológicas que buscan facilitar el cálculo y la determinación rápida del importe a pagar. Entre estas soluciones destacan las aplicaciones móviles, por su accesibilidad y capacidad de procesamiento en tiempo real.

En estudio realizado por Mary y Kurt en 2024 evidenció que, en la literatura reciente, la información financiera y contable ha sido cada vez más vinculada con la innovación tecnológica. Esta tendencia plantea a la tecnología como una alternativa fundamental para optimizar las operaciones de los profesionales del área, al proporcionar soluciones más ágiles y precisas. Además, el estudio destaca la creciente necesidad de responder a las demandas de las organizaciones y de los inversores, quienes requieren información confiable y oportuna para una toma de decisiones eficiente y

estratégica en entornos empresariales altamente competitivos.

La innovación tecnológica en el ámbito contable ha cobrado cada vez mayor relevancia. Según Mendonça (2025), la contabilidad gerencial demanda una rápida adaptación al manejo y análisis de datos, por lo que la incorporación de tecnologías en esta área resulta indispensable para alcanzar resultados positivos frente a las nuevas tendencias.

Por su parte, HuiFang (2025) señaló que los desafíos actuales de la contabilidad, como los cálculos ineficientes, la obtención tardía de datos y las limitaciones en la toma de decisiones, hacen imprescindible la adopción de tecnologías.

Bhimani, Chiquini y Malmi (2025) expusieron que las organizaciones que adoptan tecnologías experimentan cambios estructurales positivos. En este sentido, los sistemas contables y la información financiera están incorporando herramientas digitales que les permiten automatizar procesos y agilizar la toma de decisiones.

Reforzando la investigación anterior, un análisis de la literatura evidenció que las tecnologías están transformando las estructuras organizativas. Los nuevos avances tecnológicos plantean desafíos significativos para los contadores, ya que la automatización de tareas básicas en el ámbito contable podría redefinir sus funciones y habilidades, e incluso implicar la reducción de empleos (Abbas, 2025).

En el contexto de la innovación fiscal, diversos estudios demuestran que la incorporación de tecnologías optimiza el cumplimiento tributario al disminuir la asimetría de información entre contribuyentes y autoridades fiscales. Esta integración tecnológica impulsa la eficiencia

operativa, eleva la productividad total de los factores y favorece la alineación entre rentabilidad empresarial y transparencia en la información fiscal (Liangliang, Yunqiao, Jiaqi y Zheyu, 2025).

Diversas investigaciones recientes evidencian que la adopción de tecnologías en pequeñas y medianas empresas constituye un mecanismo eficaz para mitigar riesgos asociados al cumplimiento fiscal. Además, se observa que el desarrollo y uso intensivo de estas herramientas no solo fortalece las capacidades de gestión tributaria, sino que también impulsa la educación fiscal dentro de las organizaciones. En consecuencia, se confirma una relación positiva entre el nivel de adopción tecnológica y el grado de cumplimiento de las obligaciones fiscales (Duve y Schutte, 2025).

Ya en el ámbito del desarrollo de tecnología en el área fiscal, a nivel global, un grupo de investigadores en Indonesia desarrolló una aplicación móvil de calculadora fiscal automatizada, dirigida a las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (MiPyMEs). Esta herramienta permite calcular los impuestos de forma eficiente, con un tiempo de respuesta aproximado de un minuto, conforme a la normatividad fiscal vigente en ese país. Además, la aplicación distingue el tipo de contribuyente, ya sea persona física o moral, adaptando automáticamente los parámetros del cálculo según el régimen aplicable (Rachmawati, Ramayanti, & Setiawan, 2025).

Los hallazgos en materia de innovación tecnológica evidencian que, en el ámbito contable, su implementación resulta altamente factible y beneficiosa para el uso cotidiano de los profesionales del área. Un estudio realizado en Vietnam demostró que, si bien la adopción de sistemas tecnológicos no incide de forma directa en todos los procesos contables, sí contribuye

significativamente al incremento del rendimiento empresarial. Esto se debe a que las herramientas digitales optimizan tareas rutinarias, reducen errores, agilizan la gestión de información financiera y facilitan la toma de decisiones estratégicas, lo que convierte a la tecnología en un recurso clave para la competitividad en el sector (Yen, Thao y Quoc, 2025).

En Rumania, se desarrolló una calculadora fiscal digital utilizando tecnologías web como HTML, CSS y JavaScript. Esta herramienta implementa los algoritmos oficiales de la Autoridad Nacional de Administración Fiscal (ANAF) para calcular correctamente la retención del 10 % sobre pensiones que excedan ciertos umbrales, así como para determinar el impuesto sobre la renta de los salarios. El proceso contempla previamente la deducción de contribuciones sociales y deducciones personales, y considera escenarios complejos como la existencia de un segundo empleo. Una de sus principales fortalezas es la actualización continua de algoritmos y tablas fiscales, además de su potencial de expansión hacia otros tipos de gravámenes y plataformas móviles en futuras versiones (Masca, y otros, 2020).

En América Latina, Aldape, Benítez y Zorrilla (2020) desarrollaron una calculadora fiscal móvil que integra las principales variables requeridas para el cálculo del impuesto, tales como ingresos, deducciones, tarifas fiscales y retenciones. Para evaluar la calidad de la herramienta, cincuenta contadores públicos certificados la probaron bajo condiciones reales y respondieron un cuestionario estructurado con base en la norma ISO 9126, la cual considera dimensiones como funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad. Los resultados revelaron una correlación significativamente alta entre la usabilidad y la percepción general de calidad de la aplicación ($r = 0.970$, $p < 0.01$), lo que

respalda su efectividad como una solución rápida, precisa y flexible, incluso en entornos sin conexión a Internet.

Ya en México, también se identificó el desarrollo de un prototipo de dispositivo autónomo tipo calculadora física para el cálculo integral de los principales impuestos a los que están sujetas las personas físicas (ISR (impuesto sobre la renta), IVA (impuesto al valor agregado), y el IEPS (impuesto especial sobre producción y servicios)). Si bien el estudio se centró en describir la arquitectura del dispositivo, se detalla que incorpora tablas fiscales vigentes y fórmulas oficiales por régimen fiscal, integradas en un microprocesador con memoria interna. El prototipo cuenta con un teclado de 29 teclas con membrana de goma y sensor táctil, una pantalla LED de hasta 10 dígitos y una fuente de alimentación dual (baterías AA o panel solar). La viabilidad técnica se evaluó mediante una muestra de 118 encuestados, de los cuales el 93 % expresó interés en contar con una calculadora fiscal autónoma, valorando su practicidad, portabilidad y ahorro de tiempo frente al uso tradicional de hojas de cálculo (Sánchez, Aguilar, & Rodríguez, 2016).

En virtud a lo anterior, el objetivo de esta investigación es desarrollar un prototipo de calculadora fiscal que permita determinar el impuesto sobre la renta (ISR) correspondiente a las personas físicas conforme a la Ley del Impuesto Sobre la Renta vigente.

Metodología

La presente investigación corresponde a un estudio de investigación aplicada, cuyo propósito es desarrollar mecanismos orientados a la solución de un problema específico. En este caso, se plantea el desarrollo de una calculadora fiscal con el objetivo de reducir el tiempo de procesamiento y minimizar errores en el

cálculo del Impuesto sobre la Renta para personas físicas. El estudio se sustenta en un enfoque de prototipado iterativo, ya que se diseñó y evaluó el prototipo con el fin de obtener retroalimentación sistemática y mejorar de manera continua el diseño y su funcionalidad.

Asimismo, la investigación adopta un enfoque metodológico mixto. Desde la perspectiva cuantitativa, se emplea estadística descriptiva para analizar el desempeño y la funcionalidad de la calculadora fiscal. Desde el enfoque cualitativo, se recogen y analizan las experiencias y percepciones de los usuarios que evaluaron el prototipo en un entorno de laboratorio.

Materiales y Método

Para el desarrollo del dispositivo, se implementó la lógica fiscal mexicana conforme a lo establecido en la Ley del Impuesto sobre la Renta (ISR) vigente, aplicable a los distintos regímenes de personas físicas considerados en la calculadora. Dicha lógica fue posteriormente codificada, estructurando el sistema de operación mediante un menú en el teclado, lo que permite ejecutar el cálculo fiscal correspondiente de manera automática.

En cuanto al hardware, el dispositivo fue ensamblado utilizando un microcontrolador de modelo Atmega328p, al cual se conectaron un teclado de características de 4 filas y 4 columnas (16 teclas) y una pantalla alfanumérica de 16 columnas y 2 filas, con capacidad de 32 caracteres para la interacción con el usuario. La alimentación eléctrica del sistema se realizó mediante una pila alcalina de 9 voltios, permitiendo un funcionamiento autónomo y portátil. Por otro lado, el lenguaje de programación C se utilizó para el desarrollo del prototipo, empleando el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, versión 1.8.19, para la carga y

ejecución del software correspondiente a la calculadora fiscal.

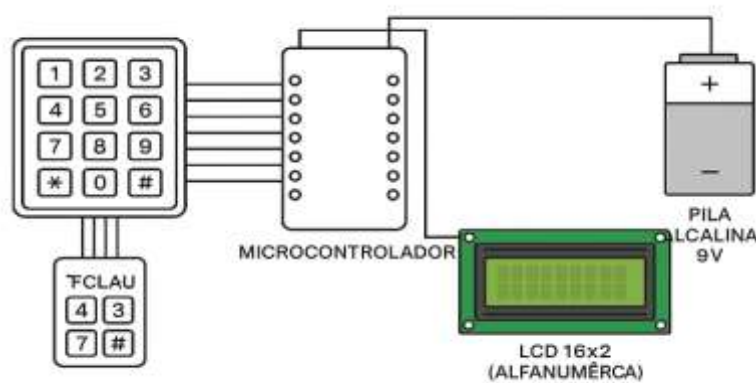


Figura 1. Diagrama esquemático del prototipo.

Para evaluar el funcionamiento del prototipo, se empleó la norma ISO/IEC 25002:2024, la cual proporciona un marco estructurado para medir la calidad de sistemas, productos de software, datos y servicios en el ámbito de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). La evaluación se centró en siete características de calidad: funcionalidad, usabilidad, confiabilidad, rendimiento, seguridad, mantenibilidad y portabilidad. El número de participantes que realizaron las pruebas fue de diez personas, mediante invitación, sin la aplicación de un

muestreo estadístico. Las evaluaciones se llevaron a cabo en condiciones controladas de laboratorio, donde se simulaban diversos escenarios de cálculo fiscal. Participaron diez personas, quienes interactuaron directamente con el prototipo realizando distintos tipos de cálculos impositivos. Para lo anterior se utilizó un instrumento de medición basado en una escala de Likert de 5 puntos (donde 5 representa "totalmente satisfecho" y 1 "totalmente insatisfecho") para registrar la percepción de calidad en cada característica evaluada.



Figura 2. Evaluación del prototipo en laboratorio.

En el caso específico del tiempo de respuesta, correspondiente a la dimensión de funcionalidad, este se evaluó de forma independiente y objetiva, cronometrando la duración de cada cálculo realizado. Esta medición permitió establecer un promedio de tiempo por tipo de impuesto, complementando así la valoración subjetiva con evidencia cuantitativa del desempeño del prototipo.

El prototipo está conformado por una carcasa (I) que aloja la placa de procesamiento (G), la cual se conecta a la pantalla (E) y al teclado alfanumérico (D). El sistema se alimenta mediante una pila alcalina de 9 voltios (F). La tapa superior de la carcasa incorpora aberturas (A y B) para la instalación de la pantalla y el teclado, mientras que en el lateral se ubica la abertura (H) destinada al interruptor de encendido/apagado.

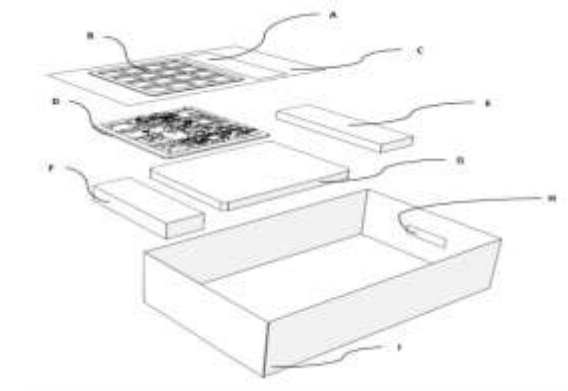


Figura 3. Ensamble del prototipo.

El dispositivo ha sido diseñado como un sistema autónomo de cálculo fiscal orientado a la determinación del Impuesto Sobre la Renta (ISR) conforme a distintos regímenes establecidos en la legislación mexicana en personas físicas. Específicamente, permite calcular obligaciones fiscales para los regímenes de arrendamiento, régimen simplificado de confianza (RESICO), actividad empresarial y profesional, así como sueldos y salarios, considerando distintas periodicidades: diaria, decenal, quincenal,

mensual y anual. Adicionalmente, incorpora el cálculo de impuestos sobre ingresos por dividendos. Como funcionalidad complementaria, el dispositivo también integra operaciones aritméticas básicas como lo es la suma, resta y división, lo que incrementa su versatilidad como herramienta auxiliar en contextos contables y fiscales.

El prototipo incorpora un teclado de dieciséis teclas, distribuidas funcionalmente de la siguiente manera: tres teclas destinadas a la limpieza, confirmación y reinicio de datos; dos teclas para la entrada de información; ocho teclas dedicadas al cálculo del ISR; y tres teclas para la ejecución de operaciones aritméticas básicas.

El prototipo presenta dimensiones compactas, con 10 cm de ancho, 6 cm de alto y 14 cm de largo. Su pantalla alfanumérica mide 9 cm de largo por 4.5 cm de ancho, lo que permite una visualización clara de los datos. El teclado alfanumérico, de forma cuadrada, posee 7 cm por lado, compuesto por teclas de 1 cm de ancho y alto cada una, optimizando tanto la ergonomía como la precisión en la interacción del usuario.



Figura 4. Vista frontal del prototipo de dispositivo autónomo.

En la parte posterior del prototipo se ubica un interruptor con dimensiones de 1,5 cm de ancho por 2 cm de largo, diseñado para

facilitar el encendido y apagado del dispositivo de manera eficiente.



Figura 5. Vista trasera del prototipo de dispositivo autónomo.

La interfaz inicial del dispositivo presenta un menú interactivo que permite al usuario seleccionar el tipo de operación mediante un sistema de entrada por teclado físico. La tecla “1” habilita el ingreso de percepciones, mientras que la tecla “2” permite la introducción de deducciones fiscales. Cada valor es confirmado mediante la tecla “E” (*Enter*), y se incorpora una función de reinicio mediante la tecla “R”, que permite restablecer el sistema para iniciar un nuevo proceso de cálculo. Esta estructura de interacción facilita una operación intuitiva y eficiente, adecuada para usuarios con distintos niveles de experiencia tecnológica y técnica fiscal.



Figura 6. Interfaz del dispositivo.



Figura 7. Interfaz del dispositivo para ingresar, reiniciar y acumular los datos.

Resultados.

Para la obtención de los resultados, se aplicó una encuesta basada en una escala de Likert de cinco niveles, donde 1 corresponde a totalmente insatisfecho y 5 a muy satisfecho. Asimismo, la medición del tiempo empleado en los cálculos se realizó mediante el uso de un cronómetro, comparando el cálculo tradicional del Impuesto sobre la Renta con el cálculo realizado mediante la calculadora fiscal desarrollada. Los datos obtenidos se registraron de manera sistemática en una hoja de cálculo y posteriormente se analizaron utilizando el software libre RStudio, empleando estadística descriptiva para la interpretación de los resultados. A partir de

este análisis, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

En cuanto a la variable del tiempo, los resultados promedio de procesamiento para el despliegue de los cálculos fiscales fueron los siguientes: 6.70 segundos para el impuesto decenal, 7.39 segundos para el quincenal, 8.18 segundos para el mensual, 15.09 segundos para el régimen de actividad empresarial, 15.44 segundos para el régimen de arrendamiento, 6.70 segundos para el régimen simplificado de confianza y 6.42 segundos para el impuesto sobre dividendos. Estos valores reflejan diferencias relevantes en la carga computacional asociada a cada tipo de cálculo fiscal.

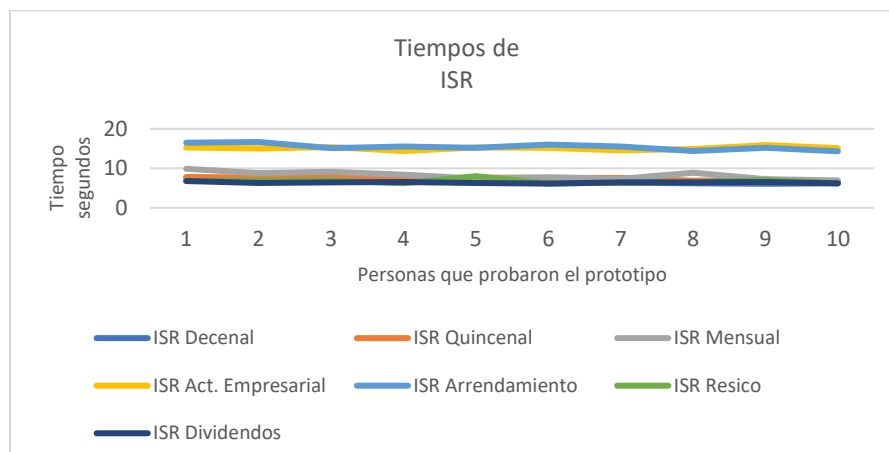


Figura 8. Tiempos de respuesta del cálculo del impuesto.

Por lo anterior, en la evaluación de la dispersión temporal en los cálculos fiscales muestra diferencias significativas entre regímenes impositivos. El ISR mensual presentó la mayor desviación estándar (0.984 segundos), lo que sugiere una mayor variabilidad en los tiempos de procesamiento, posiblemente asociada a la complejidad o volumen de datos manejados en ese esquema. Le sigue el ISR por arrendamiento (0.784 segundos), también con una dispersión considerable, lo cual podría reflejar la heterogeneidad de escenarios fiscales en este régimen.

En contraste, el ISR por dividendos exhibió la menor desviación estándar (0.192 segundos), indicando un comportamiento altamente consistente y predecible en su tiempo de respuesta. Valores relativamente bajos, también se observaron en el ISR quincenal (0.417 segundos) y en el ISR por actividad empresarial (0.424 segundos), lo cual sugiere estabilidad operativa en estos cálculos. Finalmente, el ISR, RESICO y el ISR decenal mostraron desviaciones estándar moderadas (0.558 y 0.537 segundos, respectivamente), reflejando una variabilidad intermedia en sus tiempos de ejecución.

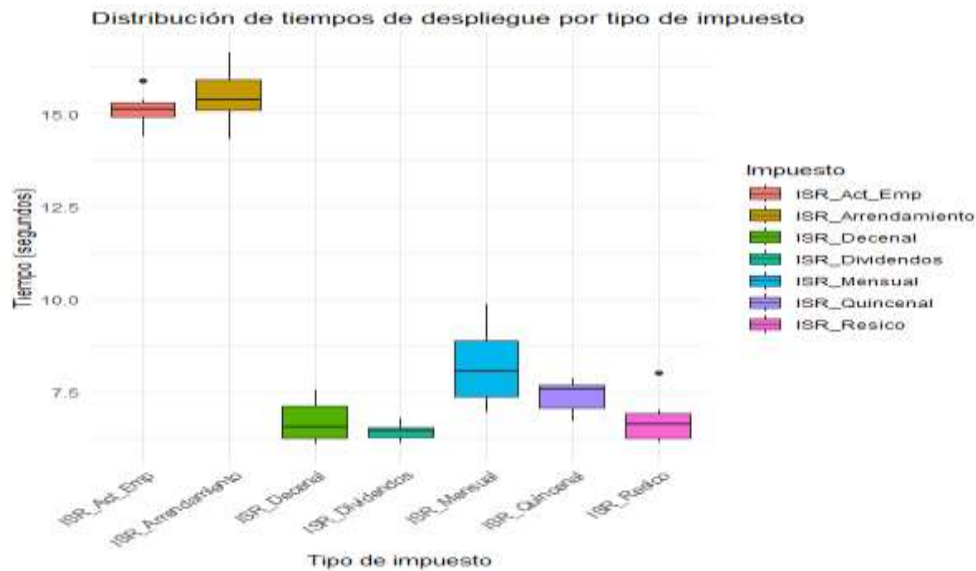


Figura 9. Distribución de los tiempos por tipo de isr.

En cuanto a la evaluación de la confiabilidad, se consultó a los participantes si el prototipo es capaz de responder adecuadamente ante posibles fallos, especialmente relacionados con la entrada de datos. El resultado arrojó un promedio de 4.7 en una escala de Likert de 1 a 5, lo que indica una percepción de alta confiabilidad y un nivel de satisfacción muy alto por parte de los evaluadores.

En lo que respecta a la característica de funcionalidad, se evaluó si el prototipo muestra correctamente el monto del impuesto conforme a las tarifas vigentes aplicables. El resultado obtuvo un promedio de 4.8 en la escala de Likert, ubicándose en el nivel de "muy satisfecho". Esto indica que los cálculos realizados por el prototipo son altamente consistentes con los obtenidos mediante métodos tradicionales de determinación de impuestos.

En cuanto a la mantenibilidad, se evaluó si el prototipo era capaz de mantenerse actualizado frente a cambios normativos. El promedio obtenido fue de 2.9, lo que lo ubica en un nivel de insatisfacción. Esta percepción podría estar relacionada con la necesidad de

realizar actualizaciones manuales al software, particularmente en lo referente en las tablas fiscales del impuesto sobre la renta (ISR) propias de una primera versión del prototipo, sin afectar su funcionalidad general. Dichas actualizaciones deben realizarse anualmente conforme a lo establecido en el Anexo 8 de la Resolución Miscelánea Fiscal, lo cual implica labores técnicas de mantenimiento que, al no estar automatizadas, pueden limitar la percepción de facilidad en su actualización.

Para la portabilidad, se evaluó la capacidad del prototipo para operar en distintos contextos de uso. La puntuación promedio fue de 4.8, lo que lo posiciona en el nivel de muy satisfecho. Este resultado se atribuye a que el dispositivo funciona con una pila alcalina de 9 voltios, lo que elimina la necesidad de conexión a la red eléctrica. Además, el prototipo no requiere acceso a Internet para su funcionamiento y puede trasladarse fácilmente sin depender de cobertura o señal, lo que refuerza su utilidad en entornos móviles o con infraestructura limitada.

Respecto al rendimiento, se evaluó si el uso de la memoria en el prototipo era adecuado. La puntuación promedio obtenida fue de 5, lo que lo ubica en el nivel de muy satisfecho. Este resultado se explica por el hecho de que el prototipo gestiona la memoria de manera eficiente: los datos se almacenan de forma acumulativa durante su funcionamiento, y al momento de reiniciar el cálculo, dicha memoria se borra automáticamente para permitir el ingreso de un nuevo conjunto de datos, evitando saturaciones y garantizando un procesamiento fluido.

En cuanto a la característica de seguridad, se evaluó si el prototipo ofrece mecanismos para la protección de los datos fiscales ingresados por el usuario. La evaluación arrojó una puntuación promedio de 3.6 en la escala de Likert, lo que corresponde a una percepción neutral. Esta calificación se explica porque, si bien el prototipo elimina automáticamente los datos al apagarse, no cuenta con funciones

adicionales de seguridad, como cifrado, autenticación de usuario o almacenamiento protegido, lo cual limita su capacidad para garantizar la confidencialidad de la información fiscal durante el uso activo del dispositivo, sin embargo, esto representa un área de oportunidad para versiones futuras, aunque no se pretende incluir datos sensibles en el prototipo, los datos numéricos quedan expuestos.

Finalmente, en la evaluación de la usabilidad, se preguntó si el dispositivo es fácil de utilizar sin requerir capacitación previa. El resultado fue una puntuación promedio de 4.5 en la escala de Likert, lo cual lo posiciona en el nivel de "muy satisfecho". Este alto nivel de aceptación se atribuye a que la interfaz del prototipo es intuitiva, permitiendo al usuario ingresar los datos y obtener el cálculo del impuesto de forma clara y sencilla, sin necesidad de conocimientos técnicos adicionales.

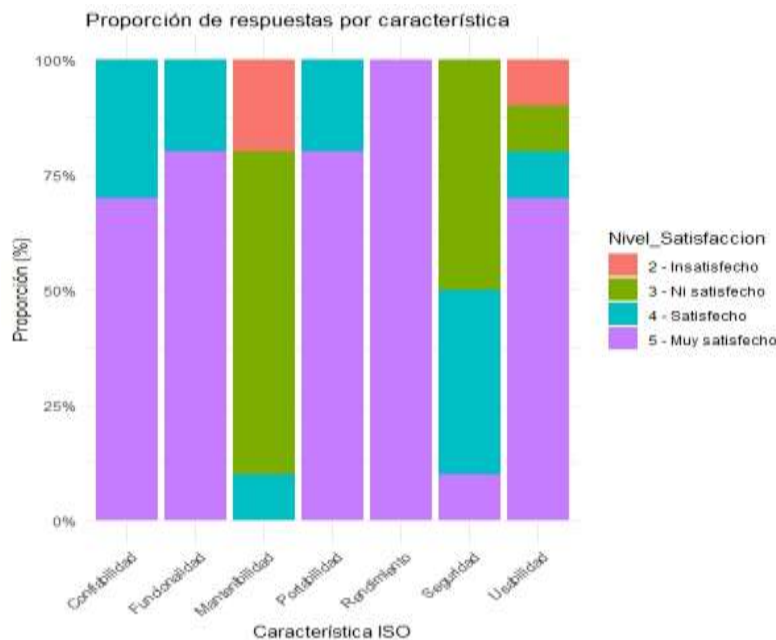


Figura 10. Mapa de calor de las respuestas de los usuarios por característica del prototipo.

La Figura 11 presenta un ejemplo de cálculo del ISR quincenal correspondiente al régimen de sueldos y salarios. En el lado izquierdo se

muestra el procedimiento realizado manualmente mediante una hoja de cálculo, mientras que en el lado derecho se observa el

resultado generado por el prototipo. La comparación evidencia que ambos métodos

arrojan resultados idénticos, lo que confirma la precisión del dispositivo.

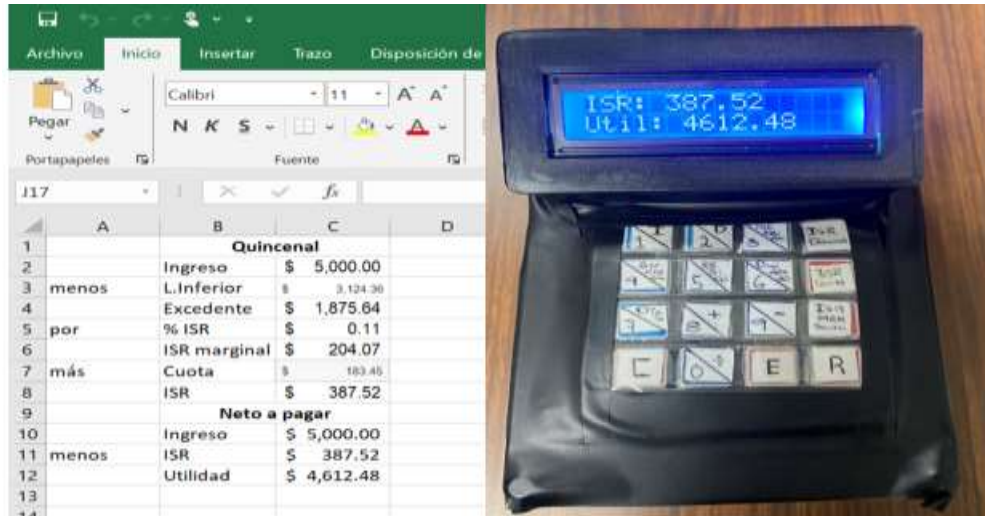


Figura 11. Comprobación de un cálculo tradicional con el prototipo (ISR quincenal).

La Figura 12 presenta un ejemplo de cálculo del ISR decenal correspondiente al régimen de sueldos y salarios. En el lado izquierdo se muestra el procedimiento realizado manualmente mediante una hoja de cálculo,

mientras que en el lado derecho se observa el resultado generado por el prototipo. La comparación evidencia que ambos métodos arrojan resultados idénticos, lo que confirma la precisión del dispositivo.

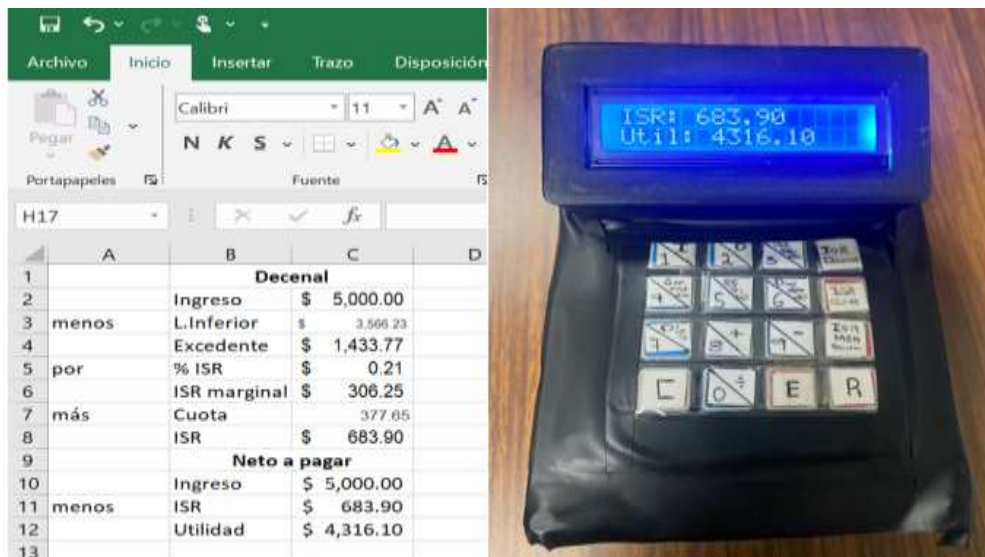


Figura 12. Comprobación de un cálculo tradicional con el prototipo (ISR decenal).

La Figura 13 presenta un ejemplo de cálculo del ISR correspondiente al régimen de actividad empresarial y/o profesional. En el lado izquierdo se muestra el procedimiento realizado manualmente mediante una hoja de

cálculo, mientras que en el lado derecho se observa el resultado generado por el prototipo. La comparación evidencia que ambos métodos arrojan resultados idénticos, lo que confirma la precisión del dispositivo.

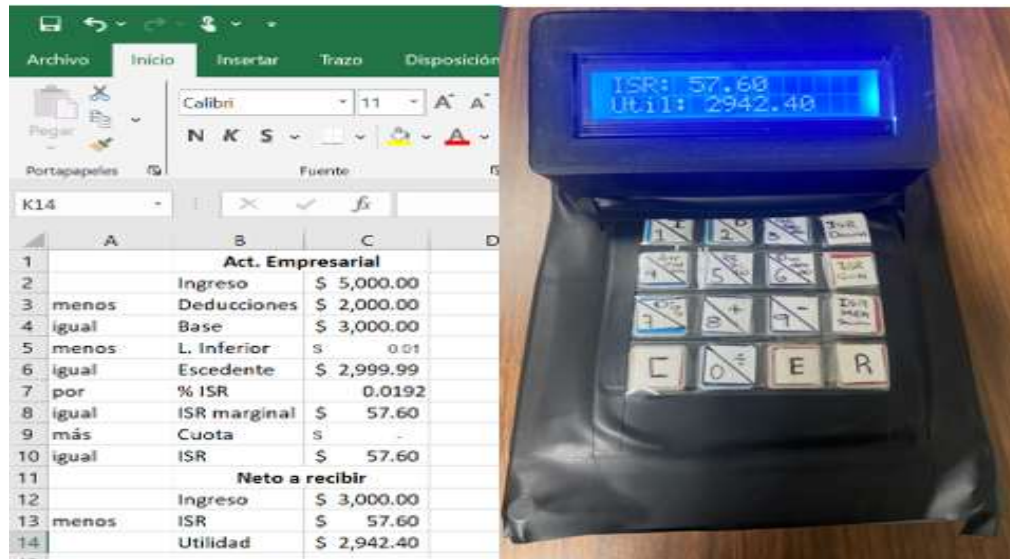


Figura 13. Comprobación de un cálculo tradicional con el prototipo (ISR Act. Empresarial).

Discusión.

Los resultados obtenidos en la evaluación del dispositivo autónomo para el cálculo del ISR en personas físicas demuestran que la integración de tecnologías digitales en el ámbito fiscal constituye una estrategia efectiva para optimizar procesos y facilitar el cumplimiento tributario. El prototipo evidenció altos niveles de satisfacción en atributos como funcionalidad, confiabilidad, portabilidad, rendimiento y usabilidad, lo que coincide con estudios previos que resaltan la relevancia de la innovación tecnológica para mejorar la gestión fiscal y contable (Mary y Kurt, 2024; Mendonça, 2025). En particular, la rapidez en el tiempo de respuesta en promedios menores a 10 segundos en la mayoría de los cálculos, representa una ventaja significativa frente a otras soluciones tecnológicas documentadas, como las aplicaciones móviles en Indonesia con tiempos aproximados de un minuto (Rachmawati, Ramayanti y Setiawan, 2025).

Asimismo, la evaluación de la confiabilidad y funcionalidad (4.7 y 4.8, respectivamente) confirma que el prototipo es capaz de reproducir con precisión los cálculos fiscales establecidos en la Ley del Impuesto Sobre la

Renta, lo que respalda su validez como herramienta auxiliar para contribuyentes. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones que señalan la utilidad de dispositivos digitales en la reducción de errores y la agilización de procesos contables (Yen, Thao y Quoc, 2025). Además, la portabilidad y autonomía energética del dispositivo amplían su potencial de aplicación en contextos con limitaciones tecnológicas, lo que resulta particularmente relevante en comparación con soluciones dependientes de conectividad a internet, como la calculadora fiscal desarrollada en Rumania (Masca et al., 2020).

No obstante, los resultados también revelaron áreas de mejora. La dimensión de mantenibilidad obtuvo la menor valoración (2.9), debido a la necesidad de actualizaciones manuales para incorporar cambios normativos. Esta limitación ha sido identificada previamente en la literatura, donde se enfatiza que la efectividad de las herramientas fiscales depende de su capacidad de adaptación dinámica frente a modificaciones legales (Duve y Schutte, 2025). De igual manera, la percepción neutral en materia de seguridad (3.6) refleja una vulnerabilidad, dado que el prototipo carece

de mecanismos de cifrado o autenticación. Estudios recientes advierten que la protección de datos fiscales constituye un elemento crítico para garantizar la confianza en estas tecnologías (Liangliang, Yunqiao, Jiaqi y Zheyu, 2025).

La comparación con antecedentes latinoamericanos refuerza la originalidad del presente prototipo. Mientras que Aldape, Benítez y Zorrilla (2020) validaron una calculadora móvil con énfasis en la usabilidad y la percepción de calidad, este estudio aporta evidencia experimental sobre un dispositivo físico autónomo, capaz de operar sin dependencia de infraestructura tecnológica externa. En este sentido, los resultados obtenidos en México guardan coherencia con la tendencia global identificada por Bhimani, Cinquini y Malmi (2025), quienes sostienen que la digitalización en contabilidad no solo automatiza procesos, sino que también redefine las prácticas profesionales.

Sin embargo, se reconoce que una de las principales limitaciones del prototipo es la actualización de la programación del dispositivo, particularmente ante cambios en la normatividad fiscal vigente. Actualmente, las actualizaciones requieren una intervención técnica directa, es decir, se actualiza de forma manual el software, con base en las actualizaciones a las tarifas aplicables al ISR que se emiten cada año en el anexo 8 de la Resolución Miscelánea Fiscal publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) lo cual reduce su flexibilidad operativa.

No obstante, como línea de trabajo futuro, se plantea el diseño de una interfaz de comunicación entre el dispositivo portátil y una aplicación móvil, mediante la cual la aplicación se encargue de gestionar y automatizar las actualizaciones del software cuando sea necesario. Esta integración permitiría conservar las ventajas del

dispositivo autónomo, al tiempo que se incrementa su capacidad de mantenimiento y adaptación normativa.

Por último, el prototipo desarrollado representa una contribución innovadora al campo de la tecnología fiscal especialmente su potencial aplicación en pequeñas y medianas empresas y despachos contables sin la necesidad de conexión a internet, al combinar precisión normativa con accesibilidad destacado por su bajo costo y autonomía. Sin embargo, su éxito a largo plazo dependerá de la integración de mecanismos de actualización automatizada y de seguridad avanzada. Estos aspectos constituyen retos inmediatos que deben atenderse en futuras versiones, con el fin de fortalecer la confianza de los usuarios y garantizar la vigencia del dispositivo en un entorno normativo dinámico.

Conclusiones

La evaluación del prototipo de dispositivo autónomo para el cálculo del ISR en personas físicas evidenció que la incorporación de tecnología en el ámbito fiscal puede ofrecer soluciones prácticas, accesibles y confiables a los contribuyentes. Los resultados obtenidos en laboratorio, particularmente en funcionalidad (4.8), confiabilidad (4.7), portabilidad (4.8), rendimiento (5.0) y usabilidad (4.5), confirman que el dispositivo cumple con los atributos esenciales para su aplicación en contextos reales. Estos hallazgos coinciden con lo señalado en la literatura, donde se destaca que la innovación tecnológica en procesos contables y tributarios contribuye a la eficiencia operativa y a la reducción de errores humanos en la determinación de impuestos.

La precisión en los cálculos fiscales realizada por el prototipo, demostrada a través de la coincidencia con los resultados obtenidos mediante métodos manuales, respalda su

validez como herramienta auxiliar. En este sentido, el dispositivo no solo automatiza los cálculos conforme a las tarifas vigentes, sino que también facilita la interacción con usuarios sin formación técnica, lo que amplía su alcance hacia contribuyentes con distintos niveles de alfabetización digital.

La alta valoración en portabilidad representa otra fortaleza clave, pues el dispositivo opera de manera autónoma mediante una batería de 9 voltios, sin requerir acceso a internet. Este atributo lo diferencia de otras herramientas documentadas en la literatura, como las calculadoras fiscales móviles o en línea que dependen de la conectividad y pueden enfrentar limitaciones en entornos rurales o con infraestructura deficiente. Así, el prototipo contribuye a reducir la brecha tecnológica, ofreciendo una alternativa viable para contextos con restricciones de acceso digital, lo que incrementa su pertinencia social en el caso mexicano.

Sin embargo, también se identificaron áreas de mejora. La percepción neutral en materia de seguridad (3.6) refleja la necesidad de incorporar mecanismos avanzados de protección de datos, tales como encriptación, autenticación o almacenamiento temporal seguro. Esto resulta fundamental considerando que la confianza en herramientas fiscales digitales depende en gran medida de la protección de la información sensible del usuario. Asimismo, la mantenibilidad del prototipo obtuvo la menor calificación (2.9), debido a que las actualizaciones de tarifas y tablas fiscales requieren procesos manuales.

Por otro lado, el prototipo presenta diversas ventajas frente a una aplicación móvil (Android o iOS). Al tratarse de un dispositivo autónomo, no requiere conexión a internet, ya que las tarifas del Impuesto sobre la Renta aplicables a las personas físicas se encuentran previamente programadas. Otra ventaja

identificada es su flexibilidad en el suministro eléctrico, dado que cuenta con una pila integrada reemplazable y, adicionalmente, ofrece la posibilidad de conectarse directamente a la red eléctrica para su funcionamiento.

La solución propuesta se encuentra principalmente orientada a minimizar el tiempo de cálculo y reducir errores en la determinación del Impuesto sobre la Renta, objetivos que constituyen el eje central de la presente investigación. En este sentido, el diseño y evaluación del prototipo priorizaron la eficiencia operativa y la facilidad de uso, complementándose con la elaboración de un manual de usuario que facilita su adopción inicial. No obstante, se reconoce que el mantenimiento y la actualización manual del software representan una limitación para su transferencia a contextos productivos, particularmente ante modificaciones en la normatividad fiscal.

En conjunto, los hallazgos de este estudio confirman que el prototipo representa una contribución innovadora al campo de la tecnología fiscal en México, al ofrecer una herramienta autónoma, precisa y de bajo costo para el cálculo del ISR en personas físicas. Si bien los atributos de funcionalidad, confiabilidad, rendimiento, portabilidad y usabilidad superaron las expectativas, la seguridad y la mantenibilidad constituyen áreas prioritarias para futuras versiones. La integración de sistemas de actualización automática y protocolos de protección de datos resultará indispensable para fortalecer su vigencia, confianza y escalabilidad en un entorno normativo dinámico.

Finalmente, este trabajo aporta evidencia de que la digitalización en el ámbito tributario no solo permite optimizar cálculos, sino también ampliar el acceso de los contribuyentes a herramientas de apoyo en el cumplimiento de sus obligaciones. De esta manera, el prototipo

puede considerarse un paso inicial hacia el diseño de dispositivos fiscales más sofisticados, que integren inteligencia artificial y conectividad segura, alineándose con la tendencia global de modernización tributaria.

Referencias

- Abbas, K. (2025). "Management accounting and artificial intelligence: A comprehensive literature review and recommendations for future research." *The British Accounting Review*, p. 1-26. doi.org/10.1016/j.bar.2025.101551.
- Aldape, A., Benítez, J., & Zorrilla, F. (2020). "Aplicación inteligente en la práctica profesional del contador público en el área fiscal." *Revista Iberoamericana para la Investigación y Desarrollo Educativo*, 11 (21), p. 1-20. doi.org/10.23913/ride.v11i21.740
- Bhimani, A., Cinquini, L., & Malmi, T. (2025). "What happens at the interface of digitalisation and accounting?". *The British Accounting Review*, p. 1-9. doi.org/10.1016/j.bar.2025.101742.
- Duve, M., & Schutte, D. (2025). "Unmooring tax compliance: The impact of information technology in the Zimbabwean small firms under presumptive taxation." *Social Sciences & Humanities Open*, 11(25), p. 1-11. /doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101422.
- HuiFang, L. (2025). "Modern Technology's role in accounting cost calculation of industrial enterprises: Informatization as a key strategy to improve management efficiency." *Heliyon*, 11 (25), p. 1-17. doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41523.
- Liangliang, H., Yunqiao, W., Jiaqi, S., & Zheyu, S. (2025). "How does digital technology application affect tax compliance?" *Finance Research Letters*, 85(25), p. 107-120. doi.org/10.1016/j.frl.2025.107932.
- Mary, B., & Kurt, G. (2024). "Accounting and innovation: Paths forward for research." *Journal of Accounting and Economics*, 78(24), p. 1-9. doi.org/10.1016/j.jacceco.2024.101733 .
- Masca, S., Comsa, I., Uifalean, E., Ihut, A., Munteanu, E., & Scoropan, D. (2021). *Calculadora electrónica de impuestos*. disponible en SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4227245>
- Mendonça, P. (2025). "Challenges of the digital landscape: An investigation into the influence of technology and information systems on financial performance of B2B key account managers." *Industrial Marketing Management*, 129(25), p. 1-17. doi.org/10.1016/j.indmarman.2025.07.008.
- Rachmawati, N., Ramayanti, R., & Setiawan, R. (2025). "Financial reporting and tax calculator application Account Tax: Is it feasible to develop for MSMEs in Indonesia?" *Jati: Journal Akuntansi Terpan Indonesia*, 8(01), p. 46-61. doi.org/10.18196/jati.v8i1.24374
- Sánchez, P., Aguilar, E., & Rodríguez, F. (2016). "Diseño y construcción de un prototipo de calculadora fiscal." *Revista de análisis cuantitativo y estadístico*, 3(06), p. 43-49.
- Yen, T., Thao, C., & Quoc, P. (2025). "Transformational leadership and

firm performance: The mediating roles of innovation capacity and management accounting systems usage." *Sustainable Futures*, 10(25), p. 1-12.
doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100988.



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Composito de Óxido de Grafeno/Polianilina/Polipirrol como Anticorrosivo de Cobre en presencia de agua al 3.5% de NaCl aplicando MSR

Graphene Oxide/Polyaniline/Polypyrrole Composite as a Copper Anticorrosive in the Presence of 3.5% NaCl Solution Using RSM

Arguelles-Ojeda, J.L.^{a*}, Ovando-Medina, V.M.^b

^a Ingeniería Mecánica Administrativa. Coordinación Académica Región Altiplano, Carr Central Km. 5+600, CP 78700, Matchuala, S.L.P. (<https://orcid.org/0000-0002-0961-4143>)

^b Ingeniería Química. Coordinación Académica Región Altiplano, Carr Central Km. 5+600, CP 78700, Matchuala, S.L.P. (<https://orcid.org/0000-0002-5704-5643>)
Matchuala, S.L.P., 4 de agosto de 2025.

luis.arguelles@uaslp.mx*; ovandomedina@yahoo.com.mx

Innovación tecnológica: La aplicación de un recubrimiento sintetizado a base de óxido de grafeno/polianilina/polipirrol para el cobre y así mejorar su resistencia a la corrosión.

Área de aplicación industrial: Todo tipo de industria que utilice el cobre en sus procesos de manufactura.

Recibido: 14 agosto 2025

Aceptado: 06 enero 2026

Abstract

Graphene, an atomically thin material discovered only twenty years ago, has become the focus of numerous investigations. Studies show that it has electrical, mechanical, thermal, and optical properties that exceed those of any other known material. In this work, a graphene oxide/polyaniline/polypyrrole (GO/PANI/PPy) composite was synthesized for use in copper coatings to improve their corrosion resistance in the presence of 3.5% NaCl seawater. The optimal proportions of GO to PANI and PPy in the composite to increase the copper corrosion resistance were determined through the Response Surface Methodology (RSM). The composite was characterized by FTIR spectroscopy, thermogravimetric analysis (TGA), and electrical conductivity (CE). FTIR analysis demonstrated that GO, PANI, and PPy are incorporated into the composite, while TGA analysis indicated that the degradation temperature was between 200 and 400 °C, increasing thermal stability with increasing GO content. According to RSM, the samples that exhibited the highest corrosion resistance contained a small amount of GO and a 70/30 weight ratio of PPy/PANI, with a corrosion rate as low as 0.0138 mm/year and an anticorrosion efficiency of 98.66%.

Keywords: Corrosion, Graphene oxide, Polypyrrole, Polyaniline, RSM.

Resumen

El grafeno, un material de espesor atómico descubierto hace solo veinte años, se ha convertido en el centro de numerosas investigaciones. Los estudios demuestran que presenta propiedades eléctricas, mecánicas, térmicas y ópticas que superan las de cualquier otro material conocido. En este trabajo se sintetizó un compuesto a base de óxido de grafeno/polianilina/polipirrol (GO/PANI/PPy) para ser utilizado en recubrimientos de cobre para mejorar su resistencia a la corrosión en presencia de agua de mar al 3.5% de NaCl. Las proporciones óptimas de GO a PANI y PPy en el composito para mejorar la resistencia a la corrosión del Cu, se determinaron mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR). El composito se caracterizó mediante espectroscopía FTIR, análisis termogravimétrico (TGA) y conductividad eléctrica (CE). El análisis FTIR demostró que el GO, PANI y PPy están incorporados en el composito, mientras que el análisis TGA indicó que la temperatura de degradación está entre 200 y 400 °C, aumentando la estabilidad térmica con el contenido de GO. De acuerdo con la MSR, las muestras que presentaron mayor resistencia a la corrosión fueron aquellas con una pequeña cantidad de GO y una relación en peso de PPy/PANI de 70/30, teniendo una velocidad de corrosión tan baja como 0.0138 mm/año y una eficiencia anticorrosiva del 98.66%.

Palabras clave: Corrosión, Óxido de grafeno, Polipirrol, Polianilina, MSR.

1. Introducción

La corrosión atmosférica de los metales es muy común y provoca pérdidas económicas sustanciales cada año. Los costos de la corrosión ascienden al menos al 4-5 % del Producto Interno Bruto de los países. Se ha reportado que la corrosión atmosférica es responsable de más fallas en términos de costo y tonelaje que cualquier otro tipo de proceso de degradación de materiales. La corrosión en una estructura puede manifestarse de diferentes formas: desde una superficie uniforme y exfoliante fácilmente detectable hasta una forma intragranular y con picaduras muy difíciles de detectar. Además, puede deberse a una variedad de factores físicos y ambientales. Con el fin de explorar la corrosión atmosférica de los materiales metálicos, se han puesto a prueba una infinidad de métodos de recubrimiento, inhibidores y optimización de sistemas de monitoreo en medios corrosivos (Harilal et al., n.d.; Hussain & Schaus, 2022; N. Li et al., n.d.; X. Li et al., 2022; Senocak et al., n.d.; H. Wang et al., 2022). Las formulaciones

anticorrosivas tradicionales contienen plomo o cromo hexavalente como agentes activos, los cuales se consideran contaminantes y representan un riesgo para los seres humanos (Deyá et al., 2013), por lo que la sustitución de materiales anticorrosivos tóxicos de las formulaciones de pinturas se ha vuelto de primordial importancia en las últimas tres décadas.

En la actualidad, se han llevado a cabo múltiples estudios con el fin de utilizar el GO debido a sus propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas únicas que posee respecto a otros materiales (Majumder et al., 2022). Dentro de las propiedades fisicoquímicas del GO tenemos que: Es muy soluble en agua con ultrasonido o agitación mecánica; es un material anfifílico, es decir, tienen una parte lipofílica y otra parte hidrofílica; tiene la facilidad de formar enlaces por puentes de hidrógeno debido a su composición química; presenta propiedades antibacterianas y fluorescentes, entre otras.

Así mismo, es utilizado como material de recubrimiento para mejorar las propiedades mecánicas y químicas de los materiales (Bernardo Do Campo, 2021; Choi et al., 2022; Huong et al., 2022; Mostovoy et al., 2022; Rodríguez, 2021; Torre et al., 2021; WANG et al., 2022), siendo esta última aplicación la de interés en el presente trabajo.

Geng et al. (Geng et al., 2022), desarrollaron un recubrimiento a base de silano y óxido de grafeno para proteger de la corrosión las varillas de acero que componen las estructuras de hormigón. Los resultados indicaron que el recubrimiento con un espesor de alrededor de 45 μm muestra un incremento de la resistencia a la corrosión con una eficacia de protección de aproximadamente el 99.36% en medios salinos. Dutta et al. (Dutta & Karak, 2022), reportan la fabricación de un nanocomposito de poliéster, con un recubrimiento orgánico anticorrosivo y mecánicamente resistente, que utiliza un nanohíbrido de ZnO/GO-reducido y nanofibras de celulosa como agente de refuerzo en la matriz polimérica. Los nanocompositos preparados exhibieron una excelente actividad anticorrosiva en superficies metálicas con una eficiencia de protección contra la corrosión del 99.5 al 99.9 %, según lo confirmado por los estudios de corrosión electroquímica. Además, también se encontró que los materiales fabricados son transparentes a la luz visible, mecánicamente resistentes y térmicamente estables, además de que mostraron buena resistencia química y al envejecimiento UV.

Una opción para reemplazar los compuestos anticorrosivos son los polímeros orgánicos conductores, principalmente el polipirrol (PPy) y la polianilina (PANI). Entre los polímeros conductores, la PANI y el PPy son los más estudiados. Estos dos polímeros semiconductores llaman la atención por sus propiedades químicas y físicas como alta conductividad eléctrica, estabilidad

ambiental, actividad redox estable, fácil preparación y bajo costo, lo que permite aplicaciones como disipación electrostática, celdas de combustible, baterías, intercambiadores de aniones, sensores y recubrimientos anticorrosivos (Armelin et al., 2009). Estos polímeros pueden sintetizarse mediante electropolimerización u oxidación química. Este último método es de particular importancia porque constituye la vía más viable para la producción a gran escala (Ovando-Medina et al., 2011a). Por ejemplo, Baldissera y Ferreira (Baldissera & Ferreira, 2012) desarrollaron una resina epóxica anticorrosiva a base de PANI para la protección contra la corrosión de acero dulce en solución acuosa al 3.5% de NaCl. Estos autores observaron que la presencia de PANI aumentó la protección del acero dulce frente a la corrosión en comparación con materiales anticorrosivos típicos como el fosfato de zinc y el cromato de zinc. En un trabajo similar, Kalendova et al. (Kalendová et al., 2014) estudiaron la protección contra la corrosión de acero utilizando diferentes materiales pigmentarios (Fe_3O_4 , CaTiO_3 , SrTiO_3 , silicato y grafito) tratados con PPy conductor y fosfato de PANI incorporados en una epoxiresina, observando que la eficiencia anticorrosiva era mayor cuando se utilizaba PANI en lugar de PPy, lo cual se atribuyó a la presencia de poros abiertos en el recubrimiento y a la mayor capacidad de absorción de agua del PPy en la película de polímero, lo que reduce el efecto barrera que resultó en la formación de burbujas en el recubrimiento.

Se ha informado ampliamente sobre el uso de películas de PPy como protección contra la corrosión del acero. Por ejemplo, Martins et al. (Martins et al., 2004) usó PPy electropolimerizado sobre electrodos de acero zincado en fase acuosa y en presencia de sales de citrato, succinato, oxalato, malato y tartrato. Ellos obtuvieron películas de PPy adherentes y homogéneas solo con

contraiones de tartrato, mientras que el rendimiento electroquímico de estos materiales en soluciones de NaCl al 3.5% mostró que los recubrimientos de PPy aumentaban el potencial de corrosión y reducían la corriente de corrosión.

La técnica de optimización clásica que consiste en cambiar una variable a la vez para determinar los efectos de las variables sobre la respuesta puede consumir mucho tiempo y es costosa, especialmente para sistemas multivariables, además de que no proporciona información sobre las interacciones entre diferentes factores. El diseño estadístico de experimentos se usa para optimizar los parámetros en sistemas multivariables, es una técnica que permite obtener modelos significativos de un fenómeno mediante un número mínimo de experimentos y también considera interacciones entre las variables (Aljuboury et al., 2016). El diseño más común bajo la metodología de superficie de respuesta (MSR) es el diseño central compuesto (DCC), que es eficiente y flexible, y proporciona datos suficientes sobre los efectos de las variables y el error general del experimento con un número mínimo de experimentos (Ahmad et al., 2005).

Debido a que el GO ha demostrado ser un excelente material para ser utilizado como recubrimiento, así como el PPy y la PANI, en el presente trabajo se optimizaron las proporciones de GO/PANI/PPy para recubrir placas de cobre y mejorar su resistencia a la corrosión en presencia de agua de mar simulada al 3.5% de NaCl (El agua de mar contiene una concentración promedio del 3.5% en peso de NaCl), para considerarlo como un posible material de bajo costo y de alta resistencia a la corrosión. El análisis de la combinación de componentes óptima del composito se realizó mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), la cual ha demostrado ser una

excelente herramienta auxiliar en el diseño de las pruebas en múltiples investigaciones relacionadas con el desarrollo de nuevos materiales.

2. Metodología

Materiales

Pirrol (98%), anilina (97%), persulfato de amonio (APS, 99%) y 1-metil-2-pirrolidona (NMP, 99.5%) fueron adquiridos de Sigma Aldrich. Para la fabricación de los electrodos se utilizaron láminas de cobre de grado electrolítico (calibre 18, 1.245 mm). NaCl (99%) fue comprado de Jalmeq. Se usó agua desionizada en todos los experimentos. Los GO fueron obtenidos mediante el método modificado de Hummers, los cuales ya han sido bien caracterizados y reportados por Ledezma-Rodríguez et al. (Irigoyen et al., 2015).

Síntesis de los compositos de GO/PANI/PPy

Los compositos de GO/PANI/PPy fueron obtenidos mediante polimerización por oxidación química de los monómeros de pirrol y anilina en las cantidades que se muestran en la Tabla 1 en la sección de diseño experimental por MSR. Como ejemplo, en un matraz Erlenmeyer se agregaron 200 mL de agua desionizada, 2 g de anilina y 2 g de pirrol. Por otro lado, en un vaso de precipitado de 50 mL de capacidad, se dispersaron 0.2 g de GO en 10 mL de agua desionizada mediante ultrasonido durante 15 minutos y se agregó a la solución de pirrol y anilina con agitación magnética. Posteriormente, la temperatura de la mezcla de reacción se elevó a 50 °C. Entonces, se agregó el APS en proporción molar 1:1 de APS:Anilina a la mezcla de reacción para iniciar la polimerización de los monómeros, la cual se dejó transcurrir durante 1 h. Finalmente, los compositos de GO/PANI/PPy fueron filtrados y lavados varias veces con agua desionizada y secados a 60 °C por 24 h.

Diseño experimental mediante MSR

Se realizaron varios experimentos para evaluar eficiencia del composito de GO/PANI/PPy en la protección anticorrosiva de cobre en presencia de agua de mar e investigar las proporciones óptimas de cada componente, para lo cual se empleó un DCC y la MSR en el diseño estadístico de experimentos. El análisis de datos proporciona las condiciones óptimas de las variables independientes y evalúa su relación con una variable independiente significativa, las cuales fueron la cantidad de GO y la relación en peso de PPY/PANI como variables independientes (dos factores), y la eficiencia anticorrosiva como variable dependiente (respuesta), tal como se muestra en la Tabla 1. Cada variable independiente se codificó en dos niveles, -1 y +1 según el DCC ortogonal, en los intervalos de valores

determinados a partir de un conjunto de experimentos preliminares. El número total de experimentos para dos factores fue 10.

El comportamiento del sistema fue explicado a través de un modelo polinomial empírico de segundo orden, como se muestra en la Ecuación (Montgomery et al.):

$$Y = \beta_0 + \sum_j^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum_i \sum_{<j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + e_i \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde Y es la respuesta, X_i y X_j son los factores (variables independientes), β_0 es el valor de la respuesta fijado en el punto central del diseño, β_i son los coeficientes lineales, β_{ij} son los coeficientes interactivos, β_{ii} son los coeficientes cuadráticos, k es el número de factores y e_i es un error aleatorio.

Tabla 1. Proporciones en peso y en % de GO, PANI y PPy ^{a), b)}

Muestra	GO (g)	PPy (g)	PANI (g)	% GO	% PPy	% PANI
GO1	0.101	2.8	1.2	2.5	68.3	29.3
GO2	0.200	1.2	2.8	4.8	28.6	66.7
GO3	0.200	2.8	1.2	4.8	66.7	28.6
GO4	0.101	2.0	2.0	2.5	48.8	48.8
GO5	0.200	2.8	1.2	4.8	66.7	28.6
GO6	0.020	2.0	2.0	0.5	49.8	49.8
GO7	0.020	1.2	2.8	0.5	29.9	69.7
GO8	0.101	1.2	2.8	2.5	29.3	68.3
GO9	0.020	2.8	1.2	0.5	69.7	29.9
GO10	0.200	2.0	2.0	4.8	47.6	47.6

a) Los pesos tienen un error ± 0.001 . b) Los porcentajes de error son $\pm 0.01\%$.

Preparación de los electrodos y pruebas electroquímicas de corrosión

La fabricación de los electrodos se realizó mediante la deposición de los compositos en láminas de cobre de 2×2 cm, para lo cual se prepararon tintas mediante la dispersión de 0.1 g cada composito previamente molido en un mortero de ágata en 5 mL de NMP en presencia de ultrasonido por 3 minutos.

Posteriormente, 2 mL de esta dispersión fueron depositados gota a gota sobre las láminas de cobre previamente lavadas y enjuagadas con metanol para remover impurezas y dejando secar los electrodos a temperatura ambiente por 12 h previo a las pruebas de corrosión. La Figura 1 muestra una fotografía del aspecto físico de los electrodos previo a las pruebas electroquímicas.

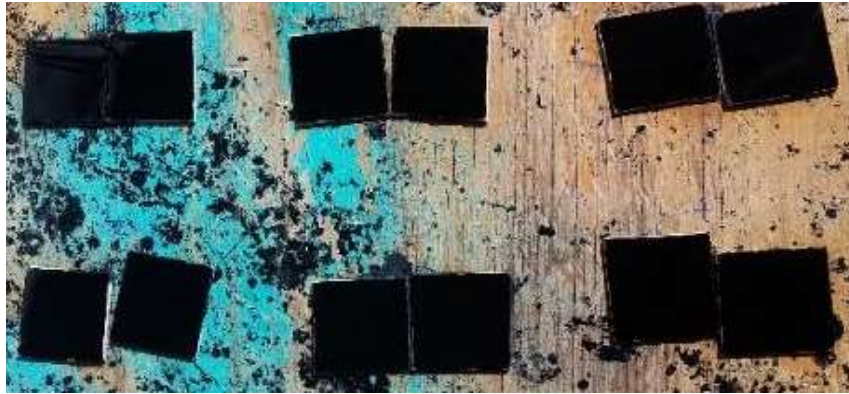


Figura 1. Aspecto físico de los electrodos de cobre recubiertos con los compositos de GO/PANI/PPy.

3. Caracterización

Los compositos de GO/PANI/PPy se analizaron mediante espectroscopia FTIR (Agilent, Cary 630) y mediante análisis termogravimétrico (TGA550, TA Instrument) utilizando 10 mg de cada muestra calentando de 25 a 800 °C a una velocidad de 20 °C/min. La conductividad eléctrica de las muestras se determinó mediante el método de cuatro puntas (cabezal de punta SP4 Lucas/Signatone con 0.04 pulgadas de espacio entre las puntas) acoplado a un instrumento Keithley (2400 SourceMeter). Los compuestos GO/PANI/PPy se prensaron en forma de discos (1 cm de diámetro × 3 mm de espesor) con 2 toneladas de presión.

Las caras recubiertas de las láminas de cobre fueron utilizadas como electrodos de trabajo, las cuales se montaron en una celda de corrosión llena de una solución acuosa de NaCl al 3.5% (200 mL), utilizando un electrodo de platino como contraelectrodo y uno de Ag/AgCl como electrodo de referencia. Los tres electrodos se conectaron a un potenciostato/galvanostato (VersaSTAT4, AMETEK™ Scientific Instruments) y luego se realizó la prueba de corrosión mediante experimentos de voltamperometría de barrido lineal a potenciales entre -250 mV y +250 mV vs. Ag/AgCl (3,5 M) y a 0.5 mV/s de velocidad de barrido para obtener los diagramas polarización de Tafel. Adicionalmente, se

realizó la prueba de corrosión a una muestra de cobre sin recubrir como comparación.

La velocidad de corrosión (CR) en mm/año fue determinada como sigue (Qiu et al., 2017):

$$CR = \frac{I_{corr}(M)}{V(\rho)F} \times 87600 \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde I_{corr} es la densidad de corriente de corrosión en A/cm², M representa la masa molar del metal (para cobre es 63.546 g/mol), V es la valencia química del Cu (la reacción de oxidación del Cu metálico es cuando pasa del 0 a +2, generando oxido cúprico, por tanto, $V=2 \text{ mol}^{-1}$), ρ es la densidad del Cu (8.96 g/cm³), F es la constante de Faraday (26.8 en A*h o 96,485 C/mol) y el valor de 87600 es un factor de conversión para obtener CR en mm/año.

La eficiencia anticorrosiva fue calculada usando la siguiente ecuación:

$$EF (\%) = \frac{I_{corr}(\text{puro}) - I_{corr}(\text{recubierto})}{I_{corr}(\text{puro})} \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde I_{corr} (recubierto) e I_{corr} (puro) representan las densidades de corriente de corrosión del Cu con y sin recubrimiento con los compositos de GO/PANI/PPy, respectivamente.

4. Resultados y discusión

Caracterización

La incorporación de los diferentes materiales en el compuesto fue verificada mediante FTIR. La Figura 2 muestra los espectros de FTIR de algunos composites de GO/PANI/PPy. Las principales señales correspondientes al PPy en la muestra GO1 (mayor contenido de PPy) se pueden ver claramente en este compuesto. Las bandas centradas en 1490 y 1560 cm^{-1} se deben a C-C y C=C de los anillos de pirrol, respectivamente (Ovando-Medina et al., 2011b). En el espectro de la muestra GO2 (mayor contenido de PANI), se aprecian también los picos característicos de la PANI, los cuales se encuentran centrados en 1570, 1500, 1258, 1130 y 828 cm^{-1} . La banda de

1448 cm^{-1} está relacionada con las vibraciones mixtas de estiramiento C-C y de flexión C-H y C-N observadas en los espectros de los oligómeros aromáticos. Los picos en 1570 y 1130 cm^{-1} se pueden atribuir al estiramiento C=C de los anillos quinoideos (Q); el pico a 828 cm^{-1} se debe a la flexión C-H fuera del plano aromático del anillo 1,4. La señal en 1258 es característica del estiramiento C-N en el Q/cis-bencenoide (Bc)/Q, Q/anillo bencenoide (B)/B y B/B/Q de PANI (Corona-Rivera et al., 2014). El pico de 1500 cm^{-1} se debe a la PANI base, lo que es consistente con las deformaciones por estiramiento del anillo de quinona y benceno. Las principales bandas características del GO se observan en todos los espectros a 1710 y 1040 cm^{-1} tal como lo reportan Irigoyen et al. (Irigoyen et al., 2015).

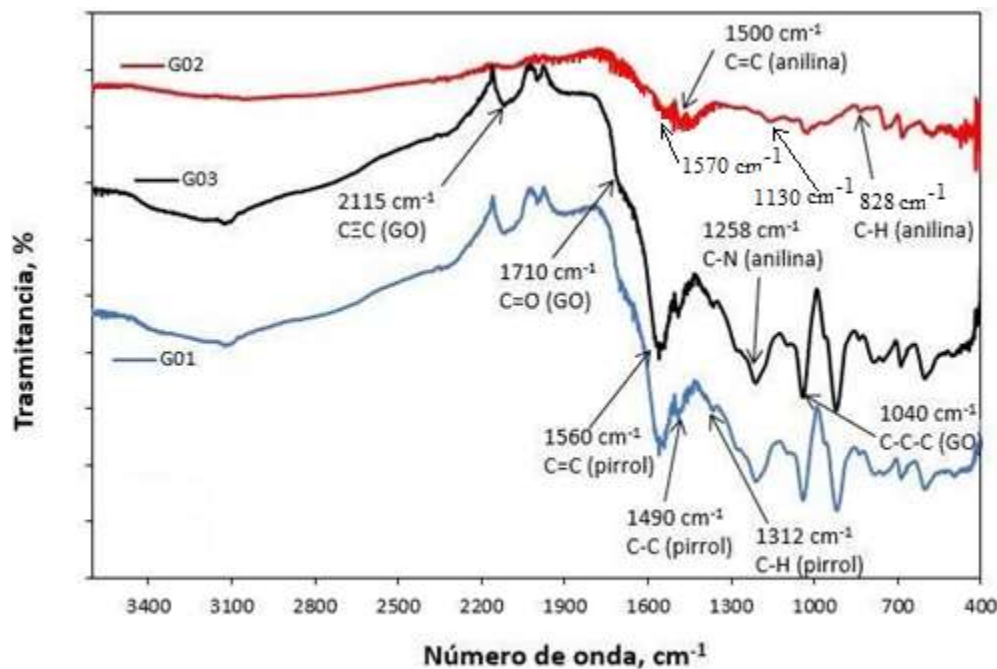


Figura 2. Espectros de FTIR de las muestras representativas GO1, GO2, GO3.

La interacción y el enlazamiento del recubrimiento GO-PPy-PANI con el sustrato de cobre se explican por una combinación de interacciones químicas y físicas que gobiernan su desempeño anticorrosivo. El óxido de grafeno actúa como una matriz

bidimensional rica en grupos oxigenados ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ y epóxidos), los cuales favorecen la integración con PANI y PPy mediante puentes de hidrógeno, interacciones electrostáticas y apilamiento π - π entre los dominios aromáticos del GO y las cadenas

conjugadas de los polímeros conductores, generando una red híbrida compacta y estable. A nivel interfacial, los átomos de nitrógeno presentes en PANI y PPy pueden coordinarse con el Cu superficial mediante interacciones tipo Cu-N, mientras que los grupos oxigenados del GO contribuyen a interacciones Cu-O, mejorando la adhesión del recubrimiento y limitando el acceso de especies corrosivas como Cl⁻, O₂ y H₂O. Durante la exposición en solución 3.5% NaCl p/v, la formación controlada de óxidos superficiales (principalmente Cu₂O y en menor medida CuO) bajo el recubrimiento desempeña un papel clave, ya que Cu₂O actúa como una capa pasiva semiconductor que reduce la cinética de disolución del cobre, mientras que la naturaleza redox de PANI y PPy contribuye a estabilizar este estado pasivo e inhibir la transformación hacia óxidos menos protectores.

La estabilidad térmica de los compositos fue determinada mediante análisis de TGA, cuyos resultados se muestran en la Figura 3. La Figura 3 muestra los porcentajes de pérdida de peso en función de la temperatura. Todas las muestras presentaron la misma cantidad de pérdida de masa (~ 5%) por debajo de los 100 °C, lo cual corresponde a agua físicamente adsorbida. Puede verse en esta figura que, a partir de los 185 °C, los compositos comienzan a descomponerse; este

primer cambio corresponde a la degradación del PPy, el cual tiene temperatura de descomposición reportada de aproximadamente 200 °C (Yussuf et al., 2018). El segundo cambio importante en la pérdida de masa ocurre aproximadamente a 300 °C, el cual corresponde a la degradación de la PANI (Y. Wang et al., 2020). Entre las muestras GO2 y GO3 (curva punteada en la Figura 3) lo único que cambia es la proporción de PPy a PANI de 30/70 a 70/30, aunque no es considerable, la pérdida de masa es ligeramente mayor en la muestra GO2, es decir, posee menor estabilidad térmica, aunque la PANI se degrada a mayor temperatura, su combinación con PPy y GO hacen que el composito sea menos estable térmicamente. Puede verse también que al disminuir la cantidad de GO en el composito (muestra GO7) la estabilidad térmica disminuye también, lo cual se debe a que las cadenas de PPy y PANI poseen mayor movimiento y por lo tanto se degradan más fácilmente. La presencia del GO disminuye la movilidad de las cadenas de los polímeros PPy y PANI, incrementando la resistencia térmica. También se observó que a altas temperaturas y para cantidades de GO mayores a 0.1 g (2.5% de composición total en el composito), la pérdida de masa es aproximadamente 35% en total, lo que demuestra la buena estabilidad térmica de los compositos.

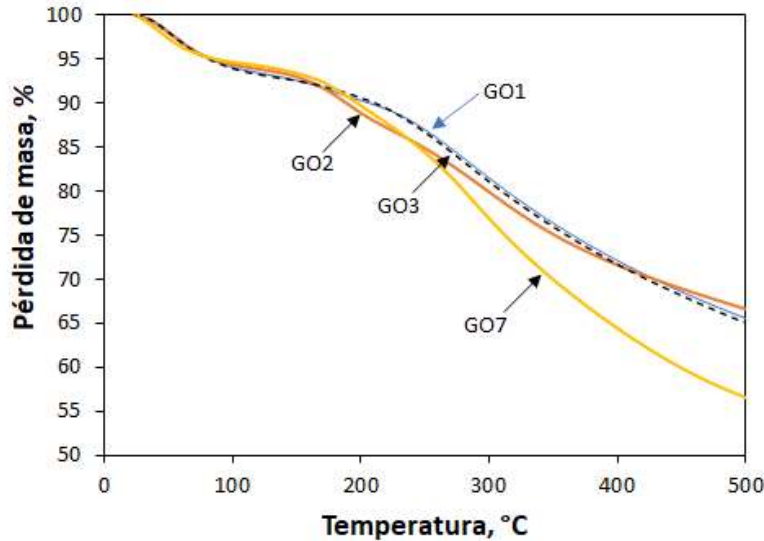


Figura 3. Análisis termogravimétrico de algunas muestras representativas de los composites de GO/PANI/PPy.

Corrosión electroquímica

La Figura 4 muestra los gráficos de polarización de Tafel de Cu recubierto con los composites de GO/PANI/PPy y el del Cu sin recubrir, mientras que la Tabla 2 muestra los parámetros electroquímicos obtenidos en una solución acuosa de NaCl al 3.5%. Se puede ver para el Cu recubierto que los potenciales de corrosión de los electrodos se desplazan a valores menos negativos (incluso hasta valores positivos) desde -5 V para el Cu solo, hasta valores de -0.3 a +0.5V para los electrodos recubiertos con los diferentes composites, lo que indica una buena protección contra la corrosión.

Es interesante observar que la película GO1 (cantidad más baja de GO y mayor cantidad de PPy) mostró solo un 89.04% de eficiencia de protección contra la corrosión (Tabla 2), mientras que el composite con una pequeña cantidad de GO (0.5%) pero mayor cantidad de PANI respecto al PPy (30/70 PPy/PANI) presentó el mayor valor de EF (98.66%), esto en la muestra G08, pero al aumentar el contenido de GO (muestra GO2) esta EF

disminuyó ligeramente. La Tabla 2 también muestra que, a mayor conductividad eléctrica, menor es la EF. Este comportamiento podría indicar que están presentes ambos mecanismos de protección: barrera, por el PPy y la PANI, y pasivación, por el GO; sin embargo, la barrera es el principal mecanismo de protección, lo cual es útil con el mínimo del proceso de pasivación. Adicionalmente, los polímeros al ser semiconductores son capaces de llevar a cabo reacciones de oxido-reducción, disminuyendo el transporte de cargas en la superficie del metal, disminuyendo la velocidad de oxidación del Cu. Aunque la muestra con menor contenido de GO y mayor contenido de PPy (GO1) presentó una EF de sólo 89.04%, esta mostró una CR nueve veces más lenta que el Cu sin recubrimiento, lo cual ya es una ventaja. Aunque las diferencias en los % de EF no sean significativas entre un composite y otro, las CR son muy diferentes, por ejemplo, mientras que las muestras GO2 y GO8 tuvieron una EF de 97.25% y 98.66%, respectivamente, sus CR fueron 31 y 74 veces más bajas respecto a cobre sin recubrir, respectivamente.

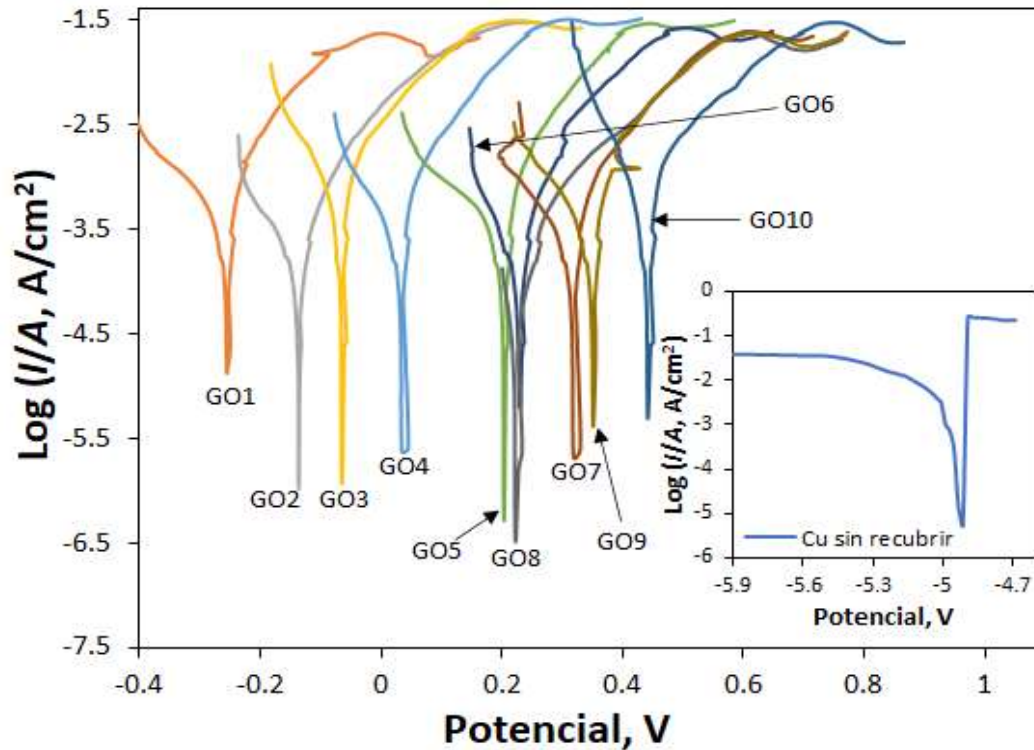


Figura 4. Curvas de polarización electroquímica de Tafel correspondientes a los electrodos de cobre recubierto con los diferentes composites de GO/PANI/PPy.

Tabla 2. Parámetros electroquímicos de los electrodos de Cu sin recubrir y recubiertos con los diferentes composites de GO/PANI/PPy en solución acuosa de NaCl al 3.5%.

Muestra	I_{corr} , A/cm ²	CR, mm/año	EF, %	CE, $\times 10^{-7}$ S/m
Cu solo	0.005623	1.0257	0.00	--
GO1	0.000617	0.1125	89.04	5.26
GO2	0.000155	0.0283	97.25	5.55
GO3	0.000530	0.0967	90.57	9.09
GO4	0.000240	0.0439	95.72	10
GO5	0.000391	0.0713	93.05	5.55
GO6	0.000300	0.0547	94.66	5.88
GO7	0.000179	0.0326	96.82	5.88
GO8	0.000076	0.0138	98.66	5.55
GO9	0.000171	0.0312	96.96	9.09
GO10	0.000525	0.0958	90.66	5.26

Superficie de respuesta y análisis estadístico

Como se puede apreciar en la figura 5 (a), se describe una superficie donde el posible punto óptimo para la eficiencia es una cantidad media de grafeno, 0.062%, y una combinación del 30% de Polipirrol y 70% de

Polianilina, para un valor de 98.1385% de eficiencia, datos que se confirman en la figura 5 (b), la gráfica de contorno para la eficiencia. Hay que mencionar que al aumentar el porcentaje de polipirrol y la cantidad de grafeno la eficiencia va en deceso.

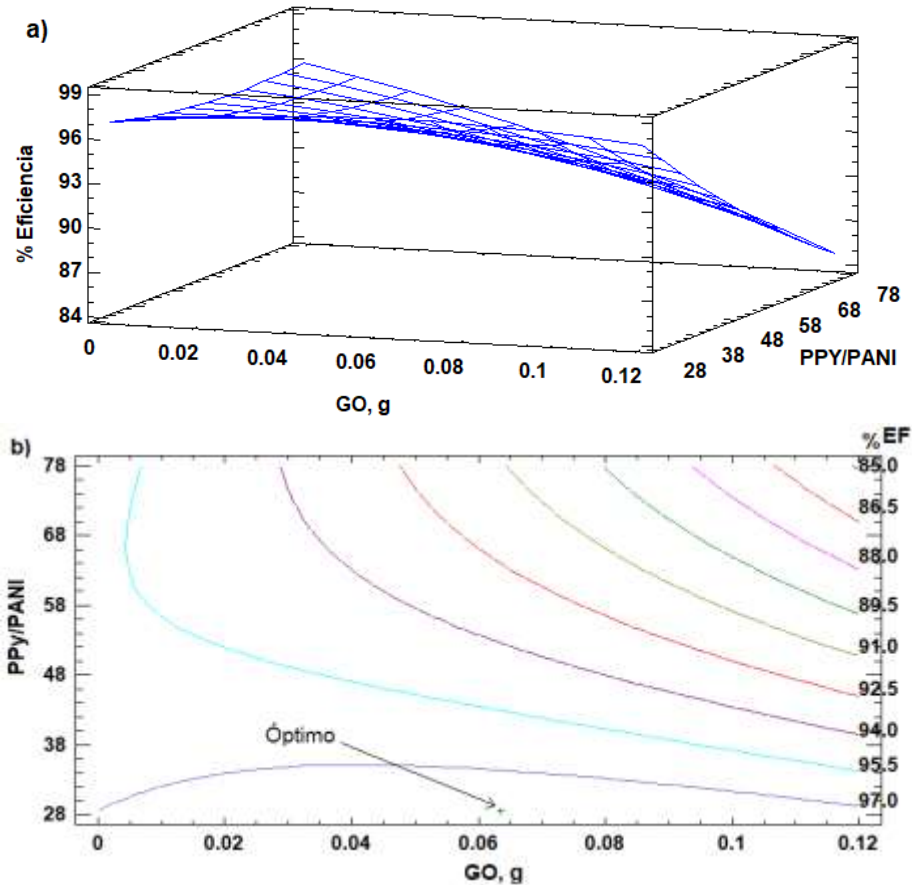


Figura 5. (a) Modelo de superficie de respuesta y (b) curvas de contorno para el % de EF de los composites de GO/PANI/PPy en la protección de cobre.

El modelo finalmente utilizado en términos de los factores cantidad de GO (GO) y de la relación de PPy/PANI (PANI) fue el siguiente:

$$EF, \% = 100.175 + 89.4104(GO) - 0.143798 * (PPy/PANI) - 279.833(GO)^2 - 1.89444(GO)(PPy/PANI) + 0.00114297(PPY/PANI)^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

El análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático (Tabla 3) revela que, bajo un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), ninguno de los factores individuales o sus interacciones mostró una significancia estadística robusta ($p > 0.05$). El factor más influyente fue la relación PPy/PANI (Factor B, $p = 0.0545$), el cual se aproxima al umbral de significancia, sugiriendo una tendencia que merece ser explorada en estudios futuros

con un mayor tamaño muestral o un rango de variables diferente. Sin embargo, la falta de significancia estadística estricta indica que el modelo de superficie de respuesta generado no es lo suficientemente predictivo para identificar un punto óptimo con confianza. Esta variabilidad, común en estudios electroquímicos de corrosión donde pequeños defectos en el recubrimiento o heterogeneidades en la superficie pueden influir fuertemente en los resultados, sugiere que las diferencias observadas entre la mayoría de las formulaciones pueden no ser estadísticamente diferentes. El valor del coeficiente de determinación $R^2 = 75.0267\%$ y $R_{aj}^2 = 70.88\%$ son aceptables al ser mayores de 70%, lo que significa que los factores explican un porcentaje de la variabilidad observada en la variable de respuesta.

Tabla 3. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) del modelo cuadrático para el % de EF de los composites de GO/PANI/PPy en la protección de cobre.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A=GO	16.6844	1	16.6844	2.67	0.1773
B=PPy/PANI	45.2189	1	45.2189	7.25	0.0545
AA	0.867555	1	0.867555	0.14	0.7281
AB	11.6281	1	11.6281	1.86	0.2439
BB	0.564732	1	0.564732	0.09	0.7785
Error total	24.9524	4	6.23809		
Total (corr.)	99.916	9			

Las gráficas mostradas en la figura 6 complementan la información expuesta en la tabla 3. La figura 6 (a), el diagrama de Pareto, muestra el factor B, la relación Polipirrol-Polianilina como el más significativo, es decir que si logramos controlar esta combinación podremos incrementar el porcentaje de eficiencia. La figura 6 (b), confirma el factor Polipirrol-Polianilina como el efecto principal más significativo,

manteniendo la relación 30% Polipirrol y 70% Polianilina. Agregar que la curva descrita por el factor tiene una pendiente más inclinada que el factor grafeno. La figura 6 (c), muestra la gráfica de interacción de factores, donde notamos una mediana interacción entre ellos, ya que, si existe una diferencia de pendientes entre las curvas, pero no se llegan a intersectar.

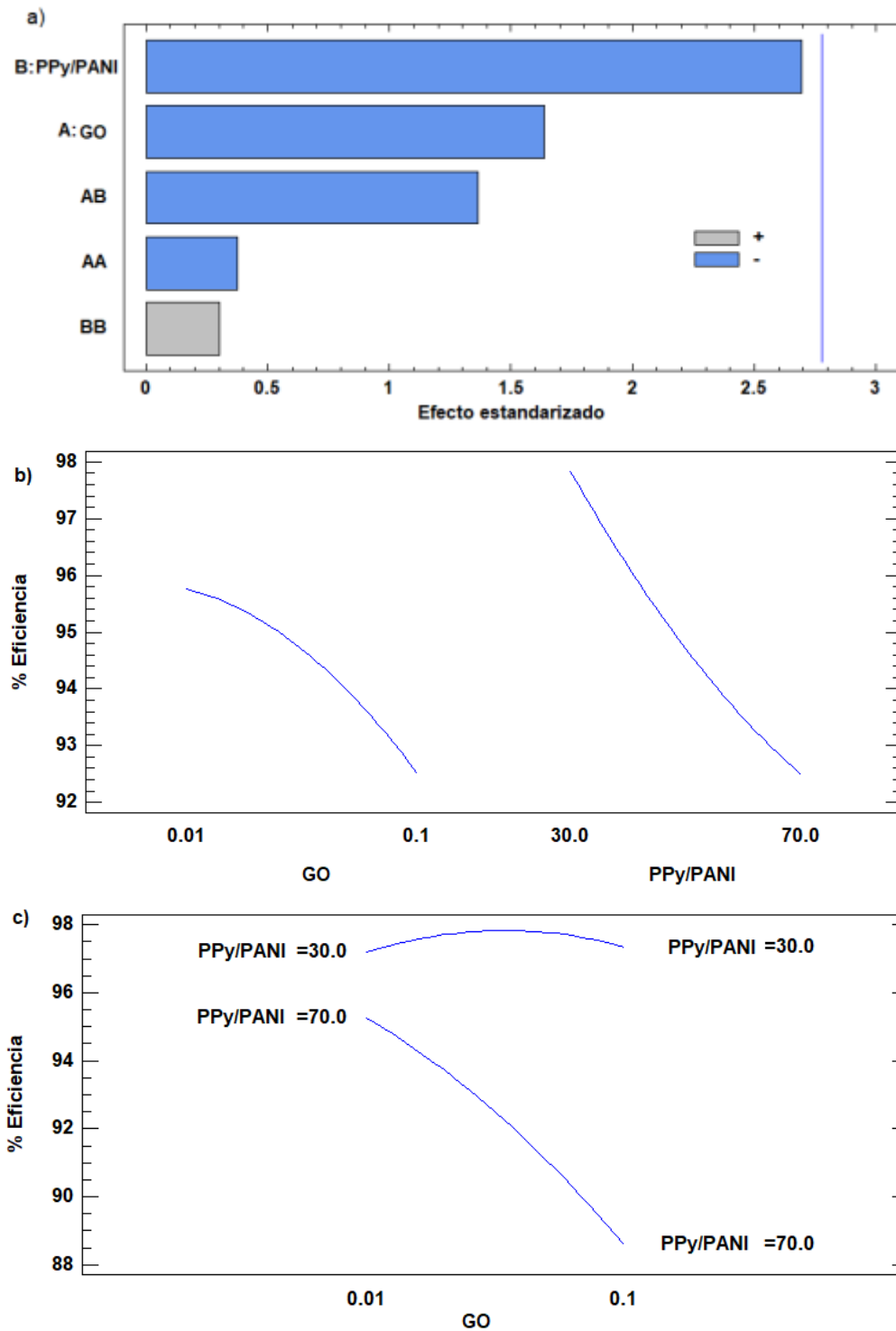


Figura 6. (a) Diagrama de Pareto estandarizado, (b) efectos principales y (c) interacciones para el % de EF de los compositos de GO/PANI/PPy en la protección de cobre.

5. Conclusiones

El composito de GO/PANI/PPy fue exitosamente preparado y demostró su

efectividad como protector anticorrosivo de cobre metálico en presencia de agua de mar simulada con NaCl al 3.5%. Mediante las curvas de polarización de Tafel, se

observaron eficiencias anticorrosivas de hasta el 98.66% respecto a cobre no recubierto y velocidades de corrosión tan bajas como 0.0138 mm/año debido a un efecto de barrera. Se sintetizó exitosamente un compuesto de GO/PANI/PPy que demostró una efectividad excepcional como protector anticorrosivo para el cobre en un medio de NaCl al 3.5%. Si bien la Metodología de Superficie de Respuesta no arrojó un modelo estadísticamente significativo para la optimización, probablemente debido a la alta variabilidad inherente a las pruebas electroquímicas, los resultados experimentales identificaron de manera empírica que la muestra GO8 (0.101 g de GO, relación PPy/PANI 30/70) fue la más efectiva, alcanzando una eficiencia del 98.66% y una velocidad de corrosión de 0.0138 mm/año. Este trabajo valida el potencial del compuesto GO/PANI/PPy y sugiere que la relación entre los polímeros conductores (PPy/PANI) es un factor crucial por investigar en futuros estudios, los cuales deberían emplear de al menos 3 réplicas para capturar y superar la variabilidad experimental. No obstante que el proceso de obtención de los GO es relativamente costoso, las cantidades usadas en los composites no representan una elevación en el costo de producción del anticorrosivo, demostrando su aplicabilidad práctica.

6. Referencias

- Ahmad, A. L., Ismail, S., & Bhatia, S. (2005). Optimization of coagulation-flocculation process for palm oil mill effluent using response surface methodology. *Environmental Science and Technology*, 39(8), 2828–2834. https://doi.org/10.1021/ES0498080/SUPPL_FILE/ES0498080SI20050118_034454.PDF
- Aljuboury, D. A. D. A., Palaniandy, P., Aziz, H. B. A., Feroz, S., & Amr, S. S. A. (2016). Evaluating photo-degradation of COD and TOC in petroleum refinery wastewater by using TiO₂/ZnO photocatalyst. *Water Science and Technology*, 74(6), 1312–1325. <https://doi.org/10.2166/WST.2016.293>
- Armelin, E., Meneguzzi, Á., Ferreira, C. A., & Alemán, C. (2009). Polyaniline, polypyrrole and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) as additives of organic coatings to prevent corrosion. *Surface & Coatings Technology*, 24(203), 3763–3769. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2009.06.019>
- Baldissera, A. F., & Ferreira, C. A. (2012). Coatings based on electronic conducting polymers for corrosion protection of metals. *Progress in Organic Coatings*. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.05.004>
- Bernardo Do Campo, S. (2021). *Propiedades mecánicas e térmicas de compósitos de poliamida 6 contendo fibra curta de carbono recobertas com óxido de grafeno*. <https://doi.org/10.31414/EM.2021.D.131382>
- Choi, J. S., Park, H. bin, Yoon, O. J., & Kim, H. J. (2022). Investigation on the role of graphene oxide sheet-platinum composite counter electrode in dye-sensitized solar cell. *Thin Solid Films*, 745, 139098. <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2022.139098>
- Corona-Rivera, M. A., Ovando-Medina, V. M., Martínez-Gutiérrez, H., Silva-Aguilar, F. E., Pérez, E., & Antonio-Carmona, I. D. (2014). Morphology and conductivity tuning of polyaniline using short-chain alcohols by heterophase polymerization. *Colloid and Polymer Science*, 293(2).

- <https://doi.org/10.1007/s00396-014-3443-1>
- Deyá, M. C., del Amo, B., Spinelli, E., & Romagnoli, R. (2013). The assessment of a smart anticorrosive coating by the electrochemical noise technique. *Progress in Organic Coatings*, 76(4), 525–532. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2012.09.014>
- Dutta, G. K., & Karak, N. (2022). Bio-based waterborne polyester/cellulose nanofiber-reduced graphene oxide–zinc oxide nanocomposite: an approach towards sustainable mechanically robust anticorrosive coating. *Cellulose* 2022, 1–25. <https://doi.org/10.1007/S10570-021-04414-4>
- Geng, Y., Zhou, P., Li, S., Cao, J., Zhou, Z., Wu, Z., & Liu, A. (2022). Superior corrosion resistance of mild steel coated with graphene oxide modified silane coating in chlorinated simulated concrete solution. *Progress in Organic Coatings*, 164, 106716. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2022.106716>
- Harilal, M., George, R., Albert, S., Building, J. P.-C. and, & 2022, undefined. (n.d.). A new ternary composite steel rebar coating for enhanced corrosion resistance in chloride environment. *Elsevier*. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822000010>
- Huong, L. M., Trung, T. Q., Tuan, T. T., Viet, N. Q., Dat, N. M., Nghiem, D. G., Thinh, D. B., Tinh, N. T., Oanh, D. T. Y., Phuong, N. T., Nam, H. M., Phong, M. T., & Hieu, N. H. (2022). Surface functionalization of graphene oxide by sulfonation method to catalyze the synthesis of furfural from sugarcane bagasse. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-02272-5>
- Hussain, M., & Schaus, D. (2022). Effect of surface roughness and coating alternatives of seawater pipes on energy efficiency of ships. *International Journal of Energy and Water Resources*. <https://doi.org/10.1007/S42108-021-00164-Y>
- Irigoyen, J., Politakos, N., Diamanti, E., Rojas, E., Marradi, M., Ledezma, R., Arizmendi, L., Alberto Rodríguez, J., Ziolo, R. F., & Moya, S. E. (2015). Fabrication of hybrid graphene oxide/polyelectrolyte capsules by means of layer-by-layer assembly on erythrocyte cell templates. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 2310–2318. <https://doi.org/10.3762/BJNANO.6.237>
- Kalendová, A., Veselý, D., Kohl, M., & Stejskal, J. (2014). Effect of surface treatment of pigment particles with polypyrrole and polyaniline phosphate on their corrosion inhibiting properties in organic coatings. *Progress in Organic Coatings*. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.04.012>
- Li, N., Zhang, W., Xu, H., Cai, Y., Materials, X. Y., & 2022, undefined. (n.d.). Corrosion Behavior and Mechanical Properties of 30CrMnSiA High-Strength Steel under an Indoor Accelerated Harsh Marine Atmospheric Environment. *Mdpi.Com*. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.mdpi.com/1450322>
- Li, X., Sci, X. L.-Int. J. Electrochem., & 2022, undefined. (2022). Study on

- Corrosion Resistance of Superhydrophobic Film Prepared on the Surface of 2024 Aluminum Alloy. *Electrochemsci.Org*, 17, 220242. <https://doi.org/10.20964/2022.02.12>
- Majumder, P., Gangopadhyay, R. Evolution of graphene oxide (GO)-based nanohybrid materials with diverse compositions: An overview (2022) *RSC Advances*, 12 (9), pp. 5686 - 5719. DOI:16 10.1039/d1ra06731a
- Martins, J. I., Reis, T. C., Bazzaoui, M., Bazzaoui, E. A., & Martins, L. (2004). Polypyrrole coatings as a treatment for zinc-coated steel surfaces against corrosion. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.02.006>
- Montgomery D.C., Runger G.C. (2012). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Limusa Wiley, 2a Edición. ISBN-10 : 9681859154. ISBN-13 : 978-9681859152
- Mostovoy, A., Shcherbakov, A., Yakovlev, A., Arzamastsev, S., & Lopukhova, M. (2022). Reinforced Epoxy Composites Modified with Functionalized Graphene Oxide. *Polymers*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/POLYM14020338>
- Ovando-Medina, V. M., Peralta, R. D., Mendizábal, E., Martínez-Gutiérrez, H., Lara-Ceniceros, T. E., & Ledezma-Rodríguez, R. (2011a). Synthesis of polypyrrole nanoparticles by oil-in-water microemulsion polymerization with narrow size distribution. *Colloid and Polymer Science*. <https://doi.org/10.1007/s00396-011-2394-z>
- Ovando-Medina, V. M., Peralta, R. D., Mendizábal, E., Martínez-Gutiérrez, H., Lara-Ceniceros, T. E., & Ledezma-Rodríguez, R. (2011b). Synthesis of polypyrrole nanoparticles by oil-in-water microemulsion polymerization with narrow size distribution. *Colloid and Polymer Science*, 289(7). <https://doi.org/10.1007/s00396-011-2394-z>
- Páez, H. Y. & Rincón, L. A. (2019). Uso del óxido de grafeno como adsorbente en la remoción de cromo en una matriz acuosa con características de agua residual producto de la actividad de curtido. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.14625/21281>
- Qiu, S., Li, W., Zheng, W., Zhao, H., & Wang, L. (2017). Synergistic effect of polypyrrole-intercalated graphene for enhanced corrosion protection of aqueous coating in 3.5% nacl solution. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(39), 34294–34304. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.7B08325/SUPPL_FILE/AM7B08325_SI_001.PDF
- Rodríguez, J. R. (2021). *Síntesis y Caracterización de Óxido de Grafeno Reducido Funcionalizado con Nanopartículas Metálicas. Aplicación en el Desarrollo de Sensores Amperométricos*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/671817>
- Senocak, T., Yilmaz, T., Budak, H., ... G. G.-M. T., & 2022, undefined. (n.d.). Influence of sodium pentaborate (B5H10NaO13) additive in plasma electrolytic oxidation process on WE43 magnesium alloys. *Elsevier*. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822000356>

- Torre, G. C.-D. la, Ortiz-Ortiz, J., Espinosa-Medina, M. A., & Zurita-Méndez, N. N. (2021). Óxido de grafeno en una matriz polimérico-cerámica: análisis de las propiedades mecánicas a compresión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 9(Especial2), 226–230. <https://doi.org/10.29057/ICBI.V9IESPE CIAL2.8014>
- Wang, H., Xu, J., Du, X., Wang, H., Cheng, X., & Du, Z. (2022). Stretchable and self-healing polyurethane coating with synergistic anticorrosion effect for the corrosion protection of stainless steels. *Progress in Organic Coatings*, 164, 106672. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2021.106672>
- Wang, X., Zhuo, J., Xing, T., & Wang, X. (2022). Preparación de un compuesto de óxido de grafeno / resina epoxi con hierro-reducido y su resistencia a la llama y estabilidad térmica. *DYNA*, 97(1), 98–103. <https://doi.org/10.6036/10327>
- Wang, Y., Wei, H., Guo, J., Bao, L., & Liu, X. (2020). Study on the Synthesis and Photothermal Conversion Property of Polyaniline. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 772(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/772/1/012048>
- Yussuf, A., Al-Saleh, M., Al-Enezi, S., & Abraham, G. (2018). Synthesis and Characterization of Conductive Polypyrrole: The Influence of the Oxidants and Monomer on the Electrical, Thermal, and Morphological Properties. *International Journal of Polymer Science*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4191747>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Biodegradation of organochlorine compounds with the *Pseudomonas chlororaphis* strain in liquid medium as the only carbon source

Biodegradación de compuestos organoclorados por *Pseudomonas chlororaphis* en medio líquido como única fuente de carbono

Bautista-Bautista, O.^a, Sánchez-Minutti, L.^a, Ortega-Sánchez, E.^b, Tellez-Girón, J.D.^c, Garcia-Dávila, J.^{a*}

^a Universidad Politécnica de Tlaxcala. Avenida Universidad Politécnica, No.1, San Pedro Xalcaltzinco, C.P. 90180 Tlaxcala, México (<https://orcid.org/0009-0009-8614-7743>, <https://orcid.org/0000-0003-4739-5196>, <https://orcid.org/0000-0002-8013-4177>).

^b Instituto Tecnológico de Tepic, División de estudios de posgrado Av. Instituto Tecnológico No. 2595, Col Lagos del Country, C.P. 63175. Nayarit, México (<https://orcid.org/0000-0002-9283-0778>).

^c Facility Manager S.A. de C.V., Polonia 1430-3 Col Las Hadas Mundial 86, C.P. 72070. Puebla, México (<https://orcid.org/0000-0001-5805-531X>).

oscar.bautista@uptlax.edu.mx; lilia.sanchez@uptlax.edu.mx; biotecnocios@gmail.com; jabeldtg77@yahoo.com.mx; jorge.garcia@uptlax.edu.mx*

Technological innovation: Bioremediation of organochlorine compounds.

Application area: Environmental biotechnology.

Received: July 24th, 2025

Accepted: December 17th, 2025

Resumen

Actualmente los suelos presentan alteraciones debido a la presencia de contaminantes de diferentes orígenes. La biorremediación es una de las áreas de mayor investigación para mitigar el efecto de los desechos orgánicos, entre los que destacan los compuestos organoclorados, conocidos por su alta resistencia a los procesos naturales de biodegradación.

Las cepas del género *Pseudomonas spp.* han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de crecer en ambientes con presencia de compuestos organoclorados y degradarlos. En este trabajo se utilizó la cepa *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 aislada de un sitio de confinamiento con presencia de compuesto organoclorados. Se estudio la cinética de crecimiento en medio tripticaseína de soya y en un medio mínimo en sales con presencia del sustrato organoclorado (Diclorobenceno 84% (Triclorobenceno 5%, Tetraclorobenceno 10.5%, y Pentaclorobenceno 0.5%) como fuente de carbono. El crecimiento microbiano se cuantificó mediante, densidad óptica y peso seco. El cultivo fue incubado por tres días a 30 °C, y posteriormente se validó la morfología característica de *Pseudomonas* mediante un frotis bacteriano. Se inoculó la cepa en dos concentraciones del sustrato

organoclorado como única fuente de carbono, para evaluar si su metabolismo puede asimilar estos compuestos tóxicos. Los resultados demuestran una mayor producción de biomasa de 3.49×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$ a una concentración de 100 ppm de sustrato organoclorado, con una remoción del 83.60%; por otra parte, a concentración de 1000 ppm se obtuvo una producción de biomasa de 1.48×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$ con un porcentaje de remoción del sustrato de 89.5%. Lo que demuestra que *P. chlororaphis* CA-1 es capaz de utilizar a los compuestos organoclorados como fuente de carbono.

Palabras clave: Biodegradación, Cinética de crecimiento, Sustrato organoclorado, *Pseudomonas chlororaphis*.

Abstract

Soils are currently altered due to the presence of pollutants from various sources. Bioremediation is one of the most researched approaches to mitigate the effects of organic waste, especially organochlorine compounds, known for their high resistance to natural biodegradation processes. Strains of the genus *Pseudomonas spp.* have been widely studied for their ability to survive in environments containing organochlorine compounds and to degrade them. In this study, the *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 strain, isolated from a confinement site containing organochlorine compounds, was used. Growth kinetics were studied in Trypticase soy broth (TSB) and mineral salts medium (MSM) in the presence of the organochlorine substrate (dichlorobenzene 84%, trichlorobenzene 5%, tetrachlorobenzene 10.5%, and pentachlorobenzene 0.5%) as a carbon source. Microbial growth was quantified by optical density and dry weight. The culture was incubated for three days at 30°C, and the characteristic morphology of *Pseudomonas* was validated using a bacterial smear.

The strain was inoculated at two concentrations of the organochlorine substrate as the sole carbon source to evaluate whether its metabolism could assimilate these toxic compounds. The results demonstrate biomass production of 3.49×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$ at 100 ppm, with an organochlorine-substrate removal percentage of 83.6%. At 1000 ppm, a substrate removal percentage of 89.5% was obtained, with biomass production of 1.48×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$. This demonstrates that *P. chlororaphis* CA-1 is capable of using organochlorine compounds as a carbon source.

Key words: Biodegradation, Growth kinetics, Organochlorine substrate, *Pseudomonas chlororaphis*.

I. Introduction

Ecosystems have been altered by the uncontrolled disposal of inorganic and organic agents. Among them, pesticides, due to their excessive use, have accumulated in the environment, showing high persistence thanks to their physicochemical properties such as their low solubility, which favors their bioaccumulation in living organisms (Sierra-Cortés, *et al.*, 2019).

Among the most persistent chemical compounds in the environment are organochlorine compounds (Pimviriyakul, P. *et al.*, 2020), which inhibit the growth of microorganisms, hindering their biodegradation (Kopytko, *et al.*, 2017). Organochlorine compounds are widely used as solvents, odorants, pesticides, and flame retardants, and are highly resistant to

microbial mineralization due to their recalcitrant haloaromatic structure (Saibu, *et al.*, 2020).

There is a wide variety of bacteria capable of degrading organochlorine compounds (Otiniano-García, *et al.*, 2013; Contreras *et al.*, 2020), among which those of the genus *Pseudomonas spp.* stand out. These are Gram-negative aerobic bacilli, with a remarkable ability to live in environments contaminated with petroleum derivatives and aromatic organic compounds (Saibu, *et al.*, 2020; Kahlon., 2016).

The genus *Pseudomonas sp.* can degrade organochlorine compounds in liquid or solid systems (Luján, D., 2019); however, most studies have focused on liquid cultures due to their diversity of applications in environmental biotechnology (Huang, *et al.*, 2019). However, biodegradation in liquid medium presents certain difficulties (Cui., *et al.*, 2017), since compounds such as dichlorobenzene, trichlorobenzene, and tetrachlorobenzenes are highly insoluble in water, which makes it difficult to prepare suitable solutions for their bioavailability (Lu, *et al.*, 2017). This low solubility limits the ability of microorganisms to use organochlorine compounds as a source of carbon and energy for their growth (Gilani, *et al.*, 2016; Ibáñez-Moreno *et al.*, 2020).

In the present study, a strain of the genus *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 was used to study growth kinetics in the absence and presence of organochlorine compounds to demonstrate its tolerance and capacity to degrade these compounds as the sole carbon source in liquid-state fermentation using a mineral salts medium (MSM).

II. Materials and Methods

2.1 Microorganism studied

The *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 strain with registration code CDBB 91 (ATCC 9447) was donated by the company Clorobencenos S.A. de C.V. in the state of Tlaxcala. This strain was selected for its ability to grow in environments containing toxic compounds derived from the company's waste. It was subsequently preserved by lyophilization using 10% glycerol as a cryoprotectant in TSB medium.

For reactivation of the microorganism, a liquid culture medium of Trypticase soy broth (TSB) was used, adjusted to $\text{pH } 7.1 \pm 0.2$ and sterilized at $120\text{ }^\circ\text{C}$. Subsequently, the microorganism was inoculated. For its growth, a King B culture medium was prepared with the following formulation: Sabouraud agar (65 g/L), potassium phosphate (1.5 g/L), magnesium sulfate (1.5 g/L), yeast extract (20 g/L), and glycerin (10 mL/L). The medium was sterilized for 15 minutes at $120\text{ }^\circ\text{C}$.

2.2 Growth kinetics

Twenty-five 125 mL Erlenmeyer flasks were prepared with 30 mL of sterile TSB culture medium adjusted to $\text{pH } 7.1 \pm 0.2$. Twenty-four flasks were inoculated with 4 mL of the primary culture, and one flask served as a blank containing only TSB medium. The flasks were incubated at $30\text{ }^\circ\text{C}$. Aliquots were taken every hour for seven days to measure the optical density in a Thermo Scientific UV-Vis spectrophotometer (Genesys 10S model).

Biomass was quantified by the gravimetric method by measuring the weight per unit volume (Gómez-Reyes *et al.*, 2017). For this, cells were separated from the liquid medium by centrifugation at 13,000 rpm for 5 minutes (Thermo Scientific centrifuge). The supernatant was removed, and the pellet was

dried in an oven (model HS-60, Prendo) at 50 °C for 10 minutes. Subsequently, the dried pellet was weighed on an Ohaus Pioneer analytical balance.

The cell counting procedure was performed using a Neubauer chamber to determine the concentration of cells in the medium. A 10 µL aliquot of the diluted cell sample (1:2) was taken and loaded into the counting chamber, which has a depth of 0.1 mm. The chamber was allowed to stand for one minute to stabilize the cell distribution before reading. The count was performed using an optical microscope equipped with a 40x objective lens. The number of cells in each square was recorded, and the average cell count per square was calculated. To determine the final cell concentration in the suspension, the following formula was applied:

Cell concentration (cells/mL)=(Average number of cells per square×Dilution factor×10⁴)/1

2.3 Degradation kinetics

The organochlorine liquid substrate used for this analysis was obtained from the waste of the Clorobencenos S. A. de C. V. plant in the municipality of El Carmen Tequexquitla in the state of Tlaxcala. Due to the nature of the substrate, it cannot be sterilized. The composition of the organochlorine substrate was analyzed by gas chromatography in the company's quality control laboratory using its own analytical methods (Table 1).

The degradation kinetics of the organochlorine substrate by *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 was evaluated by liquid fermentation, using a mineral salts medium (MSM). With the following composition: calcium nitrate (60 mg/L), sodium bicarbonate (125 mg/L), potassium nitrate (70 mg/L), monobasic potassium phosphate (100 mg/L), iron sulfate (10 mg/L), zinc sulfate (1.5 mg/L) and agar 15 (g/L). The

medium was inoculated with a bacterial concentration of approximately 2.48 ×10⁶ CFU/mL. Incubation was carried out at 30 ± 2 °C on an orbital shaker at 130 rpm, with pH 7.2 ± 0.2 at the beginning of fermentation.

Five one-liter Erlenmeyer flasks were prepared in duplicate, each with 500 mL of MSM medium. Of these, two flasks were loaded with a concentration of 100 ppm of organochlorine substrate, two more with 1000 ppm of the same substrate, and the fifth flask was used as a control. Over a period of 7 days, two 1 mL samples were taken from each flask every 2 hours to evaluate microbial growth, to maintain the homogeneity of the medium, it was kept in constant agitation at 200 rpm.

Table 1. Concentrations of compounds present in the organochlorine substrate.

Composition of the liquid organochlorine substrate	
According to a chromatographic analysis performed	
% Concentration	Chemical compound
84 ± 0.3%	Dichlorobenzene
5% ± 0.2%	Trichlorobenzene
10.5% ± 0.3%	Tetrachlorobenzene
0.5% ± 0.2%	Pentachlorobenzene

The kinetic parameters were determined using a modified version of the logistic model proposed by Zwietering *et al.* (1990), based on the evolution of bacterial density over time.

2.4 Determination of the percentage of organochlorine substrate removal by GC/MSD

Over a period of seven days, one 1 mL sample was taken daily from each flask to evaluate the percentage removal of the organochlorine substrate. The sample was extracted with 2 mL of hexane, and sodium sulfate was added to the organic layer for drying. Samples were analyzed on an Agilent 7890A gas chromatograph coupled with a mass

spectrometer (triple-axis detector 5975C). Three microliters (3 μL) of the sample were injected in splitless mode (50:1) and carried through an HP 5-MS capillary column (30 m \times 320 μm \times 0.25 μm). The injector temperature was 300 $^{\circ}\text{C}$, and helium carrier gas was set at a constant flow rate of 1 mL min^{-1} . The oven program was set to 90 $^{\circ}\text{C}$ for 5 min, then ramped to 300 $^{\circ}\text{C}$ at 20 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ and held for 2 min. The mass detector was operated with an ion source temperature of 230 $^{\circ}\text{C}$ and a quadrupole temperature of 150 $^{\circ}\text{C}$. Ion acquisition was performed in scan mode (m/z 25 to 550 amu) in selective ion mode (SIM) using the NIST 2.0 library.

The experiment was performed in duplicate using two generations of the *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 strain, which were tested at different concentrations of the organochlorine substrate.

III. Results

3.1 Growth kinetics

In the analysis of the growth of *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 in TSB culture medium, a specific growth rate of 0.15 h^{-1} was obtained; the exponential phase was recorded during the first 12 hours of fermentation.

Figure 1 shows the correlation between cell dry weight and optical density (OD) during the first 12 hours of culture of *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 in two different media, TSB and MSM, with organochlorine substrate. This correlation between both techniques allows evaluation of bacterial growth as a function of the medium and the available carbon source.

For the analysis of *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 growth, the specific growth rate was determined. According to Student's t-test, a value of $t = 0.048$ was obtained, which was much smaller than the tabulated value for a significance level of $\alpha = 0.05$, indicating that there was no significant difference between the dry weight and optical density measurements.

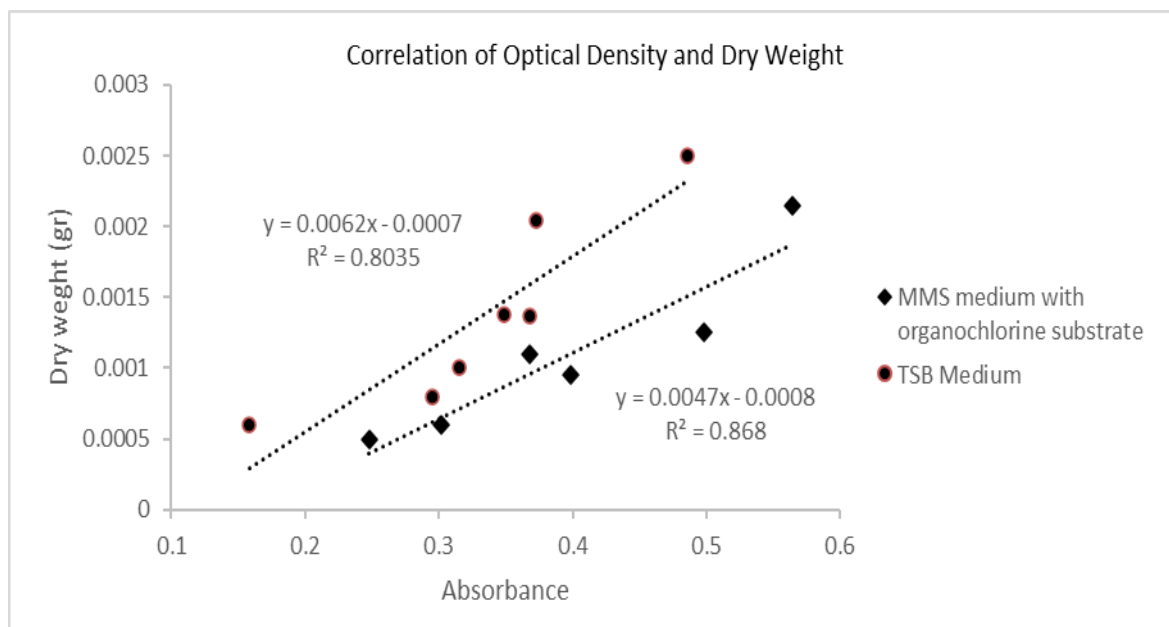


Figure 1. Linear correlation between dry weight and optical density (OD) for *Pseudomonas chlororaphis* cultured in TSB and MSM media with organochlorine substrate at 100 ppm.

3.2 Growth kinetics with and without organochlorine substrate

Figure 2 shows the complete growth kinetics of *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 in the presence and absence of organochlorine substrate. Similar growth was observed in both treatments, although with a slight decrease in biomass production when the organochlorine substrate was present. This suggests that *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 is capable of growing and using said substrate as a carbon source.

Significant cell growth was observed at a concentration of 100 ppm, similar to that reported by Mohanty *et al.* (2017). The authors pointed out that microorganisms of the genus *Pseudomonas* maintain growth, although it is affected when a toxic compound is used as the sole carbon source. Mohanty

reported a maximum biomass production of 0.079 mg/mL, while in this study a biomass of 25 mg/mL was obtained after 14 hours of fermentation in TSB medium (Saibu *et al.*, 2020). These results indicate that the presence of the organochlorine substrate affects cell viability after 30 hours of fermentation compared to experiments without the organochlorine substrate.

The difference in means analysis was performed using the Student t-test. The results showed an observed difference greater than the expected random variability, indicating a significant difference between growth kinetics with and without the presence of the organochlorine substrate. This confirms that the organochlorine substrate affects biomass production, although it does not alter the growth profile of *Pseudomonas chlororaphis* (Nelson, J., *et al.*, 2014).

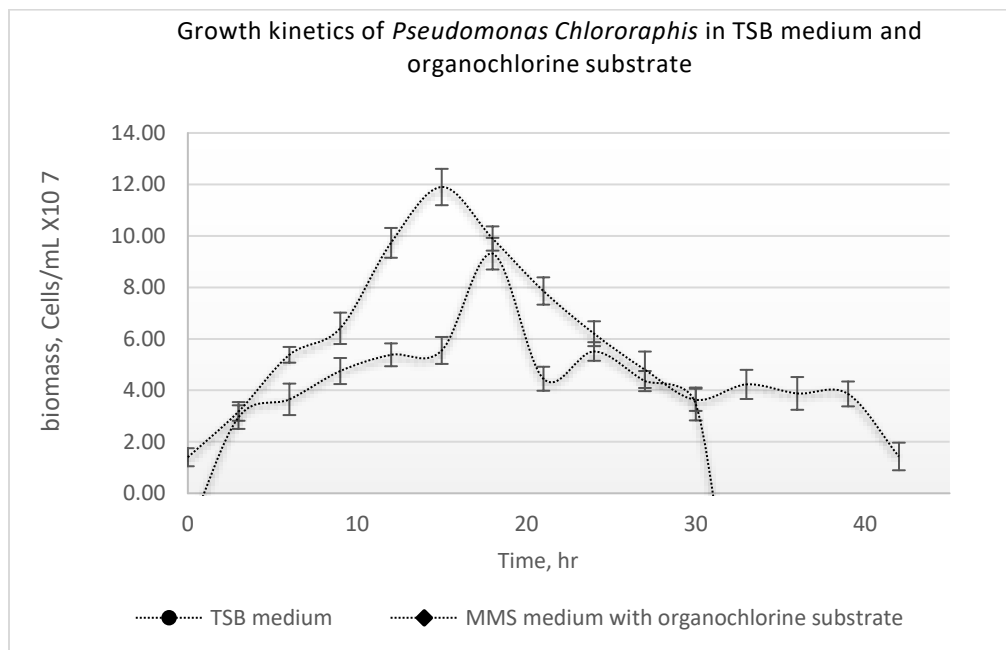


Figure 2. Growth kinetics of *Pseudomonas chlororaphis* with organochlorine substrate \blacklozenge at 100 ppm, and \bullet TSB medium.

These results are consistent with those reported by Aswathi (2019), who documented the use of *Pseudomonas* for the biodegradation of chlorpyrifos, observing

growth kinetics similar to those in this work, with a removal of 97%. However, it should be considered that chlorpyrifos has a similar degree of recalcitrance because it contains

chlorine atoms in its structure, like the organochlorine substrate evaluated in this research.

From the growth kinetics in the presence of the organochlorine substrate, a modified version of the logistic model (Zwietering *et al.*, 1990) was used to obtain kinetic growth parameters for *Pseudomonas chlororaphis* CA-1, yielding a growth rate of $\mu = 0.16176$ cells/mL·h and an $R^2 > 0.94$, which indicates that the model fits the experimental data. This is similar to what was observed by Aswathi *et al.* (2019), who reported *Pseudomonas* in the degradation of chlorpyrifos, an organophosphorus pesticide. In turn, Gilani *et al.* (2016) reported 92% removal of chlorpyrifos at concentrations of 50 ppm at

720 hours. On the other hand, Kong, J. *et al.* (2017) studied the degradation of phenanthrene by a strain of *Pseudomonas stutzeri* JP1, showing removal results of 33.23% in the first 24 hours at a concentration of 20 mg/L.

Figure 3 shows the early stages of biomass production in MSM at two different concentrations of the organochlorine substrate. In both growth curves, the adaptation and initial exponential phases are observed. Biomass production was affected by the concentration of the organochlorine substrate in the medium, resulting in a higher biomass yield of 3.49×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$ at 100 ppm compared to 1.48×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$ at 1000 ppm.

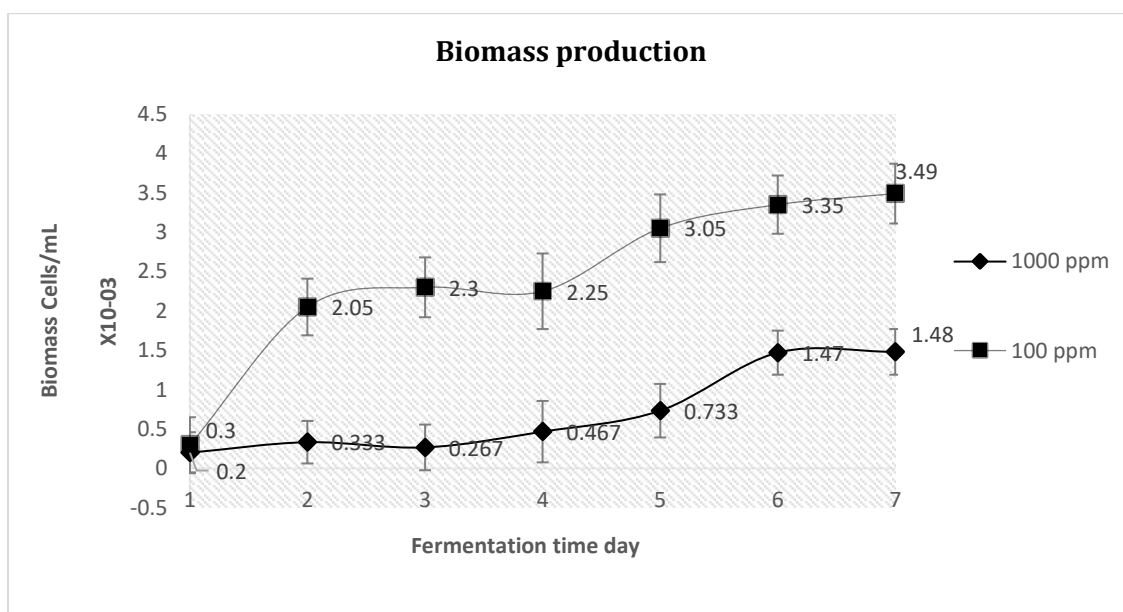


Figure 3. Growth of *P. chlororaphis* CA-1 in MSM, ■ 100 ppm organochlorine and ◆ 1000 ppm organochlorine.

Similar growth was observed in both treatments, although with a slight decrease in biomass production at 1000 ppm of organochlorine substrate. This suggests that *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 is capable of growing and using this substrate as a carbon source, but at 1000 ppm, it inhibits biomass production by up to 50%.

3.3. Degradation of the organochlorine substrate

The percentage removal of the organochlorine substrate was determined. The data are presented in Table 2, where the percentage decrease for each compound present in the organochlorine substrate and the total area corresponding to the original substrate can be observed (Figure 4).

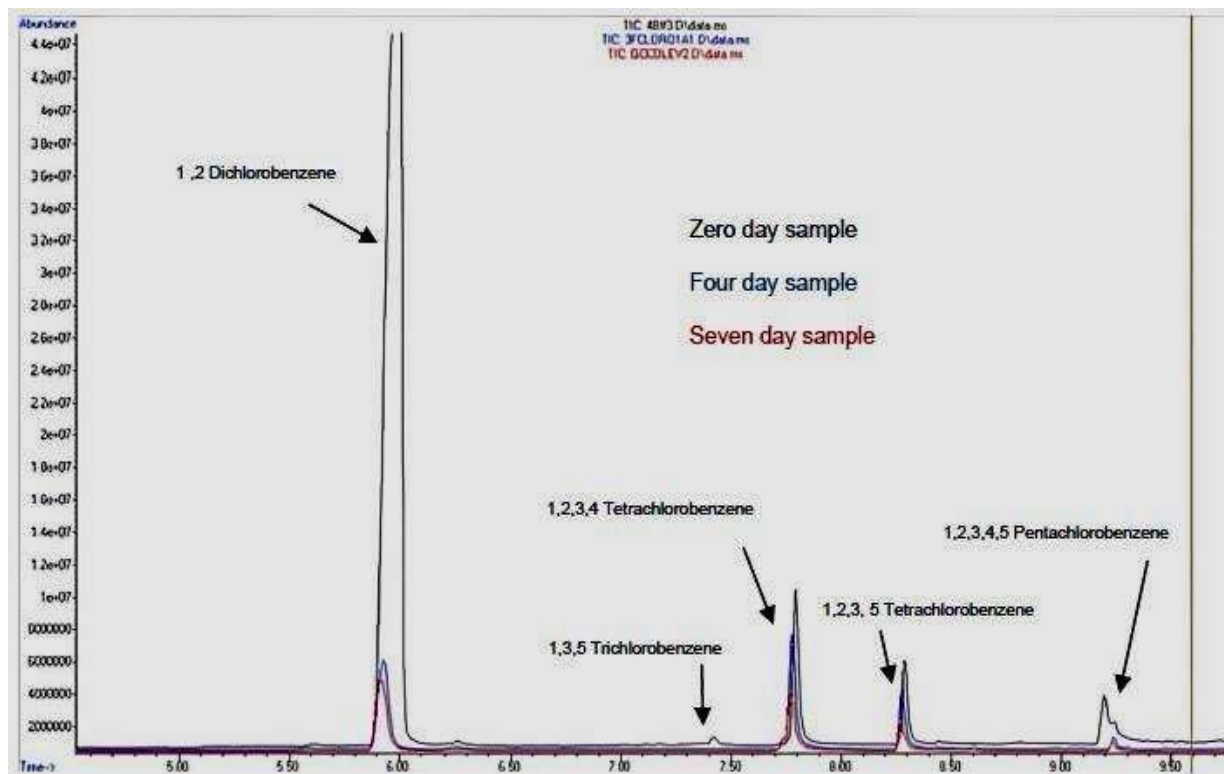


Figure 4. Overlay chromatograms at different incubation times showing the area reduction in peaks representative of the organochlorine substrate.

The data presented in Table 2 indicate the percentage of degradation by *P. chlororaphis*, as well as the ppm corresponding to the degradation. This percentage removal of the organochlorine substrate can be explained by its low solubility, which limits its bioavailability for cells (Otiniano-García, *et al.*, 2013).

The data show greater removal of 1,2-dichlorobenzene (91%), while removal of tetrachlorobenzene is 33%. These data coincide with those reported by Sander *et al.* (1991), who demonstrated that a strain of *Pseudomonas* is capable of dechlorinating chlorobenzene molecules, including 1,2,3-trichlorobenzene and 1,2,3,4-tetrachlorobenzene, to obtain monochlorobenzene. Their work indicates that molecules with a higher number of chlorine atoms are less susceptible to losing chlorine atoms anchored in the aromatic ring, demonstrating that the higher the number of chlorine atoms, the

lower the ability of the *Pseudomonas* strain to degrade them.

Potrawfke *et al.* (1998) studied the degradation of haloaromatics by *Pseudomonas chlororaphis* RW71 and demonstrated that the greater the number of chlorine atoms (e.g., penta- and hexachlorobenzene), the more resistant the compounds are to bacterial attack, showing greater degradation of molecules such as 1,3-dichlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene, and 1,2,4-trichlorobenzene.

These studies demonstrate that *Pseudomonas* CA-1 has a greater affinity for degrading molecules with fewer chlorine atoms. This effect is observed in the greater removal of 1,2-dichlorobenzene (91%) compared to other organochlorine compounds, which range from 66% to 33%.

The data in Table 3 show that the percentage of degradation of each peak of the initial organochlorine substrate was quantified. It can be observed that *Pseudomonas* more easily degrades compounds with fewer chlorine atoms. Table 3 summarizes

degradation of the organochlorine substrate at an initial concentration of 1000 ppm by *P. chlororaphis*. When comparing these results with those obtained at 100 ppm, a higher percentage of removal is observed, despite the low biomass production.

Table 2. Degradation percent of organochlorine substrate at 100 ppm.

Initial concentration 100 ppm	7 days fermentation		Degradation percentage
	Compound	Initial percent	
Dichlorobenzene	83.76	37.28	91.66
Trichlorobenzene	5.44	1.73	66.11
Tetrachlorobenzene	10.46	46.66	33.68
Total			83.60

There are no previous reports indicating the use of an organochlorine mixture similar to the one used in this study as the sole carbon

source. Furthermore, bacterial tolerance at the concentrations applied in this study has not been documented (Molano *et al.*, 2016).

Table 3. Degradation percent of organochlorine substrate at 1000 ppm.

Initial concentration 1000 ppm	7 days fermentation		Degradation percentage
	Compound	Initial percent	
Dichlorobenzene	83.76	50.36	93.72
Trichlorobenzene	5.44	1.53	63.86
Tetrachlorobenzene	10.46	42.86	57.23
Total			89.55

The data obtained were compared with a previous study in which endosulfan was used as the sole substrate at a concentration of 4 ppm, achieving 99% removal. However, that study showed an inhibitory effect attributed to the presence of the organochlorine compound. Contreras *et al.* (2020) reported that concentrations of 800 ppm cause total inhibition of bacterial growth. In contrast, the results of the present study demonstrate that *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 exhibits greater tolerance to the presence of organochlorine compounds, even achieving removal at higher concentrations.

Vanitha *et al.* (2023) investigated the decomposition of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, a chlorinated herbicide, at maximum concentrations of 100 ppm during 12 days of incubation, achieving a maximum biodegradation of 90%. They used a microbial consortium that included *Arthrobacter sp.*, *Sphingomonas sp.*, and *Stenotrophomonas sp.*

Simultaneously, they used a microbial consortium containing strains of *Bacillus sp.* and *Pseudomonas sp.*, achieving nearly 100%

removal in an incubation time of 4 days, with an inoculum volume of 10%.

A similar study was carried out by Samiappan and Ravichandran (2023), who worked on the elimination of organochlorine compounds related to chlorpyrifos using two strains, *P. aeruginosa* and *P. fluorescens*. These strains were the only ones capable of tolerating the toxic compound, despite increasing the concentration of the organochlorine compound fivefold. The removal percentages ranged from 14 to 25% at high concentrations and approached 100% at low concentrations of chlorpyrifos during a five-day incubation period.

This phenomenon has also been observed in previous studies. Maymó-Gatell, *et al.* (1999) used a microbial consortium where slow biomass growth but high enzymatic activity was observed, using the chlorinated compound as an electron acceptor, providing little energy available for cell growth.

Similarly, Nzila, A. (2013) demonstrated that *Pseudomonas* performs cometabolism due to the high presence of a cosubstrate, showing effective degradation without an increase in biomass induced by the contaminant present. This phenomenon is considered to be occurring in our experiments with the increase in organochlorine substrate concentration. *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 uses the organochlorine substrate as a cosubstrate to induce enzymes to transform it. Cometabolism allows the chlorinated substrate to be degraded without it contributing to significant biomass growth.

These studies support the idea that *Pseudomonas sp.* strains have a superior ability to biodegrade chlorinated compounds. This assertion is reinforced by studies conducted by Muhammad *et al.* (2025), who studied the biodegradation of butachlor in soil using a strain of *Pseudomonas aeruginosa*,

demonstrating a 90% removal at concentrations of 100 ppm after 5 days of fermentation. This indicates that strains of the genus *Pseudomonas sp.* are more tolerant to high concentrations of chlorinated compounds and can use them as an energy source, achieving higher removal rates in a shorter period of time compared to strains of other genera.

Rodríguez-Orozco *et al.* (2025) studied strains of *Bacillus cereus* and *Paenibacillus lautus* for the removal of organochlorine and organophosphorus compounds, showing removal percentages approximately from 50 to 80% during 12 days of incubation at maximum concentrations of 80 ppm.

These studies show that the *Pseudomonas chlororaphis* CA-1 strain has a higher tolerance to the presence of organochlorine compounds at high concentrations and achieves higher biodegradation percentages, as reported in these studies.

IV. Conclusions

The *P. chlororaphis* CA-1 strain tolerates high concentrations of organochlorine compounds and uses them as a carbon and energy source to produce biomass. The results showed higher biomass production, reaching 3.49×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$ at a concentration of 100 ppm, while at 1000 ppm biomass production of 1.48×10^{-3} $\mu\text{g/mL}$ was obtained.

This difference is due to the recalcitrant nature of organochlorine compounds at high concentrations in the medium. However, the *P. chlororaphis* strain also tolerates high concentrations of haloaromatic compounds, achieving removal of 83.6% at 100 ppm and 89.5% at 1000 ppm. This phenomenon has previously been reported as cometabolism, where the chlorinated substrate is eliminated by high enzymatic activity despite low biomass production, since the microorganism

does not use it as a source of carbon and energy.

Future research will focus on this particular topic, seeking to understand the process of cometabolism activation in *Pseudomonas CA-1* and modulate enzymatic activity in this type of degradation.

V. References

1. Sierra-Cortés, J. C., Vega y León, S., Gutiérrez-Tolentino, R., Ortis-Salinas, R., Pérez-González, J. J., and Escobar-Medina, A. C. (2019). Plaguicidas organoclorados en agua de la laguna negra de puerto marqués, acapulco, guerrero, México. *Rev. Int. Contam. Ambiente*, 35(2), 397-406. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.11>
2. Pimviriyakul, P., Wongnate, T., Tinikul, R., and Chaiyen, P. (2020). Microbial degradation of halogenated aromatics: molecular mechanisms and enzymatic reactions. *Microbial Biotechnology*, 13(1), 67-86. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.1318>.
3. Kopytko, M., Correa-Torres, S. N., and Estévez-Gómez, M. J. (2017). Biodegradación estimulada de los suelos contaminados con pesticidas organoclorados. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8 (1), 119-130. <https://doi.org/10.22490/21456453.1843>.
4. Saibu, S., Adebusoye, S. A., Oyetibo, G. O., and Rodrigues, D. F. (2020). Aerobic degradation of dichlorinated dibenzo-p-dioxin and dichlorinated dibenzofuran by bacteria strains obtained from tropical contaminated soil. *Biodegradation*, 31(1), 123-137. <https://doi.org/10.1007/s10532-020-09898-8>.
5. Otiniano-García, N. M. (2013). Efecto de la fuente nitrogenada sobre la capacidad de degradación del petróleo diesel 2 por *Pseudomonas sp.* octubre 10-11: Cuenca Ecuador. 867-881 Universidad Politécnica Salesiana, Memorias del II Congreso Binacional de investigación, Ciencia y tecnología de las Universidades. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11201>.
6. Sander, P., Wittich, R. M., Fortnagel, P., Wilkes, H., and Francke, W. (1991). Degradation of 1, 2, 4-trichloro- and 1, 2, 4, 5-tetrachlorobenzene by *Pseudomonas* strains. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(5), 1430-1440. <https://doi.org/10.1128/aem.57.5.1430-1440.1991>.
7. Potrawfke, T., Timmis, K. N., & Wittich, R. M. (1998). Degradation of 1, 2, 3, 4-tetrachlorobenzene by *Pseudomonas chlororaphis* RW71. *Applied and environmental microbiology*, 64(10), 3798-3806. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.10.3798-3806.1998>.
8. Contreras, F. P. V., Alvarado, K. D. C. C., Rosalba, E., Escalante, M., Valencia, L. H. Á., Tenorio, L. M. D., and Palacios, D. S. (2020) Evaluación de la eliminación del endosulfán en un sistema híbrido y su efecto sobre el consorcio microbiano presente. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 11 (28), 252-256. (rlac.buap.mx).

9. Molano Niño, J. E., and Flórez Pachón, M. D. P. (2016). Prueba piloto para la determinación de la tolerabilidad del carbofurano usando *pseudomonas sp* proveniente del suelo.
https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1
10. Kahlon, R. S. (Ed.). (2016). *Pseudomonas: molecular and applied biology*. Editorial Berlin, Germany:Springer. DOI 10.1007/978-3-319-31198-2.
11. Cui, G., Chien, M. F., Suto, K., and Inoue, C. (2017). Analysis of stable 1, 2-dichlorobenzene-degrading enrichments and two newly isolated degrading strains, *Acidovorax sp.* sk40 and *Ralstonia sp.* sk41. *Applied microbiology and biotechnology*, 101(17), 6821-6828.
<https://doi.org/10.1007/s00253-017-8406-2>.
12. Luján, D. (2019). Uso de *Pseudomonas aeruginosa* en biorremediación. *Bio Tecnología*, 23(1), 32-42.
<https://www.researchgate.net/publication/335871095>.
13. Huang, L., Wang, W., Shah, S. B., Hu, H., Xu, P., and Tang, H. (2019). The HBCDs biodegradation using a *Pseudomonas* strain and its application in soil phytoremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 380, 120833.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.12083>.
14. Lu, Y., Ramiro-Garcia, J., Vandermeeren, P., Herrmann, S., Cichocka, D., Springael, D., and Smidt, H. (2017). Dechlorination of three tetrachlorobenzene isomers by contaminated harbor sludge-derived enrichment cultures follows thermodynamically favorable reactions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(6), 2589-2601.
<https://doi.org/10.1007/s00253-016-8004-8>.
15. Gilani, R. A., Rafique, M., Rehman, A., Munis, M. F. H., Rehman, S. U., and Chaudhary, H. J. (2016). Biodegradation of chlorpyrifos by bacterial genus *Pseudomonas*. *Journal of basic microbiology*, 56(2), 105-119.
<https://doi.org/10.1002/jobm.201500336>.
16. Moreno, W. X. I., Logroño, J. P. A., & Zambrano, P. V. M. (2020). Degradación de pesticidas organoclorados mediante la aplicación de nanopartículas de TiO₂ y sus posibles aplicaciones. *dominio de las ciencias*, 6(2), 803-834.
<https://Doi.org/10.23857/dc.v6i2.1195>.
17. Zwietering, M. H., Rombouts, F. M. and Van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Appl. Environ. Microbiol.* 56 (6), 1875-1881. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990>.
18. Gómez-Reyes, R., Medina-Moreno, S. A., Jiménez-González, A., and Lizardi-Jiménez, M. A. (2017). Aislamiento y análisis cualitativo de biomasa microbiana fúngica degradadora de hidrocarburos de un cenote de Quintana Roo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 33,53-61.

- <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.05>
19. Mohanty, S. S., and Jena, H. M. (2017). Biodegradation of phenol by free and immobilized cells of a novel *Pseudomonas* sp. NBM11. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(1), 75-84. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150388>.
 20. Nelson, J. L., Jiang, J., and Zinder, S. H. (2014). Dehalogenation of chlorobenzenes, dichlorotoluenes, and tetrachloroethene by three *Dehalobacter* spp. *Environmental science & technology*, 48(7), 3776-3782. <https://doi.org/10.1021/es4044769>.
 21. Aswathi, A., Pandey, A., and Sukumaran, R. K. (2019). Rapid degradation of the organophosphate pesticide—Chlorpyrifos by a novel strain of *Pseudomonas nitroreducens* AR-3. *Bioresource technology*, 292, 122025. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122025.
 22. Kong, J., Wang, H., Liang, L., Li, L., Xiong, G., and Hu, Z. (2017). Phenanthrene degradation by the bacterium *Pseudomonas stutzeri* JP1 under low oxygen condition. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 123, 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.06.001>.
 23. Vanitha, T. K., Suresh, G., Bhandi, M. M., Mudiam, M. K. R., and Mohan, S. V. (2023). Microbial degradation of organochlorine pesticide: 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid by axenic and mixed consortium. *Bioresource technology*, 382, 129031. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129031>.
 24. Samiappan, S.C., Ravichandran, M. (2023). Characterization of Chlorpyrifos Degrading *Pseudomonas* sp. Isolated from Contaminated Soil. In *Sustainable and Cleaner Technologies for Environmental Remediation: Anuesin Nano and Biotechnology*. 35-47, Cham Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29597-3_4.
 25. Maymó-Gatell, X., Chien, Y. T., Gossett, J. M., and Zinder, S. H. (1999). Reductive dechlorination of tetrachloroethene to ethene by a microbial consortium. *Environmental Science & Technology*, 33(3), 479–484. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10329282/>
 26. Nzila, A. (2013). Update on the cometabolism of organic pollutants by bacteria. *Environmental pollution*, 178, 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.042>.
 27. Muhammad, B., Bukar, A., and Umar, S. (2025). Biodegradation of Butachlor by *Pseudomonas aeruginosa* Strain B2 Isolated From Agricultural Soil. *Journal of Environmental Microbiology and Toxicology*. 13 (1), 18-22. <https://doi.org/10.54987/jemat.v13i1.1106>.
 28. Rodríguez-Orozco, V. A., Duarte-Restrepo, E., and Jaramillo-Colorado, B. E. (2025). Isolation of Bacteria from Agricultural Soils and

Evaluation of Their Degradative
Capacity for Organochlorine and
Organophosphorus Pesticides.

Agronomy, 15(4).
<https://doi.org/10.3390/agronomy15040814>.



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Desarrollo de una aplicación móvil para el aprendizaje de las lenguas indígenas: Mazahua y Hñähñu Development of a Mobile Application for Indigenous Language Learning: Mazahua and Hñähñu

Castillo-Alarcon, I.¹, Sampedro-Mendoza, A.², Cásares-García, L.³, López-Morales, V.¹, Franco-Árcega, A.¹, Cruz-Olgún, J.M.¹, Ojeda-Misses, M.A.^{1*}

¹ Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca-Hidalgo, CP 42184, México (<https://orcid.org/0009-0009-0089-1732>, <https://orcid.org/0000-0003-2043-8766>, <https://orcid.org/0000-0002-9415-8313>, <https://orcid.org/0009-0008-1328-7780>, <https://orcid.org/0000-0003-3963-5399>).

² Área de Comunicación, Unidad Académica Profesional Huehuetoca, Universidad Autónoma del Estado de México, La Cañada, 54680 Huehuetoca, Estado de México, México (<https://orcid.org/0000-0001-8630-7190>).

³ Facultad de Derecho, Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Derecho, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas s/n. Col. La Haciendita C.U. Sur. CP. 39087 Chilpancingo, Gro. (<https://orcid.org/0000-0003-1661-4878>).
ca464844@uaeh.edu.mx; asampedrom@uaemex.mx; 18805@uagro.mx; virgilio@uaeh.edu.mx;
afranco@uaeh.edu.mx; cr233109@uaeh.edu.mx; manuel_ojeda@uaeh.edu.mx*

Área de aplicación industrial: inteligencia artificial, educación, comunicación, cómputo y traducción.
Innovación tecnológica: aprendizaje automático, procesamiento de lenguaje natural, cómputo inteligente.

Recibido: 25 agosto 2025

Aceptado: 09 enero 2026

Abstract

This paper presents the development of a mobile application that provides university students with access to learning resources for the indigenous languages Mazahua and Hñähñu. The mobile application is designed as an accessible digital tool that integrates a translator based on Transformer models for body-part vocabulary and a card-based game that combines a memory game and a puzzle, incorporating augmented reality featuring animals. The application was developed in collaboration with computer science and linguistic-cultural experts to ensure accuracy and relevance in the indigenous languages. The application aims to encourage vocabulary learning related to body parts and animals, while supporting writing and pronunciation through interactive games. Finally, the application was evaluated with university students, which demonstrated their motivation to participate and the application's success in promoting the learning of indigenous languages through the use of accessible technology, especially in geographic areas where these languages are declining.

Keywords: Mobile application, learning, augmented reality, Mazahua, Hñähñu.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de una aplicación móvil que permite el acceso al aprendizaje de las lenguas indígenas mazahua y hñähñu para estudiantes universitarios. La aplicación móvil es diseñada como una herramienta digital accesible que integra un traductor basado en modelos transformer para partes del cuerpo y un juego basado en tarjetas que integran un memorama y un rompecabezas simultáneamente, agregando realidad aumentada con animales. El diseño se realizó en colaboración con expertos en computación y lingüísticos-culturales que permiten asegurar precisión y relevancia en las lenguas indígenas. La aplicación busca incentivar el aprendizaje de vocabulario basado en partes del cuerpo y animales como una guía para la escritura y la pronunciación mediante juegos interactivos. Finalmente, la aplicación es evaluada con estudiantes de nivel superior, mostrando motivaciones en la participación y el objetivo de promover el aprendizaje de lenguas indígenas mediante el uso de una tecnología accesible, especialmente en zonas geográficas donde las lenguas están en decadencia.

Palabras clave: Aplicación móvil, Aprendizaje, Realidad aumentada, Mazahua, Hñähñu.

I. Introducción

La preservación de las lenguas indígenas fortalece la identidad y el sentido de pertenencia comunitaria. El uso frecuente de la lengua materna se asocia con un mayor bienestar y emociones positivas, incluso en donde la lengua está amenazada por la asimilación y la pérdida lingüística (Olko et al., 2022). Las lenguas indígenas también posicionan a las personas frente a la comunidad, transmiten valores y cosmovisiones propias. En este sentido, el uso de la lengua se convierte en una manifestación del derecho a la autodeterminación de los pueblos indígenas.

México alberga 68 agrupaciones lingüísticas, cada una con sus variantes particulares. En la actualidad, resulta fundamental fomentar su uso, desarrollo, preservación y difusión, reconociéndolas como un componente esencial de la diversidad cultural nacional, tal como lo expresa el artículo 2º de la Constitución mexicana. Una de las estrategias para promover estas lenguas es mediante el desarrollo de una aplicación móvil para el aprendizaje de las lenguas indígenas: mazahua y hñähñu.

En México 39.2 millones de personas se reconocen como indígenas, sin embargo, únicamente 7.4 millones de habitantes de tres años o más hablan alguna lengua originaria. En este sentido, 7.0 millones de personas cumplían con ambas características (INEGI, 2025), aunque quienes se identifican el número es relativamente alto, los hablantes son cada vez menos. Las lenguas más utilizadas, son: el náhuatl hablado por 1,651,958 personas, le sigue la lengua maya con 774,755, el tseltal con 589,144, el tsotsil con 550,274, mixteco con 550,274, zapoteco con 490,845 y el otomí con 298,851. En contraste, entre las lenguas con menor número de hablantes se encuentran el awakateko, kickapoo, ayapaneco, kiliwa, oluteco, teko, ixil, qato'k, kaqchikel y el cucapá (INEGI, 2022).

Las lenguas indígenas han ido desapareciendo gradualmente en la región. La desaparición de las lenguas es un fenómeno que avanza día con día, ocasionando la pérdida de un número considerable de ellas. En México, este fenómeno impacta directamente a los pueblos originarios, pues

vulnera la identidad de sus culturas y pone en riesgo la preservación de sus lenguas.

La desaparición de las lenguas indígenas se presenta debido a factores como el reducido número de hablantes, la dispersión geográfica, el predominio de adultos entre quienes la dominan y la tendencia de la transmisión a las nuevas generaciones prevalecen. Esto se acelera dado por situaciones como la exclusión de las lenguas originarias de los espacios públicos e institucionales (Gutiérrez Arriaga & Alvarado Rodríguez, 2024), así como la escasa presencia en los medios de comunicación y poca empatía social.

La disminución de lenguas indígenas manifiesta una alarmante directriz a la desaparición de dichas lenguas, especialmente porque las comunidades se han visto afectada por diversos factores como la urbanización, la discriminación y la presión para adoptar otras lenguas, como el español como lengua predominante. Lo anterior refuerza la falta de interés en aprender y preservar estas lenguas, lo que afecta a las nuevas generaciones de niños, jóvenes y adultos, lo que conduce a la pérdida de la lengua y cultural (Gobierno de México, 2022).

Asimismo, las aplicaciones móviles para la documentación lingüística se están convirtiendo en recursos que ahora también se pueden compartir interlingüísticamente. Las aplicaciones móviles y las comunidades de aprendizaje en redes están empezando a influir en el aprendizaje de las lenguas de forma mucho más amplia, trascendiendo los canales tradicionales de educación lingüística utilizados por quienes trabajan para preservar las lenguas (Annet, 2024). De ahí la relevancia del desarrollo e implementación de la aplicación móvil para el aprendizaje de ambas lenguas. Se seleccionó la lengua hñähñu debido a la disminución de hablantes

en la zona del Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, y la lengua mazahua con el propósito de fortalecer su uso en la zona norte del Valle del Estado de México. El objetivo es incrementar el número de hablantes; para ello, la aplicación contribuirá al fortalecimiento y preservación de las mismas.

En la actualidad, dentro de las disciplinas de la computación y la lingüística, el procesamiento del lenguaje natural (PLN) se ha consolidado como una de las áreas más notables del aprendizaje automático. A través de él, las máquinas son capaces de leer, interpretar y descifrar lenguajes humanos, además de generar descripciones, resúmenes, traducciones e incluso respuestas coherentes en lenguaje natural (García-Méndez et al., 2024; Liu et al., 2019; Devlin et al., 2019). De esta manera, el PLN posibilita el desarrollo de soluciones de software que comprenden, analizan y responden de manera semejante a los humanos, tanto en formato de texto como de voz.

El lenguaje natural, también denominado lenguaje humano (Liu et al., 2019), constituye la principal fuente de información para que las máquinas puedan interpretar y comunicarse. Para ello, se requiere de un corpus (partes del cuerpo y animales), es decir, un conjunto estructurado de muestras lingüísticas que sirve como base de entrenamiento en trabajos del procesamiento del lenguaje natural (PLN). Así es como una máquina aprende a comunicarse. Sin embargo, los humanos nos expresamos de innumerables maneras; existen diversos idiomas, lenguas indígenas y dialectos, con reglas gramaticales particulares. En consecuencia, el principal desafío desde el punto de vista del PLN consiste en desarrollar una aplicación móvil capaz de identificar de manera automática el lenguaje a nivel sintáctico, fonético, morfológico y semántico de las lenguas indígenas presentadas.

El desarrollo de la aplicación móvil interactiva está basada en el PLN y la aplicación de la realidad aumentada (RA) con el fin de promover el aprendizaje de un corpus de palabras de las lenguas mazahua y hñähñu. El objetivo es promover el aprendizaje con el fin de contrarrestar la pérdida de hablantes de las lenguas mediante herramientas educativas innovadoras y accesibles que permitan preservar y promover las lenguas indígenas en las nuevas generaciones. Para lograr lo anterior, se recurre al uso de la tecnología como medio para motivar la enseñanza y el aprendizaje accesible a cualquier persona generando un impacto de aprendizaje significativo (Devlin et al., 2019).

El pueblo mazahua, originario de la región central de México, tiene sus raíces en las comunidades que habitaron el territorio ancestral de *Xinanta* durante la época prehispánica. Su historia se entrelaza con el imperio mexica y esplendor de Tenochtitlán, formaron parte de las campañas militares, contribuyeron a la construcción del templo mayor y formaron parte de ceremonias como la inauguración de la gran piedra de sacrificios *temalácatl*, símbolo del poder ritual, elaborada bajo el mandato de Moctezuma Ilhuicamina. Se dedicaban a la fabricación de su vestimenta, labores de campo y pastoreo (Salgado Naime et al., 2024).

De acuerdo con Celote Preciado (2025), los mazahuas denominados como *jñatjo*, vocablo que en náhuatl significa “gente de venado”, encuentra en este término de referencia fundamental a la identidad étnica, social y política. Su etimología proviene del verbo *ñä'a* (hablar), que al prefijarse la fricativa glotal sorda [h-] al verbo *ñä'a*, se convierte en el sustantivo *jñä'a*, cuyo significado es “palabra” o “lengua”, según el contexto de su uso. Cuando el sustantivo *jñä'a* es sufijado por el elemento *-tjo* su significado es “nada más” y da origen al concepto *jñatjo*, que

significa “los que hablan”. En todo momento los mazahuas del siglo XXI hacen referencia al concepto *jñatjo*, que es portador de significados relacionados con su historia, filosofía, cultura y cosmovisión, y que ha sido esencial para construir, trascender y reafirmar su existencia como pueblo indígena.

La lengua mazahua forma parte del subgrupo otopame, dentro de la familia otomangué. Se trata de una lengua tonal que, en el ámbito verbal, codifica tiempo, aspecto, modo y persona. La sílaba inicial de cada palabra es tónica, y en ella se distinguen tanto tonos de nivel como tonos de contorno, ascendente y descendente, además de un tono flotante que, siempre es alto. Asimismo, el mazahua se caracteriza por ser una lengua de marcación en el núcleo, donde se establecen e indexan las relaciones entre sujeto y objeto (Mora Bustos et al., 2023).

La lengua mazahua guarda parentesco con el otomí, pame, matlatzinca y chichimecajonaz. El pueblo mazahua, está reconocido entre los 68 pueblos originarios de México, denominación que alude a su existencia histórica y a su organización sociopolítica que mantenían antes de la colonización española. Su asentamiento se ubica lo que hoy corresponde a los estados de México y Michoacán, aunque es en el primero donde se concentra la mayor parte de su población en la actualidad (Payán Díaz & Flores Flores 2025).

El mazahua es una de las culturas indígenas más significativas en el país, principalmente por el número de hablantes que la componen. En el estado de México, su población se concentra en la región norte, caracterizada por su clima frío, bosques templados y la reserva de la biosfera de la mariposa monarca. No obstante, las condiciones de marginación social y económica han impulsado procesos migratorios hacia grandes ciudades como México, Toluca, Querétaro y también a

Estados Unidos cuando viajan al extranjero, casi siempre de forma ilegal (Alejandro García, & Guzmán Mendoza, 2016).

En México, hasta el año 2020 se registraron 152,912 personas de cinco años y más que hablan la lengua mazahua, la mayor concentración se encuentra en el estado de México, con 131,911 hablantes, seguido de la Ciudad de México con 7,862 y Michoacán con 4,479 (INEGI, 2020). El resto se distribuye en otras entidades federativas en proporciones menores, estos datos reflejan que la mayor presencia de hablantes de mazahua se localiza en la región centro del país.

El otomí es una lengua originaria de México que forma parte de la familia lingüística otomame que comprende la lengua mazahua, matlatzinca-tlahuica, pame, chichimeco. Esta familia junto con los grupos chinanteco, tlapaneco-mangueano, integra el tronco lingüístico oto-mangue (Instituto Nacional de Lenguas Indígenas, 2008). En particular, la lengua mazahua y el otomí mantienen una estrecha relación, al estar consideradas lenguas hermanas.

El otomí es una lengua tonal con tonos graves, agudos y ascendentes, con algunas diferencias entre variedades. Se considera una de las lenguas más antiguas y diversificadas de México, con un registro de aproximadamente 6,500 años de antigüedad y conformada por nueve variantes (De la Cruz-Sánchez & De la Cruz, 2024). La lengua hñähñu constituye un símbolo de cohesión étnica entre sus hablantes, quienes, pese a la notable diversidad lingüística existente, se reconocen como un solo pueblo con un origen común (Instituto Nacional de Lenguas Indígenas, 2010).

Existen nueve variantes lingüísticas para el otomí: 1. Otomí de la Sierra, 2. Otomí bajo del noroeste, 3. Otomí del oeste, 4. Otomí del

oeste del Valle del Mezquital, 5. Otomí del Valle del Mezquital, 6. Otomí de Ixtenco, 7. Otomí de Tilapa o del sur, 8. Otomí del noroeste y 9. Otomí del centro (Avelino Sierra, 2022). Para la presente, se retoma la variante otomí del Valle del Mezquital, conocida como la lengua hñähñu, hablada en el estado de Hidalgo.

El hñähñu se habla en el Valle del Mezquital, una de las principales regiones geoculturales del estado de Hidalgo, que ocupa el 33.7% de su territorio. En esta área se localiza el pueblo hñähñu, distribuido en varios municipios habitados, con una extensión aproximada de 165 kilómetros cuadrados (Cruz-Carrillo et al., 2024).

En México, hasta el año 2020 se registraron 296,658 personas de cinco años y más que hablan la lengua otomí, la mayor concentración se encuentra en el estado de Hidalgo, con 119,614 hablantes, seguido del estado de México con 106,141, Querétaro con 22,209, Veracruz con 17,100 y la Ciudad de México con 11,717 (INEGI, 2020). El resto se distribuye en otras entidades federativas en proporciones menores, estos datos reflejan que la mayor presencia de hablantes de otomí se localiza en el estado de Hidalgo y estado de México.

II. Antecedentes de aplicaciones móviles para el aprendizaje de lenguas indígenas

Actualmente se han desarrollado diversas aplicaciones móviles con fines de aprendizaje que tienen como objetivo la preservación de las lenguas indígenas. Las aplicaciones ofrecen herramientas basadas en el uso de tecnología mediante un aprendizaje intuitivo desde el uso hasta el contenido y la información. En muchos casos se busca motivar a los usuarios mediante el uso de recursos multimedia como figuras, textos, animaciones, audios, videos, sonidos, entre otros. De esta manera, se busca brindar una

experiencia más dinámica y fácil en la adquisición de las lenguas indígenas. Esta aplicación funciona como herramienta para el refuerzo, de apoyo y para la promoción de la lengua hñähñu para escuelas primarias en el municipio de Ixmiquilpan, en Hidalgo. Para su desarrollo se empleó la metodología ágil Mobile-D implementada con Android Studio, una base de datos en SQLite y Adobe Illustrator.

Por otro lado, en González y García (2021) se presenta una aplicación implementada para Android, cuyo propósito es facilitar el aprendizaje del p'urhépecha. El objetivo de la aplicación consiste en ofrecer traducciones en tiempo real e intuitivas entre español, inglés y p'urhépecha. Para su implementación se utilizó Android Studio como entorno de desarrollo (IDE) y el lenguaje Java. De manera similar, Muñoz (2018) desarrolló una aplicación móvil orientada a la enseñanza básica de la lengua náhuatl. Esta herramienta es diseñada para usuarios mayores de seis años, contiene un curso que incluye ejercicios y actividades enfocadas en aprender sobre el vocabulario, la gramática, la escritura y la lectura. En este desarrollo se empleó lenguaje Java, el IDE Android Studio y una base de datos en SQLite.

Finalmente, en Cunalata (2020) se presenta la implementación de una aplicación para el aprendizaje de la lengua Kichwa. Una de las lenguas indígenas en Ecuador. El trabajo tuvo propósito fomentar la enseñanza de dicha lengua mediante el uso de tecnologías móviles accesibles, de manera que cualquier usuario interesado en aprender la lengua pudiera tenerla accesible. Para la implementación se usó la metodología ágil, y se desarrolló un sistema complementario de gestión web que permitió fortalecer la aplicación en el ámbito educativo. La herramienta es compatible tanto con dispositivos Android como con iOS, lo que amplía el alcance y la usabilidad.

En varias de las aplicaciones revisadas se incorpora el PLN, el cual considera distintos niveles de análisis del lenguaje, tales como el gramatical, el semántico y el sintáctico. El estudio de estos lenguajes ayuda establecer una conexión entre la lingüística, los algoritmos computacionales y el PLN. Por ende, el objetivo del PLN es aproximar modelos capaces de comprender los aspectos fundamentales del lenguaje humano, automatizar tareas y extraer la información (Porta Zamorano & Sancho Sánchez, 2021). En Fuentes et al. (2022) se presenta una aplicación cuyo fin es promover el aprendizaje y preservar la lengua zapoteca (diidxazá) de la zona de San Blas Atempa en Oaxaca, México. La aplicación es para usuarios con conocimientos escasos mediante la práctica y la realización de actividades y tareas interactivas, dinámicas, lúdicas y gamificadas, sin la necesidad de internet. Los autores consideran un diseño e implementación intuitiva e interactiva, ofreciendo el aprendizaje de la lengua zapoteca con animaciones, videos, sonidos y audios.

Por otra parte, el PLN busca la extracción de relaciones (ER) centrada en identificar patrones en entidades nombradas (EN), así como términos clave, definiciones, abreviaturas y nombres propios. A través del reconocimiento automático es posible identificar vínculos semánticos entre dos o más elementos en un texto. En suma, en Pawar et al. (2017) se menciona que para diseñar un sistema de realidad aumentada basado en aprendizaje supervisado consideran como aspectos principales contextos semánticos, léxicos, morfológicos y sintácticos (*Part-Of-Speech*, POS). Además, en Nasar et al. (2021) se considera que la ER requiere un análisis sintáctico como parte del proceso para llevar a cabo la segmentación y la lematización de textos y palabras. De acuerdo con Nasar et al. (2021), la certidumbre de la ER depende del corpus

de palabras de entrenamiento y aprendizaje, vinculado con el conjunto de datos extraídos (Pawar et al., 2017; Nasar et al., 2021). Asimismo, esta tarea ha sido aplicada en diversas disciplinas como la química, las redes sociales, la medicina, la robótica, entre otros (Virmani et al., 2017; Kumar, 2017). Por otro lado, Geman y Johnson (2004) consideran que un modelo de ER debe ser construido con base en el conocimiento, que puede generarse a partir de la recopilación y anotación de textos realizada por expertos, o bien mediante procesos automáticos que asignan etiquetas al contenido textual. A partir de estas muestras anotadas, un modelo computacional es capaz de identificar patrones que permiten determinar si una frase establece o no una relación semántica Nasar et al. (2021).

Incluso en Nasar et al. (2021) se considera que existen limitaciones debido a que se tiene un corpus de palabras limitado, específicamente porque ciertas lenguas varían de región a región o simplemente no existen suficientes fuentes y reglas gramaticales. Sin embargo, el trabajo de Carrino et al. (2020) es destacado por la traducción automática (TA) como alternativa porque a pesar de las limitaciones de los corpus lingüísticos se logra obtener una traducción exitosa. Lo anterior, ha permitido el desarrollo de herramientas de traducción a pesar de las limitaciones facilitando la traducción de lenguas incluso con un corpus limitado. Aunque los conjuntos de datos mediante TA no es un enfoque novedoso, la aplicación demanda un proceso de experimentación cuidadoso y la implementación de estrategias adecuadas (Carrino et al., 2020). En este trabajo se empleó la TA como una estrategia para abordar los desafíos asociados a la ER en español.

Por lo tanto, esta aplicación se implementa como una herramienta con el objetivo de preservar las lenguas indígenas mediante la construcción de conjuntos de datos. Permitiendo el desarrollo de la aplicación móvil para estudiantes que buscan desarrollar sus habilidades lingüísticas mientras interactúan con la tecnología de forma lúdica e intuitiva. Esto contribuirá no solo a la difusión de la lengua, sino también al fortalecimiento de la identidad cultural de la zona del Valle del Mezquital, Hidalgo, donde se observa una preocupante disminución de hablantes de la lengua hñähñu. Por otro lado, a la zona Norte del Estado de México donde existen hablantes de la lengua mazahua. Sin embargo, el uso de la tecnología permitirá que además que, no sólo población de las zonas de Hidalgo y el Estado de México, sino cualquier persona puede tener acceso a la aplicación. A continuación, se presenta los materiales y métodos empleados para el desarrollo de esta aplicación.

III. Materiales y métodos

El diseño de la aplicación móvil se implementó considerando las fases dadas por la metodología de Diseño Centrado en el Usuario (DCU). Esta metodología busca que el funcionamiento como un método iterativo donde los usuarios participan activamente para garantizar que se cumplan los requerimientos funcionales y los no funcionales (ANENOR, 2000). La norma ISO 13407, establecida por la Organización Internacional de Normalización (OIN) brinda un conjunto de recomendaciones aplicables para llevar a cabo proceso de diseño. Dicho proceso está integrado por diversas tareas como se muestra en la Figura 1 (ANENOR, 2000).

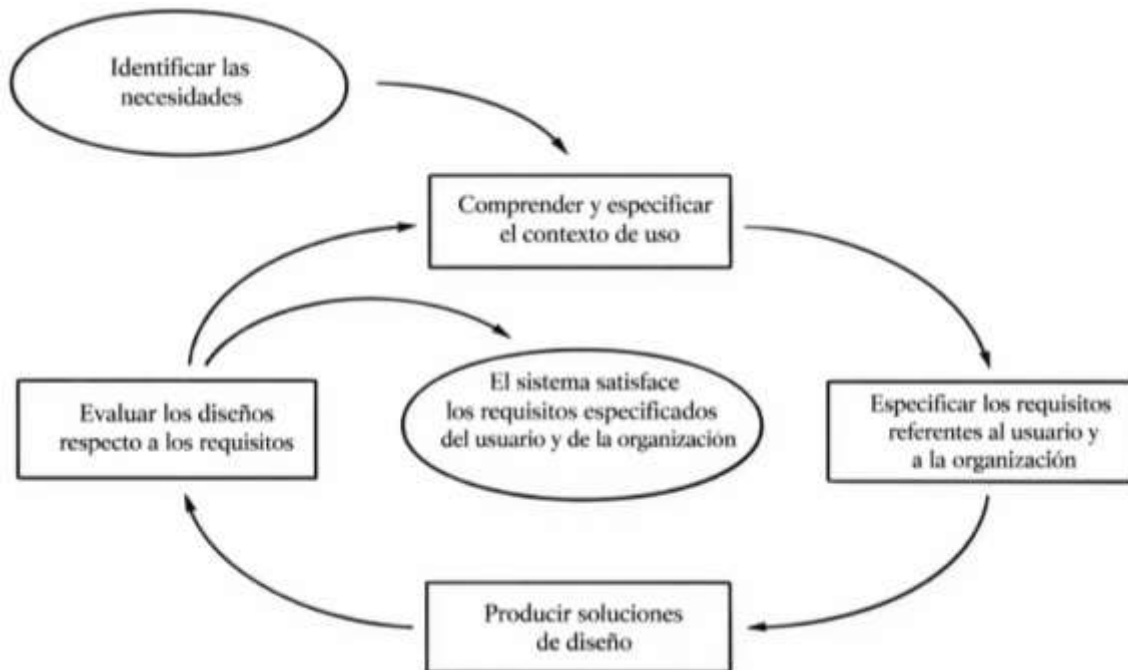


Figura 1. Actividades del DCU (ANENOR, 2000).

Ahora, se detallan las fases asociadas que integran las actividades del Diseño Centrado en el Usuario (DCU) (ANENOR, 2000). Primero, la Actividad 1: es dada para comprender y definir el contexto de uso. En esta etapa se identifican los usuarios finales del sistema, así como el uso previsto y las condiciones en las que se empleará la aplicación. En esencia, los diseñadores buscan adquirir un entendimiento profundo de cómo los usuarios interactuarán con el sistema.

En esta etapa se pueden identificar las necesidades de los usuarios y las metas que se buscan alcanzar mediante el uso de la aplicación móvil. Para esto, se aplicaron encuestas para conocer la opinión de las personas sobre el uso de una aplicación destinada a promover las lenguas mazahua y hñähñu. Con el fin de conocer si las personas han tenido experiencias previas con herramientas similares. Las encuestas recopilaron información sobre características demográficas, experiencia del usuario con sistemas interactivos, modelos mentales de

cómo funciona un sistema, gustos, colores, actitudes personales, habilidades e incluso el tiempo que emplean en el uso de un teléfono inteligente.

Las encuestas fueron realizadas de forma presencial en los municipios de San Felipe del Progreso, Atlacomulco, Pachuca, Mineral de la Reforma y en la zona del Valle del Mezquital, mientras que algunas se aplicaron electrónicamente a través de Google Forms, una herramienta gratuita para crear y gestionar cuestionarios. Se empleó una muestra no probabilística (Martínez, 2012), seleccionando un total de 83 usuarios, de entre 17 y 28 años, con características similares en términos de edad, género, conocimiento básico de la lengua indígena o con gusto por aprenderlas, y manejo de dispositivos móviles.

Actividad 2: en esta etapa se lleva a cabo la especificación de las necesidades del usuario. Esta etapa consiste en identificar los objetivos, tanto de los usuarios, como de los proveedores del sistema que deben ser

satisfechos. Se definen y detallan los requisitos del usuario, los cuales representan las características funcionales del sistema, con el fin de determinar qué actividades serán compatibles con la tecnología y cuáles no.

A partir de los resultados obtenidos en las encuestas de la etapa anterior, se elaboró un perfil de usuario que permitió interpretar de manera precisa los datos recopilados. Este perfil facilitó la identificación de los usuarios potenciales de la aplicación móvil, el rango de edad con mayor interés en promover y fortalecer la lengua indígena zapoteca, y su disposición a utilizar la aplicación como herramienta de práctica. Además, se integraron las especificaciones de la norma ISO 13407 con las recomendaciones del Modelo de Diseño de Interacción Persona-Computadora (MODIHC) (Castro et al., 2017; Narciso et al., 2001).

Actividad 3: en esta etapa se generan las soluciones de diseño. Esta etapa fue dividida en varias fases secuenciales, que van desde los prototipos iniciales hasta la propuesta del diseño final. Su propósito es desarrollar soluciones concretas que satisfagan las necesidades del usuario, a partir de los requisitos recopilados en las Actividades 1 y 2. Con base en la información obtenida, se validó la aplicación en desarrollo y se elaboró un prototipo de la aplicación móvil, abordando aspectos relacionados con los datos, la interfaz, la usabilidad y la alineación del diseño con los modelos de usuario del sistema.

Para explorar y probar la aplicación, los usuarios interactuaron directamente con la interfaz usando los botones y funciones implementadas. El desarrollo del prototipo utilizando el framework Flutter (Flutter, 2020) y el IDE Visual Studio Code (Flutter, 2020). Además, se consultó el vocabulario bilingüe mazahua-español publicado por la

Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas por (Benítez, 2017) y el diccionario de hñähñu (otomí), (Hernández Cruz *et al.*, 2010) para traducir correctamente las palabras empleadas en el desarrollo de la aplicación móvil.

Actividad 4: en esta etapa se evalúan los diseños en función de las necesidades. En esta etapa las soluciones de diseño son puestas a prueba de los usuarios con el objetivo de identificar problemas a futuro sobre la usabilidad que requieran atención y mejoras a futuro (Cruz, 2015). El objetivo es evaluar la adecuación del diseño considerando los requisitos específicos del usuario determinando si se satisfacen las necesidades de los usuarios.

En la etapa final se llevó a cabo la prueba con los usuarios cuyo fin es evaluar la usabilidad de la aplicación mediante preguntas basadas en la Escala de Usabilidad del Sistema (SUS), Brooke (1995). La SUS utiliza una escala Likert con cinco niveles para medir el grado de acuerdo de los usuarios con diez afirmaciones, donde 1 pertenece a “totalmente en desacuerdo” y 5 a “totalmente de acuerdo”. Este procedimiento permite detectar errores de diseño e implementación y verificar que los requisitos hayan sido correctamente interpretados en la aplicación.

Las Actividades 1 y 2 se enfocan en percibir y detallar el contexto de uso, así como identificar las necesidades del usuario. Los resultados son obtenidos a partir de las encuestas aplicadas al grupo seleccionado y permiten determinar los requerimientos funcionales y el perfil de los usuarios de la aplicación móvil (ver Tabla 1). Esta etapa es lograda mediante la integración de los detalles de la norma ISO 13407 y las recomendaciones derivadas de las características del usuario (Perfil del Usuario).

Tabla 1. Requisitos y complementos de la aplicación móvil.

Requisitos	Complementos
Perfil demográfico Edad: 16-60 años Género: indistinto	
Perfil de conocimientos y experiencia Conocimientos previos: ninguno (solo motivación para aprender) Experiencia con la lengua: Ninguna	Experiencia con aplicaciones similares: Ninguna
Lenguas objetivo: <ul style="list-style-type: none"> • Mazahua • Hñähñu 	
Objetivos de la aplicación: Evaluar, valorar y promover la adquisición de conocimientos sobre las lenguas indígenas mazahua y hñähñu.	
Hardware / plataforma Teléfono celular con sistema operativo Android o iOS	
Modelo mental / contexto de uso Actualmente no existen materiales didácticos específicos para la difusión de estas lenguas. Las aplicaciones disponibles se enfocan en otras variantes y presentan limitaciones en atractivo visual, diseño y uso de colores.	Preferencias de diseño: gama de colores cálidos.

Fuente: elaboración propia.

Los requisitos funcionales se basan en cada módulo de la aplicación, considerando imágenes, palabras y animaciones relacionadas con las siguientes secciones: traductor, partes del cuerpo y juegos de animales con realidad aumentada. El objetivo es presentar palabras básicas y sus correspondientes traducciones en cada

módulo. Es importante mencionar considerar que sólo hay un actor, el usuario, para quien es hecha la aplicación. La aplicación debe permitir la identificación de voces, la inserción de letras, la reproducción de audios, la emisión de imágenes, el uso de la cámara y la generación de animaciones basadas en Realidad Aumentada (RA) (ver Figura 2).

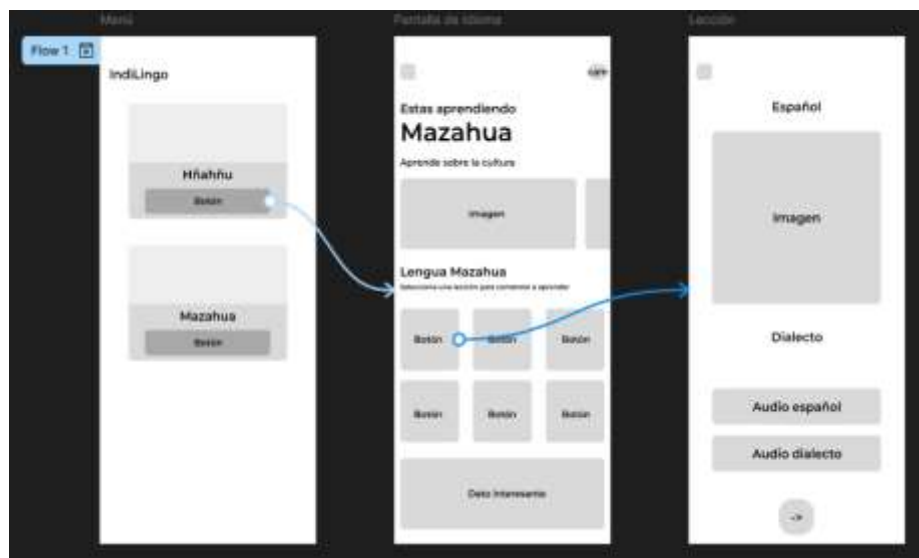


Figura 2. Módulos de aplicación móvil.

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, es importante considerar los requisitos no funcionales. Primero, la usabilidad, es decir, obtener una interfaz sencilla, clara, intuitiva, atractiva y fácil de usar. En cuanto a la extensibilidad, la aplicación móvil se crea de forma que pueda adaptarse a cualquier entorno, puedan agregarse más funciones y complementar el corpus de palabras a futuro (véase la Figura

3). También es importante considerar la eficiencia, es decir, la respuesta y la interacción deben ser lo más rápidas posible, ya que la aplicación puede trabajar sin conexión a internet. Finalmente, la aplicación puede ejecutarse en sistemas operativos móviles como Android Jellybean v16, 4.1.x e iOS 8 u otros.

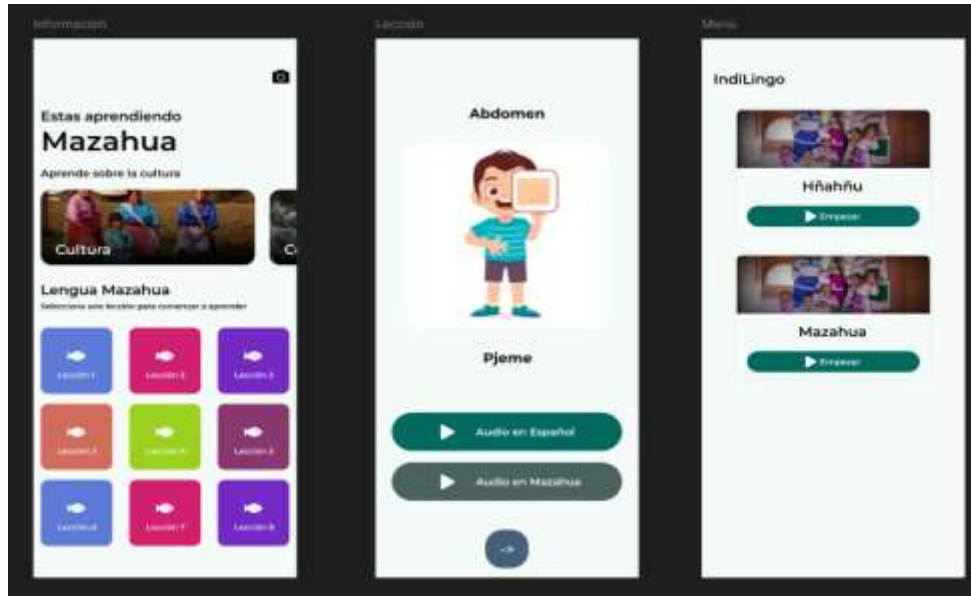


Figura 3. Entorno de aplicación móvil para lengua mazahua.

Fuente: elaboración propia.

En la Actividad 3 se contempla el desarrollo del traductor y del juego, implementando un modelo de traducción basado en transformadores. Los transformadores constituyen una arquitectura de red neuronal

que ha transformado significativamente los modelos de PLN, especialmente en aplicaciones de traducción automática y en el desarrollo de juegos de realidad aumentada (véase la Figura 4).

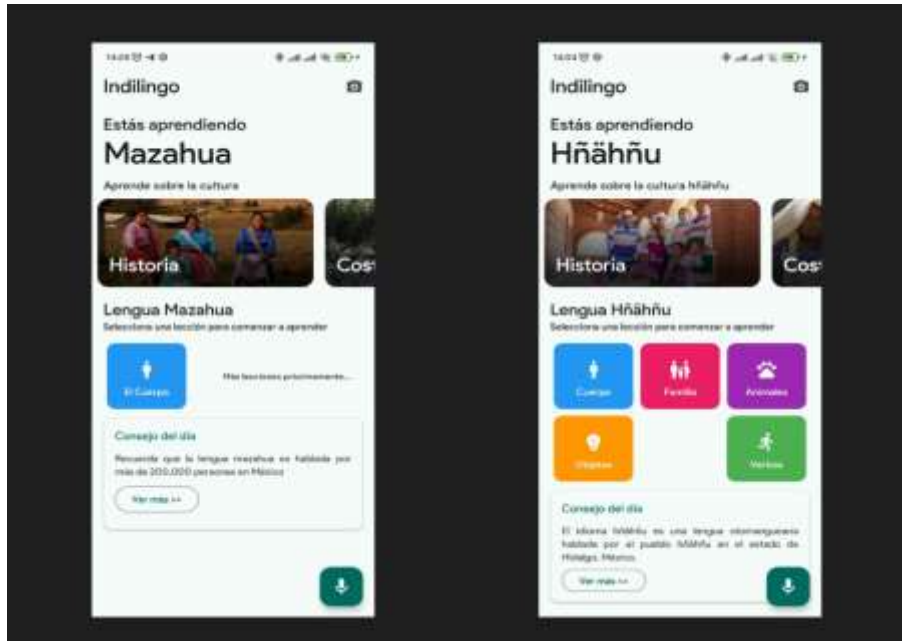


Figura 4. Entornos de aplicación móvil para contenidos mazahua y hñähñu para traductor y juego.
Fuente: elaboración propia.

IV. Detalles técnicos del traductor de mazahua y hñähñu

El modelo de traducción basado en transformadores se introdujo en el artículo «La atención es todo lo que necesitas» de Vaswani et al., (2017). El transformador es un modelo que se distingue por su uso exclusivo de mecanismos de atención, a diferencia de otros modelos como las redes neuronales recurrentes (RNN) y las redes de memoria a corto plazo (LSTM), que se basaban en el procesamiento secuencial de la información.

Las características clave de los transformadores en la traducción se apoyan en dinámicas de atención (autoatención). Esto significa que el transformador usa un mecanismo de atención que permite al sistema centrarse en todas las palabras de una sucesión de entrada al generar una traducción. La atención es autoatención, lo que significa que, para cada palabra de la entrada, se calcula la relación con las demás. Además, se emplea el cómputo paralelo, a diferencia de las redes procesan secuencias de entrada y de salida en paralelo. Esto acelera

considerablemente el entrenamiento y la inferencia de los transformadores, lo que resulta en modelos mucho más eficientes.

La arquitectura de los transformadores incluye un codificador y un decodificador. El codificador es capaz de procesar la secuencia de entrada, por ejemplo, una palabra de la lengua indígena, la convierte en una representación interna que captura sus características relevantes. A partir de esta representación, el decodificador crea la serie de salida, es decir, la traducción al idioma de destino. Tanto el codificador como el decodificador están conformados por capas apiladas que combinan mecanismos de atención y redes neuronales de propagación hacia adelante. Dado que los transformadores no siguen una estructura secuencial como las RNN o las LSTM, utilizan una codificación capaz de incorporar información dando un orden a las palabras en la secuencia. Esta codificación es esencial para que el modelo pueda interpretar correctamente el ámbito indicado y la relación entre cada palabra a lo largo de toda la oración.

Finalmente, los transformadores presentan una alta escalabilidad, lo que permite incrementar de manera eficiente el número de capas y parámetros del modelo para abordar tareas más complejas. Esta capacidad ha sido demostrada en variantes avanzadas como BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) y GPT (Generative Pre-trained Transformer), las cuales han alcanzado resultados sobresalientes en traducción automática y en diversas aplicaciones de PLN (Pilicita y Barra, 2025).

Los modelos basados en transformadores que se utilizan actualmente para la traducción son Google Translate, que utiliza una versión mejorada del transformador llamada Traducción Automática Neural Transformadora; BERT, que aunque no está diseñado específicamente para la traducción, ha demostrado ser muy útil para tareas de traducción y otros procesos de PLN; y GPT (Transformador Generativo Preentrenado), conocido como un modelo de generación de texto, que también puede aplicarse a tareas de traducción gracias a su capacidad para comprender el contexto del texto (Pilicita y Barra, 2025).

La arquitectura del transformador se organiza en dos componentes principales: el codificador y el decodificador (Javed *et al.*, 2025), donde cada componente está formado por múltiples capas, y cada capa realiza una serie de operaciones matemáticas diseñadas para procesar y transformar la información de manera eficiente, capturando las relaciones contextuales dentro de las secuencias de entrada y salida. En el caso del decodificador, cada capa se compone de dos componentes clave: primero, el mecanismo de atención (autoatención), que permite obtener las relaciones entre las palabras de la secuencia de entrada. Por otro lado, existe una red neuronal de propagación hacia adelante, lo que significa que, tras aplicar la atención, el

resultado se transmite a través de una red neuronal de propagación hacia adelante completamente conectada, independientemente de cada posición de la secuencia.

El codificador procesa la entrada en el idioma de origen convirtiendo cada token en un vector de incrustación x_i , y añadiendo codificaciones posicionales p_i para incorporar la información posicional de los tokens en la secuencia:

$$e_i = x_i + p_i \quad (\text{Ec. 1})$$

Las capas del codificador se inicializan con los pesos pre entrenados de BERT para mejorar su capacidad de comprender y representar mejor el texto de entrada. Tras la inicialización, se ajustan las capas del codificador aumentadas con BERT en nuestros conjuntos de datos para ajustar los pesos pre entrenados a las especificaciones de las tareas de traducción. Las dimensiones de las incrustaciones de BERT difieren de las dimensiones esperadas de la incrustación del codificador del modelo M2M (d_{m2m}) y se aplica una transformación lineal para ajustar las dimensiones:

$$e'_{bert} = W_{transform} e_{bert} + b_{transform} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde $W_{transform}$ y $b_{transform}$ son los pesos y sesgos de la capa de transformación, respectivamente. Esto garantiza que las incrustaciones BERT transformadas (e'_{bert}) sean compatibles con el codificador M2M100.

Lo anterior, permite introducir algunas modificaciones clave en los mecanismos de atención, como la atención bidireccional sincrónica y la atención ponderada dinámica. La atención bidireccional sincrónica permite al modelo atender simultáneamente a tokens

pasados y futuros dentro de cada capa, lo que mejora su comprensión del contexto y su capacidad para capturar dependencias de largo alcance. Esta modificación se logra ajustando las máscaras de atención, originalmente unidireccionales, para permitir el contexto bidireccional. Específicamente, se modifica la máscara de atención para que el modelo pueda atender a todos los tokens de la secuencia, independientemente de su posición. Esta máscara de atención bidireccional garantiza que cada token pueda atender a los tokens anteriores y posteriores en la secuencia, lo que permite una comprensión más completa de la entrada. La matriz de atención $M_{\text{bidireccional}}$ se modifica a $M_{\text{bidireccional}} = 1$, o todos los pares de tokens en la secuencia. Esta modificación permite al modelo aprovechar todo el contexto de la secuencia de entrada, mejorando así la precisión de la traducción, especialmente en

Además, se usa un mecanismo de respaldo para abordar entidades con nombre que no están presentes en los datos de entrenamiento. En el caso de una entidad con nombre no vista, la reemplazamos con una entidad predefinida de un diccionario bilingüe o una lista de mapeo de entidades. Si no se encuentra una coincidencia directa, el modelo se basa en pistas contextuales de los tokens circundantes para inferir el significado de la entidad. Esto garantiza que la traducción se mantenga precisa y fluida, incluso en presencia de entidades nuevas o poco comunes. El mecanismo de respaldo garantiza que el modelo pueda manejar una amplia gama de entidades con nombre, lo que mejora su robustez, especialmente para idiomas con recursos limitados.

$$z = \text{LayerNorm}(x + \text{Dropout}(\text{MultiHead}(Q, K, V))) \quad (\text{Ec. 4})$$

El decodificador genera la salida en el idioma de destino un token a la vez. La capa de autoatención enmascarada impide la atención

oraciones donde las relaciones entre tokens distantes son cruciales. Esto conduce a un mejor manejo de las estructuras sintácticas y semánticas, lo que resulta en traducciones más precisas.

Las ponderaciones de atención se recalculan durante cada operación de atención, lo que las hace dependientes del contexto y permite que el modelo se adapte a la importancia de los diferentes tokens a medida que se procesa la secuencia de entrada. El mecanismo de atención con ponderación dinámica se expresa como:

$$\text{Atención}(Q, K, V) = \text{soft max} \left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right) V \quad (\text{Ec. 3})$$

La aplicación de la normalización de capas después de las capas de atención y de avance estabiliza el proceso de aprendizaje y mejora significativamente el rendimiento del modelo. Las capas de abandono evitan el sobreajuste al establecer aleatoriamente algunas activaciones a cero durante el entrenamiento. La implementación de conexiones residuales alrededor de las capas de atención y de avance facilita el flujo de gradiente y mejora la capacidad del modelo para capturar dependencias complejas. Esto garantiza que las dimensiones de salida de las capas de atención y de avance coincidan con las dimensiones de entrada. La ecuación (4) describe el proceso:

a tokens futuros en la secuencia de salida mediante un mecanismo de enmascaramiento como el siguiente

$$\text{MaskedAttention}(Q, K, V) = \text{soft max} \left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} + M \right) V \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde M es la matriz de máscara que impide que el modelo examine tokens futuros. La capa de atención del codificador-decodificador gestiona las consultas de la capa decodificadora anterior, con claves y

valores de la salida del codificador, lo que permite que cada posición del decodificador atienda a todas las posiciones en la secuencia de entrada como:

$$\text{Attention}(Q_{dec}, K_{dec}, V_{dec}) = \text{soft max} \left(\frac{Q_{dec} K_{enc}^T}{\sqrt{d_k}} \right) V_{enc} \quad (\text{Ec. 6})$$

La red neuronal de propagación hacia adelante transforma la representación tras la integración de la atención, aplicando la normalización y el abandono de capas para garantizar que las dimensiones coincidan con las capas posteriores:

$$\text{FFN}(x) = \max(0, xW_1 + b_1)W_2 + b_2 \quad (\text{Ec. 7})$$

El modelo propuesto se ajusta con precisión a nuestros conjuntos de datos para adaptarlo a nuestras tareas de traducción. Este proceso

ayuda al modelo a comprender todo el alcance semántico del idioma de origen. El modelo propuesto puede producir traducciones que preservan la coherencia y el significado pretendido de textos más largos. Esto minimiza la pérdida y garantiza una traducción automática sin problemas al procesar secuencias de forma paralela, eficiente y flexible. De esta manera, se implementa el traductor para palabras mazahua y hñahñu presentado en este artículo (véanse la Figura 5 y la Figura 6).

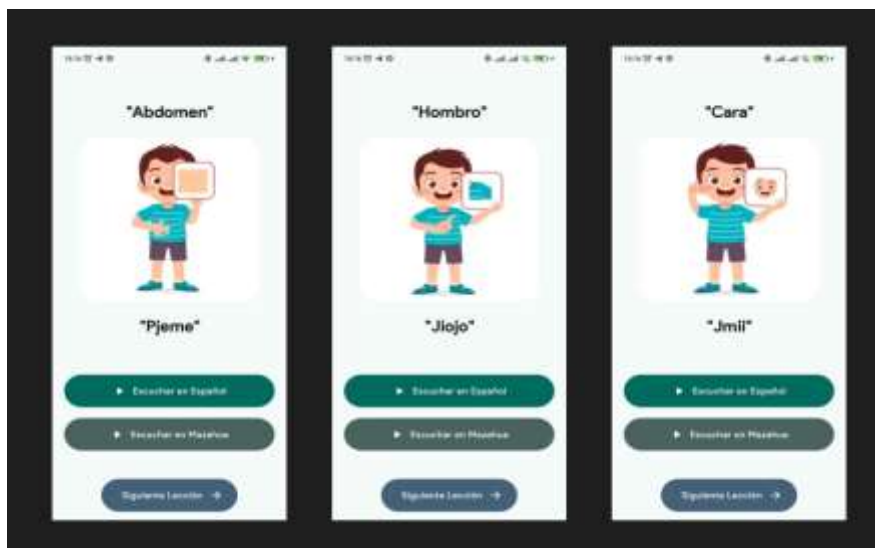


Figura 5. Traductor de aplicaciones móviles de mazahua para partes del cuerpo.
Fuente: elaboración propia.

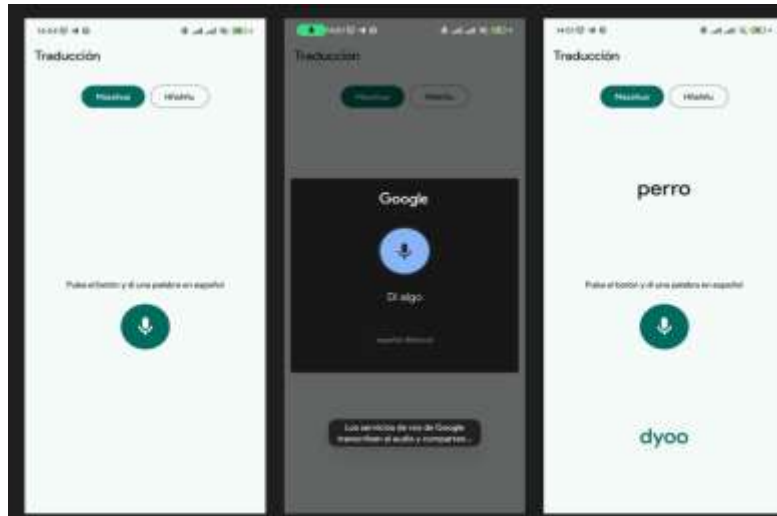


Figura 6. Traductor de aplicaciones móviles para hñähñu que utiliza animales.
Fuente: elaboración propia.

Juego basado en realidad aumentada para animales en hñähñu

La realidad aumentada (RA) ha sido aplicada como parte complementaria en el desarrollo tecnológico con el objetivo de modelar y representar entornos virtuales muy parecidos a la realidad con el fin de que el usuario tenga una experiencia muy similar a la realidad. Debido a esto, se han creado diversos dispositivos basados en RA. El Apple Vision Pro desarrollado para tener experiencias con diseños reales, ergonómicos y tecnologías de interacción natural, como los gestos (Baashar *et al.*, 2023). Por otro lado, en muchos casos se ha integrado a la inteligencia artificial con la RA permitiendo experiencias personalizadas y adaptativas en ámbitos como la medicina, la astronomía, la biología, la educación, entre otros. En el contexto educativo, diversas plataformas educativas han incorporado la RA como un medio innovador permitiendo a los usuarios experiencias más reales que facilitan la enseñanza y el aprendizaje. En específico, buscan emular, representar y simular entornos y escenarios muy similares a los del mundo real (Marrahi & Belda, 2023).

En ámbitos más profesionales, la realidad aumentada (RA) ha sido empleada en

sectores como en la astronomía, la medicina, la biología, e incluso en las artes, como es el caso de los museos virtuales, entre otros. Donde permite a los usuarios tener una experiencia en eventos del espacio, las galaxias, los planetas, e incluso Marte, muy similares a lo real; y en aplicaciones como museos y galerías mediante un contenido realista, interactivo y contextual (Rodríguez y Pérez, 2023) que permiten el arte, como el museo de Louvre, en Francia. Esta tecnología también ha demostrado el desarrollo de aplicaciones en la medicina, donde se aplica tanto en terapias de salud mental, la exploración del cuerpo humano, la simulación de células, bacterias y virus permitiendo visualizaciones detalladas de órganos y procedimientos quirúrgicos (Collado, 2024), (Villalobos López, 2024).

La (RA) ha permitido la superposición de elementos, objetos, figuras e imágenes de manera virtual sobre entornos físico buscando brindar una experiencia real, interactiva e inmersiva para los usuarios. Desde una perspectiva matemática, la RA hace uso de modelos, operaciones matemáticas, superposiciones y aplicación de transformaciones homogéneas dadas por rotaciones y traslaciones, y técnicas que

permiten integrar los objetos virtuales. Las operaciones presentadas son de suma importancia para modelar objetos virtuales con las características reales y las mediciones precisas, lo más similar al mundo real usando conceptos como los que a continuación son presentados.

V. Modelado basado en realidad aumentada

Las transformaciones son representaciones matemáticas capaces de modelar figuras que permiten de modificar la orientación, el escalado, la rotación y la posición de los objetos con base en un marco de referencia. Esto permite manipular y representar los objetos en entornos gráficos de realidad aumentada. Para esto, son usadas matrices de transformación, que permiten manipular objetos en 3D mediante operaciones matemáticas de rotación, traslación y/o escalamiento (Groosman, 2019).

El escalado o escalamiento es definido (Groosman, 2019) como una transformación que permite modificar directamente el tamaño de un objeto y se puede realizar de manera uniforme (conservando las proporciones del objeto) o no uniforme (modificando las dimensiones de manera diferente a lo largo de cada eje). La matriz de escalado S para un objeto 3D tiene la siguiente forma:

$$S = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde s_x, s_y, s_z son los elementos de escala a lo largo de los ejes x, y, z , respectivamente.

Por otro lado, la rotación (Groosman, 2019) es una transformación que hace girar un objeto alrededor de un eje. Las rotaciones en

3D pueden ser alrededor de los ejes x, y, z , o incluso alrededor de un eje arbitrario. Las matrices de rotación son definidas para cada eje como:

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 11})$$

Aquí, θ representa el ángulo de rotación y estas matrices permiten que el objeto gire alrededor del eje especificado. Finalmente, la traslación (Groosman, 2019) permite mover un objeto de una ubicación a otra en el espacio tridimensional. Es un desplazamiento realizado a lo largo de los ejes x, y, z , y la matriz de traslación tiene la siguiente forma:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde t_x, t_y, t_z son las distancias de traslación a lo largo de los ejes x, y, z , respectivamente.

En la realidad aumentada, los objetos virtuales se posicionan y alinean correctamente dentro del espacio físico (Groosman, 2019). Esto generalmente

requiere la composición de transformaciones. Por ejemplo, si se va a escalar, rotar y trasladar un objeto, las transformaciones se combinan multiplicando sus respectivas matrices. Si T, R y S son las matrices de traslación, rotación y escala, respectivamente, la matriz de transformación compuesta es:

$$M_{final} = T \cdot R \cdot S \quad (\text{Ec. 13})$$

Esto garantiza que las transformaciones se apliquen en el orden correcto para lograr la posición, orientación y tamaño deseados del objeto en el espacio.

Además de las transformaciones geométricas, otro aspecto importante de la RA es el cálculo de la posición de objetos para su aproximación como en el mundo real. Esto puede implicar el uso de cámaras y sensores para obtener la ubicación y orientación del dispositivo en el espacio. Los parámetros son empleados para estimar las operaciones capaces de calcular las matrices de transformación, logrando obtener objetos en 3D similares al entorno real.

Es decir, en la RA se busca que los objetos virtuales sean lo más parecido a los del entorno real. Para lograr lo anterior, en muchos casos se realiza la calibración de las cámaras, determinando parámetros intrínsecos como la distancia focal, pruebas de mediciones e incluso el uso de filtros para el procesamiento de imágenes. Por otro lado, se deben considerar algunos parámetros extrínsecos como la posición y orientación de la cámara, para tener un modelo preciso. Posteriormente, se usan algoritmos que permiten la reconstrucción de los objetos en

3D para obtener una representación de los objetos y del entorno, detalles que en muchos programas ya son integrados actualmente. En conclusión, desde un punto de vista matemático, la realidad aumentada emplea indirectamente de las matemáticas mediante las matrices de transformación para modelar los objetos virtuales.

Así la RA ha sido incorporada en ámbitos educativos y ha permitido la interacción del usuario para facilitar el aprendizaje, proporcionando experiencias motivadoras y significativas (Kleftodimos y Evagelou, 2025). Por lo tanto, en este trabajo se incorpora a la RA en una aplicación móvil que permite el uso de un traductor automático y combinar un juego basado en RA. Este juego es un memorama combinado con un rompecabezas. Tiene como objetivo promover y motivar el aprendizaje cognitivo, constructivo e interactivo para los aprendientes de lenguas indígenas. El juego combina lo tecnológico con el uso de cartas físicas, donde los jugadores deben buscar las piezas de la figura de un animal y armarla, finalmente, el usuario puede escanear la figura y modelarla mediante el uso de la RA experimentando la animación, los sonidos y el realismo con fines de aprendizaje y juego.

La figura basada en RA es proyectada en la pantalla del dispositivo, donde no solo cobra vida en formato 3D, sino que también emite sonidos y animaciones desde diferentes perspectivas. En esta aplicación, se implementan cartas de diversos animales como el chivo, el pato, el toro, el cerdo, el caballo, el gato, la vaca y el conejo, cada uno con su figura y su nombre en hñähñu, respectivamente (ver Figura 7).



Figura 7. Conjunto de animales para juego de realidad aumentada.

Fuente: elaboración propia.

El juego desarrollado para la aplicación móvil tiene dos principales objetivos. Por un lado, busca que el usuario pueda ejercitar la memoria visual, ya que debe recordar la ubicación y las características de las figuras de las cartas para completar el rompecabezas. Por otro lado, busca fomentar el aprendizaje cognitivo, constructivo e interactivo, ya que los jugadores no solo deben recordar las cartas, sino también resolver el rompecabezas, adquiriendo el conocimiento sobre el animal representado. En suma, la visualización de figuras de animales mediante RA ofrece la oportunidad de agregar aspectos como el sonido, los animales, la lengua indígena, entre otros.

Por lo tanto, el juego presentado mediante la aplicación es capaz de combinar e incentivar de manera simultánea el uso de la tecnología con juegos tradicionales, la realidad aumentada, el juego del memorama y el juego del rompecabezas. De esta forma, se busca estimular las habilidades cognitivas, es decir, la capacidad mental que usa el ser humano para procesar, pensar, percibir, almacenar y usar la información. Además, mediante el uso de RA se busca obtener un aprendizaje

dinámico y atractivo al involucrar activamente a los jugadores mediante el uso de la tecnología y la interacción. Por lo que, la aplicación combina la parte cognitiva, constructiva e interactiva, que permite a las personas no solo absorber información pasivamente, sino también construirla y aplicarla activamente en la práctica.

Incorporar a la RA en este juego mixto presentado que combina el juego de memoria y el juego del rompecabezas se considera una herramienta educativa innovadora que promueve el aprendizaje mediante el juego activo que busca ofrecer una experiencia interactiva y multisensorial. Se considera también que este tipo de juego promueve el aprendizaje mediante la motivación y da paso al desarrollo de habilidades cognitivas, haciendo del aprendizaje una actividad más atractiva y efectiva (véase la Figura 8).



Figura 8. Imagen del conejo en realidad aumentada para el juego desarrollado.
Fuente: elaboración propia.

VI. Resultados y discusión

Como parte de los resultados se evaluaron las siguientes competencias considerando los objetivos planteados. Primero, considerando el marco teórico, que considera la estructura conceptual que comprende el contexto o el tema que se está estudiando, es importante debido a que es necesario definir un proceso de intervención y diseño de un modelo. En cuanto a la planificación, se basó en una evaluación diagnóstica, esta etapa se llevó a cabo el diseño, la programación y la funcionalidad de la aplicación bajo la guía del docente, esperando que los alumnos usen la aplicación. Esto incluye la descripción del proceso de intervención, el diseño del modelo, el tipo de proyecto, las tareas requeridas, los recursos, como la capacidad de reprogramar la aplicación y adaptarlo a otros lenguajes, incluso considerar áreas de oportunidad y el cronograma de trabajo.

Considerando la ejecución, en esta fase se centra en los experimentos prácticos que realizan los alumnos con el apoyo del docente. Es la fase más larga y requiere el desarrollo de competencias tanto genéricas como especializadas considerando las

motivaciones e incluso el modelo del salón de clases.

Finalmente, en la etapa de evaluación se realizó un juicio de valor en los contextos educativos y de aprendizaje. El objetivo de esta etapa es identificar lo aprendido, los logros y las áreas de oportunidad. Cabe mencionarse que se emplea la evaluación continua que buscan lograr el desarrollo de las habilidades cognitivas, el pensamiento crítico y reflexivo en los estudiantes y las motivaciones intrínsecas y extrínsecas de cada uno de ellos.

En la fase de evaluación, los alumnos usaron la aplicación para ser evaluados de si aprendieron o no las palabras presentadas mediante la aplicación diseñada para el aprendizaje de las lenguas indígenas, así como sus destrezas y habilidad en los juegos de memoria y del rompecabezas. El objetivo fue recopilar datos del rendimiento y de las experiencias con la aplicación de los alumnos a través de su uso, considerando si los alumnos habían ganado o perdido el juego y responder preguntas para evaluar si los temas tratados eran nuevos. La mayoría de los alumnos indicaron estar familiarizados con los aspectos teóricos y la gramática de las partes del cuerpo y los animales presentados.

Además, se realizó una encuesta a los estudiantes con el fin de que calificaran el nivel de satisfacción general con los componentes teóricos y prácticos de la aplicación presentada. Las calificaciones fueron positivas, obteniendo que más del 80% de los estudiantes aprobaron la aplicación presentada. Esto es, 68 de 83 alumnos y alumnas del programa de Licenciatura en Ciencias Computacionales del Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías de la UAEH (durante el semestre agosto-diciembre de 2024), ofrecieron comentarios positivos y favorables de la aplicación presentada (véase la Figura 9).

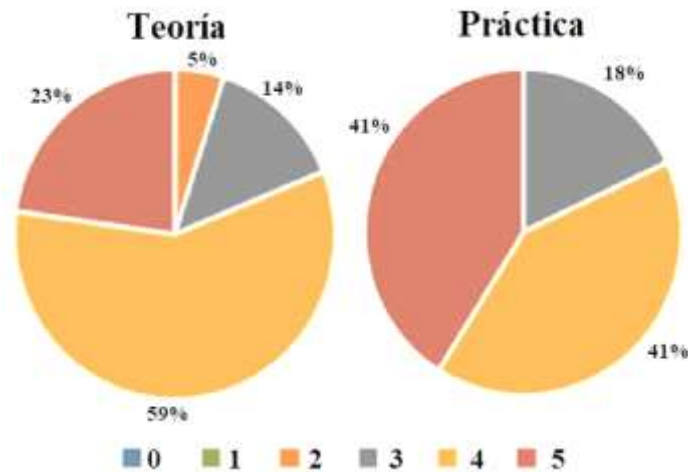


Figura 9. Resultados estadísticos del proceso de aprendizaje con la aplicación móvil.
Fuente: elaboración propia.

Este hallazgo es significativo, ya que los beneficios que suelen atribuirse a los juegos educativos suelen provenir de la actitud de los participantes hacia la actividad, más que del contenido o las reglas en sí. En respuesta a las necesidades de aprendizaje, se prevé que el modo "Repaso" incluya una opción para ocultar o mostrar los nombres escritos de las palabras. Esta función puede ayudar que las figuras no interfieran con la percepción auditiva en mazahua y hñähñu, para el aprendizaje mediante un repertorio de animales y partes del cuerpo, incluso si la aplicación se extiende a otra clase de palabras como colores, alimentos, integrantes de la familia, entre otros.

Cabe señalar que en los trabajos mencionados que se han centrado en herramientas informáticas para el aprendizaje de idiomas. Sin embargo, este estudio destaca por utilizar una aplicación móvil interactiva para obtener resultados cuantificables mediante un método científico. El aprendizaje de las partes del cuerpo, por ejemplo, puede abordarse como una transacción (Da Silva et al., 2005), lo que subraya la necesidad de métodos interactivos en el aprendizaje de idiomas. Esto implica el uso de la aplicación demuestra que es capaz

de llevar a cabo la traducción de partes del cuerpo mediante el uso de voz.

VII. Conclusiones

Este artículo se presentó el desarrollo de una aplicación móvil diseñada para el aprendizaje de un corpus de las lenguas indígenas mediante un juego basado en la realidad aumentada y un traductor automático para mazahua y hñähñu. El juego y el traductor buscan promover el aprendizaje cognitivo, constructivo e interactivo entre el usuario y la aplicación, sumando la realidad aumentada. El fin es crear un entorno de aprendizaje lúdico y efectivo. Además, el desarrollo de esta aplicación móvil combina elementos de aplicaciones móviles, realidad aumentada, ciencias del juego y la didáctica de lenguas para un corpus de palabras de animales y partes del cuerpo.

La aplicación es puesta a prueba mediante experiencias de uso con los estudiantes universitarios de la carrera de Ciencias Computacionales, que interactuaron con el juego basado en la realidad aumentada y el traductor automático. Los resultados demostraron que la aplicación tiene el potencial y la capacidad para facilitar la experiencia de aprendizaje mediante el uso de

los juegos para la preservación de las lenguas indígenas. Los resultados obtenidos fueron favorables, sin embargo, existen trabajos futuros que incluye la incorporación de nuevas secciones y áreas que aborden otros temas, así como palabras básicas que incluyen colores, miembros de la familia y el uso de verbos.

Sin embargo, la aplicación presenta algunas ventajas como una interfaz multimodal que promueve la comunicación no verbal y verbal. La aplicación móvil hace uso de transformers para el traductor que permite una traducción más rápida y efectiva. Incluso, se combinan los juegos tradicionales con el uso de nuevas tecnologías como la realidad aumentada para integrar a los animales mediante animaciones, sonidos y movimientos. Lo que brinda mejores experiencias basadas en el uso de la tecnología y la gamificación aplicada en el aprendizaje de lenguas en una aplicación móvil.

Por otro lado, se fomenta el aprendizaje activo y cognitivo mediante la aplicación móvil, ya que existe la interacción bidireccional, es decir, existe respuesta de parte de la aplicación que depende del usuario. Lo anterior, contrasta con los enfoques tradicionales y conductistas de enseñanza, donde el usuario solo repite, por lo que, se enfoca en emplear nuevos modelos de aprendizaje basado en la literacidad mediática multimodal y las competencias del siglo XXI, considerando el aprendizaje como un proceso activo, constructivo e interactivo. Desde una perspectiva orientada en la enseñanza de lenguas, la aplicación busca promover las competencias lingüísticas y comunicativas, ofreciendo experiencias interactivas y contextualizadas que facilitan la adquisición de las lenguas indígenas.

Finalmente, la aplicación tiene enfoque constructivista e interaccionista donde se

resalta el papel del alumno y el docente como facilitador y guía, proporcionando a los estudiantes la libertad de explorar el entorno tecnológico construyendo el conocimiento de forma autónoma y puede recibir el apoyo oportuno según las necesidades. Desde esta perspectiva, la interacción entre los estudiantes, el docente y la aplicación móvil resulta fundamental, especialmente considerando los recientes avances tecnológicos como la realidad aumentada, las aplicaciones móviles y el uso de la inteligencia artificial, las cuales se han ido integrando en los nuevos modelos educativos.

Referencias

Alejandro García, S., & Guzmán Mendoza, R. (2016). Conocimiento tradicional asociado al uso de plantas medicinales en migrantes mazahuas de una comunidad indígena de San José del Rincón, Estado de México, *Huellas de Migración*, 1, 195-220.

Avelino Sierra, R. (2022). Marcadores discursivos del español en narraciones otomíes: Primeras observaciones. *Boletín de Filología*, 57(1), 175-207. <https://boletinfilologia.uchile.cl/index.php/BDF/article/view/67532>

ANENOR. (2000). UNE EN ISO 13407 Procesos de diseño para sistemas interactivos centrados en el operador humano (ISO 13407: 1999). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0023082>

Annet, K. A. (2024). Language Preservation: Strategies for Indigenous Languages. *NEWPORT INTERNATIONAL JOURNAL OF CURRENT ISSUES IN ARTS AND MANAGEMENT*, 5(3), 1-4. <https://doi.org/10.59298/nijciam/2024/5.3.14100>

Baashar, Y., Alkaws, G., Wan Ahmad, W. N., Alomari, M. A., Alhussian, H., & Tiong, S. K. (2023). *Towards Wearable Augmented Reality in Healthcare: A Comparative Survey and Analysis of Head-Mounted Displays*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 3940. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053940>

Benítez Reyna, Rufino. (2017). Vocabulario práctico bilingüe Mazahua-Español, Colección Vocabularios en Lenguas Indígenas, Mexico. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/192866/cdi-vocabulario-mazahua-rufino-benitez-reyna-web.pdf>

Brooke, J. (1995). SUS: A quick and dirty usability scale. En P. W. Jordan, B. Thomas, I. L. McClelland, B. Weerdmeester (Ed.), *Usability Evaluation in Industry*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781498710411-35/sus-quick-dirty-usability-scale-john-brooke>

Carrino, M., Orozco, J., & García, E. (2020). Machine translation as a solution for linguistic corpora limitations in Spanish: An application to relation extraction. *Journal of Computational Linguistics*, 36(2), 112-126. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-0139-x>

Castro, L. A., Tentori Espinosa, M. E., Favela Vara, J., Rodríguez Urrea, M. D., Sánchez, J. A. (2017). Interacción Humano Computadora. En L. A. Pineda Cortés (Ed.), *La Computación en México por Especialidades Académicas* (pp. 195-231). Academia Mexicana de Computación, A. C. <http://www.amexcomp.org.mx/files/libro/Cap%206.pdf>

Celote Preciado, A. (2025). *El mundo mazahua y la construcción de interculturalidad*. Gobierno del Estado de México.

<https://uiem.edomex.gob.mx/sites/uiem.edomex.gob.mx/files/files/FONDO%20EDITORIAL%20UIEM/Fondo%20Editorial/EI%20mundo%20Mazahua%20-%20digital.pdf>

Collado-Vázquez, S. (2024). *Realidad virtual, realidad aumentada y medicina en la literatura, el cine y la televisión*. *Revista de Medicina y Cine*, 20(2), 147–157. <https://doi.org/10.14201/rmc.26044>

Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. (2005). *Acciones de Gobierno para el Desarrollo Integral de los Pueblos Indígenas*. https://www.inpi.gob.mx/2021/dmdocument/s/CDI_informe_2005.pdf

Cruz, A. (2015). El diseño centrado en el usuario (DCU). <https://alexacruzhdmo.wordpress.com/2015/07/15/el-diseno-centrado-en-el-usuario-dcu/>

Cruz-Carrillo, D. A., Peña-González, J., Tovar-Meléndez, L. M., & Herrera-González, A. M. (2024). *Effect of microalgae addition in broiler chicken diets on productive parameters*. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 6(11), 79–88. <https://doi.org/10.29057/jas.v6i11.12352>

Cunalata Amuguimba, C. J. (2020). *Desarrollo de una aplicación móvil que facilite el aprendizaje de la lengua Kichwa*. [Tesis de Grado]. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21103>

Da Silva, G. C., M. H., Signoret D. A., *Temas sobre la adquisición de una segunda lengua*, Trillas, México, 2005.

De la Cruz-Sánchez, G., & De la Cruz, C. (2024). A day in the cornfields: A Western Otomi narrative. *Tlalocan: Revista de fuentes para el conocimiento de las culturas indígenas de México*, 29(1), 93–119.

<https://doi.org/10.19130/iifl.tlalocan.2024.1.0001S0W698X24>

Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *NAACL-HLT 2019* (pp. 4171-4186).
<https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>

Escorza-Sánchez, Y.M., Martínez-Martín, G., Saldaña-Tapia, Y., Maldonado-Catalán, O. (2018). Aplicación móvil para reforzar el aprendizaje de la lengua Hñähñu. *Revista de Tecnología y Educación*, 2(6), 23-31.
https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Tecnologia_y_Educacion/vol2num6/Revista_de_Tecnolog%3%ada_y_Educaci%3%b3n_V2_N6_4.pdf

Flutter. (2020). Flutteres el kit de herramientas de interfaz de usuario de Google.
<https://flutter.dev/?gclid=EAIaIQobChMIkpSp07ez6AIVrYFaBR3LAWQvEAA>
YASAAEgLkBFd_BwE

Fuentes Cortes, W., Reyes Jiménez, S., & Sánchez González, R. (2022). Aplicación móvil para el fomento, fortalecimiento y preservación del idioma indígena Zapoteca (Diidxazá). *Revista De Investigación En Tecnologías De La Información*, 10(22), 92–102. <https://doi.org/10.36825/RITI.10.22.007>

García-Méndez, S., Fernández-Gavilanes, M., Costa-Montenegro, E., Juncal-Martínez, J., & González-Castaño, F. J. (2024). A Library for Automatic Natural Language Generation of Spanish Texts. arXiv preprint arXiv:2405.17280.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.036>

Geman, S. & Johnson, M. (2004). Probability and Statistics in Computational Linguistics, a Brief Review. En *Mathematical Foundations of Speech and Language Processing* (Vol.

138). Springer. DOI: 10.1007/978-1-4419-9017-4_1

Gobierno de México. (2022). Preservar las lenguas indígenas de México, prioridad y compromiso ético del INPI. Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas. Recuperado de <https://www.gob.mx/inpi/articulos/preservar-las-lenguas-indigenas-de-mexico-prioridad-y-compromiso-etico-del-inpi>

González Orozco, D. D., y García Trillo, M. Á. (2021). Diseño y construcción de una aplicación móvil para fomentar el uso y aprendizaje de la lengua P'urhépecha, Procesamiento de lenguaje natural para lenguas indígenas (pp. 95-111). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23936.97287>

Grossman, S. I. (2019). Álgebra lineal (8.^a ed.). McGraw-Hill.
https://books.google.com.mx/books/about/%C3%81lgebra_lineal_8a_ed.html?id=wUE0yQEACAAJ&redir_esc=y

Gutiérrez Arriaga, O. F., & Alvarado Rodríguez, M. E. (2024). La importancia social y jurídica de la conservación de las lenguas indígenas en la Ciudad de México. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5 (5), 1133 – 1148.
<https://doi.org/10.56712/latam.v5i5.2650>

Hernández Cruz, L., Victoria Torquemada, M. y Sinclair Crawford, D. (2010) Diccionario del Hñähñu (Otomí) del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo (Segunda edición electrónica). Instituto Lingüístico de Verano, A.C., México.
<http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Valle-Del-Mezquital-Diccionario-Hnahnu.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2025). *Estadísticas a propósito del Día Internacional de los Pueblos Indígenas*. [Comunicado de prensa 115/25]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/salade prensa/aproposito/2025/EAP_PuebIndig_25.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020: Principales resultados*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/Censo2020_Principales_resultados_EUM.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). *Banco de Indicadores*. https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=6200240454&tm=6#D6200240454_132#D6200240454_132#D6200240361_132

Instituto Nacional de Lenguas Indígenas. (2008). *Catálogo de las lenguas indígenas nacionales: Variantes lingüísticas de México con sus autodenominaciones y referencias geoestadísticas*. Diario Oficial de la Federación. https://www.inali.gob.mx/pdf/CLIN_completo.pdf

Instituto Nacional de Lenguas Indígenas. (2010). *Norma de escritura de la Lengua Hñähñu (otomí)*. https://site.inali.gob.mx/Micrositios/normas/pdf/Norma_Otomi.pdf

Javed, A., Zan, H., Mamyrbayev, O., Abdullah, M., Ahmed, K., Oralbekova, D., Dinara, K., & Akhmediyarova, A. (2025). Transformer-Based Re-Ranking Model for Enhancing Contextual and Syntactic Translation in Low-Resource Neural Machine Translation. *Electronics*, 14(2), 243. <https://doi.org/10.3390/electronics14020243>

Kleftodimos, A., y Evagelou, A. (2025). Realidad aumentada basada en la ubicación en la educación. *Enciclopedia*, 5 (2), 54. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5020054>

Kumar, S. (2017). Relation extraction in the healthcare industry: Approaches and challenges. *International Journal of Medical Informatics*, 98, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2016.11.003>

Liu, Y., Ott, M., Goyal, N., Du, J., Wang, Y., & Yiming, L. (2019). RoBERTa: A robustly optimized BERT pretraining approach. arXiv preprint arXiv:1907.11692. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11692>

Marrahi-Gomez, V., & Belda-Medina, J. (2023). *The Integration of Augmented Reality (AR) in Education*. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 9(12), 475–487. <https://doi.org/10.14738/assrj.912.13689>

Martínez, C. (2012). Estadística y muestreo (13ra Ed.). Ecoe Ediciones <https://ies-booklick.s3.amazonaws.com/1626728222781-Estadistica-MuestreoCiro1-198.pdf>

Mora Bustos, A., Ortiz Villegas, A. I., García Zúñiga, H. A., & Hernández Hernández, N. (2023). Clases de adposiciones en tres lenguas otomangués. *Cuadernos de Lingüística de El Colegio de México*, 10, 1–46. <https://doi.org/10.24201/clecm.v10i00.272>

Muñoz García, R. (2018). Aplicación móvil para el aprendizaje de la lengua náhuatl [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Guerrero. <http://ri.uagro.mx/handle/uagro/279?locale-attribute=en>

Narciso Farias, F. E., Rodríguez, T. J. (2001). La Interacción Humano-Computadora (MODIHC). XXVII Conferencia

Latinoamericana de Informática (CLEI). Mérida, Venezuela. <https://erevistas.saber.ula.ve/index.php/academia/article/download/5920/5724>

Nasar, M., Raj, K., & Jha, R. (2021). Linguistic tools for relation extraction: A review of syntactic analysis and segmentation. *Journal of Computational Science*, 28, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.09.010>

Olko, J., Lubiewska, K., Maryniak, J., Haimovich, G., de la Cruz, E., Cuahutle Bautista, B., Dexter-Sobkowiak, E., & Iglesias Tepec, H. (2022). The positive relationship between Indigenous language use and community-based well-being in four Nahua ethnic groups in Mexico. *Cultural Diversity & Ethnic Minority Psychology*, 28(1), 132-143. <https://doi.org/10.1037/cdp0000479>

Payán Díaz, M., & Flores Flores, J. A. (2025). No me llamo María: El género y el racismo en la mujer Mazahua. *QVADRATA. Estudios Sobre educación, Artes y Humanidades*, 7(14), 61-73. <https://doi.org/10.54167/qvadrata.v7i14.1948>

Pawar, V., Patil, V., & Joshi, M. (2017). Supervised learning for relation extraction: Morphological, syntactic, and lexical considerations. *Natural Language Engineering*, 23(5), 829-845. <https://doi.org/10.1017/S135132491700016X>

Picket, V. (2013). Vocabulario Zapoteco del Istmo. Instituto Lingüístico de Verano. https://www.sil.org/system/files/reapdata/47/57/69/47576984555300844250765337113555205633/zai_vocabulario_ed5.2.pdf

Pilicita, A. y Barra, E. (2025). Maestrías en Derecho en Educación: Evaluación de los modelos GPT y BERT en la clasificación de comentarios de los estudiantes. *Tecnologías Multimodales e Interacción*, 9 (5), 44. <https://doi.org/10.3390/mti9050044>

Porta Zamorano, J. & Sancho Sánchez, J.L. (2021). Procesamiento de lenguaje natural aplicado a datos masivos generados en medios sociales. *RSEL*, 51(2), 111-124. <https://doi.org/10.31810/RSEL.51.2.7>

Rodríguez, A., & Pérez, M. (2023). El impacto de la realidad aumentada en la experiencia museística. *Revista de Arte y Cultura Digital*, 5(1), 22-37.

Salgado Naime, F. Y., Morales Sales, E. S., & Salgado Vega, J. (2024). Indumentaria, identidad y roles de género en los mazahuas: Mujeres indígenas vistiendo la resistencia, hombres tejiéndola. *Chakiñan*, 2(25), 1-25. <https://doi.org/10.37135/chk.002.25.11>

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. In *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)* (pp. 6000-6010). Curran Associates, Inc. <https://doi.org/10.5555/3295222.3295349>

Villalobos López, J. A. (2024). *Marco teórico de realidad aumentada, realidad virtual e inteligencia artificial: Usos en educación y otras actividades*. *Emerging Trends in Education*, 6(12), 1-17. <https://doi.org/10.19136/etie.a6n12.5695>

Virmani, A., Gupta, R., & Sharma, P. (2017). Application of relation extraction in pharmaceutical chemistry and law. *Journal of AI and Data Science*, 31(3), 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.jdsci.2017.04.009>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Bio-Pots: Innovación de macetas biodegradables, basado en un modelo de negocio en economía circular

Bio-Pots: Innovation in biodegradable pots, based on a business model in a circular economy

Suárez-Colores, Z.P.^a, Barrios-Reyes, I.^a, Alaniz-Lara, G.Y.^a, Dolores-Ruiz, E.^{b*}, Salazar-Gómez, J.F.^c

^a Residentes de la carrera de Ingeniería en Administración. Tecnológico Nacional de México, Campus Tierra Blanca (<https://orcid.org/0009-0005-1600-4545>, <https://orcid.org/0009-0002-7284-7270>, <https://orcid.org/0009-0006-5279-705X>).

^{b*} Docente investigador de la carrera de Ingeniería en Administración. Tecnológico Nacional de México, Campus Tierra Blanca (<https://orcid.org/0000-0003-1089-1284>).

^c Docente investigador de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales. Tecnológico Nacional de México, Campus Tierra Blanca (<http://orcid.org/0000-0003-0597-7163>).

228n0495@itstb.edu.mx; 228n0456@itstb.edu.mx; 228n0452@itstb.edu.mx; erika.dr@tierrablanca.tecnm.mx*; julio.sg@tierrablanca.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Tecnologías de economía circular.

Área de aplicación industrial: Industria de Gestión de Residuos y Compostaje.

Recibido: 24 noviembre 2025

Aceptado: 27 enero 2026

Abstract

The growing environmental problems arising from the use of plastics in horticulture and the proliferation of water hyacinth in bodies of water demand sustainable and innovative alternatives. The aim of this study is to design and assess the feasibility of biodegradable pots made from plant waste such as banana rhizome (*Musa paradisiaca*), cuajilote bark (*Parmentiera aculeata*) and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), under the project called Bio-Pots. The research was conducted using an experimental-descriptive approach, which included the collection, processing and mixing of raw materials, as well as tests of mechanical resistance, permeability and degradation time under controlled soil conditions. Preliminary results showed that pots made with a balanced proportion of 40% banana rhizome, 35% water hyacinth, and 25% cuajilote bark achieved a degradation time of 6 to 8 months, which represents an efficient alternative to the 500-year persistence of polypropylene pots. Likewise, resistance tests indicated that the product can support up to 1 kg of weight, sufficient for ornamental crops and agricultural transplants. In terms of permeability, improved substrate drainage was observed without compromising moisture retention. These characteristics make Bio-Pots a product with high potential for application in the nursery,

agricultural, and ornamental industries, offering a solution that combines sustainability, social and solidarity-based circular economy, and the use of invasive species. It is concluded that this innovation not only reduces plastic pollution and the impact of invasive plants, but may also generate economic opportunities for rural communities through the management of plant waste.

Keywords: Biodegradable, Sustainability, Circular economy, Social and solidarity economy, Innovation.

Resumen

La creciente problemática ambiental derivada del uso de plásticos en la horticultura y la proliferación del lirio acuático en cuerpos de agua demanda alternativas sostenibles e innovadoras. El presente estudio tiene como objetivo diseñar y evaluar la viabilidad de macetas degradables elaboradas a partir de residuos vegetales como rizoma de plátano (*Musa paradisiaca*), corteza de cuajilote (*Parmentiera aculeata*) y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), bajo el proyecto denominado Bio-Pots. La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental-descriptivo, que incluyó la recolección, procesamiento y mezcla de las materias primas, así como pruebas de resistencia mecánica, permeabilidad y tiempo de degradación en suelo controlado. Los resultados preliminares mostraron que las macetas elaboradas con una proporción equilibrada de 40% rizoma de plátano, 35% lirio acuático y 25% corteza de cuajilote alcanzaron un tiempo de degradación de 6 a 8 meses, lo que representa una alternativa eficiente frente a los 500 años de persistencia de las macetas de polipropileno. Asimismo, las pruebas de resistencia indicaron que el producto soporta hasta 1 kg de peso, suficiente para cultivos ornamentales y de trasplante agrícola. En términos de permeabilidad, se observó un mejor drenaje del sustrato sin comprometer la retención de humedad. Estas características convierten a Bio-Pots en un producto con alto potencial de aplicación en la industria viverista, agrícola y ornamental, ofreciendo una solución que une sostenibilidad, economía circular social y solidaria, aprovechamiento de especies invasoras. Se concluye que la innovación no solo reduce la contaminación plástica y el impacto de plantas invasoras, sino que también puede generar oportunidades económicas para comunidades rurales mediante la gestión de residuos vegetales.

Palabras clave: Degradables, Economía circular, Economía social y solidaria, Innovación, Sostenibilidad.

Introducción

La contaminación ambiental es uno de los desafíos más urgentes a escala global, con repercusiones directas sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos (Palacios y Moreno, 2022). Dentro de sus múltiples expresiones, la contaminación por plásticos sobresale por su persistencia, acumulación y capacidad de generar impactos prolongados en el tiempo.

En los ambientes marinos, la magnitud del problema se ha documentado con claridad: ejemplo de ello, en la Isla de Cozumel (Caribe mexicano), se ha reportado que el 94% de los desechos superficiales y el 97.8% de los enterrados en playas, corresponden a plásticos (Manzilla et al., 2024). Situación que se agrava con la presencia de micro plásticos (MP), considerados contaminantes emergentes cuyos efectos en los suelos, el

agua y la biodiversidad aún se encuentran en fase de exploración científica (Casso et al., 2022).

En el ámbito agrícola y hortícola, la dependencia del uso de macetas plásticas desechables amplifica la crisis ambiental. Estos productos, diseñados para un ciclo de vida breve, persisten en el medio ambiente durante décadas, fragmentándose en microplásticos que alteran las propiedades del suelo y afectan la microbiota edáfica (Wang et al., 2023). Frente a este panorama, la búsqueda de alternativas biodegradables elaboradas a partir de recursos renovables se perfila como una línea prioritaria de innovación y sostenibilidad (Teixeira et al., 2023).

En los desafíos ambientales actuales, dos crisis aparentemente desconectadas convergen de manera silenciosa pero devastadora. Por un lado, la horticultura global depende en gran medida de un producto aparentemente inocuo: la maceta de plástico. Fabricadas con polipropileno, estas pueden tardar hasta 500 años en descomponerse, fragmentándose en microplásticos que contaminan suelos y alcanzan los acuíferos (Wang et al., 2023).

Cada temporada de siembra, millones de estas macetas se descartan, generando una montaña de desechos que el planeta no puede digerir. Este modelo lineal de “usar y tirar” choca frontalmente con los principios de la sostenibilidad, exigiendo una transición urgente hacia materiales que completen su ciclo de vida en armonía con la naturaleza (Hofmann et al., 2023).

Los cuerpos de agua sufren una asfixia progresiva, por la eutrofización, resultado del exceso de nutrientes provenientes de la agricultura y las aguas residuales, ha convertido ríos y lagos en incubadoras de biomasa (Yanez et al., 2022). Aquí, el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) encuentra su

oportunidad. Que forma tapetes tan densos que impiden el paso de la luz solar y al descomponerse, consumen el oxígeno disuelto hasta generar zonas muertas donde la vida acuática no puede prosperar (Lakane et al., 2023). Que es un colapso ecológico que afecta la biodiversidad, el acceso al agua y los medios de vida de las comunidades ribereñas (Drexler et al., 2024).

La gestión convencional de esta masa por métodos como el retiro mecánico es costosa y de eficacia limitada, además de que la disposición inadecuada del material extraído genera nuevos impactos ambientales (Macêdo et al., 2024). Ante esta problemática, la biorrefinería ofrece un marco estratégico para convertir pasivos ambientales en recursos valiosos, al integrar dimensiones técnicas, sociales y económicas en soluciones sostenibles (Peña y López., 2020).

En diversos estudios hay evidencia del potencial de las fibras naturales para el desarrollo de materiales biodegradables. Por ejemplo, Iglesias et al. (2023) evaluaron especies invasoras en la fabricación de productos celulósicos, mientras que Yamini et al. (2023) caracterizaron propiedades mecánicas de fibras naturales en las composites. El lirio acuático es una materia prima atractiva por su alto contenido de celulosa y hemicelulosa (Öztep et al., 2023). Propiedades que se complementan con otros residuos agrícolas de la región, como el rizoma de plátano, con alta capacidad de retención hídrica, y la corteza de cuajilote (*Parmentiera aculeata*), reconocida por sus compuestos de carácter adhesivo (Serna et al., 2023).

En este contexto surge Bio-Pots, un proyecto experimental que propone la elaboración de macetas degradables a partir de una mezcla de estos materiales. La investigación integra metodologías de evaluación de

biodegradabilidad. Asimismo, se incorporan técnicas gravimétricas para analizar la absorción de agua y estudios de cinética de degradación, con el fin de evaluar el desempeño estático y dinámico de las macetas a lo largo de un ciclo de cultivo completo.

No solo se trata de la creación de macetas, sino de la integración de dos recursos naturales abundantes, más allá de ser una solución ecológica, Bio-Pots representa una nueva opción de entender la relación entre el diseño sustentable y el aprovechamiento responsable de los recursos naturales, fomentando la economía circular.

Las fibras de lirio, a menudo consideradas maleza invasora y los rizomas de plátano, subproducto agrícola comúnmente desaprovechado, se integran como materias primas, dándoles un nuevo valor dentro de una cadena de producción amigable con el entorno.

No solo busca reducir el impacto ambiental negativo que se asocia al uso de plásticos, sino también aportar beneficios directos al crecimiento de las plantas. Las macetas Bio-Pots) están diseñadas para ser sembradas directamente en la tierra sin necesidad de trasplante, ya que, al entrar en contacto con el suelo, comienzan su proceso de descomposición natural. Durante este proceso, liberan nutrientes que enriquecen la tierra, actuando como abono orgánico y favoreciendo el desarrollo saludable de las plantas.

La trascendencia de este trabajo va más allá del plano técnico, pues se inserta en un modelo de economía circular que transforma problemáticas ambientales en oportunidades de desarrollo local. De este modo, Bio-Pots busca ofrecer una alternativa real a las macetas plásticas, al mismo tiempo que promueve la valorización de biomásas

acuáticas y agrícolas subutilizadas, que contribuye tanto a la reducción de la contaminación plástica como al manejo sostenible de especies invasoras.

Metodología

La metodología que se utilizó es cuantitativa (Kotronoulas y Papadopoulou, 2023), de tipo experimental (Pérez et al., 2025), longitudinal (Daza et al., 2003). El procedimiento tiene las siguientes fases que asegura una ejecución sistemática y organizada del proyecto:

Fase 1: Acopio y preparación de materiales para el desarrollo del producto.

Se realizó la recolección de rizomas de plátano (*Musa paradisiaca*), cuajilote (*Parmentiera aculeata*) y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en la localidad. Concluida esta actividad, los materiales fueron sometidos a limpieza manual y mecánica con la finalidad de eliminar impurezas. El secado se efectuó de manera natural (exposición solar) o asistida (horno de convección) según condiciones climáticas. Al fin, se efectuó el triturado hasta obtener partículas finas y homogéneas.

Fase 2: Formulación y pruebas de mezcla.

Se desarrollaron tres formulaciones experimentales de los materiales seleccionados, incorporando aglutinantes naturales. Cada mezcla fue evaluada en cuanto a textura, cohesión y moldeabilidad, con la finalidad de comprobar su idoneidad para el moldeo y la resistencia estructural del producto final.

Fase 3: Fabricación de prototipos.

Para el desarrollo de los prototipos de macetas, pasaron por un proceso de moldeo manual y mediante presión ejercida en moldes reutilizables. Subsiguientemente, se sometieron a un proceso de secado y curado durante varios días bajo condiciones ambientales controladas, con la finalidad de

garantizar su estabilidad física y evitar deformaciones para obtener un producto competitivo.

Fase 4: Evaluación de prototipos.

Una vez concluida la fase 3, se procedió a realizar pruebas de resistencia física (peso, presión y caída), aunado a pruebas de biodegradabilidad, a través del entierro parcial en tierra húmeda durante un período específico. Además de evaluar su impacto en el crecimiento de plantas en paralelo con macetas plásticas convencionales. Adicionalmente, se realizaron encuestas de aceptación a consumidores y viveristas locales para medir la percepción de funcionalidad, estética y sostenibilidad del producto.

Fase 5: Análisis y documentación.

Con base en las etapas anteriores, los resultados se sistematizaron mediante registros fotográficos, tablas comparativas y análisis estadísticos descriptivos e inferenciales. Con base en ello, se definieron las mezclas y procesos con mayor viabilidad técnica y económica.

Fase 6. Evaluación económica del producto.

Se realizó un análisis de costos de producción, contemplando materiales, procesos, mano de obra y durabilidad, para estimar la rentabilidad y factibilidad comercial de la propuesta como alternativa sostenible frente a productos plásticos tradicionales.

Resultados.

Durante la fase experimental se prepararon tres formulaciones distintas de macetas biodegradables con materiales vegetales locales: rizoma de plátano, corteza de cuajilote y lirio acuático. Cada materia prima fue secada en horno entre 100 y 150 °C durante 2 horas con 11 minutos, asegurando la eliminación de humedad y mejorando la molienda posterior. Después del secado, los materiales fueron triturados hasta obtener una harina vegetal uniforme. Inicialmente se consideró utilizar el jugo del rizoma como adhesivo natural, pero al no poseer las características de viscosidad necesarias, se decidió complementar con goma xantana, un polímero natural que mejora la cohesión y plasticidad de la mezcla. Las proporciones utilizadas se definieron con base en el diseño preliminar, considerando las propiedades de las fibras y la viabilidad de las mezclas, estas se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Composición de las formulaciones.

Fórmula	Harina de Rizoma (g)	Harina de Cuajilote (g)	Harina de Lirio (g)	Agua de Rizoma (mL)	Goma Xantana (g)
F1	30	15	5	130	5
F2	35	10	5	90	4
F3	40	5	5	120	4

Fuente: Elaboración propia.

Cada mezcla se homogeneizó durante al menos 10 minutos para asegurar una distribución uniforme de las partículas y del aglutinante. Se buscó obtener una masa firme, maleable y libre de aire. Posteriormente, se evaluó la moldeabilidad, cohesión y

apariencia tras el secado, determinando cuál presentaba mejor comportamiento estructural y estético (Figura 1). La fórmula F1, con una relación equilibrada entre los tres componentes, mostró ser la más estable y funcional.



Figura 1. Mezclado de las diferentes formulaciones.

Fuente: Elaboración propia.

Moldeo y secado de prototipos

Las mezclas se vertieron en moldes reutilizables de diámetros 6, 10 y 15 cm. Se aplicó presión manual uniforme para eliminar burbujas de aire y garantizar una compactación adecuada (figura 3). Los moldes se recubrieron con una película plástica para evitar la adherencia de las piezas al desmoldear. El secado se realizó en dos etapas: inicialmente las macetas permanecieron 4 a 5 días a temperatura ambiente (25–30 °C), permitiendo la evaporación gradual del exceso de agua, sin

presentar deformaciones, grietas o contracciones bruscas, este período de tiempo se determinó con base en pruebas preliminares. Posteriormente las macetas fueron sometidas en horno de convección a 60 °C por 24 horas para obtener una estructura firme y estable, esto permitió la eliminación de la humedad residual teniendo como resultado una estructura firme y estable. Este proceso combidado de tiempo y temperatura obedece a la necesidad de equilibrio en la reducción controlada de la humedad, estabilidad estructural y eficiencia operativa del proceso.



Figura 2. Secado y desmolde las macetas.

Fuente: propia. Imágenes obtenidas del proceso de elaboración.

Una vez obtenidos los prototipos, se sometieron a una serie de pruebas para evaluar su comportamiento físico, mecánico y biológico. Las pruebas incluyeron resistencia a la compresión, absorción de

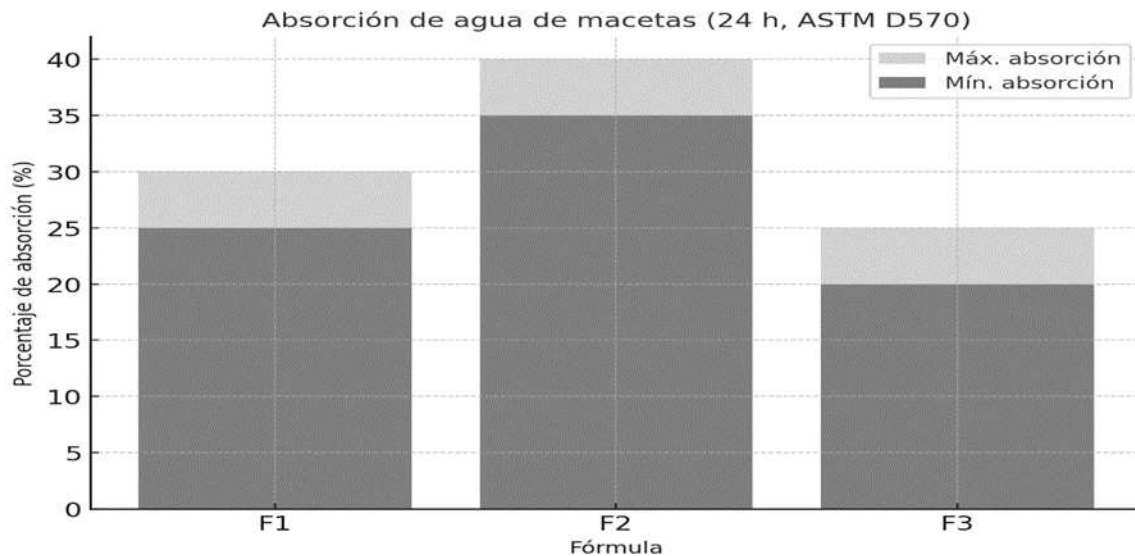
agua, biodegradación en suelo, desempeño vegetal y compatibilidad con sistemas de riego por goteo. Cada prueba se realizó tres veces ($n = 3$) expresándose los resultados como promedio \pm desviación estándar.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de resistencia mecánica/ compresión.

Fórmula	Descripción del resultado	Rango de resistencia (kg)	Observación
F1	La maceta soportó una carga progresiva entre 0.9 y 1.1 kg antes de presentar deformación.	0.9 – 1.1	Muestra una excelente cohesión estructural y alta rigidez.
F2	Resistió entre 0.7 y 0.8 kg; se observó ligera flexibilidad, atribuida al mayor contenido de rizoma.	0.7 – 0.8	Presenta buena resistencia, sin embargo presentó menor rigidez que F1.
F3	Soportó entre 0.6 y 0.7 kg, con una estructura más porosa y ligera.	0.6 – 0.7	Muestra menor resistencia mecánica en comparación con las otras formulaciones.

Con base en las pruebas de carga progresiva aplicada en la parte superior de las macetas consistió observar diferencias significativas en la resistencia entre las formulaciones (tabla 2). Esto significa que la presencia del

cuajilote en la mezcla incrementa la rigidez y cohesión estructural del material, debido a su alto contenido de fibras lignocelulósicas, las cuales mejoran la integridad mecánica del prototipo.

**Figura 3.** Comparativa de absorción de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo una metodología similar a la norma ASTM D570, la cual describe el método estándar para determinar la absorción de agua en materiales. Por lo tanto, las macetas se sumergieron completamente en agua durante 24 horas a temperatura ambiente. La fórmula F1 presentó una absorción del 25–30 %, manteniendo su forma y estructura. F2 alcanzó un 35–40 %,

lo que indica una mayor capacidad de retención de agua, pero también mayor riesgo de deformación. F3 absorbió entre 20–25 %, demostrando menor retención hídrica pero mejor drenaje (figura 3). El comportamiento equilibrado de F1 la convierte en la más adecuada para el uso agrícola, permitiendo humedad estable sin ablandamiento.

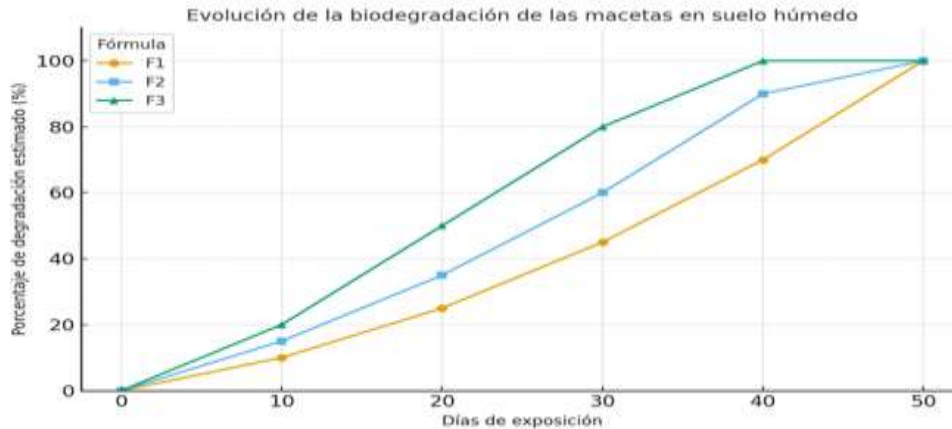


Figura 4. Evolución de la biodegradación de las 3 formulaciones.

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar la degradación natural, las macetas se enterraron parcialmente en suelo húmedo con humedad controlada (60–70 % de capacidad de campo). Durante las primeras dos semanas se observó ablandamiento superficial; a los 20–25 días comenzó la desintegración parcial de las paredes. Alrededor del día 40, las macetas F3 mostraron una pérdida estructural casi

completa, mientras que F1 conservó integridad suficiente hasta los 50 días (figura 4). Estos resultados demuestran que la biodegradación ocurre de manera progresiva, permitiendo que la maceta cumpla su función durante el ciclo de cultivo y luego se integre completamente al suelo sin dejar residuos contaminantes manteniendo un equilibrio entre la resistencia y biodegradabilidad.

Tabla 3. Comparativa de crecimiento de las plántulas de acuerdo con el tipo de maceta.

Formulación	Observaciones durante el crecimiento	Condición del sustrato	Resultado final (30 días)
F1	Crecimiento continuo, raíces blancas y saludables.	Humedad adecuada.	Altura promedio equivalente al 95% del control plástico. Existe alta compatibilidad con el desarrollo vegetal.
F2	Crecimiento normal con leves signos de exceso de humedad en la base.	Leve exceso de humedad.	Existe un desarrollo ligeramente inferior al control; posible ajuste de drenaje recomendado.
F3	Crecimiento estable, con tendencia del sustrato a secarse más rápido.	Sustrato seco con mayor frecuencia.	Existe un desarrollo menor al control debido a rápida pérdida de humedad.
Control (maceta plástica)	Crecimiento óptimo, sin alteraciones visibles.	Humedad controlada y estable.	Referencia del 100% del crecimiento promedio.

Fuente: Elaboración propia.

Se sembraron plántulas en cada formulación y se comparó su desarrollo con un control en maceta plástica. Las plántulas en F1 mostraron un crecimiento constante, raíces blancas y saludables, y una humedad adecuada en el sustrato. En F2 se observó un leve exceso de humedad cerca de la base,

mientras que en F3 el sustrato tendía a secarse más rápido. Después de 30 días de observación, las plantas en F1 alcanzaron una altura promedio equivalente al 95% del control plástico, demostrando que las Bio-Pots son compatibles con el desarrollo vegetal (Tabla 3).

Tabla 4. Tabla comparativa de las macetas aplicando riego por goteo.

Formulación	Comportamiento estructural durante el riego por goteo	Drenaje y retención hídrica	Conclusión específica
F1	Mantuvo su forma estructural durante los 14 días; ligera suavización superficial.	Buena retención de humedad con drenaje equilibrado.	Muestra el mejor equilibrio entre retención hídrica y estabilidad estructural.
F2	Ablandamiento en la base tras varios días de riego continuo.	Retención de agua ligeramente excesiva.	Requiere ajustes: mejorar la resistencia en condiciones de humedad prolongada.
F3	Conservó excelente drenaje sin fisuras ni deformaciones.	Drenaje rápido, menor retención hídrica.	Ofrece alta permeabilidad, pero puede secarse más rápido.
Conclusión general	Todas las formulaciones resistieron el sistema de riego por goteo.	—	Las tres son compatibles con riego por goteo, destacando F1 como la más balanceada.

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de simular condiciones reales de vivero, las macetas se sometieron a riego por goteo continuo durante 14 días, con una tasa de 4 L/h por 30 minutos diarios (tabla 4). La fórmula F1 mantuvo su forma estructural durante todo el ensayo, presentando únicamente una ligera suavización superficial. F2 mostró ablandamiento en la

base tras varios días de riego constante, mientras que F3 conservó excelente drenaje sin fisuras. Se concluye que las tres formulaciones son compatibles con sistemas de riego por goteo, siendo F1 la que ofrece el mejor equilibrio entre retención hídrica y estabilidad.

Tabla 5. Análisis estadístico ANOVA.

Variable	Suma de cuadrados	GL	F	Significancia (p)
Resistencia mecánica	0.042	2	5.87	0.03
Absorción de agua	68.4	2	7.91	0.02
Biodegradación	14.1	2	4.23	0.04

+ Los resultados fueron estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

Cada prueba se realizó por triplicado ($n = 3$) para garantizar la confiabilidad de los resultados. Los datos se analizaron estadísticamente mediante ANOVA con un nivel de significancia del 5%, confirmando diferencias significativas entre las

formulaciones en resistencia mecánica y absorción de agua. El promedio y la desviación estándar de cada ensayo permitieron establecer conclusiones precisas sobre el comportamiento de las mezclas (tabla 5).

Tabla 6. Resultados experimentales y análisis comparativo de Bio-Pots.

Sección / Aspecto evaluado	Descripción de resultados principales	Interpretación técnica
Propiedades físicas y mecánicas	F1 presentó una resistencia promedio de 1.0 kg y absorción de agua de 25–30 %, adecuada para viveros. F2 y F3 mostraron valores menores.	El equilibrio entre rizoma, cuajilote y lirio determina la resistencia estructural del biocompuesto.
Biodegradabilidad en suelo	La descomposición inició a los 14 días; pérdida de forma y color al día 25; desintegración casi completa entre 40 y 50 días.	La biodegradación controlada permite mantener funcionalidad durante el cultivo y posterior incorporación al suelo.
Desempeño vegetal	Plántulas en Bio-Pots F1 mostraron crecimiento uniforme y vigoroso, similar al control plástico. Las raíces atravesaron las paredes sin dificultad.	La aireación y retención hídrica equilibradas favorecen el desarrollo vegetal y el trasplante directo sin daño radicular.

Fuente: Elaboración propia.

Las macetas elaboradas con la fórmula F1 mostraron una resistencia promedio de 1.0 kg y una absorción de agua de 25–30 %, lo cual las hace adecuadas para el manejo en viveros y trasplantes. F2 y F3 mostraron propiedades ligeramente inferiores, confirmando que el equilibrio entre rizoma, cuajilote y lirio influye directamente en la resistencia. Los resultados concuerdan con estudios de Elashry et al., (2025), quienes reportaron mejoras similares en biocompuestos vegetales reforzados. La descomposición inició a partir de la segunda semana de entierro parcial, con pérdida de forma y color visible al día 25. Entre los días 40 y 50 se observó la desintegración casi completa de las paredes (tabla 6). La biodegradación

controlada garantiza que las macetas mantengan funcionalidad durante el cultivo y luego se integren al suelo, aportando materia orgánica. Este comportamiento es comparable con los resultados obtenidos por Harahap et al. (2025) en biocompuestos agrícolas biodegradables.

Las plántulas cultivadas en Bio-Pots F1 mostraron desarrollo uniforme y vigoroso, con tasas de crecimiento y masa equivalentes a las observadas en macetas plásticas. Las raíces atravesaron las paredes sin dificultad, lo que facilita el trasplante directo sin daño radicular. La adecuada aireación y retención de humedad permitieron un entorno favorable para el crecimiento vegetal.

Tabla 6. Evaluación de mercado, económica y sostenibilidad artesanal del proyecto.

Aspecto / Categoría	Detalle / Descripción	Indicador / Dato	Valor / Resultado	Interpretación / Valoración
Tipo y modelo de empresa	MIPYME artesanal ecológica / Economía circular y solidaria	-	Producción local y manual / Reutiliza residuos vegetales	Sostenible / Circular
Producto segmento	Macetas biodegradables (Bio-Pots) / Mercado objetivo	Especies: lirio, cuajilote, rizoma, goma xatan / % estimado	Producción natural / 70 % viveros, 30 % retail	Natural / En crecimiento
Costos producción	Materias primas + mano de obra + energía / Producción anual	MXN / unidades	\$75,700 mensuales, \$908,400 anuales / 200,000 unidades	Controlado / Eficiente
Costos y precios unitarios	Costo y precio por unidad / Utilidad unitaria	MXN	\$4.50 costo / \$6.50 precio / \$2.00 utilidad	Competitivo / Aceptado / Rentable

Aspecto / Categoría	Detalle / Descripción	Indicador / Dato	Valor / Resultado	Interpretación / Valoración
Rentabilidad anual y margen	Utilidad anual / Margen de rentabilidad	MXN / %	\$400,000 / 30–35 %	Positiva / Alto
Punto de equilibrio retorno	Volumen para cubrir costos / Recuperación inversión	unidades / meses	136,000 / 20	Alcanzable / Factible
Rentabilidad proyectada	TIR (3 años)	%	32%	Viable
Impacto ambiental social	Reducción de residuos plásticos / Empleos generados	t/año / personas	2 toneladas aprox. / 6 directos + 10 indirectos	Muy alto / Inclusivo
Impacto económico ODS	Mejora ingresos comunitarios / ODS vinculados	% / -	+25% / 8, 12, 13	Positivo / Alineado
Sostenibilidad escalabilidad	Ambiental / Viabilidad económica / Rentabilidad social / Escalabilidad	-	Alta / Alta / Alta / Media (cooperativa)	Excelente / Positiva / Solidaria / Adaptable
Riesgo financiero	Dependencia de insumos externos	-	Bajo	Controlado

Fuente: Elaboración propia.

Con base en el análisis financiero de Bio-Pots, una Micro, pequeña y mediana empresa (MiPyMe) ecológica, circular y solidaria, que opera bajo principios de sostenibilidad ambiental, economía circular priorizando la reutilización a través de un proceso artesanal dedicada a la producción de macetas biodegradables, muestra una rentabilidad sólida y sostenible. Esto se reflejó al presentar un margen neto del 30.8%, con una utilidad de \$2.00 MXN por cada maceta vendida. Este margen refleja una estructura de costos eficiente, que facilita que la operación sea competitiva en el mercado sin afectar la calidad del producto. Si se proyecta una rentabilidad anual de \$400,000 MXN con un margen del 30–35 %, se comprueba que el modelo de negocio es financieramente viable y capaz de generar beneficios constantes.

Con relación al punto de equilibrio se ubica en 136,000 unidades, mientras que la producción anual estimada es de 200,000 unidades, indica que la empresa supera con holgura el volumen necesario para cubrir costos, minimizando el riesgo financiero y

asegurando beneficios desde etapas anticipadas de operación. Se recupera la inversión en 20 meses, al proporcionar una eficiencia en la gestión del capital y liquidez del proyecto. Aunado a una tasa de retorno (TIR) del 32% estimada a tres años. Se visualiza una gestión de costos controlada, que sugiere vigilancia para hacer frente a posibles fluctuaciones, al demostrar un riesgo financiero mínimo.

En conjunto, los indicadores financieros de Bio-Pots evidencian que el modelo de negocio no solo es rentable, sino que se caracteriza por ser escalable y sostenible, alineando a los objetivos económicos con impactos sociales y ambientales positivos. La proyección demuestra que la integración de criterios de economía circular y producción artesanal puede generar beneficios financieros sólidos sin comprometer la sostenibilidad, ofreciendo un ejemplo de cómo las MiPyMes pueden combinar rentabilidad, responsabilidad social y cuidado ambiental.

Análisis y discusiones

El estudio muestra una innovación relevante con relación al uso de macetas convencionales, al proponer un producto totalmente sustentable, amigable con el medio ambiente y a un precio accesible, que permite generar un modelo de negocio sostenible.

El mercado nacional e internacional proporciona una amplia variedad de macetas y semilleros biodegradables elaborados a partir de diversas fibras naturales. En México destacan marcas como Agrorganicos, Suculentas Dzityá, Agroguza y Hortaflor, con precios que oscilan entre los \$8 MXN por unidad (en productos de fibra de madera o turba) hasta paquetes más grandes de \$400–700 MXN, según volumen y tamaño. En el ámbito internacional dominan empresas como Fertil Pot, DocuPots, Biodegradable-Pots, Jiffy, Kokopelli, Compostify y Blüm, que utilizan materiales como fibra de coco, jute, celulosa, pulpa vegetal o turba. Según el fabricante, tamaño y cantidad, los precios importados pueden variar desde alrededor de \$39 MXN por maceta individual hasta \$600 MXN o más por paquetes de más de 100 piezas. Estas macetas tienen tiempos de biodegradación que oscilan entre 3 y 4 meses. En contraste, la propuesta desarrollada en este estudio incorpora fibras alternativas provenientes de lirio acuático, cuajilote y rizoma de plátano, alcanzando un costo aproximado de \$6.50 MXN por unidad, representando una alternativa accesible para el consumidor sin comprometer la funcionalidad del producto.

Autores como (Zwawi, 2021; Ahmed et al., 2025) probaron que la incorporación de fibras naturales contribuye a una mejor cohesión estructural, al aumentar la rigidez y la resistencia. Esto se logró comprobar con la formulación F1 que logró alcanzar una resistencia y compresión efectiva en el

desarrollo de macetas biodegradables. Se destaca el hallazgo que al incorporar de una mayor proporción de fibras naturales favorece la rigidez y resistencia mecánica en el producto propuesto.

Con relación a la absorción de agua, los hallazgos destacan que la formulación F1, logró un balance positivo entre retención hídrica y estabilidad estructural. Comparativamente los trabajos desarrollados por (Anirudh et al., 2021) y (Mohammed et al., 2023) y mostraron absorciones de ~41 % y ~15 - 17, respectivamente, De este modo, las formulaciones F1 y F3 de este estudio muestran valores de absorción menores, lo que indica buena impermeabilidad relativa.

La literatura científica también previene que altos niveles de absorción de agua pueden arriesgar las propiedades mecánicas con el tiempo, al considerar que las fibras naturales son hidrófilas y ocasionan hinchamiento, microfisuras o deterioro de la interfase fibra-matriz (Nurazzi et al., 2021; Ahmed et al., 2025). Por lo tanto, con base en los resultados de estos autores se visualiza la necesidad de desarrollar ensayos enfocados en la durabilidad bajo ciclos húmedo-seco y de envejecimiento hidrotérmico, con la meta de evaluar el comportamiento a futuro.

El ensayo de biodegradación de Bio-Pots indica que la formulación F3 se desintegró casi por completo alrededor del día 40. Mientras que F1 mantuvo integridad estructural hasta aproximadamente el día 50 bajo condiciones de enterramiento parcial en suelo húmedo (60-70 % de capacidad de campo). Bio-Pots es estable durante el cultivo, degradándose después de cumplir su labor con un equilibrio funcional.

Estudios comparables señalan que en residuos vegetales alcanzan degradaciones de 82% en 60 días (Elfaleh et al., 2023), lo cual depende de la composición, porosidad,

adhesión fibra-matriz y ambiente microbiológico (Syduzzaman et al., 2020). Además, se ha comprobado que la existencia de raíces activas y microbiota en la rizosfera acelera la biodegradación de materiales lignocelulósicos (Behera et al., 2021).

En este sentido, la formulación F1 sostiene un buen desempeño para usos de vivero, sin embargo para aplicaciones con ciclos de cultivo más largos podría requerirse una mayor vida útil antes de desintegrarse, o bien ajustar la formulación para prolongar la integridad. Por ello es necesario cuantificar la pérdida de masa residual y confrontarla con estándares de biodegradabilidad reconocidos (ASTM D5988 o ISO 14855) para lograr una medida cuantitativa estándar (Syduzzaman et al., 2020).

Con base en el ensayo de plántulas sembradas en la maceta (con la formulación F1) alcanzaron aproximadamente el 95% de la altura promedio de las macetas plásticas de control al cabo de 30 días, con raíces blancas y saludables y humedad adecuada. En contraste, F2 mostró exceso de humedad en la base y F3 presentó un sustrato que tendía a secarse con mayor rapidez, lo que afectó el crecimiento confirmando, para Bio-Pots, no solo se atribuyen propiedades mecánicas, sino también la retención hídrica/drenaje, permeabilidad, y que las raíces puedan atravesar la pared de la maceta sin complicaciones (Elfaleh et al., 2023).

Por lo tanto, el crecimiento en F1 al ser cercano al del control propone que la maceta biodegradable no inhibe el desarrollo inicial de la plántula y favorece potencialmente el trasplante directo sin impacto negativo radicular. Coincidiendo con Pratibha et al., (2024) quienes consideran que los criterios clave para estos contenedores son favorecer la transición al suelo sin generar barrera para las raíces.

Se considera que la formulación F1 muestra características de resistencia mecánica relevante, de absorción moderada de agua, degradabilidad controlada y compatibilidad vegetal (Zwawi et al., 2021; Manafi., 2022). Por lo que se propone como una opción viable frente a la competencia de macetas plásticas tradicionales, aunado a la tendencia hacia biocomposites sostenibles y economía circular en horticultura.

Dentro de las áreas de oportunidad que se atenderán en corto plazo por parte de Bio-Pots se encuentra la realización de pruebas en Kg de carga, con la finalidad de lograr comparaciones directas con estudios que reportan tensiones de 20-30 MPa o más (Behera et al., 2021; Syduzzaman et al., 2020).

Es necesario aplicar tratamientos de superficie de fibras (mercerización, salinización) para compararlos con estudios como los de (Akindoyo et al., 2019; Fuentes et al., 2023) que han demostrado mejoras significativamente la adhesión fibra-matriz, reduciendo la absorción de agua y aumentando la resistencia mecánica. Aunado a el ensayo de absorción de agua que se limitó a 24 h de inmersión; faltando evaluaciones de los efectos de envejecimiento o ciclos repetidos de humedad, siendo importante ya que pueden evolucionar mecánicamente bajo estas condiciones (Nurazzi et al., 2021).

Como parte de la sostenibilidad ambiental del producto se debe realizar un análisis de ciclo de vida (LCA) o huella ambiental para compararlo explícitamente con macetas plásticas u otras alternativas biodegradables (Volk et al., 2024). Además de escalar el estudio hacia producción piloto y ensayo de campo en viveros comerciales, con evaluación económica real, logística de producción, durabilidad en condiciones reales de vivero y trasplante al suelo, para

determinar el comportamiento del producto en campo y económicamente.

En general, al realizar la comparación con estudios de Anirudh et al. (2024) y Elashry et al. (2025), el uso de materiales locales como rizoma de plátano, lirio acuático y corteza de cuajilote ofrece una alternativa sustentable y de bajo costo frente a los biocompuestos industriales. El trabajo demuestra que es posible obtener macetas biodegradables con propiedades físicas adecuadas sin necesidad de polímeros sintéticos. Además, el aprovechamiento de residuos vegetales locales reduce la contaminación, promueve la economía circular y contribuye al manejo ambiental responsable.

Conclusión

La formulación F1 de macetas biodegradables, con base en harina de rizoma de plátano, harina de corteza de cuajilote y harina de lirio acuático, aglutinadas con goma xantana, mostró un desempeño sobresaliente en términos de resistencia estructural, absorción de agua moderada, degradabilidad controlada y compatibilidad vegetal. Al contrastarse con la literatura reciente sobre biocomposites para viveros y contenedores biodegradables (Behera et al., 2021; Darma et al., 2022; Zwawi et al., 2021), se observa que los valores obtenidos están en un rango competitivo y aportan evidencia de viabilidad técnica. Aun así, para alcanzar un desempeño mecánico más alto, reducir absorción de agua al nivel de los mejores estudios y asegurar una aplicación comercial escalable, es necesario avanzar en tratamiento de fibras, estandarización de métodos, durabilidad a largo plazo y análisis de ciclo de vida.

El estudio demuestra la viabilidad técnica, económica y ambiental de producir macetas biodegradables a través de la utilización de materiales vegetales locales —lirio acuático,

rizoma de plátano y corteza de cuajilote— presentándose como una alternativa sustentable y a un costo inferior con relación a los contenedores plásticos y las macetas biodegradables industriales que oferta el mercado.

Entre las formulaciones evaluadas, F1 se destacó por integrar un equilibrio sobresaliente entre resistencia mecánica, absorción moderada de agua, estabilidad estructural durante el ciclo de cultivo y una degradación controlada posterior a su uso. Coincidiendo con la literatura científica actual, que destaca el papel de las fibras naturales en la mejora de la cohesión y rigidez de biocompuestos hortícolas.

De igual manera, la coincidencia vegetal observada en F1, con un crecimiento del 95% respecto al control plástico, demuestra que el material no impide el desarrollo inicial de la plántula y posibilita el trasplante directo sin afectar la integridad radicular. Con relación a la parte económica, el costo de \$6.50 MXN por unidad coloca a Bio-Pots como una opción competitiva en comparación con productos nacionales e internacionales, con potencial dentro de los modelos de negocio con base en la economía circular y sostenibilidad.

Los hallazgos más importantes del estudio incluyen: la identificación de F1 como formulación óptima. La demostración de que fibras locales permiten fabricar macetas sin necesidad de polímeros sintéticos. Evidencia de un comportamiento de biodegradación comparable con biocompuestos lignocelulósicos reportados en la literatura. Valorización de residuos vegetales con potencial para reducir impactos ambientales. Por último, viabilidad económica del producto en mercados emergentes.

Se identifican áreas de oportunidad orientadas a fortalecer el desarrollo de Bio-

Pots, tales como la realización de ensayos mecánicos en kilogramos de carga, pruebas de envejecimiento bajo ciclos húmedo-seco, evaluación de tratamientos de superficie para mejorar la adhesión fibra-matriz y la ejecución de un análisis de ciclo de vida (LCA). En conjunto, los resultados consolidan a Bio-Pots como una innovación importante para la horticultura sostenible y como un insumo potencialmente escalable en contextos productivos reales.

Agradecimientos

Se agradece al Tecnológico Nacional de México, campus Tierra Blanca, por el apoyo brindado para la realización de esta investigación.

Referencias

- Agarwal, B., Bañares-Cañizares, R., Saliba, F., Ballester, M.P., Rodica-Tomescu, D., Martín, D., Stadlbauer, V., Wright, G., Sheikh, M., Morgan, C., Alzola, C., Lavin, P., Green, D., Kumar, R., Sacleux, S.C., Schlcher, G., Koball, S., Tudor, A, Minten, J., Domenech, G y Jalan, R. (2023). Randomized, controlled clinical trial of the DIALIVE liver dialysis device versus standard of care in patients with acute-on- chronic liver failure. *Journal of hepatology*. 79. 79-92.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37268222/>
- Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Heim, H. P., Feldmann, M., & Mariatti, M. (2019). Oxidative induction and performance of oil palm fiber reinforced polypropylene composites — effects of coupling agent and UV stabilizer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105577.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105577>
- Anirudh, M.K., Nandhu-Lal, A.M., Harikrishnan, M.P., Jose, J., Thasim, J., Warriar, A.s., Venkatesh, R., Prakash-Vaddevolu, U.B., Kothakota, A. (2024). Sustainable seedling pots: Development and characterisation of banana waste and natural fibre-reinforced composites for horticultural applications. *Revista international journal of biological macromolecules*. 270. 132070.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132070>
- Ahmed, R., Hasan-Manik, K., Nath, A., Rahman-Shohag, J., Jannat-Mim, J y Hossain, N. (2025). Recent advances in sustainable natural fiber composites: Environmental benefits, applications, and future prospects. *Materials today sustainability*. 32. 101220.
<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101220>
- Behera, A.K., Avancha, S., Das, N y Adhikari, B. (2021). Mechanical and biodegradation analysis of fully biodegradable eco-friendly natural fiber reinforced sapling pot. *Revista Inspiring plastics professionals*.
<https://doi.org/10.1002/pc.26024>
- Casso-Gaspar, J.M., Acevedo-Sandoval, O.A y Martinez-Hernández, S. (2022). Contaminación del suelo por microplásticos: panorama actual Soil contamination by microplastics: current panorama. *Revista Páidi Boletín científico de ciencias básicas e Ingenierías del ICBI*. 10 (19). 55-60.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.188>
- Darma-Jaya, J., Elma, M., Sunardi, S y Nugroho, A. (2022). Physical and Mechanical Properties of Biodegradable Pot Derived from Oil

- Palm Empty Fruit Bunch and Sodium Alginate. *Revista Environmental Sciences*. 65. e22210789. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210789>
- Daza, J.F., Mitani, A.A., Alibhai, S.M.H., Smith, P.M., Kennedy, E.G., Shulman, M.A, Myles, P.S y Wijeyesundera, D. N. (2024). Joint models inform the longitudinal assessment of patient-reported outcomes in clinical trials: a simulation study and secondary analysis of the restrictive Vs. liberal fluid therapy for major abdominal surgery (RELIEF) randomized controlled trial. *Journal of Clinical Epidemiol.* 176. 111553 <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2024.111553>.
- Drexler K, Boles E. Cultural Eutrophication Impacts on New River in Northern Belize: A Community Capitals Assessment. *Adv Environ Eng Res* 2024; 5(3): 017; <http://dx.doi.org/10.21926/aeer.2403017>
- Elashry, M.E., Khater. E.G y Ali, S.A. (2025). Biodegradable biocomposite pots reinforced with mercerized sugarcane bagasse for sustainable agriculture and plastic waste mitigation. *Revista scientific reports*. 17199. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01419-y>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Narsi, M y Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Revista results in engineering*. 19. 101271. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- Fuentes, R.A., Berthe, J.A., Barbosa, S.E y Castillo, L.A. (2021). Development of biodegradable pots from different agroindustrial wastes and byproducts. *Revista Sustainable materials and technologies*. 30. E00338. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00338>
- Harahap, H., Nasution, H., Manurung, R., Yustira, A., & Rashid, A. A. (2025). Physical characteristics of biodegradable pots from empty fruit bunches (EFB) and sawdust waste as planting media. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jmcwm.2025.04.005>
- Hofmann, T., Ghoshal, S., Tufenkji, N. *et al.* Plastics can be used more sustainably in agriculture. *Commun Earth Environ* 4, 332 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00982-4>
- Iglesias, A., Cancela, A, Soler-Baena, A y Sánchez, A. (2023). Characterization of Cellulose Derived from Invasive Alien Species Plant Waste for Application in the Papermaking Industry: Physic-Mechanical, Optical, and Chemical Property Analysis. *Revista Appl. Sci*. 13(20), 11568; <https://doi.org/10.3390/app132011568>
- Kotronoulas, G y Papadopoulou, C. (2023). A Primer to Experimental and Nonexperimental Quantitative Research: The Example Case of Tobacco-Related Mouth Cancer. *Resvita Seminars in Oncology Nursing* . 39. 151396. <https://doi.org/10.1016/j.soncn.2023.151396>

- Lakane, C.P., Adams, J.B. & Lemley, D.A. Drivers of seasonal water hyacinth dynamics in permanently eutrophic estuarine waters. *Biol Invasions* 26, 2831–2849 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10530-024-03347-w>
- Macêdo, R.L., Haubrock, P.J., Klipper, G., Fernández, R.D., Leroy, B., Angulo, E., Carneiro, L., Musseau, C.L., Rocha, O y Cuthbert, R.N. (2024). The economic costs of invasive aquatic plants: A global perspective on ecology and management gaps. *Revista science of the total environment*. 908. 168217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168217>
- Mansilla-García, A. V., Cuarón, A. & Vázquez, L.-B. (2024). *Characterizing plastic pollution on beaches of Cozumel Island, Mexico: abundance, distribution, and influencing factors*. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 16(2), 51-69. <https://doi.org/10.15359/revmar.16-2.3>
- Manafi-Dastjerdi, M., Ebrahimi.Nik,M., Rohani, A y Lawson, S. (2022). Production of biodegradable pots from cattle manure and woodwaste: effects of natural binders on mechanical performances and biodegradability. *Environmental Science and Pollution Research*. 29. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17235-6>
- Mohammed, M., Mohamad-Jawad, A.J., Mohammed, A.M., oleiwi, JK., Adam, T., Osman, A.F., Dahham, O.S., Betar, B.O., Gopinath, S.C.B y Jaafar, M. (2023). Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites. *Revista Polymer Testing*. 124. 108083. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108083>
- Nurazzi, M. N., Asyraf, M. R. M., Norrrahim, M. N. F., et al. (2021). Hydrophilic behavior and degradation of natural fiber polymer composites: A review. *Polymers*, 13(5), 814. <https://doi.org/10.3390/polym13050814>
- Öztep, Ggüngören-Madenoglu, T., Özdemir, G., Isik, E., Serez, H., Kabay, N y Yüksel, M. (2023). Optimization and microbial community analysis for anaerobic digestion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) with waste sludge at different solid contents and temperatures. *Environmental Technology & Innovation*. 32. 103395. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103395>
- Palacios Anzules, Ítalo del Carmen, & Moreno Castro, Denny William. (2022). *Contaminación ambiental*. *RECIMUNDO*, 6(2), 93–103. [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(2\).abr.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103)
- Pérez-Moneo, B., Esparza Olcina, M. J., Flores Villard, S., Blanco Rodríguez, C., Martínez Rubio, M. V., & Molina Arias, M. (2025). Methodology for research and scientific publication in pediatrics. Main methodological designs. *Anales de Pediatría*, 103(3). <https://doi.org/10.1016/j.anpede.2025.503933>
- Pratibha, Saha, S y Hariprasad, P. (2022). Paddy straw-based biodegradable horticultural pots: An integrated greener approach to reduce plastic waste, valorize paddy straw and improve plant health. *Journal of cleaner*

- production. 337. 130588.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130588>
- Peña-Murillo, S.E., López Galán, J.E. (2020). Desarrollo sostenible y oportunidad de aprendizaje de las biorrefinerías: Una alternativa de la biomasa. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 26. 401-413.
<https://www.redalyc.org/journal/280/28064146026/html>
- Syduzzaman, M., Al Faruque, M. A., Bilisik, K., & Naebe, M. (2020). Plant-Based Natural Fibre Reinforced Composites: A Review on Fabrication, Properties and Applications. *Coatings*, 10 (10), 973.
<https://doi.org/10.3390/coatings10100973>
- Serna-Jiménez, J.A., Siles-López, J.A., Martín -Santos, A., Chica-Pérez, A.F. (2023). Exploiting waste derived from Musaspp. processing: Banana and plantain. Review: Exploiting waste derived from Musa spp. processing. 1046-1067.
<https://doi.org/10.1002/bbb.2475>
- Teixeira SC, de Oliveira TV, de Fátima Ferreira Soares N, Raymundo-Pereira PA. Sustainable and biodegradable polymer packaging: Perspectives, challenges, and opportunities. *Food Chem.* 2025 Apr 1;470:142652.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142652>
- Volk, R., Schröter, M., Saeidi, N., Steffl, S., Javadian, A., Hebel, D.E y Schultmann, F. (2024). Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. *Resources, Conservation & Recycling*. 205. 107579.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107579>
- Wang, K., Wang, F., Yu, Y., Yang S., Han Y y Yao, H. (2025). Microplastics and soil microbiomes. *Revista BMC Biol.* 23, 273 (2025).
<https://doi.org/10.1186/s12915-025-02387-5>
- Yamini, P., Rokkala, S., Rishika, S., Rani, P.M y Kumar, R.A. (2023). Mechanical properties of natural fiber reinforced composite structure. *Materialstoday proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.547>
- Yanez-Montalvo A, Aguila B, Gómez-Acata ES, Guerrero-Jacinto M, Oseguera LA, Falcón LI, Alcocer J. (2022). Shifts in water column microbial composition associated to lakes with different trophic conditions: “Lagunas de Montebello” National Park, Chiapas, México. *PeerJ* 10:e13999
<http://doi.org/10.7717/peerj.13999>
- Zwawi. M. (2021). A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications. *Molecules*. 26 (2), 404.
<https://doi.org/10.3390/molecules26020404>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Análisis y Comparación de Algoritmos No Supervisados para Detectar Riesgo de Deserción Estudiantil **Analysis and Comparison of Unsupervised Algorithms to Detect Student Dropout Risk**

Romero-Rodríguez, W.J.G.*, **García-De-La Rosa, L.A.**, **González-Páramo, A.**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato; C.P. 36262 Guanajuato, Guanajuato, México (<https://orcid.org/0000-0002-9256-9784>, <https://orcid.org/0000-0002-0866-9783>, <https://orcid.org/0000-0002-1363-5772>).
wendolyjgrr@gmail.com*; lgarcia@itesg.edu.mx; agonzalez@itesg.edu.mx

Innovación tecnológica: Se presenta en análisis de factores y comparación de algoritmos no supervisados para detectar casos de riesgo de deserción estudiantil.

Área de aplicación industrial: En el área de educación, para apoyar al área de tutoría a detectar los estudiantes posibles a desertar de sus estudios.

Recibido: 09 enero 2025

Aceptado: 08 diciembre 2025

Abstract

The COVID-19 pandemic had significant repercussions across various sectors, with the education sector being one of the most affected. The inclusion, continuity, and timely graduation of students enrolled in higher education are among the priorities established in the General Education Law. To achieve this, strategies and measures must be implemented to promote student retention in higher education institutions. For this reason, one of the primary educational challenges is providing teachers with the necessary tools and resources to identify and refer cases involving violence, mental health concerns, and potential school dropout.

Through the application of data mining techniques in education, it has been possible to predict academic performance, create predictive models for student retention, and define behavioral profiles. A review of the literature has shown that student dropout is influenced by multiple factors, such as academic, economic, and social variables. By utilizing clustering algorithms, more detailed information and insights into dropout patterns can be obtained, supporting informed decision-making in higher education.

In this project, the indicators will be analyzed and defined to monitor the academic performance of students at the ITESG campus in two phases: first using all student features and then using only the relevant features to compare results. This dataset will be managed by an intelligent system that will

use unsupervised artificial intelligence algorithms, such as k-means and fuzzy c-means (FCM), to cluster students and detect potential dropout cases, which can then be referred to the tutoring area. The results suggest that the FCM algorithm performs best for detecting students at risk of dropping out.

The objective of this work is to analyze and compare the performance of the unsupervised algorithms for detecting students at risk of dropping out, using a dataset from the Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato and considering both the full set of features and only the most relevant ones identified through statistical tests.

Keywords: k-means, fuzzy c-means, education, school dropout, classification, artificial intelligence.

Resumen

La pandemia del virus COVID-19 tuvo repercusiones significativas en diversos sectores, siendo el sector educativo uno de los más afectados. La inclusión, continuidad y graduación oportuna de los estudiantes inscritos en la educación superior es una de las prioridades de la Ley General de Educación. Para lograr esto, deben implementarse estrategias y medidas que promuevan la retención estudiantil en las instituciones de educación superior. Por esta razón, uno de los principales desafíos educativos es proporcionar a los docentes las herramientas y recursos necesarios para identificar y canalizar casos como la violencia, la salud mental y posibles casos de abandono escolar.

Mediante la aplicación de técnicas de minería de datos en educación, se ha logrado predecir el rendimiento académico, la creación de modelos predictivos para la retención estudiantil y definir perfiles de comportamiento. Una revisión del estado del arte ha concluido que el abandono escolar está influenciado por múltiples factores, como variables académicas, económicas y sociales. Al utilizar algoritmos de agrupamiento, se puede obtener información más detallada y conocimientos sobre los patrones de abandono, lo que permite tomar decisiones informadas en los niveles de educación superior.

En este proyecto, se analizarán y definirán los indicadores para monitorear el rendimiento escolar de los estudiantes del campus universitario ITESG en dos fases: primero con todas las características de los estudiantes y luego solo con las características relevantes para comparar sus resultados. Este conjunto de datos será gestionado por un Sistema Inteligente que hará uso de algoritmos de clasificación no supervisados de Inteligencia Artificial, como K-Means y Fuzzy C-Means (FCM), para agrupar y detectar posibles casos de abandono escolar y poder canalizarlos al área de tutoría. Concluyendo que el algoritmo FCM es el mejor para este trabajo al detectar casos en riesgo de deserción escolar.

El objetivo de este trabajo fue analizar y comparar el desempeño de los algoritmos no supervisados anteriormente mencionados, para detectar estudiantes en riesgo de deserción escolar, empleando un conjunto de datos del Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato y considerando tanto todas sus características como solo las más relevantes identificadas mediante pruebas estadísticas.

Palabras clave: K-means, Fuzzy c-means, Educación, Deserción escolar, Clasificación, Inteligencia artificial.

1. Introducción

El impacto que tuvo la pandemia por COVID-19 repercutió en diferentes sectores, particularmente al sector educativo. La inclusión, continuidad y egreso oportuno de los estudiantes inscritos en Educación Superior, es una de las prioridades en la Ley General de Educación, por lo que se deben establecer estrategias y medidas para promover su permanencia en instituciones de educación superior [1].

La deserción estudiantil a nivel superior es un desafío global para las instituciones educativas, en el cual sería deseable identificar de manera temprana los casos de estudiantes que se encuentran en riesgo de abandonar sus estudios para poder implementar estrategias para intervenir de manera más efectiva, de tal manera que se puedan aumentar las tasas de retención y así mejorar los índices académicos.

Es de suma importancia el apoyar proyectos académicos que atiendan las causas del abandono escolar, las cuales incrementaron a causa de la pandemia por COVID-19, el cual es uno de los objetivos principales del Programa de Expansión de la Educación Media Superior y Superior, el cual se justifica de acuerdo con el Programa Sectorial de Educación 2020-2024 [2].

De acuerdo con las estadísticas que reporta la Secretaría de Educación Pública (SEP) para Guanajuato, de cada 100 estudiantes que iniciaron el ciclo escolar 2001-2022, solo 19 egresaron de educación de nivel superior. Siendo 5 menos que en el resto del país y 27 menos que en la Ciudad de México [2]. Es por ello, que uno de los retos educativos es que los docentes cuenten con las herramientas y recursos para detectar y canalizar casos de violencia, salud mental y posibles casos de deserción escolar.

Por medio de la aplicación de técnicas de minería de datos en la educación, se ha podido predecir el desempeño, creación de modelos predictivos para la permanencia escolar y definir perfiles de comportamiento. De acuerdo con el estado del arte, se ha concluido que la deserción escolar no depende de un solo factor y se pueden aplicar diversos algoritmos para obtener más información respecto deserción a nivel superior [3]. La minería de datos educativos (Educational Data Mining) es un campo emergente, en el que se aplican técnicas de inteligencia artificial para explorar y analizar el rendimiento escolar en estudiantes, teniendo como objetivo principal el prevenir la deserción escolar, retroalimentar a docentes y tutores para la búsqueda de mejoras en el proceso de aprendizaje [4].

Los algoritmos de clasificación no supervisada forman parte de las técnicas de Inteligencia Artificial que están siendo ampliamente usados como herramientas innovadoras para el monitoreo de casos de riesgo. A diferencia de los algoritmos de clasificación supervisados, estos no requieren de etiquetas previamente asignadas, lo que los convierte en ideales para explorar y detectar patrones ocultos que permitan segmentar a los estudiantes en grupos según sus características. Algunas escuelas han aplicado clusterización y técnicas de minería de datos para analizar el rendimiento académico de estudiantes universitarios, tal como [5], en el cual se usó análisis de clusterización para analizar el rendimiento de los estudiantes y poder distinguir las categorías de cada alumno. Al cual agregaron el uso de un algoritmo K-means, combinado con un modelo determinista para analizar el desempeño de los estudiantes [6].

En el trabajo [7], se han aplicado algoritmos de clusterización para detectar seis grupos de estudiantes, de acuerdo con el análisis de los patrones de interacción.

En el estado del arte se han identificado que para el análisis de rendimiento escolar de estudiantes se han usado algoritmos de clasificación supervisada [8] [9] y no supervisada [10] [11] [5] [12], con buenos resultados en la minería de datos educativos, con el objetivo de analizar los datos educativos y usa los datos existentes, mejorando la calidad de la educación y proceso de aprendizaje.

En este estudio se tiene como objetivo analizar y definir los indicadores clave para monitorear el desempeño escolar de los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato (ITESG), los cuales posteriormente serán gestionados mediante un Sistema Inteligente que implementará algoritmos de clasificación no supervisada para identificar casos potenciales de deserción escolar y canalizarlos al área de tutoría correspondiente. Se propuso el uso de los algoritmos K-Means y Fuzzy C-Means (FCM), los cuales serán comparados en términos de las métricas de evaluación para determinar cuál resulta más adecuado en este análisis. Los resultados de este análisis son importantes para la prevención temprano de estudios en riesgo de deserción y al diseño de estrategias de intervención enfocadas en la retención estudiantil a nivel superior. Por tanto, el objetivo principal de esta investigación es comparar el rendimiento de los algoritmos K-Means y Fuzzy C-Means en la detección de patrones de deserción estudiantil en dos fases de análisis, una con todas las variables y otra con las características más significativas, con el fin de determinar cuál ofrece una clasificación más precisa y útil para la toma de decisiones institucionales.

Marco Teórico

a. Factores asociados a la deserción escolar

La deserción escolar ha sido identificada por un conjunto de diversos factores que pueden afectar el rendimiento y continuidad académica, los cuales se pueden agrupar en categorías como académicos, económicos, sociales e incluso psicológicos. A partir del estado del arte se pudieron encontrar diversos trabajos en los cuales se han aplicado diversas técnicas de clasificación supervisada y no supervisada, con el objetivo de categorizar a los estudiantes en base a su rendimiento.

Como se ha mencionado anteriormente, algunas escuelas han usado técnicas de agrupamiento y minería de datos para categorizar el rendimiento académico de los estudiantes. En algunos de ellos se han aplicado Árboles de decisión, para clasificar a los estudiantes en riesgo de deserción, tal como en [13] en el cual se obtuvo un modelo en el cual la cantidad de asignaturas aprobadas fue una variable significativa por encima de las demás, así como se concluyó que la calificación del examen de admisión fue la menos significativa de todos los demás factores.

En [14] se hace uso de árboles de inferencia condicional para realizar una clasificación binaria con el objetivo de predecir si un alumno se graduará o terminará por desertar de sus estudios, cuyos factores fueron las calificaciones de escuela secundaria y satisfacción del estudiante. En [15] también se hace uso de árboles de decisión en conjunto con regresiones logísticas, donde los factores a tomar en cuenta fueron el género, origen (alemán o no alemán), número de intentos para examen, semestre, resultado de examen, promedio de exámenes reprobados y promedio de exámenes aprobados.

[16] estudió qué características podrían ayudar a predecir el abandono escolar de los estudiantes, usando técnicas como redes neuronales y regresión logística, concluyendo que los factores más significativos fueron la

cantidad de créditos acumulados, cantidad de cursos reprobados y número de actividades realizadas en la plataforma Moodle.

De acuerdo con [17], se pudo predecir de manera correcta el 91% de los estudiantes desertores y no desertores, tomando en cuenta 10 variables y teniendo información de estudiantes de todos los semestres. En este estudio se aplicaron algoritmos como Bosques Aleatorios y Máquinas de Soporte Vectorial, en el cual los factores usados fueron género, residencia actual, apoyos

económicos, cursos aprobados y cursos que necesita para graduarse.

A continuación, en la Tabla 1 se presenta un resumen de los factores más comunes que pueden ayudar a predecir la deserción escolar de acuerdo con las referencias consultadas, en la cual se puede ver el número de coincidencias que tiene cada factor y el nivel de impacto para poder tener una idea de qué factores pueden ser lo más significativos y así poder elegir estos para nuestras pruebas.

Tabla 1. Factores más comunes de deserción escolar.

Clasificación	Factor	Número de coincidencias	Nivel de impacto
Académicos	Resultados en prueba de admisión	7	Alto
	Promedio de notas	12	Alto
	Cantidad de asignaturas aprobadas	5	Medio
	Porcentaje de asistencia a clases	1	Bajo
	Grado de satisfacción con la carrera elegida	3	Medio
Económicos	Apoyos económicos por Institución	1	Bajo
	Ingreso familiar	2	Bajo
Sociales	Zona de residencia	6	Medio
	Estado Civil	1	Bajo
	Género	1	Bajo
	Sexo	2	Bajo
	Edad	4	Medio
	Máximo nivel educativo alcanzado por los padres	3	Medio

Aunque los factores psicológicos presentan menor incidencia cuantitativa en las referencias analizadas, se incluyeron variables relacionadas como “problemas personales” y “salud mental”, dado su impacto comprobado en la retención estudiantil [3] [15], lo cual permite una visión más integral del fenómeno. Cabe destacar que, dentro de la Coordinación de Tutorías del ITESG, se aplican encuestas a los alumnos que han desertado, y estos factores han sido de los más señalados como causas asociadas a la deserción escolar.

b. Algoritmo K-Means

El algoritmo K-Means es uno de los más populares para resolver problemas de clusterización. Este algoritmo intenta agrupar n elementos en subgrupos k definidos por el usuario, donde k debe ser menor o igual que n . La agrupación se realiza de manera iterativa, minimizando la suma de las distancias al cuadrado y los centroides de los elementos hasta que ya no haya cambios en la estructura o se alcance un umbral [18].

Este algoritmo se puede resumir en el siguiente pseudocódigo:

1. Se define el número de clústeres o grupos K en los cuales desea clasificar los datos.
2. Se eligen puntos iniciales para los centroides K , los cuales pueden ser elegidos de manera aleatoria o mediante métodos como K-means++.
3. Se mide la distancia de cada punto en el conjunto de datos hacia cada centroide y se le asigna el clúster más cercano.
4. Se recalcula el centroide de cada clúster como el promedio de las coordenadas de los puntos asignados a ese clúster.
5. Repetir pasos 3 y 4 hasta que los centroides ya no cambien significativamente o se haya alcanzado el máximo número de iteraciones.

c. Algoritmo Fuzzy C-Means

El algoritmo Fuzzy C-Means (FCM), es una técnica de clusterización usada en problemas en los cuales los datos no tienen etiquetas asignadas [19]. Su principal diferencia a comparación del algoritmo K-Means es que, para este algoritmo, un dato puede pertenecer a más de un clúster de manera simultánea, teniendo diferentes grados de pertenencia que se representan por valores en un rango entre 0 y 1. Esto lo convierte en un algoritmo popular para modelar incertidumbre y manejar datos difusos.

Este algoritmo se puede resumir de la siguiente manera [20]:

Entradas:

- u_{ij} es el grado de pertenencia de x_i al clúster j .
- x_i es el i -ésimo de los datos medidos de la d -dimensión.
- c_j es el centro de la dimensión d del clúster.

1. Inicializar aleatoriamente u_{ij}
2. Calcular los centros de los clústeres, usando la ecuación:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m}$$

3. Actualizar la nueva matriz de partición difusa, usando la ecuación:

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}$$

4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta que se cumpla el criterio de parada.

Aunque los algoritmos supervisados como árboles de decisión o redes neuronales han demostrado dar buenos resultados en la predicción para datos, requieren conjuntos de datos etiquetados. En contraste, los algoritmos no supervisados como K-Means y Fuzzy C-Means permiten identificar patrones

y agrupaciones sin conocimiento previo, resultando ideal en contextos donde la información de deserción escolar no está completamente definida o se requiere descubrir grupos potenciales de riesgo.

2. Metodología

La metodología se basa en aplicar técnicas de minería de datos y análisis mediante algoritmos de clasificación no supervisada. El procesamiento y análisis de datos se realizaron con Python versión 3.11.3 utilizando las librerías pandas, scikit-learn, numpy y matplotlib para la manipulación, normalización, visualización y evaluación de resultados.

El algoritmo Fuzzy C-Means fue implementado con la librería fcmeans y la selección de características se realizó mediante la función χ^2 del módulo `sklearn.feature_selection`.

a. Dataset y características

Se realizó la recolección de los datos académicos históricos del 2019 al 2023 de estudiantes del campus Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato (ITESG) de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, entre los cuales se tienen datos como sus calificaciones, asistencia, cursos aprobados y no aprobados, datos socioeconómicos, nivel educativo de los padres o tutores, información institucional como si el estudiante cuenta con apoyos financieros o si ha sido canalizado a alguna tutoría psicológica o académica y además los diversos motivos como problemas personales, salud mental, falta de apoyo económico, administrativos, etc. que les hicieron desertar. Esto se hizo con la finalidad de poder analizar los datos necesarios que pudieran ayudar a medir el desempeño escolar y su posterior categorización de deserción escolar. Para ello se usaron entrevistas y mesas de trabajo en colaboración con el área de tutorías del

campus, el cual proporcionó datos de 150 estudiantes entre los cuales 50 desertaron, 50 fueron graduados y 50 actualmente están inscritos, pero que se consideran irregulares.

En base al estado del arte y a las bases de datos institucionales del campus consultado, se identificaron los atributos relevantes que pudieran ayudar a generar indicadores para detectar posibles casos de riesgo de deserción en alumnos del ITESG, entre los cuales se encuentran factores externos e internos como:

- Residencia actual (distancia en kilómetros a la ciudad del campus).
- Nivel académico máximo alcanzado por padres (No cuenta o Primaria, Secundaria o Preparatoria, Estudios Superiores o Estudios Posgrado).
- Problemas personales (Si / No)
- Hijos (Si / No)
- Trabaja (Si / No)
- Estado civil (Libre / En compromiso)
- Embarazo (Si / No)
- Problemas de salud mental (Si / No)
- Adicciones (Si / No)
- Enfermedad diagnosticada (Si / No)
- Apoyo económico institucional (Si / No)
- Asignaturas en repetición (Número)
- Asignaturas en especial (Número)
- Asistencia a clases (0 – 10, donde 0 significa poca asistencia y 10 es buena asistencia)
- Promedio actual (Número)
- Semestre actual (Número)

b) Preprocesamiento de los datos

Fue necesario transformar las variables categóricas, como estado civil y problemas personales, entre otras, en valores numéricos. Para ello se asignaron valores binarios para representar la presencia o ausencia de cada categoría, donde el 0 indica ausencia o “No” y el 1 representa presencia o “Si”. En el caso del nivel académico máximo alcanzado por los padres, se asignó 0 cuando el valor correspondía a “No cuenta o Primaria”, 1 para “Secundaria o Preparatoria” y 2 para “Estudios Superiores o Posgrado”. Para el factor de Estado civil, se asignó un 0 para el valor de “Libre” y un 1 en caso de “En compromiso”. Esta transformación permitió que tanto K-Means como Fuzzy C-Means pudieran procesar correctamente los datos sin sesgos asociados a la naturaleza cualitativa de algunas variables.

Además, durante el preprocesamiento se revisó la base de datos para identificar los valores nulos o inconsistentes. Los registros con valores faltantes en variables clave fueron eliminados y se verificó la presencia de valores atípicos mediante el método de rango intercuartílico. Los valores que distorsionaban significativamente las distribuciones se ajustaron o eliminaron. Esto garantizó la consistencia y calidad del conjunto de datos antes de aplicar los algoritmos.

Para garantizar que los algoritmos de clasificación no supervisada traten todas las características con la misma importancia, sin importar las unidades o rangos en que se encuentran, es importante el escalado o normalización. Esto mejorará la convergencia de K-Means y Fuzzy C-Means. En este trabajo se aplicó la técnica de Normalización StandardScaler de Python [21] [22], la cual convierte los datos para tener:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde:

- z es el valor escalado o estandarizado de la característica x .
- x es el valor actual de la característica x .
- μ es la media de la característica x en el conjunto de datos.
- σ es la desviación estándar de la característica estandarizada en el conjunto de datos.

Para aplicar los algoritmos de clasificación no supervisada como K-Means y Fuzzy C-Means (FCM), se cuenta con un conjunto de datos que contienen 16 características que representan a cada estudiante y su etiqueta de riesgo alto, medio o bajo de deserción. Cabe mencionar que, aunque en este análisis se están implementando algoritmos de clasificación no supervisada, las etiquetas sólo se tomarán en cuenta para la generación de las matrices de confusión y así poder evaluar el desempeño del algoritmo para agrupar.

En la primera fase del análisis, con el fin de identificar los indicadores o factores que permitan detectar casos de riesgo de deserción en los estudiantes de nivel superior, se usaron las 16 características completas para aplicar los algoritmos de clasificación. De esta forma se pudo evaluar el desempeño de ambos algoritmos para agrupar a los estudiantes en 3 clústeres. Estos 3 grupos representan a los estudiantes que se encuentran en un riesgo alto de desertar, los que están en peligro medio de deserción y los que se predice que serán graduados sin inconvenientes. Las características elegidas para iniciar la primera fase fueron seleccionadas de acuerdo a su impacto en el estado del arte y en los datos recopilados por

ITESG, algunos de los originales como Resultados en prueba de admisión.

Para la segunda fase del análisis, se ha aplicado la Prueba de Chi-cuadrado, la cual es una técnica de selección de las características más relevantes de un conjunto de datos que influyen en su clusterización [21]. Esta herramienta es importante para reducir el

número de dimensiones de los datos, la cual hace un filtrado de las características o factores que obtuvieron un valor $p < 0.05$ y se muestran en la Tabla 2, las cuales se consideran como las características más relevantes y las cuales se usarán para la aplicación de los algoritmos de clusterización.

Tabla 2. Características más relevantes aplicando Prueba de Chi-cuadrado con base en datos de ITESG.

Característica	Valor Chi ²	P-Valor
Residencia Actual	9.363636	0.009262158
Nivel Académicos padres	52.354839	0
Trabaja	17.705882	0.000142961
Casado	29.485149	0.000000396
Asignaturas en repetición	136.721429	0
Asignaturas en especial	137.550173	0
Asistencia	1538.59214	0
Promedio Actual	3059.14825	0

De acuerdo con la prueba Chi-cuadrado, se filtraron 8 características identificadas como relevantes y se usaron para reentrenar los algoritmos K-Means y Fuzzy C-Means (FCM) y poder realizar su posterior comparación con los resultados obtenidos entre la Fase 1 y 2 del análisis, con esto se puede concluir si se mejora la agrupación de los datos con las características relevantes. En la Tabla 3 se puede observar la comparación de los factores de deserción identificados en el estado del arte consultado y los factores que se tienen recopilados en los datos recopilados por los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, a los cuales se les aplicó la Prueba Chi-Cuadrada para categorizar el nivel de impacto que pueden tener en la clusterización si se toman en cuenta. Hay algunos factores que no se encontraron en las referencias consultadas, pero que en las pruebas realizadas denotan tener un impacto alto para agrupar los datos y con los cuales, si se cuenta en el conjunto de datos recopilado, tal como la cantidad de

asignaturas en repetición, cantidad de asignaturas en especial, cuenta con trabajo o no. Existen otros factores como semestre actual y cuenta con hijos o no, que se vieron como factores de nivel de impacto medio y que no se habían tomado en cuenta en el estado del arte, lo cual podría ser una aportación como factores en la detección de estudiantes en riesgo de deserción.

El análisis se dividió en dos fases complementarias:

- Fase 1: Se incluyen las 16 características para observar el comportamiento general del modelo.
- Fase 2: Se aplicó la prueba de Chi-cuadrado para seleccionar las variables más relevantes en la agrupación de clústeres.

De esta manera, el objetivo fue determinar si un menor número de características relevantes puede mejorar la precisión y coherencia de los grupos formados.

Tabla 3. Comparación de factores de deserción estado del arte y Datos recopilados con base ITESG.

Clasificación	Factor	Nivel de impacto	
		Estado del arte	Datos recopilados
Académicos	Resultados en prueba de admisión	Alto	N/A
	Promedio de notas	Alto	Alto
	Cantidad de asignaturas aprobadas	Medio	N/A
	Cantidad de asignaturas en repetición	N/A	Alto
	Cantidad de asignaturas en especial	N/A	Alto
	Porcentaje de asistencia a clases	Bajo	Alto
	Grado de satisfacción con la carrera elegida	Medio	N/A
	Semestre Actual	N/A	Medio
Económicos	Apoyos económicos por Institución	Bajo	Medio
	Ingreso familiar	Bajo	N/A
	Trabaja	N/A	Alto
Sociales	Zona de residencia	Medio	Alto
	Estado Civil	Bajo	Alto
	Género	Bajo	N/A
	Edad	Medio	N/A
	Máximo nivel educativo alcanzado por los padres	Medio	Alto
	Hijos	N/A	Medio
	Embarazo	N/A	Bajo
	Problemas de Salud mental	N/A	Bajo
	Enfermedad Diagnosticada	N/A	Bajo
	Problemas personales	N/A	Bajo
	Adicciones	N/A	Bajo

Cabe mencionar que algunas variables utilizadas en el estado del arte, como el grado de satisfacción con la carrera, ingreso familiar, género o edad, no fueron incluidas en el presente análisis debido a que dichos datos no se encontraban disponibles en la base institucional proporcionada por el ITESG. Asimismo, la variable cantidad de asignaturas aprobadas fue omitida por presentar alta correlación con los factores asignaturas en repetición y asignaturas en especial, los cuales mostraron un impacto significativo en las pruebas exploratorias. Estos factores, aunque no aparecen ampliamente documentados en el estado del arte, emergieron como variables de alta influencia en el contexto local, aportando una

perspectiva complementaria a los estudios previos sobre deserción escolar.

c) *Agrupación de datos*

Para evaluar la calidad y consistencia de los clústeres generados por los algoritmos, se aplicaron diversas métricas. En primer lugar, se utilizó el coeficiente de Silhouette [24], que mide simultáneamente la cohesión interna y la separación entre grupos, indicando qué tan bien se encuentran definidos los clústeres. Además, se analizaron métricas derivadas de las matrices de confusión (exactitud, precisión, sensibilidad y F1-Score), con las cuales se pudo comparar el rendimiento de los algoritmos K-Means y Fuzzy C-Means en ambas fases del estudio.

Estas métricas ofrecen una valoración objetiva sobre la capacidad de cada modelo para clasificar correctamente los estudiantes en los diferentes niveles de riesgo de deserción.

Como se mencionó anteriormente, para elegir el número óptimo de clústeres k que pueden agrupar los datos, se aplicó la métrica de coeficiente de Silhouette. En la Figura 1, se muestra el coeficiente de Silhouette promedio para diferentes números de clústeres k , en el cual se puede ver que el valor máximo se encuentra cuando $k = 2$, lo cual indica que los datos agrupados en 2 clústeres pueden tener mayor cohesión y su separación es más significativa. Cuando $k > 5$, los clústeres no están tan definidos y algunos datos pueden ser agrupados erróneamente. Con $k = 3$, se

considera un valor aceptable de clústeres para tener una segmentación suficiente sin añadir complejidad innecesaria.

Es por ello por lo que el modelo se ha reducido a 3 categorías, las cuales se pueden interpretar como:

- Riesgo bajo: estudiantes con buen desempeño académico y que no se consideran que pudieran desertar de sus estudios.
- Riesgo medio: estudiantes que tienen indicadores de alerta que les pudiera hacer desertar de sus estudios.
- Riesgo alto: estudiantes con alto índice de desertar de sus estudios, debido a problemas académicos y/o personales.

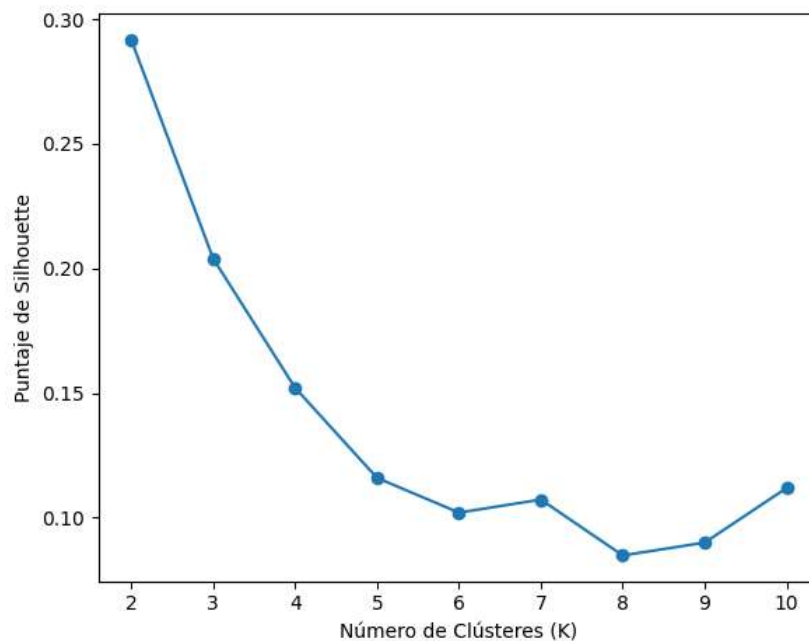


Figura 1. Coeficiente de Silhouette.

Todas las figuras y tablas son autoría propia, generadas con datos proporcionados por el área de tutoría del ITESG. El conjunto de datos utilizado tiene carácter confidencial, ya que contiene información sensible de los estudiantes y no puede ser publicado de manera abierta.

En el caso del algoritmo Fuzzy C-Means, los parámetros se definieron inicialmente conforme a los valores más reportados en el estado del arte, con el fin de mantener la comparabilidad de los resultados. Posteriormente, dichos parámetros se

ajustaron en función del rendimiento observado en las matrices de confusión, seleccionando la combinación que mostró mayor precisión y estabilidad en la clasificación. Los valores finales se reportan en la sección de Resultados.

3. Resultados

Es importante el mostrar una visualización de los clústeres generados por los algoritmos de clasificación no supervisada, esto debido a que se debe evaluar qué tan bien están agrupando los datos. Sin embargo, en este caso se están manejando datos con 16 dimensiones en la primera fase de las pruebas y 8 dimensiones en la segunda fase, por lo que es difícil interpretar gráficamente los

clústeres en su espacio inicial. Es por esto que se usa el Análisis de Componentes Principales (PCA), para reducir el número de dimensiones a 2 principales. Estas dos dimensiones permiten representar los datos en un espacio bidimensional sin que se pierda información importante para los clústeres.

En la Figura 2 se presenta la visualización de los tres clústeres generados en la primera fase mediante el algoritmo K-Means, utilizando las 16 características consideradas. En esta representación, el clúster 2 agrupa a los 77 estudiantes clasificados con bajo riesgo de deserción, el clúster 1 corresponde a los 23 estudiantes con riesgo medio de deserción, y el clúster 0 incluye a los 50 estudiantes con alto riesgo de deserción.

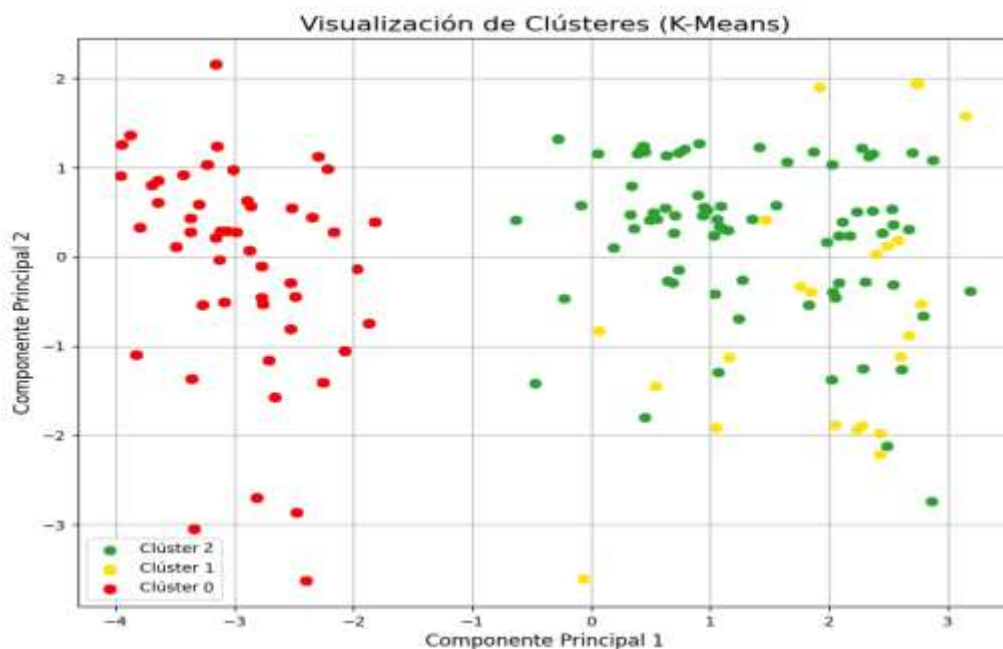


Figura 2. Visualización de Clústeres (K-Means) usando 16 características.

La Figura 3 presenta la matriz de confusión generada por la primera fase mediante el algoritmo K-Means, utilizando las 16 características consideradas, en la cual se puede observar que se clasifican de manera correcta por completo a los 50 estudiantes que estaban clasificados en riesgo alto de deserción, 7 estudiantes correctamente en

riesgo medio y 34 estudiantes correctamente clasificados en riesgo bajo de deserción. Sin embargo, los restantes fueron clasificados de manera incorrecta, 43 estudiantes de riesgo medio fueron clasificados como riesgo bajo, mientras que 16 estudiantes de riesgo bajo fueron clasificados como riesgo medio.

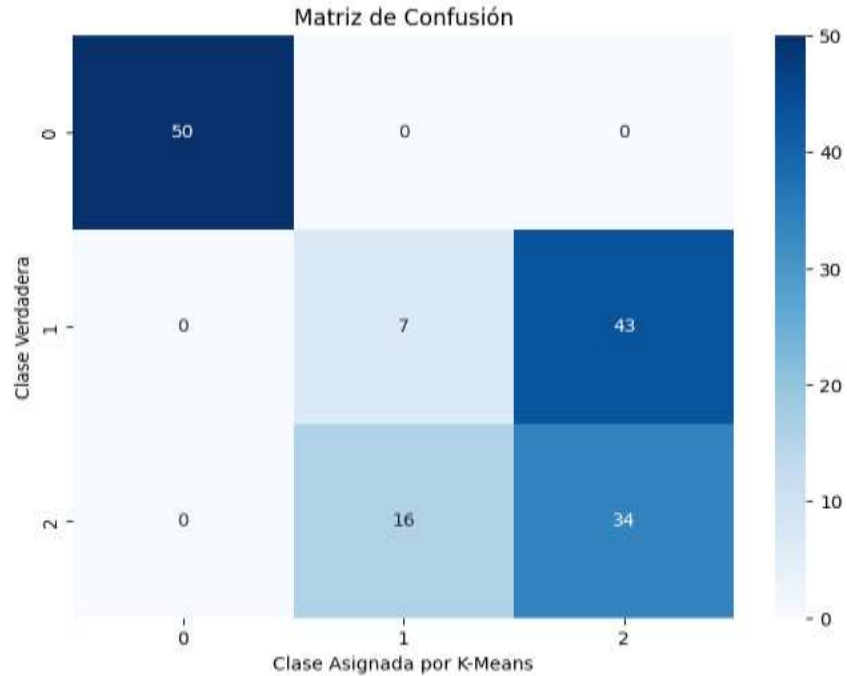


Figura 3. Matriz de confusión (K-Means) usando 16 características.

En la Figura 4 presenta la visualización de los tres clústeres generados en la primera fase mediante el algoritmo Fuzzy C-Means, utilizando las 16 características consideradas y los siguientes valores de entrada:

- $m=2$, peso de fuzzificación².
- $error=0.005$, error de tolerancia.
- 1000 iteraciones.

En esta representación, el clúster 2 agrupa a los 60 estudiantes clasificados con bajo riesgo de deserción, el clúster 1 corresponde a los 40 estudiantes con riesgo medio de deserción, y el clúster 0 incluye a los 50 estudiantes con alto riesgo de deserción.

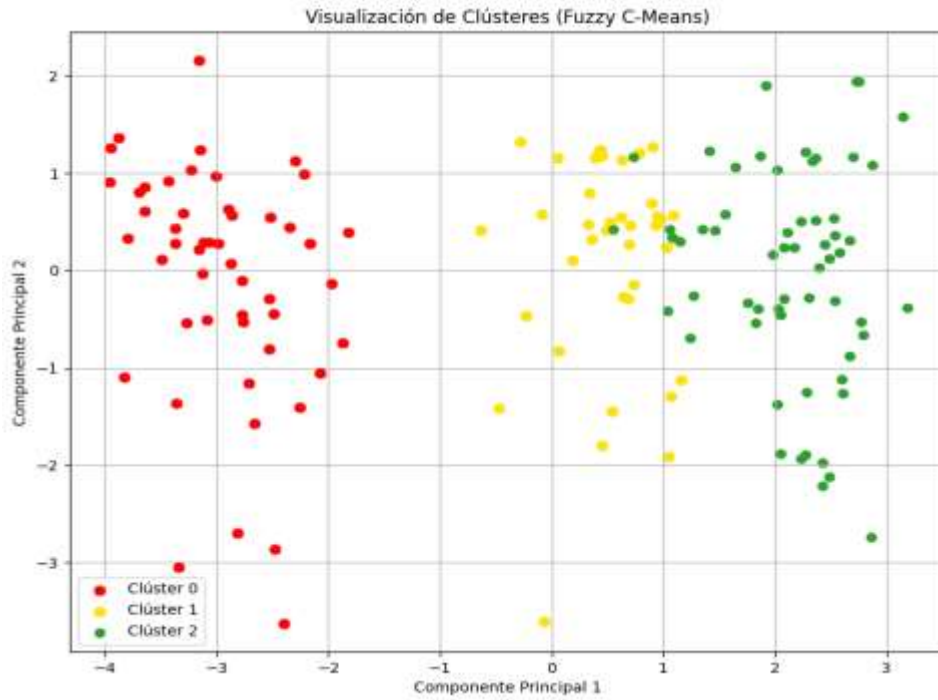


Figura 4. Visualización de Clústeres (Fuzzy C-Means) usando 16 características.

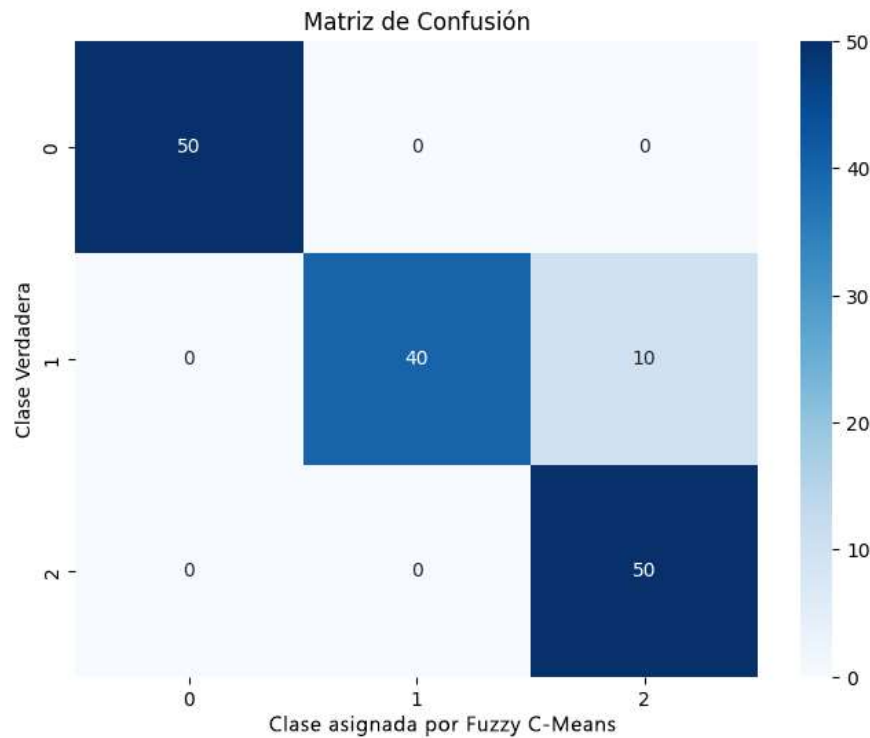


Figura 5. Matriz de confusión (Fuzzy C-Means) usando 16 características.

La Figura 5 presenta la matriz de confusión generada por la primera fase mediante el algoritmo Fuzzy C-Means, utilizando las 16

características consideradas, en la cual se puede observar que se clasifican de manera correcta por completo a los 50 estudiantes que

estaban clasificados en riesgo alto de deserción, 40 estudiantes correctamente en riesgo medio y 50 estudiantes correctamente clasificados en riesgo bajo de deserción. Sin embargo, los restantes fueron clasificados de manera incorrecta, 10 estudiantes de riesgo medio fueron clasificados como riesgo bajo.

En la Tabla 4 se presenta una comparativa de las métricas de evaluación de las matrices de confusión de ambos algoritmos usando 16 características, estas métricas son exactitud, precisión, sensibilidad y F1 Score. Claramente el algoritmo Fuzzy C-Means resultó obtener mejores valores de clasificación para la primera fase en la cual se toman en cuenta las 16 características de los datos, además que su matriz de confusión para el FCM también muestra una mejor agrupación correcta de los estudiantes en los 3 clúster.

Tabla 4. Comparativa de métricas matriz de confusión (16 características).

Métrica	K-Means	Fuzzy C-Means
Exactitud	0.61	0.93
Precisión	0.58	0.94
Sensibilidad	0.61	0.93
F1-Score	0.58	0.93

Para la segunda fase, se tomaron en cuenta las 8 características relevantes tal como se menciona en la Sección de Metodología. En la Figura 6 se presenta la visualización de los tres clústeres generados en esta segunda fase mediante el algoritmo K-Means, utilizando las 8 características relevantes. En esta representación, el clúster 2 agrupa a los 30 estudiantes clasificados con bajo riesgo de deserción, el clúster 1 corresponde a los 21 estudiantes con riesgo medio de deserción, y el clúster 0 incluye a los 99 estudiantes con alto riesgo de deserción.

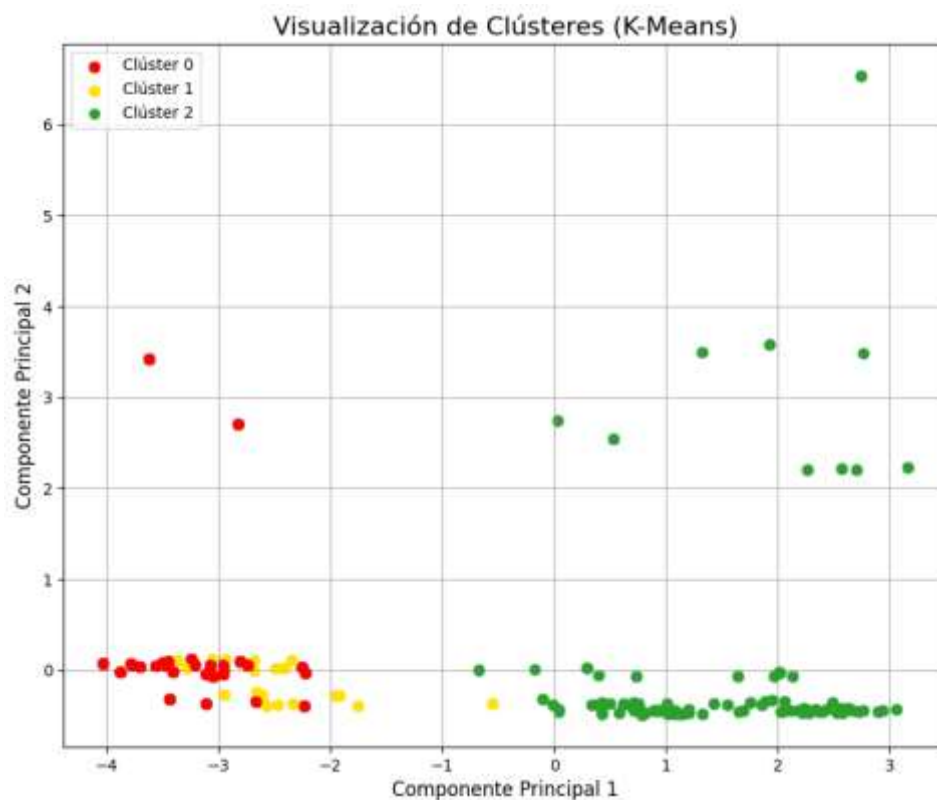


Figura 6. Visualización de Clústeres (K-Means) usando 8 características relevantes.

La Figura 7 presenta la matriz de confusión generada por la segunda fase mediante el algoritmo K-Means, utilizando las 8 características relevantes, en la cual se puede observar que se clasifican de manera correcta

por completo a los 30 estudiantes que estaban clasificados en riesgo alto de deserción, 1 estudiante correctamente en riesgo medio y 50 estudiantes correctamente clasificados en riesgo bajo de deserción.

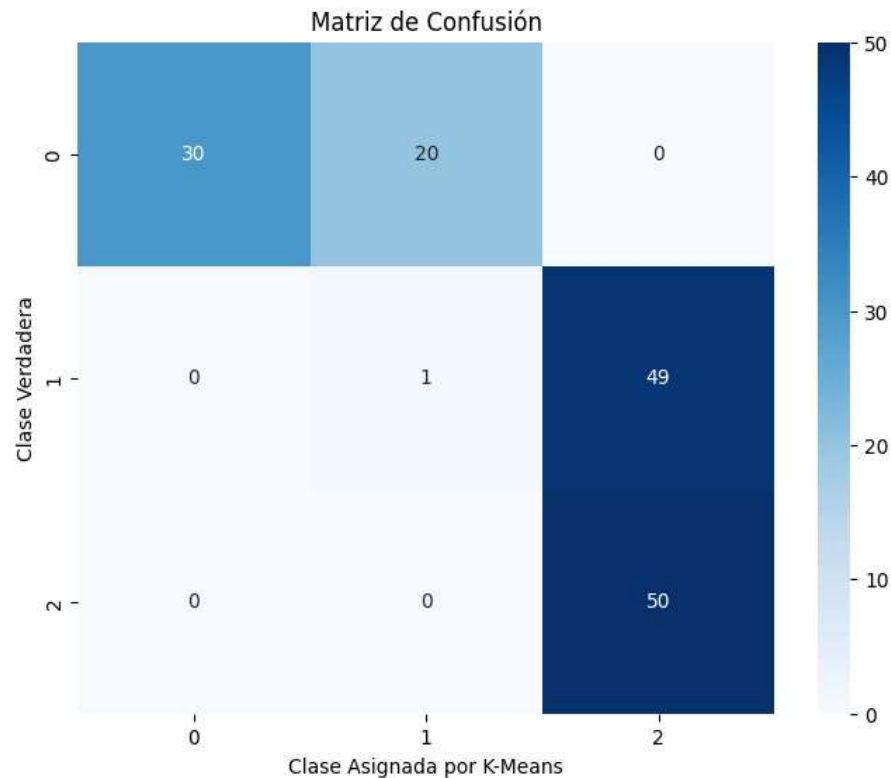


Figura 7. Matriz de confusión (K-Means) usando 8 características relevantes.

En la Figura 8 se presenta la visualización de los tres clústeres generados en la segunda fase mediante el algoritmo Fuzzy C-Means, utilizando las 8 características relevantes. En esta representación, el clúster 2 agrupa a los

51 estudiantes clasificados con bajo riesgo de deserción, el clúster 1 corresponde a los 49 estudiantes con riesgo medio de deserción, y el clúster 0 incluye a los 50 estudiantes con alto riesgo de deserción.

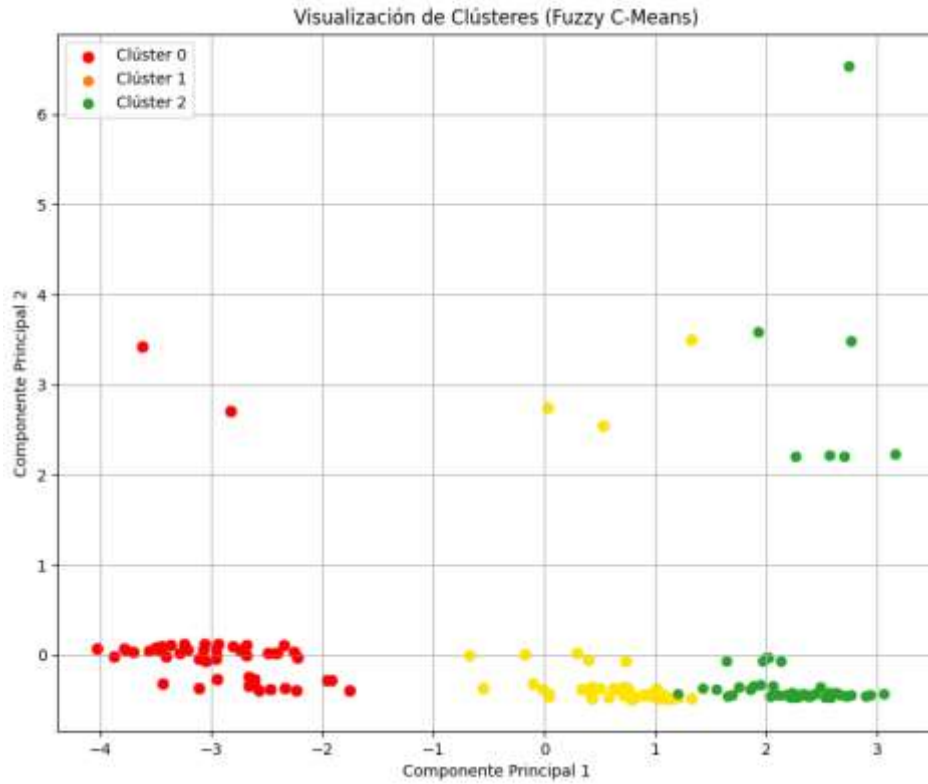


Figura 8. Visualización de Clústeres (Fuzzy C-Means) usando 8 características relevantes.

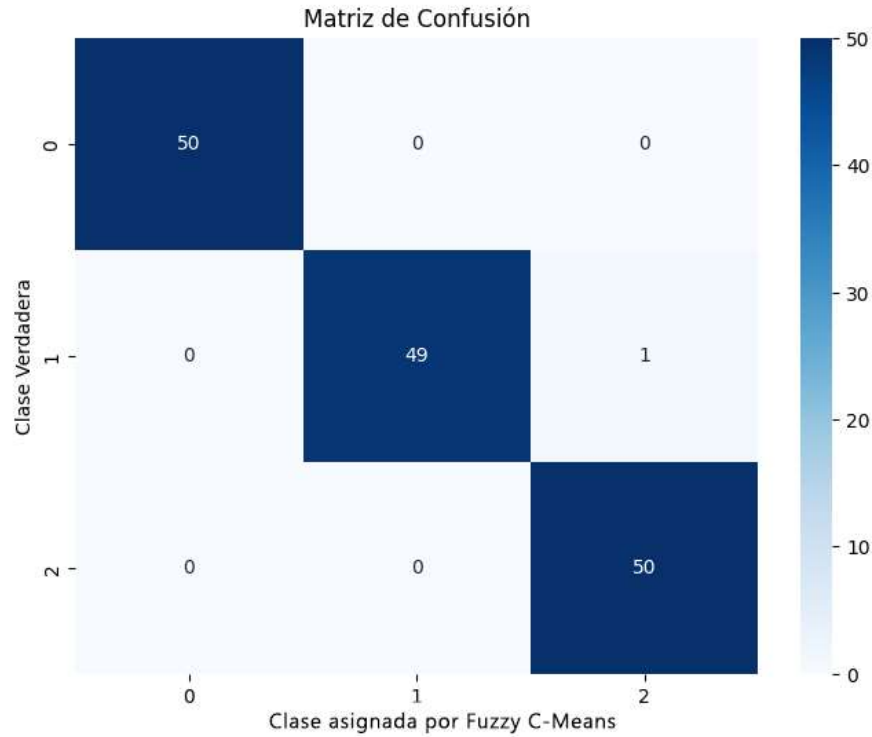


Figura 9. Matriz de confusión (Fuzzy C-Means) usando 8 características relevantes.

La Figura 9 presenta la matriz de confusión generada en la segunda fase mediante el algoritmo Fuzzy C-Means, utilizando las 8 características relevantes, en la cual se puede observar que se clasifican de manera correcta por completo a los 50 estudiantes que estaban clasificados en riesgo alto de deserción, 49 estudiantes correctamente en riesgo medio y 50 estudiantes correctamente clasificados en riesgo bajo de deserción. Esto denota que usando únicamente 8 de las 16 características contempladas inicialmente, se puede obtener una mejor categorización de los estudiantes en los niveles de riesgo de deserción.

En la Tabla 5 se presenta una comparativa de las métricas de evaluación de las matrices de confusión de ambos algoritmos usando 16 características, estas métricas son exactitud, precisión, sensibilidad y F1 Score. El algoritmo Fuzzy C-Means resultó nuevamente obtener mejores valores de clasificación a comparación del K-Means, para esta segunda fase en la cual se toman en cuenta las 8 características relevantes de los datos.

Tabla 5. Comparativa de métricas matriz de confusión (8 características).

Métrica	K-Means	Fuzzy C-Means
Exactitud	0.54	0.99
Precisión	0.52	0.99
Sensibilidad	0.54	0.99
F1-Score	0.48	0.99

Aunque los algoritmos aplicados son de tipo no supervisado, se usaron matrices de confusión únicamente con fines de evaluación externa del desempeño. Las etiquetas originales del conjunto de datos (estudiantes desertores, graduados y en riesgo) no se emplearon durante el proceso de agrupamiento, sino únicamente para comparar los resultados obtenidos y medir el grado de correspondencia entre los grupos formados por los algoritmos y las categorías

reales. Este procedimiento permite validar la calidad de los clústeres generados sin violar el principio del aprendizaje no supervisado.

Los resultados obtenidos tanto en primera y segunda fase de los algoritmos K-Means y Fuzzy C-Means (FCM), mostraron que el algoritmo Fuzzy C-Means superó en las métricas evaluadas. FCM mostró una mayor capacidad para representar la pertenencia de las muestras a los clústeres y así poder clasificar a los estudiantes en 3 grupos en función de su riesgo de deserción escolar. Si se comparan los resultados del Fuzzy C-Means usando 16 y 8 características, se concluye que tiene mejor rendimiento para clasificar los estudiantes usando únicamente las 8 características relevantes: residencia actual, nivel académico de padres, cuenta con trabajo, estado civil, cantidad de asignaturas en repetición, cantidad de asignaturas en especial, promedio de asistencia a las clases y promedio actual de calificaciones en todas las asignaturas.

Además, en el análisis del coeficiente de Silhouette confirmó que los clústeres asignados por FCM presentaron una mejor separación respecto a los generados por K-Means, lo cual lo convierte en un algoritmo de clasificación no supervisada adecuado para este análisis de deserción estudiantil para el campus ITESG y así poder generar estrategias para poder evitar el abandono escolar de los alumnos.

Con base en los resultados obtenidos, se propone que la institución fortalezca sus estrategias de intervención temprana mediante un sistema institucional de monitoreo continuo que utilice las ocho características identificadas como más relevantes para la detección de riesgo. La implementación formal del modelo basado en Fuzzy C-Means permitiría canalizar de manera oportuna a los estudiantes con riesgo medio y alto hacia programas de tutoría

académica, apoyo psicológico y acompañamiento socioeconómico. Asimismo, se recomienda integrar estos indicadores en los procesos de seguimiento docente y en la toma de decisiones del área de Tutorías, con el fin de diseñar planes personalizados de atención y reducir los índices de abandono escolar. La adopción de este enfoque sistematizado contribuiría a mejorar la retención estudiantil, optimizar los recursos institucionales y elevar la calidad educativa del ITESG.

4. Conclusiones y Trabajo a Futuro

Esta investigación tuvo como uno de sus objetivos el analizar los factores asociados a la deserción estudiantil en nivel superior en el campus ITESG, mediante la aplicación de algoritmos de clasificación no supervisada. Para ello, se recopilaron datos relevantes de los estudiantes que han desertado y actualmente se encuentran inscritos, además se consultó en el estado del arte cuáles eran los factores clave que influyen en la deserción escolar.

A través de este análisis de factores externos e internos involucrados en el desempeño escolar, se pudieron agregar más posibles indicadores que podrían ayudar a detectar a los estudiantes en riesgo de deserción escolar del ITESG. Para este análisis se dividieron las pruebas en dos fases, la primera usando 16 factores o características de los estudiantes y la segunda fase usando 8 características relevantes usando herramientas como Prueba de Chi-cuadrado.

A estos datos se les aplicó algoritmos de clasificación no supervisada como K-Means y Fuzzy C-Means, los cuales segmentaron a los estudiantes en 3 grupos de riesgo: bajo, medio y alto.

De acuerdo con las pruebas, se pudo evidenciar la superioridad del algoritmo

Fuzzy C-Means en la detección precisa de estudiantes con distintos niveles de riesgo de deserción, en comparación con K-Means. Además, se corroboró que dividiendo en 3 clústeres se podían obtener grupos claramente segmentados tanto en el caso de 16 características como con 8 características relevantes, tal como lo denota el análisis del coeficiente de Silhouette.

Los hallazgos obtenidos coinciden con lo reportado en la literatura, especialmente en estudios donde las variables académicas son las de mayor peso en la predicción de deserción escolar. Tal como señalan [13], [15] y [17], factores como el número de asignaturas reprobadas, el avance académico y la acumulación de cursos pendientes son determinantes para identificar a los estudiantes en riesgo. Estos resultados se alinean con el presente estudio, donde las características con mayor impacto (asignaturas en repetición, asignaturas en especial, promedio actual y residencia actual) mostraron ser variables decisivas en la formación de clústeres. Asimismo, la relevancia de la asistencia y del nivel educativo de los padres coincide con las tendencias descritas en [3] y [16], reafirmando que tanto las condiciones personales como socioeducativas influyen de manera significativa en la permanencia escolar. En contraste, variables comúnmente consideradas en el estado del arte, como el género, la edad o el ingreso familiar, no mostraron impacto en el contexto del ITESG, lo que constituye una aportación relevante al evidenciar la necesidad de adaptar los modelos predictivos al entorno local. Este contraste con la literatura permite fortalecer la interpretación de los resultados y profundizar en la comprensión de los factores que influyen en la deserción estudiantil en el nivel superior.

Como trabajo a futuro, se plantea el ampliar el conjunto de datos de los estudiantes y la

incorporación de algoritmos de clasificación supervisada para poder integrar esto a un Sistema predictivo de deserción estudiantil y así poder implementar estrategias personalizadas que permitan a las instituciones educativas identificar y apoyar a los estudiantes en riesgo de manera proactiva, contribuyendo a mitigar la deserción estudiantil a nivel superior.

5. Referencias

- [1] Subsecretaría de Educación Superior, "Criterios Generales para la Distribución de los Recursos Autorizados al Programa Presupuestario U079", Programa de Expansión de la Educación Media Superior y Superior, 2023.
- [2] Secretaria de Educación Pública, "Programa Sectorial de Educación 2020-2024", 2020.
- [3] A. Urbina Nájera, "Deserción escolar universitaria, Patrones para prevenirla aplicando minería de datos educativa", *e-Journal of Educational Research, Assessment and Evaluation*, 2020.
- [4] H. Sadiq, "Educational data mining and analysis of students' academic performance using WEKA", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 9, no. 2, pp. 447-459, 2018.
- [5] F. Guiyun, "Analysis and prediction of students' academic performance based on educational data mining", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 19558-19571, 2022.
- [6] A. Ani, "Enhancing the clustering of student performance using the variation in confidence", *Intelligent Tutoring Systems: 14th International Conference*, pp. 274-279, 2018.
- [7] R. González, "Massive LMS log data analysis for the early prediction of course-agnostic student performance", *Computers & Education*, vol. 163, 2021.
- [8] F. I. Moreira, "Moodle Predicta: A Data Mining Tool for Student Follow Up", *CSEdu*, pp. 339-346, 2017.
- [9] M. Saqr, "How learning analytics can early predict under-achieving students in a blended medical education course", *Medical Teacher*, pp. 757-767, 2017.
- [10] D. Y. Hooshyar, "Clustering algorithms in an educational context: An automatic comparative approach", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 146994-147014, 2018.
- [11] Y. G. Li, "Educational data mining for students' performance based on fuzzy C-means clustering", *The Journal of Engineering*, pp. 8245-8250, 2019.
- [12] M. Jessica, "DETECT: a hierarchical clustering

- algorithm for behavioural trends in temporal educational data", *Artificial Intelligence in Education: 21st International Conference*, pp. 374-385, 2020.
- [13] B.-A. Norka, "Classification Models for Determining Types of Academic Risk and Predicting Dropout in University Students", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, vol. 11, 2020.
- [14] B. Andreas, "Early Prediction of University Dropouts – A Random Forest Approach", *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*, vol. 240, no. 6, pp. 743-789, 2020.
- [15] K. Lorenz, "Predicting student dropout: A machine learning approach", *European Journal of Higher Education*, 2020.
- [16] V. Matti, "Predicting student dropouts with machine learning: An empirical study in Finnish higher education", *Technology in Society*, vol. 76, 2024.
- [17] S. Martín, "Perspectives to Predict Dropout in University Students with Machine Learning", *IEEE International Work Conference on Bioinspired Intelligence (IWOBI)*, 2018.
- [18] H. Sadiq, "Classification, clustering and association rule mining in educational datasets using data mining tools: A case study", *Cybernetics and Algorithms in Intelligent Systems: Proceedings of 7th Computer Science On-line Conference 2018*, pp. 196-211, 2019.
- [19] B. J.C., "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function", Springer, 1981.
- [20] R. & S. R. Suganya, "Fuzzy c-means algorithm-a review", *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 2, no. 11, 2012.
- [21] T. J., "Feature selection for classification: A review", *Data classification: Algorithms and applications*, 2014.



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Teledetección del incremento de la agricultura protegida y factores que la han impulsado en San Salvador el Verde, Puebla (2010-2022)

Remote sensing of the increase in protected agriculture and the factors that have driven it in San Salvador el Verde, Puebla (2010-2022)

Sánchez-Olarte, J.^{a*}, Guevara-Brindis, J.^b, Méndez-Espinoza, J.A.^c

^a Estancias Posdoctorales por México para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México. Colegio de Posgraduados. CP. 72760 Puebla, Puebla (<http://orcid.org/0000-0003-4469-2726>).

^b Posgrado en Gestión del Desarrollo Social, Colegio de Posgraduados. CP. 72760 Puebla, Puebla.

^c Posgrado en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional. Colegio de Posgraduados. CP. 72760 Puebla, Puebla (<https://orcid.org/0000-0002-9733-4175>).

josset.sanchez@smartin.tecnm.mx*; jesusgbg4@gmail.com; jamendez@colpos.mx

Innovación tecnológica: Uso del software QGIS para la teledetección y mapeo de estructuras en el sector agrícola.

Área de aplicación industrial: Agroindustria y plataformas que generan mapeos digitales.

Recibido: 01 marzo 2025

Aceptado: 05 febrero 2026

Abstract

Currently, protected agriculture is used to optimize the available space for cultivation, where vegetables, fruits, and flowers can be grown, with a focus on marketing these products. In the case of San Salvador el Verde, Puebla, greenhouse floriculture has grown; however, the factors that have led to an increase in these structures and the number that exist are unknown. The objective was to conduct remote sensing of the increase in greenhouses in 2010, 2015, 2020, and 2022 and to identify the entrepreneurial factors that motivate producers to engage in floriculture in this municipality. A mixed-methods approach was used: interviews were conducted with three groups of producers, and the free geographic information system (GIS) software QGIS was used for remote sensing of greenhouses. Among the most notable results, the key factors that favored the increase or expansion of structures were affordable greenhouse construction costs, government support, and the influence of cultural diversity, which contributed to growth from 231 greenhouses reported by INEGI in 2010 to 855 greenhouses identified through remote sensing in 2022 using QGIS.

Keywords: QGIS; entrepreneurship; INEGI; SIAP; geographic information systems.

Resumen

En la actualidad, la agricultura protegida se lleva a cabo para optimizar el espacio disponible para el cultivo donde se pueden sembrar hortalizas, frutas y flores, con un enfoque en la comercialización de sus productos. En el caso de San Salvador el Verde, Puebla., la floricultura bajo invernadero ha crecido, sin embargo, se desconocen cuáles son los factores que han propiciado el incremento de dichas estructuras y cuántas existen. El objetivo fue “realizar la teledetección del incremento de invernaderos en los periodos 2010-2015-2020 y 2022 y conocer los factores de emprendimiento que impulsan a los productores para llevar a cabo la floricultura en este municipio”. Se utilizó una metodología mixta, se aplicó una entrevista a 36 productores y para la teledetección de invernaderos se ocupó el software libre de Sistemas de Información Geográfica (QGIS). Entre los resultados se destaca que los factores determinantes que favorecieron el incremento o expansión de estructuras son los precios accesibles para la construcción de invernaderos, el apoyo gubernamental, y la influencia de la diversidad cultural, que propiciaron un crecimiento de 231 invernaderos reportados por el INEGI en 2010 a 855 en 2022 tele-detectados con el software QGIS.

Palabras clave: QGIS, Emprendimiento, INEGI, SIAP, Sistemas de Información Geográfica.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional a nivel mundial se concentra principalmente en áreas urbanas y con ello, también, incrementa la demanda de alimentos y de otros productos provenientes del sector primario. La respuesta para producir una mayor cantidad en espacios más pequeños, especialmente en zonas urbanas, ha sido la agricultura protegida o ambiente controlado. Ésta se concibe como aquella que se realiza bajo diversos tipos de estructuras con la finalidad de disminuir las restricciones que impone el medio ambiente, garantizando así el desarrollo óptimo de los cultivos (SIAP, 2022). En esta línea, la tecnología de producción basada en la agricultura protegida, también, es utilizada para producir cultivos en zonas agrícolas rurales, ya que según Segrelles-Serrano (2015), este tipo de agricultura es capaz de suministrar a los consumidores rurales y urbanos, alimentos frescos, sanos, nutritivos e inoocuos en cantidades suficientes, además de producir otro tipo de cultivo, propiciando el acercamiento entre productores y consumidores.

En el ámbito de la agricultura protegida, es posible cultivar hortalizas, frutas y flores, siendo la floricultura el enfoque del presente análisis, ya que, en el mapa mundial de la floricultura 2021 de Rabobank, publicado en colaboración con Royal Flora Holland, se destacan tendencias globales clave en el sector de la floricultura internacional, ya que la estimación de la producción mundial de floricultura es de 80 000 millones de USD en una superficie aproximadamente de 650 000 ha. Las principales especies ornamentales producidas en el mundo son la rosa de corte (*Rosa spp*), crisantemo (*Chrysanthemum*), clavel (*Dianthus caryophyllus*) y orquídeas (*Orchidaceae*) cultivados en Países Bajos, Ecuador, Colombia y Tailandia. Igualmente, en el mapa de flores de Rabobank, México se encuentra entre los cinco países que más cultiva y exporta flores ornamentales en Latinoamérica, ocupando el tercer puesto, solo por debajo de Guatemala y arriba de El Salvador.

De acuerdo con la SADER (2020), las variedades de flores que tienen mayor producción en México incluyen el crisantemo, con alrededor de 11 millones de gruesas (1 gruesa = 12 docenas = 144 flores), la rosa que supera los 8 millones de gruesas, y la gladiola, que alcanza más de 5 millones de gruesas. En Puebla, hay aproximadamente 17 tipos de flores ornamentales, las cuales brindan anualmente ingresos superiores a mil 300 millones de pesos a los floricultores, siendo las plantas ornamentales un componente esencial del mercado en ocasiones especiales que celebran a la familia y sus seres queridos. Puebla se distingue por su variada producción, impulsada por los habitantes de más de 50 municipios que se dedican a la floricultura. Además, la rosa es particularmente notable, con 330 hectáreas cultivadas que producen más de 550 mil plantas al año, principalmente en las regiones de Atlixco y San Salvador el Verde (SADER, 2020).

El caso del municipio de San Salvador el Verde, Puebla, es uno de los lugares donde se agrupa una cantidad significativa de invernaderos dedicados a la producción de plantas decorativas. Sin embargo, hay una falta de datos estadísticos precisos sobre el crecimiento que ha experimentado esta actividad, y no se dispone de registros confiables ni información de teledetección que especifique tanto la superficie como el número de invernaderos relacionados con la producción de flores.

Por otro lado, el informe mundial sobre la floricultura 2021 de Rabobank, mencionan que existe una correlación importante entre los países que importan y exportan flores ornamentales. Esta relación se basa en que todos estos países son reconocidos a nivel mundial por sus tradiciones, festividades y eventos sociales que les demandan la presencia de plantas ornamentales debido a su atractivo visual y cultural. No obstante, en el

municipio de San Salvador El Verde, no hay datos sobre los factores emprendedores que han facilitado el avance de la floricultura en el ámbito de la agricultura protegida. Aunque la cultura podría ser un aspecto determinante que impulsa a los productores a adoptar la agricultura protegida enfocada a la floricultura, hay otros factores a considerar como el tipo de suelo de la región, la demanda y ausencia de flores ornamentales en el mercado, la viabilidad en términos de costos y ventas, así como aspectos internos relacionados con la calidad de vida de los productores, su situación económica, la disponibilidad de recursos para la agricultura protegida y su nivel de especialización y capacidad para llevar a cabo esta actividad.

Por ello, el objetivo de esta investigación fue; realizar la teledetección del incremento de invernaderos en los periodos 2010-2015-2020 y 2022 y conocer los factores de emprendimiento que impulsan a los productores para llevar a cabo la floricultura en San Salvador el Verde, Puebla. Con el propósito de generar información relevante relacionada con la floricultura en la zona de estudio y entender los factores que los productores toman en cuenta para implementar o acrecentar la superficie en que cultivan. Asimismo, se busca comparar la información obtenida con los datos ya disponibles de instancias como el INEGI y el SIAP para verificar cualquier discrepancia con los datos existentes.

REVISIÓN DE LITERATURA

- La agricultura en México

México posee un área nacional de 198 millones de hectáreas, de las cuales 145 millones (73%) están destinadas a actividades agropecuarias. Aproximadamente 30 millones de hectáreas se utilizan para la agricultura y 115 millones son terrenos de agostadero. Además, los bosques y selvas cubren 45.5 millones de hectáreas (Corona-

Ramírez, 2016). En esta línea, la agricultura se describe como “el arte de cultivar la tierra” proviene del latín *ager*, *agri* (campo) y *cultura* (cultivo). Es una actividad que se ocupa de la producción de cultivo en suelo, el desarrollo y recogida de las cosechas, la explotación de bosques y selvas (silvicultura), la cría y desarrollo de ganado (SEDEMA, 2022). En nuestro país, la agricultura representa el elemento más importante del ámbito agropecuario, su contribución es significativamente superior en comparación con la pesca, la cría de animales y la acuicultura, además se mantiene activa durante todo el año con su diversidad de cultivos.

En el caso de la agricultura, ésta es la encargada de proveer alimentos, materias primas, y mano de obra al sector agroindustrial y de servicios, también, demanda gran cantidad de productos industriales de primera necesidad para la producción agrícola, entre ellos: fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, maquinaria, entre otros, y en el aspecto social favorece el arraigo a sus tierras, el sustento a familias y la preservación de recursos naturales de cierto número de personas en localidades productoras (SADER, 2018a). En nuestro país se practican dos tipos de agricultura: la tradicional o extensiva, en la cual el productor depende en gran parte de las lluvias, condiciones climatológicas y mano de obra no asalariada y la segunda, la agricultura comercial o intensiva en la que para producir se implementa tecnología de punta y mano de obra asalariada (SADER, 2018b).

- **Agricultura protegida**

Su propósito principal es el resguardo de los cultivos, y representa una opción viable para poder controlar total o parcialmente el microclima que rodea a la planta, de acuerdo con las necesidades durante su periodo de crecimiento (SADER, 2017). Se define como una serie de técnicas o métodos de

producción que permiten resguardar y alterar el ambiente natural en el que se desarrollan los cultivos, con la intención de garantizar un crecimiento óptimo (Pérez-Andrade, 2017). También, contribuye a incrementar el rendimiento en diferentes cultivos, o bien, obtener cosechas en fechas fuera de temporada que no pueden obtenerse si no es con un alto riesgo de siniestro (Ortiz-Alamilla *et al.*, 2023).

- **Tipos de estructura para la agricultura protegida**

La agricultura protegida se lleva a cabo utilizando gran variedad de estructuras que ayudan a salvaguardar los cultivos frente a las alteraciones climáticas. Estas instalaciones proporcionan diferentes opciones para crear un entorno adecuado que favorezca el desarrollo de las plantas conforme a las necesidades de cada especie. De igual manera, son fundamentales para potencial el avance del sector agrícola de México y, de acuerdo con la SADER (2017) se categorizan en: a) Invernaderos; estructura alta y permanente que permite un control efectivo de los factores ambientales, b) Casa o malla sombra; que ayudan a moderar la cantidad de luz solar que reciben las plantas, c) Macrotúnel o túnel elevado; óptimo para cultivar hortalizas y plantas decorativas, d) Microtúnel, túnel bajo o mini invernadero; que reduce el impacto negativo de las temperaturas frías en los cultivos.

- **La floricultura en México**

La floricultura es la sección de la horticultura enfocada al cultivo de flores y plantas ornamentales, destinada principalmente para fines decorativos. Es una amplia área del conocimiento que abarca varias actividades como la producción de plantas para jardín, producción y comercialización de flores de corte, paisajismo, decoración de interiores, por mencionar algunas (Bastida-Cañada, 2019). A través de los años, esta actividad se

ha convertido en una de las más rentables en el sector agrícola, ya que permite obtener una importante derrama económica gracias a la demanda que se genera en el mercado, tanto nacional como internacional. En México la producción de flores requiere de mucha mano de obra, en este rubro la actividad genera 188 mil empleos directos y 50 mil eventuales dependiendo de la temporada, así como más un millón de trabajos indirectos anualmente (SAGARPA, 2018).

Los factores climáticos más críticos para el cultivo de flores en invernaderos son la alta humedad relativa y la baja ventilación, influenciados por las características del lugar; un exceso de humedad puede aumentar la propagación de plagas y enfermedades hacia los cultivos, por otro lado, los excesivos y fuertes vientos pueden dañar o desprender parte del follaje como los pétalos (Acuña-Caita, 2009).

- **Desarrollo de Rosa (*Rosa spp.*) y Crisantemo (*Chrysanthemum spp.*)**

El cultivo de rosa y crisantemo, en agricultura protegida, permite la producción de flores en momentos y lugares donde, de otro modo, no sería factible, logrando así precios óptimos. Para esto, es fundamental que los invernaderos cumplan con ciertas especificaciones: deben ser amplios (mínimo 50 x 20 m), ofrecer una adecuada transmisión de luz, tener una altura considerable y garantizar una ventilación eficiente en los meses de calor. También se sugiere tener sistemas de calefacción en invierno y usar mantas térmicas para mantener el calor durante la noche. El suelo necesita un buen drenado y aireación para evitar acumulaciones de agua, por lo que aquellos suelos que no cumplan con estos requisitos deben ser tratados adecuadamente, utilizando diferentes materiales orgánicos. Las rosas pueden crecer en suelos ácidos, aunque debe mantener un pH cercano a 6; no toleran altos

niveles de calcio porque provoca clorosis si hay un exceso de este elemento. Así mismo, no deben exponerse a concentraciones elevadas de sales solubles, siendo recomendable no superar el 0.15%. La desinfección del suelo puede realizarse mediante calor u otro método que satisfaga las necesidades del cultivo. En caso de realizarse fertilización de fondo, es necesario un análisis de suelo previo (SAGARPA, 2018). En el caso del municipio de San Salvador el Verde, tiene las condiciones edafoclimáticas propicias para este tipo de cultivos (Sánchez & Tapia, 2023).

- **Emprendimiento y emprendimiento agrícola**

La teoría económica clásica desde hace décadas ha sido un referente teórico en relación con el emprendimiento, Richard Cantillón (1680-1734) estableció un concepto en el que envuelve las características de quien lo practica, definiéndolo “como el individuo que asume riesgos en condiciones de incertidumbre, dividiendo a los productores de la economía de mercado en “contratados”, que reciben salarios o rentas fijas, y los “emprendedores”, que reciben ganancias variables e inciertas” (Rodríguez-Ramírez, 2009). No obstante, el emprendimiento es un concepto que ha tenido transformaciones a lo largo de la historia que lo definen como el proceso que, a través de la innovación, la aceptación del riesgo, las actividades pioneras de personas o grupos se genera crecimiento y progreso económico, características que podrían llegar a ser iguales en el caso del emprendimiento agrícola y dados los elementos positivos que se le atribuyen, ser generador de desarrollo rural (Pedrozo-Ruidíaz, 2016).

El emprendimiento se distingue por poseer acciones colectivas en busca de alternativas de desarrollo, por medio de actividades que contribuyan a la evolución de la comunidad,

pensando globalmente y actuando localmente, tiene una visión de compromiso enfocado al cambio, pretendiendo convertir a los involucrados, en protagonistas solucionadores ante escenarios de injusticia y marginalidad, adoptando una posición crítica con propuestas sólidas para revertir desigualdades. Aunque la noción de emprendedor social es reciente, la capacidad para resolver problemas sociales no lo es (Alvord *et al.*, 2004). En este sentido, el emprendedor agrícola se caracteriza por ser un individuo o grupo que tiene derechos de uso y explotación de tierras u otros elementos para llevar a cabo las actividades agropecuarias, forestales o mixtas (Suárez-Melo, 1972), además, se debe tener en cuenta que el emprendimiento rural favorece el establecimiento de nuevas organizaciones que crean mercados y productos innovadores o implementan tecnologías recientes desde las zonas rurales (Wortman, 1990).

En esta línea, no se puede ignorar hoy en día el impacto que tienen las micro, pequeñas y medianas empresas a la economía, en la eficiencia, en la innovación, en la generación de empleo, en el fortalecimiento del tejido social y en el bienestar general del territorio donde implementan y emprenden conocimiento, innovación tecnológica, métodos de producción novedosos o amplían la superficie en la que llevan a cabo la actividad agrícola (Sánchez & Tapia, 2023). Sin embargo, para que el emprendimiento agrícola se realice de manera adecuada, Lawere (2004) indica que es esencial que los agricultores cuenten con características personales específicas como la autocrítica, el liderazgo, la creatividad, la perseverancia y la iniciativa para lograr un emprendimiento e implementación exitoso y sostenible. De este modo, el emprendimiento se configura como una vía para descubrir nuevas y complementarias alternativas para el desarrollo, principalmente con un enfoque más intensivo en las zonas rurales mediante

acciones de creación, transformación y crecimiento que pueden contribuir al desarrollo rural (Mejía *et al.*, 2024). Este es el caso de los floricultores de San Salvador el Verde, quienes, frente a situaciones adversas y ante la incertidumbre, eligen implementar y aplicar técnicas de producción novedosas. Estas no solo mejoran sus métodos de cultivo, sino que también fortalecen las conexiones entre los productores y quienes están asociados a sus sistemas de producción (Sánchez & Tapia, 2023).

- **El emprendimiento en el desarrollo económico**

En la actualidad, el emprendimiento es visto como un factor clave en el desarrollo económico y coadyuva al avance en la zona o territorio donde se implementa. Sin embargo, Kam *et al.* (2005), refieren que el trabajo empírico realizado no ha sido contundente como para generar propuestas de análisis del fenómeno, complementado con la complejidad que representa la diversidad de factores personales, sociales, culturales, políticos e institucionales, que confluyen en los emprendedores. Jaramillo *et al.* (2013), proponen que el emprendedor rural es un pequeño productor que conoce sus recursos naturales, humanos y materiales, y posee conocimiento de su uso actual y potencial para la producción de alimentos, y toma en cuenta las condiciones del mercado. Por lo tanto, emprendimiento se relaciona con el esfuerzo de individuos con una visión clara, caracterizándose por su originalidad en sectores tecnológicos, comerciales y/o en la gestión, lo que permite generar valor y la mejora de las condiciones de bienestar social.

No obstante, en México se han realizado escasos estudios para registrar las particularidades de los emprendedores, así como sus motivaciones, requerimientos de asistencia y su papel en la innovación y desarrollo económico, especialmente en el

sector agrícola de áreas rurales, principalmente por tratarse de casos un tanto aislados de la urbanidad, por lo que la investigación resulta fundamental para conocer qué factores tienen en cuenta los productores al emprender e incrementar su superficie en agricultura protegida, especialmente en el ámbito de la floricultura.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método empleado fue mixto, que incluyó tanto datos primarios como secundarios, para evaluar la eficacia de los métodos, se llevó a cabo una encuesta en profundidad con tres grupos de floricultores, uno de la cabecera municipal, otro de la junta auxiliar de San Gregorio Atztotocan y un tercero de Tlacotepec de José Manzo dando una (n=36), dichos grupos fueron elegidos en función de su vocación productiva de floricultura en agricultura protegida y que son los más representativos de la zona de estudio en el cultivo de rosa y crisantemo (Figura 1).

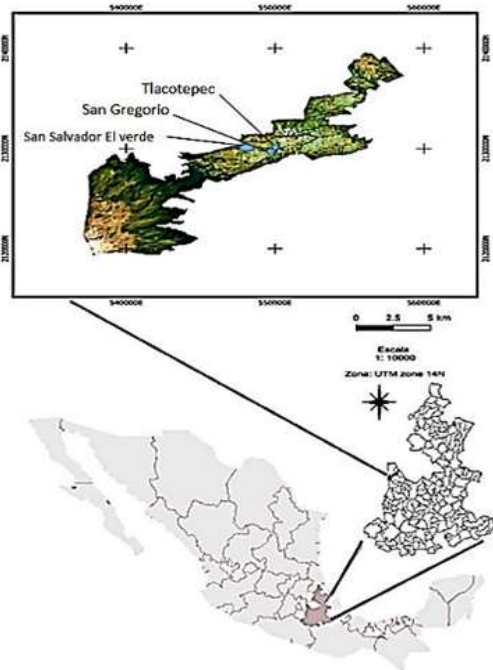


Figura 1. Localización del municipio de San Salvador el Verde, Puebla, México.
Fuente: Elaboración propia.

- Definición del área de estudio

El Municipio de San Salvador el Verde cuenta con una superficie de 108.7 km², se localiza en la parte centro Oeste, del estado de Puebla (ID de Estado #21). Sus coordenadas geográficas son los paralelos 19° 12'18" y 19° 21'54" de latitud norte y los meridianos 98° 26'54" y 98° 93'18" de longitud occidental.

Es fundamental señalar que este municipio se encuentra situada cerca de Huejotzingo y San Martín Texmelucan, también, está muy próxima a otros estados como Tlaxcala y México, expandiéndose por la zona colindante a la ciudad de San Martín Texmelucan, donde hay una demanda de producción de rosas y crisantemos por parte de mercados urbanos y negocios locales.

- Métodos y técnicas de investigación

La obtención de datos primarios fue a través de una encuesta en profundidad a 36 productores de rosa y crisantemo con el fin de generar un diagnóstico socioeconómico y poder describir los factores que impulsan esta actividad, tales como la calidad de vida, disponibilidad de recursos (capital y disposición de terrenos) y especialización, para determinar las razones que llevan a los agricultores a participar en la agricultura protegida y mantenerla a lo largo del tiempo. Adicionalmente, se consultaron bases de datos del INEGI y el SIAP del 2010 al 2022, para estimar los datos que se reportan en la actualidad del crecimiento de la agricultura protegida. De estas, se obtuvieron datos relacionados con el tamaño de la localidad, pobreza, rezago educativo, ingresos y afiliación de servicios de salud. También, se llevó a cabo una búsqueda en fuentes secundarias (bibliotecas digitales, bases de datos institucionales y repositorios científicos) para conocer las propiedades físico-químicas del área de estudio y los requisitos básicos para llevar a cabo la agricultura protegida de forma eficaz, lo que

incluyó la recopilación de información sobre los suelos predominantes de la zona, las condiciones climáticas, los patrones de humedad y el uso de suelo y vegetación.

Así mismo, se realizaron mapas de escala a nivel local (1: 20,000) mediante el software libre de Sistemas de Información Geográfica QGIS para realizar el diagnóstico relacionado con la teledetección. Se consultó información pertinente en el Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de INEGI. Después de localizar los datos necesarios en estas plataformas de consulta y utilizando técnicas de Sistema de Información Geográfica (SIG), se delimitó la zona de estudio para así llegar a una conclusión acerca del factor edafoclimático.

El análisis geoespacial se fundamentó en mapas, que permitieron el reconocimiento de las transformaciones en la superficie del suelo de San Salvador el Verde y de sus juntas auxiliares; lo que permite la identificación de la sinergia de diferentes factores que contribuyen al crecimiento de la agricultura protegida. Por esta razón, resultó crucial emplear SIG para examinar de manera georreferenciada cada instalación destinada a la agricultura protegida. De este modo, se consultaron imágenes satelitales obtenidas del portal de Google Earth en los años 2010-2015-2020, así como del portal USGS Earth Explore del satélite Landsat 8 correspondiente al año 2022.

Gracias a los SIG y al uso de la aplicación del software QGIS, fue posible crear mapas que muestran claramente el crecimiento de la agricultura protegida, además, se facilitó la posibilidad de exportar la información obtenida en un cuadro de atributos que detalla los tipos de cultivos, la instalación y sus cantidades respectivas, así como el dato más relevante que fue la superficie total.

Para determinar el aumento de la superficie y las estructuras en agricultura protegida se utilizó la ecuación de tasa de crecimiento propuesta por Ros (2016), también conocida como tasa de variación (positiva), que representa el cambio positivo en porcentaje de una variable en dos instantes diferentes de tiempo. Cabe destacar que la fórmula fue adaptada a los intervalos de tiempo analizados para su aplicación específica a este estudio:

$$TC_{i-f} \left[\left(\frac{SPF}{SPI} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right] * 100 = \%$$

En donde: TC es la tasa de crecimiento, SPF es la superficie final en hectáreas, SPI es la superficie inicial en hectáreas, P es el periodo o intervalo de tiempo en la cual se hace la comparación y, el resultado final representado en porcentaje (%).

La ecuación fue aplicada directamente a los intervalos de tiempo de los años 2010-2015, 2015-2020, 2020-2022 y 2010-2022, para evidenciar el incremento, en términos positivos de la agricultura protegida. Finalmente, se describieron los factores clave relacionados a la demanda de flores ornamentales, las costumbres locales, la cultura, el apoyo gubernamental y el familiar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la identificación de los factores socioeconómicos del municipio de San Salvador el Verde, este se encuentra en un segmento en el cual las condiciones relacionadas con la calidad de vida de los pobladores (educación integral, economía y afiliación a los servicios de salud), posibilitan la determinación de la motivación para emprender actividades relacionadas a la agricultura. Las encuestas aplicadas a los tres grupos de productores de rosa y crisantemo hicieron posible reconocer que la influencia

del entorno social fue un factor determinante para establecer invernaderos y qué, mediante asesoramiento técnico, se han conseguido cosechas de alta calidad, las cuales se manifiestan en las ganancias y en la permanencia de este sistema de cultivo.

Los factores edafoclimáticos que se encuentran en el área de investigación según el SIAP (2022) son adecuados para satisfacer las condiciones ambientales necesarias para la producción de rosas y crisantemos. Los registros del SIAP durante el intervalo de los años 2010-2022, no indican que haya habido cultivos siniestrados por factores climáticos, lo que sugiere que la región posee cualidades adecuadas para dichos cultivos incluyendo

tipos de suelo, clima y niveles de humedad. No obstante, dada la complejidad de las actividades llevadas a cabo en agricultura protegida, es posible que se vean influenciadas tanto por errores del personal que opera, como fluctuación en la temperatura.

De acuerdo con los análisis geoespaciales elaborados con imágenes satelitales de Google Earth y USGS earth explore landsat 8, se realizaron mapas en el software de uso libre QGIS, en los cuales se muestra el crecimiento exponencial de instalaciones específicas para la agricultura protegida en los años 2010, 2015, 2020 y 2022, figuras 2, 3, 4 y 5.

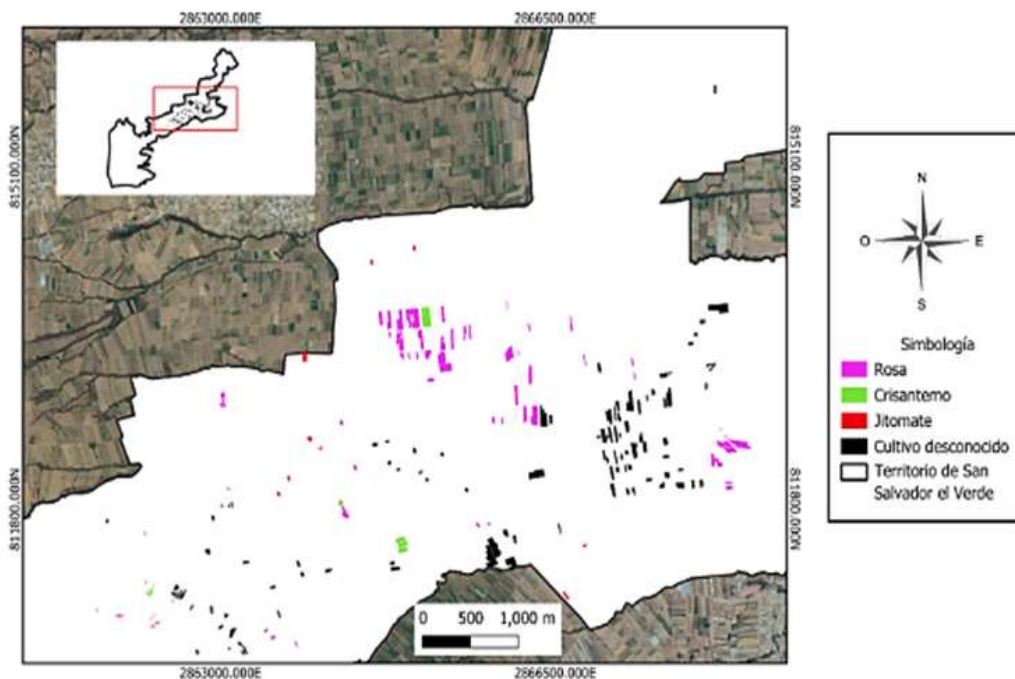


Figura 2. Invernaderos de San Salvador el Verde, Puebla, 2010.

Fuente: Elaboración propia.

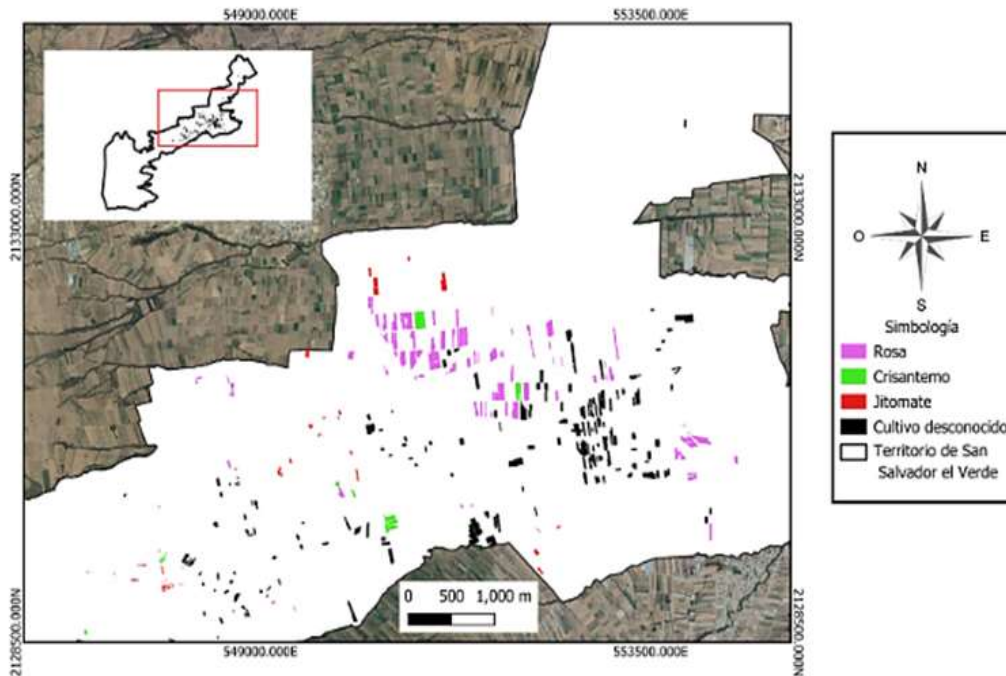


Figura 3. Invernaderos de San Salvador el Verde, Puebla, 2015.
Fuente: Elaboración propia.

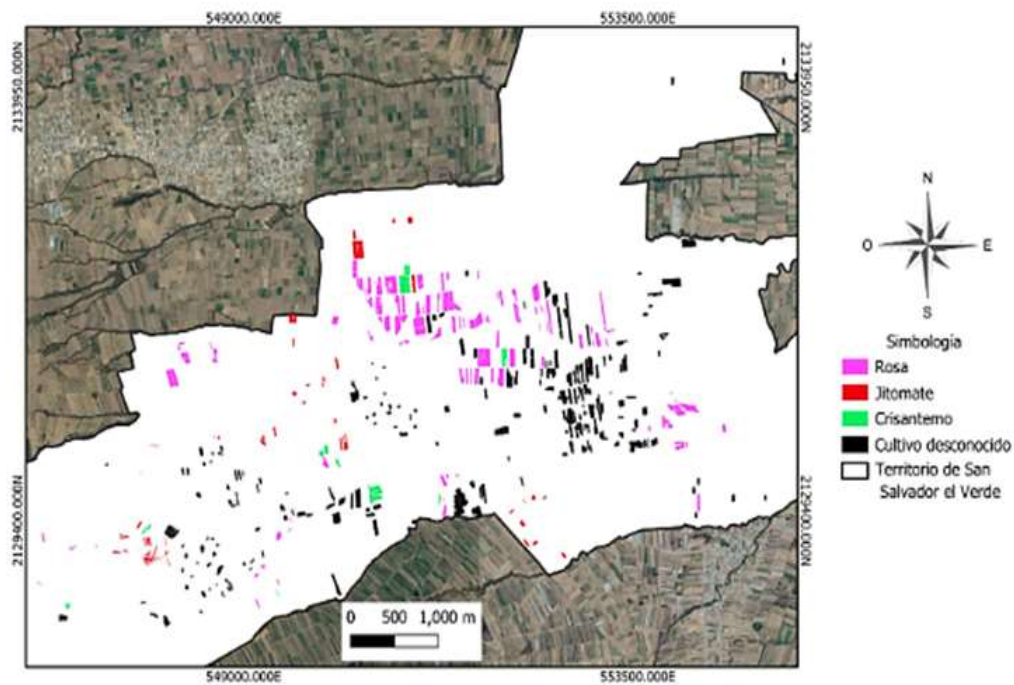


Figura 4. Invernaderos de San Salvador el Verde, Puebla, 2020.
Fuente: Elaboración propia.

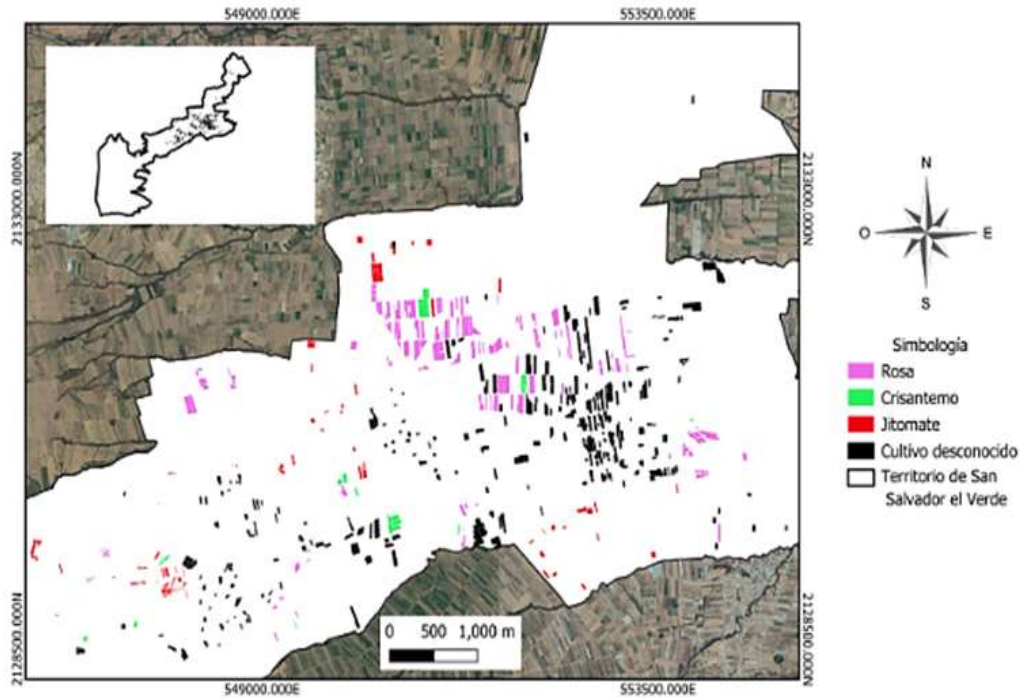


Figura 5. Invernaderos de San Salvador el Verde, Puebla, 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar el software QGIS para crear mapas, se posibilitó la exportación de información relacionada con el área y perímetro de los invernaderos que se delimitaban en cada intervalo de tiempo, para obtener así los datos presentados en la Tabla 1, muestra el número de instalaciones (invernaderos) y la superficie destinada a la agricultura protegida en los periodos analizados.

Tabla 1. Superficie dedicada a la agricultura protegida 2010-2022.

Año	Cantidad de Instalaciones	Hectáreas
2010	231	45.37
2015	413	83.38
2020	729	125.14
2022	855	151.88

Fuente: Elaboración propia.

Para mostrar las variaciones vinculadas a la superficie y la cantidad de instalaciones con agricultura protegida entre la información reportada por las plataformas del SIAP e INEGI y los resultados obtenidos mediante la teledetección aplicada en este estudio, se elaboró una comparación en la Tabla 2.

Tabla 2. Superficie dedicada a la agricultura protegida 2010-2022.

Institución	Variable	Año 2010	Año 2015	Año 2016	Año 2020	Año 2022
SIAP	Número de invernaderos	Sin Datos				
	Superficie (ha)	Sin Datos		63.44	54	54
INEGI	Número de invernaderos	Sin Datos		242	Sin Datos	
	Superficie (ha)				197.25	
Investigación 2022-2025	Número de invernaderos	231	413	Sin Datos	729	855
	Superficie (ha)	45.37	83.38			125.14

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Entre los años 2010 y 2015 no se encontraron registros en las plataformas SIAP e INEGI.

Los métodos utilizados por INEGI y SIAP para clasificar este conjunto de datos referidos a la superficie destinada a la agricultura protegida, muestran variaciones en los resultados, lo que podría deberse al método empleado para la recolección de datos. Para este análisis fue crucial el uso de

software de los Sistemas de Información Geográfica SIG, los cuales proporcionan datos muy precisos y contribuyen a mejorar la información recopilada en años anteriores. La Figura 6, ilustra el aumento en el número de invernaderos en función de los intervalos de tiempo analizados.

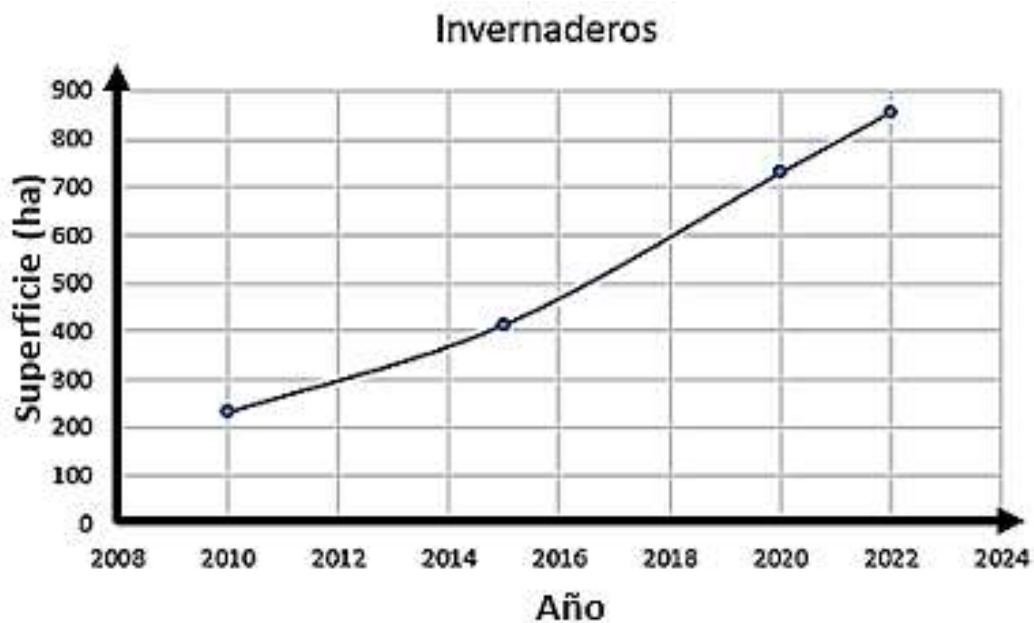


Figura 6. Crecimiento del número de invernaderos en San Salvador el Verde, Puebla.

Fuente: Elaboración propia.

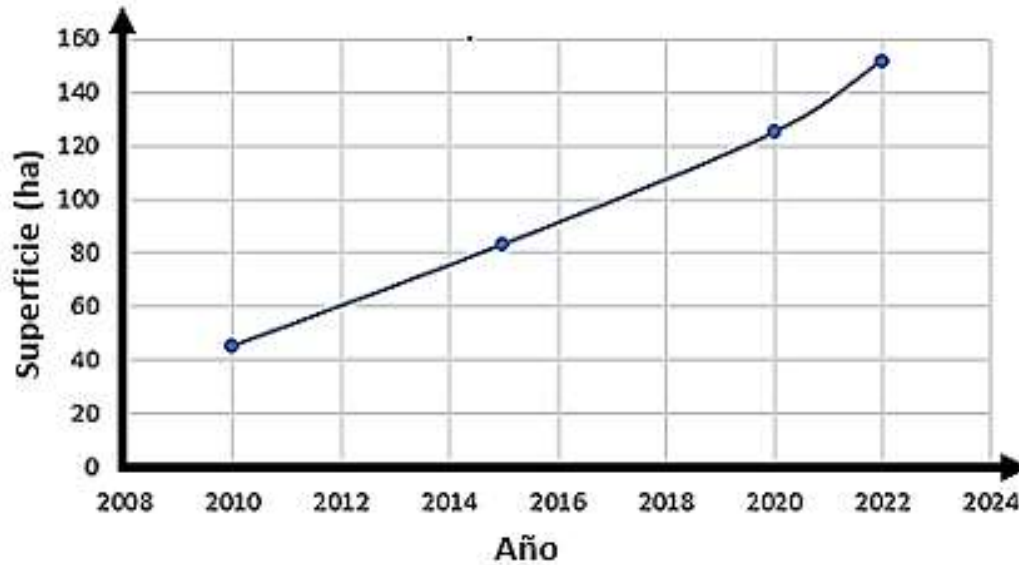


Figura 7. Crecimiento de la superficie dedicada a la agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7, muestra el aumento de la superficie destinada a la agricultura protegida, datos que se obtuvieron a través del uso de la teledetección realizada.

Las Figuras 6 y 7 permiten realizar una comparación y muestran el incremento de invernaderos y de la superficie destinada a la producción de rosas y crisantemos entre 2010 y 2022. Además, la encuesta realizada ayudó a comprender que la llegada de nuevos agricultores se debió a la percepción positiva de esta actividad, así como aquellos que optaron por ampliar sus invernaderos para incrementar sus ingresos. Se puede observar que ambas figuras muestran similitudes en la dispersión relacionada con el aumento tanto de nuevos invernaderos como de la expansión de los ya existentes, así como de la superficie dedicada a esta actividad, lo que sugiere que tanto nuevos agricultores como aquellos con más experiencia en la agricultura protegida, han seguido un patrón similar en el incremento de este tipo de agricultura.

Por otro lado, se realizó el cálculo del aumento de la superficie con agricultura protegida en la zona de estudio, mediante la

ecuación de la tasa de crecimiento, abarcando el periodo del 2010-2022 tomando como datos de referencia los presentados en la Tabla 1.

$$TC_{2010-2022} \left[\left(\frac{151.88}{45.37} \right)^{\frac{1}{12}} - 1 \right] * 100 = 10.59 \%$$

Al aplicar la ecuación, se identificó que la agricultura protegida tuvo un crecimiento porcentual promedio de 10.59% anual durante el periodo 2010-2022. No obstante, es importante señalar que la información obtenida en esta investigación, contrasta con los datos consultados en las bases del censo agropecuario de INEGI 2016 y el SIAP, ya que, cuando se realizó el análisis georreferencial, los resultados indicaron que los datos de INEGI y SIAP difieren, tal como se muestra en la Tabla 2.

En el caso de INEGI, solo se tiene registro del censo agropecuario realizado en el 2016, en el cual se reportaron 197.25 ha destinadas a la agricultura protegida. Sin embargo, las que se generaron a partir de esta investigación

(2022-2023), muestran que la superficie ocupada con agricultura protegida en 2015 era de 83.38 ha, es decir INEGI reportó, en ese periodo, una superficie de más de un 200% del real, quizá el dato reportado en esa etapa se debió a la metodología aplicada para el levantamiento del CENSO, lo cual genera incógnitas sobre la metodología con la cual obtuvieron los datos.

Una posible respuesta al problema identificado, quizá se debió a la

sobrestimación por parte de INEGI al considerar como referencia cada invernadero con una superficie de 1ha. Ya que, durante el análisis georreferencial de la ubicación de los invernaderos, se consultó el mapa digital de INEGI y, utilizando los filtros correspondientes para la actividad y lugar de estudio, se reveló que en algunos terrenos donde se indican cultivos de rosa y crisantemo, existe una superficie considerable, como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Superficie reportada de Rosa en agricultura protegida 2018.

Fuente: Mapa digital de INEGI 2018.

Con la herramienta georreferenciación que ofrece el mismo mapa digital de INEGI, permite georreferenciar mediante polígonos,

aquellas zonas de sobrestimación, mismas que son las observadas cuando se abren con algún sistema de navegación GPS (Figura 9).



Figura 9. Superficie de rosa en agricultura protegida 2018.

Fuente: Elaboración propia a partir de investigación, 2022-2025.

En la Figura 9; el área de color rosa representa la superficie real de agricultura protegida. Esto no implica que los datos proporcionados por INEGI sean incorrectos, sino que podría haber una probabilidad de que el equipo encargado del CENSO, haya registrado la superficie total especificada en el acta de propiedad del terreno.

Por otro lado, el SIAP cuenta con un filtro de búsqueda excelente para la consulta de información de acuerdo con el cultivo específico, sin embargo, el problema fue que no proporciona datos relacionados con la tecnología empleada en la agricultura protegida en lo que respecta a la producción de rosas y crisantemos, lo que impidió una comparación visual con el SIAP.

Respecto a la identificación de ciertos factores clave que los productores tienen en cuenta al optar por entrar o continuar con prácticas de agricultura protegida, se logró identificar que la accesibilidad económica es el factor más importante, ya que está relacionado con la construcción y el mantenimiento de invernaderos, además de manejo de los cultivos. Aunque un productor no pudiera establecer invernaderos de acuerdo a su calidad de vida y disponibilidad de terrenos, la asistencia del gobierno en el año 2015 a través de SAGARPA brindó apoyos que impulsaron la construcción, equipamiento y modernización de invernaderos en el estado de Puebla a través del Programa de Concurrencia con las Entidades Federativas específicamente en el Componente de Proyectos Productivos o Estratégicos, lo cual se convirtió en un factor determinante en el aumento en superficie y estructuras de dicha actividad (SAGARPA, 2016). Además, de acuerdo con las opiniones expresadas por los grupos de productores encuestados, refirieron que la mayoría de los que se inscribieron para recibir dicho apoyo, cumplían con los requisitos, mismo que pudo ser reflejado en los mapas de

georreferenciación, donde el aumento se concentró en pequeños puntos dentro de las juntas auxiliares, específicamente en los traspatios de las casas de los pobladores.

Finalmente, los productores indicaron que el principal factor que influyó el aumento de la agricultura protegida y la superficie de producción está relacionado con la demanda de flores decorativas debido a la propia cultura de México, especialmente porque ésta ha crecido notablemente en años recientes. Aunque México exhibe una gran diversidad étnica, la necesidad de flores ornamentales es vital para celebraciones familiares y religiosos. A pesar de la crisis sanitaria mundial causada por la pandemia COVID-19 en 2020, que paralizó actividades en todos los sectores. No obstante, el sector de la floricultura no sufrió un impacto significativo. Específicamente, en la zona objeto de estudio, que es considerada aún parte del entorno rural, las labores agrícolas continuaron sin interrupciones aún en pandemia, a diferencia de las zonas urbanas donde reside un mayor número de personas.

CONCLUSIONES

El análisis georreferencial y de teledetección espacial realizado con diferentes imágenes satelitales y la aplicación del Software libre QGIS contribuyó a determinar la tasa de crecimiento porcentual de la superficie y estructuras en agricultura protegida de manera más precisa en área objeto de estudio.

Los datos obtenidos en la investigación permitieron realizar una contrastación con los informes proporcionados por el INEGI y el SIAP en los años en cuestión. No obstante, esto crea una oportunidad para continuar investigando y mejorar la precisión de los datos que ya existen en las diversas plataformas oficiales.

Las opiniones manifestadas por los productores de rosas y crisantemos ayudaron a reconocer varios factores clave que impulsaron la implementación de nuevas estructuras o la expansión de las existentes orientadas a la agricultura protegida.

Se encontró que durante el periodo de 2010 a 2015 hubo gran accesibilidad y precios bajos en insumos para la construcción de invernaderos. En ese mismo lapso, el gobierno impulsó esta actividad, contribuyendo a fortalecer la agricultura familiar y, particularmente, a la agricultura protegida en áreas de traspatio.

Finalmente, se observó que el sistema agrícola en agricultura protegida en el ámbito de la floricultura ha persistido y aumentado, gracias a su viabilidad económica, a las condiciones de suelo y clima del área de estudio, además de factores culturales, económicos, sociales y ambientales. Sin embargo, se recomienda seguir investigando para generar información que fortalezca dicha actividad.

BIBLIOGRAFIA

- Acuña-Caita, J. F. (2009). Grupo de investigación en tecnología de invernaderos y agroplasticultura: Experiencias. *Ingeniería e Investigación*, 29(3), 156-157.
- Alvord, S.H., Brown, L.D. & Letts, C.W. (2004). "Social Entrepreneurship and Societal Transformation, An Exploratory Study", *The journal of applied behavioral science*, 40 (3), 260-282.
- Bastida-Cañada, O, A. (2019). ¿Qué es la floricultura?. Blog agricultura. Consultado el 10 del 2022. Recuperado de

<https://blogagricultura.com/concepto-floricultura/>

- Corona-Ramírez, I. (2016). El desarrollo de la agricultura y el impacto que tendría en las finanzas públicas de México. Premio nacional de las finanzas públicas de México 2016. Consultado el 10 del 2022. https://cefp.gob.mx/formulario/Trabajo_12a.pdf
- Jaramillo *et al.*, (2013). Factores que influyen para el emprendimiento de microempresas agropecuarias en el Valle de Puebla, México *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5: 925-937
- Kam, W. P.; Ping, H. Y. and Autio, E. (2005). Entrepreneurship, innovation and economic growth: Evidence from GEM data. *Small Business Economics*. 24:335-350.
- Mejía, E. T., Olarte, J. S., & Santos, A. L. (2024). Inmigrante mexicano emprendedor: detonante para la emigración hacia EE. UU. en universitarios de San Martín Texmelucan, Puebla, México. *Paradigma económico. Revista de economía regional y sectorial*, 16(1), 147-165.
- Pedrozo-Ruidíaz, L. M. (2016). El emprendimiento agrícola como promotor de desarrollo rural en Colombia. Retrieved from: https://ciencia.lasalle.edu.co/finanzas_comercio/41
- Pérez-Andrade, L. F. (2017). Evaluación de una Malla Agrícola Anti-Insectos con Propiedades Antitérmicas en el cultivo de tomate. "Solanum lycopersicum" (Tesis de maestría).

- Centro de investigación en química aplicada. Saltillo, Coahuila.
- Lawere, C. (2004). The role of agricultural entrepreneurship in Dutch agriculture of today. *Agricultural Economics* 33: 229-23
- Ortiz-Alamilla, A. I., Neri-Suárez, M., López-González, J. L., & Vilaboa-Arroniz, J. (2023). Análisis de la agricultura protegida y sus impactos socioambientales en tres municipios de la Sierra Nevada de Puebla, México. *Religación*, 8(36), e2301061.
- Rabobank. (2021). World Flower Map 2021: More than Just a Local Affair. Recuperado de https://research.rabobank.com/far/en/documents/175926_Rabobank_Flower-Map-2021_20211230.pdf
- Rodríguez-Ramírez, A. (2009). Nuevas perspectivas para entender. *Pensamiento y Gestión*. 94-119.
- Ros, J. (2016) "The real exchange rate, the real wage and growth. A formal analysis of the 'development channel'," en M. Damill, M. Rapetti y G. Rozenwurcel (eds), *Macroeconomics and Development: Roberto Frenkel and the Economics of Latin America*, Columbia University Press
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural SADER. (2017). Tipos de estructura para la agricultura protegida. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/tipos-de-estructura-para-la-agricultura-protegida>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural SADER. (2018a). Floricultura, cultivando belleza y ganancias. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/floricultura-cultivando-belleza-y-ganancias>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural SADER. (2018b). ¿Cómo beneficia la agricultura a las familias mexicanas? <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/como-beneficia-la-agricultura-a-las-familias-mexicanas>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Noticias SADER. (2020). Resalta Puebla por producción de flores. <https://sdr.puebla.gob.mx/noticias/resalta-puebla-por-produccion-de-flores>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA. (2016). Programa de Concurrencia con las Entidades Federativas. Recuperado de [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2020/03/21/1981/21032020-ipassa-informe-compendio-2016-vf-puebla.pdf](https://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2020/03/21/1981/21032020-ipassa-informe-compendio-2016-vf-puebla.pdf)
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA. (2018). Fundación produce Chiapas. Manual de producción de rosa. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/view/14364081/manual-rosapdf-fundacion-produce-chiapas>
- Sánchez-Olarte, J. & Tapia-Mejía, E. (2023). Factores de emprendimiento en la preservación del cultivo de rosa en San Salvador el Verde, Puebla. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 23(44).
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México SEDEMA. (2022).

Glosario de agricultura.
<http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Agricultura>

Segrelles-Serrano, J.A. (2015). Agricultura periurbana, parques naturales agrarios y mercados agropecuarios locales: una respuesta territorial y productiva a la subordinación del campo a la ciudad. Scripta Nova.
<http://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/15107/18310>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP. (2022). Documentos

abiertos. Agricultura protegida SIAP 2022.

<https://www.gob.mx/siap/documentos/agricultura-protegida-200653>

Suárez-Melo, M. (1972). "Campesino" comunitarian enterprises in America Latina. En J. E. Araujo, The community enterprise (págs. 297-330). San José, Costa Rica: IICA-headquarters.

Wortman, M. (1990). Rural entrepreneurship research: An integration into the entrepreneurship field. Agribussines, 329-244.