



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y POSGRADO

— MEMORIA —



25^º VERANO DE LA CIENCIA
★ 2026 ★

UAQ | CRECER EN LA DIVERSIDAD

DIRECTORIO

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano

Rectora

Dr. José Guadalupe Gómez Soto

Secretario Académico

Dr. Manuel Toledano Ayala

Secretario de Investigación, Innovación y Posgrado

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

Directora de Investigación

M. en GIC. Karina Villarauz Camargo

Coordinadora de Difusión y Enlace

Dirección de Investigación y Posgrado

Dr. Manuel Toledano Ayala

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes

Comité Organizador

M. en GIC. Karina Villarauz Camargo

Coordinadora de Difusión y Enlace

C. Laura Pilar Wendolyn Vázquez Jasso

Secretaria de la Coordinación

Apoyo logístico

Publicación especial

De la 25° Verano de la Ciencia UAQ

Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n

Código Postal 76010, Querétaro, Qro., México.



INTRODUCCIÓN

Una de las funciones sustantivas de la universidad es la investigación, tarea a través de la cual la **Universidad Autónoma de Querétaro** asume el compromiso de atender algunas de las problemáticas sociales más apremiantes. Aunado a lo anterior, la investigación, al estar vinculada con la docencia y, en la mayoría de los casos, con la vinculación, permite proporcionar a las y los estudiantes una formación integral.

Desde la Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado, a través de la Dirección de Investigación se propone la realización de acciones que contribuyan a la formación en investigación de nuestro estudiantado, una de estas es el **Verano de la Ciencia que se organiza anualmente**. Esta actividad, consiste en una estancia de cinco semanas en donde las y los estudiantes colaboran dentro de un proyecto de investigación tutelado por una persona investigadora de nuestra universidad, con el objetivo de acercarlos a la ciencia, formarlos en investigación y despertar el interés por cursar un posgrado.

El Verano de la Ciencia se realiza en dos modalidades: el **Verano de la Ciencia UAQ**, dirigido a estudiantes de licenciatura que cursan del quinto semestre en adelante y el **Verano de Introducción a la Investigación** dirigido a estudiantes que cursan del primero al cuarto semestre. En estos programas, pueden participar estudiantes y docentes de cualquier facultad, lo cual amplía la oportunidad de formación tanto para estudiantes como para investigadoras e investigadores.

Este año celebramos la edición número **25° del Verano de la Ciencia UAQ**, en el que participaron **15 estudiantes, quienes fueron asesorados por 11 investigadores anfitriones**. En la presente compilación presentamos el producto final de las y los participantes, el cual consiste en un informe de actividades de la estancia con formato de artículo científico.

Los trabajos presentados, además de que ejercitan a las y los estudiantes en la escritura con fines de comunicación académica, muestra el trabajo realizado y los aprendizajes adquiridos. Cabe señalar que todos trabajos fueron revisados y avalados por las personas investigadoras que fungieron como anfitriones.

Agradecemos a las y los estudiantes, a las personas investigadoras por su participación e interés.

Deseamos que lo aprendido trascienda en la formación personal y científica de todas y todos.

Atentamente

“Educo en la Verdad y en el Honor”

Dr. Manuel Toledano Ayala
Secretario de Investigación, Innovación y Posgrado

Dra. Azucena de la Concepción Ochoa Cervantes
Directora de Investigación

25° VERANO DE LA CIENCIA UAQ

INDICE

Participantes	Proyecto
Dulce María Palmerin Carreño; Luz Flor Martínez Salazar	Actividad in vitro de una biomolécula encapsulada con alginato
Cabrera-Galván Regina; Hernández-Silva Diego Josimar; Pérez-Almeida Chyntia Quetzalli	Obtención y caracterización del plásmido pPICZαA-CHPV1.9 mediante su propagación en <i>Escherichia coli</i> TOP10
Velázquez Sánchez Johanna Fátima; Ledesma García Janet; Arriaga Hurtado Luis Gerardo; Escalona Villalpando Ricardo Antonio	Desarrollo de un electrodo de trabajo para un biosensor amperométrico de glucosa
Monica Guadalupe Jimenez Rojo; Dr. Javier López Baltazar; Dr. Josué Manríquez Núñez; Dr. Ángel Ramón Flores Sosa	Desarrollo de un método de germinación in vitro de plantas de tomate nativo
Angel Raziel Guevara Cervantes; Uriel Alejandro Padrón Flores; Monserrat Escamilla García; Aldo Amaro Reyes; Silvia Lorena Amaya Llano; José Ángel Granados Arvizu	Biodegradación de plásticos por <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pestalotiopsis microspora</i> : Evaluación de micorremediación
María Inés Alanis Díaz Leal; Monserrat Escamilla García; Lucia Guadalupe Abadía García; Aldo Amaro Reyes; Silvia Lorena Amaya Llano; José Ángel Granados Arvizu	Evaluación de la microbiota del frass de <i>Hermetia illucens</i> como biofungicida y bioestimulante de crecimiento en plantas de tomate
Benjamín Ruan Ortega; Enrique Leonardo Kato Vidal; Claudia	El retorno del tren de pasajeros en México: evidencia internacional

Cárdenas Aguilar	de su impacto económico
Fernando Cárdenas González; Hugo Jiménez Hernández	Compresión Morfológica a Escala de Grises para Videovigilancia
Peña Sánchez Ana Luisa; Romero González Julio Alejandro	Análisis exploratorio para identificar patrones asociados con depresión estudiantil
A. Alpízar Cejudo; D. G. García-Gutiérrez; J. Rodríguez-Reséndiz; L.G. Arriaga; J. Ledesma-García; R.A. Escalona-Villalpando	Membrana selectiva de iones para sensor de potasio
Minerva Velazquez Quintanar; Guillermo de Jesús Valero Rosillo; Edwin Esaú Hernández Arvizu; Juan Joel Mosqueda Gualito	Identificación de hemoparásitos en sangre de murciélago mediante PCR.
Diana Camila Tamariz López; Diana Margarita Córdova Esparza	Generación automática de animaciones 3D para la Lengua de Señas Mexicana
Abril Sofía Alcántara-Chávez; Dra. Cynthia Quetzalli Perez-Almeida; Dr. Diego Josimar Hernández-Silva	Expresión de CHPV1.9 en <i>Pichia pastoris</i> X-33
Aidee Alvarez Mayorga; Enrique Kato Vidal	Cambio estructural y etapas del desarrollo económico de Querétaro
Arely Lizardi Sánchez; Dr. Leonardo Senén Cabello Álvarez	La implementación del sistema de justicia oral en materia civil y familiar en el Distrito Judicial de San Juan del Río, Querétaro: un análisis jurídico-social del proceso de transición institucional, infraestructura y retos de su entrada en vigor

Actividad *in vitro* de una biomolécula encapsulada con alginato.

Dulce María Palmerin Carreño ¹, Luz Flor Martínez Salazar ¹

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, Campus Pedro Escobedo

dulce.palmerin@uaq.mx

lzflorm@gmail.com

Resumen: La encapsulación de proteínas recombinantes en matrices biocompatibles como el alginato de sodio se destaca como una estrategia prometedora para mejorar la estabilidad y la liberación controlada de agentes terapéuticos. En este proyecto se evaluó un formulado basado en alginato de sodio como sistema de encapsulación para una proteína recombinante dirigida al cáncer de colon, con el objetivo de comprobar que el material no interfiriera con la actividad biológica de la molécula ni presentara actividad proteica propia. Para ello, se preparó el formulado y se comparó con la lectina recombinante de frijol tepari (rTBL-1) mediante electroforesis, además de cuantificar proteína con el kit Rapid Gold BCA. Adicionalmente se realizó un estudio citotóxico en células de cáncer de colon de la línea celular MC-38. Los resultados mostraron que la proteína conservó su actividad citotóxica y que el formulado por sí solo no presentó bandas proteicas detectables en la electroforesis. En conclusión, el formulado demostró ser una matriz adecuada, ya que no alteró la función de la biomolécula y se propone como una opción sencilla y reproducible frente a futuras aplicaciones en la liberación dirigida de proteínas recombinantes contra el cáncer de colon.

Palabras clave: Lectina recombinante, cáncer de colon, alginato de sodio, encapsulación

Abstract: Encapsulating recombinant proteins in biocompatible matrices, such as sodium alginate,

stands out as a promising strategy for enhancing the stability and controlled release of therapeutic agents. This project evaluated a sodium alginate-based formulation as an encapsulation system for a recombinant protein targeting colon cancer, aiming to verify that the material neither interfered with the molecule's biological activity nor exhibited intrinsic protein activity. To this end, the formulation was prepared and compared with the recombinant lectin rTBL-1 via electrophoresis, alongside protein quantification using the Rapid Gold BCA kit. Additionally, a cytotoxicity study was conducted using MC-38 colon cancer cells. The results demonstrated that the protein retained its cytotoxic activity and that the formulation alone showed no detectable protein bands during electrophoresis. In conclusion, the formulation proved to be a suitable matrix, as it did not alter the biomolecule's function; it is proposed as a simple, reproducible option for future applications involving the targeted delivery of recombinant proteins against colon cancer.

Keywords: Recombinant lectin, colon cancer, sodium alginate, encapsulation

Introducción

Actualmente la encapsulación de biomoléculas en matrices poliméricas es una estrategia ampliamente estudiada para protegerlas de la degradación y asegurar su liberación en el lugar objetivo. El alginato de sodio es un biopolímero natural extraído de algas que ha demostrado ser un material versátil y biocompatible para aplicaciones biomédicas. Su capacidad de formar geles estables en condiciones fisiológicas lo convierte en un material apropiado para el transporte de proteínas sensibles. Estudios recientes han señalado que el alginato puede mejorar la biodisponibilidad de proteínas recombinantes y reducir efectos secundarios, consolidándose como un biopolímero prometedor en este campo (Reig-Vano et al., 2021).

En este estudio se propone poner a prueba un formulado de alginato de sodio, diseñado para la encapsulación de una proteína recombinante obtenida a partir de melaza como fuente de carbono

(rTBL-1), que ha mostrado propiedades beneficiosas frente al cáncer de colon.

Objetivo

El objetivo principal es evaluar la interacción del formulado de alginato de sodio con la rTBL-1, así como determinar la influencia que tiene el formulado sobre la actividad biológica de la lectina y su efecto citotóxico en la proliferación celular.

Metodología

Obtención de la lectina

Se usaron 4 g de melaza como fuente de carbono y en un matraz Erlenmeyer con 100 ml de medio se cultivó la levadura *Pichia pastoris* a partir de una colonia en medio YPD. El proceso de fermentación se llevó a cabo en un biorreactor bajo condiciones de sistema fed-batch, manteniéndose durante siete días a 30 °C, con agitación de 200 rpm y pH controlado en 5. La determinación proteica adicional se efectuó mediante el método de ácido bicinconínico (BCA), registrando la absorbancia a 480 nm (López de Lucio et al., 2025).

Estrategia de formulación de la rTBL-1

Para la preparación del formulado que se propone como medio de encapsulación se utilizó una mezcla de 5 mL de solución de lectina a diferentes dosis (500, 700 y 900 µg/mL), aceite mineral y trehalosa al 15 %, a 12,000 rpm. En un tubo se depositó alginato de sodio estéril y se le añadió la emulsión generada. Posteriormente se depositan en una solución de CaCl₂ estéril para formar cápsulas (López de Lucio et al., 2025).

Estudio citotóxico

El estudio citotóxico se llevó a cabo en células de la línea MC-38 (adenocarcinoma de ratón). Las células se sembraron en placas de cultivo con una densidad de 30,000 células por pozo en 50 µL de medio DMEM y se mantuvieron en incubación a 37 °C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se procedió a la tripsinización: se retiró el medio de cultivo, se lavaron las células con PBS para eliminar restos de suero, se añadió tripsina-EDTA y se incubaron a 37 °C durante unos minutos hasta lograr

su desprendimiento. Posteriormente, se inactivó la enzima mediante la adición de medio de cultivo, se centrifugó la suspensión celular y el pellet obtenido se resuspendió en medio fresco para redistribuir las células en nuevos pozos.

En cada pozo se colocó solución de lectina y formulado a diferentes concentraciones (500, 700 y 900 µg/mL), y se mantuvieron en cultivo durante 24 horas adicionales. Se incluyeron dos controles: células tratadas únicamente con formulado sin lectina y células tratadas únicamente con medio de cultivo.

Cuantificación de la proteína.

Se llevó a cabo una cuantificación mediante el kit Rapid Gold BCA, utilizando una curva de calibración con concentraciones conocidas de lectina a una longitud de onda 480 nm. Asimismo, se evaluó la pureza mediante un SDS-PAGE en geles de poliacrilamida al 13% teñidos con Coomassie.

Resultados

En el ensayo se encontró la presencia de proteína en el formulado. Como se observa en la figura 1, todas las muestras presentaron un cambio de color a una tonalidad amarilla que aumenta la intensidad según la concentración de proteína.



Fig. 1 Cuantificación de proteína total mediante el ensayo Rapid Gold BCA

Para este ensayo se preparó una curva estándar utilizando un rango de 100–1000 µg/mL, siguiendo el protocolo de microplaca recomendado por el fabricante. Las muestras de formulado analizadas arrojaron concentraciones de proteína de 190.22 mg/mL y 223.55 mg/mL, una concentración relativamente baja pero que contradice la electroforesis. Es posible que la concentración observada se deba a una contaminación durante la preparación de las muestras y durante la manipulación para la realización del ensayo.

Por otro lado, los resultados de la electroforesis que se presentan en la figura 2, indican que no hay presencia de proteína en el formulado. Si observamos el gel de arriba hacia abajo se puede apreciar dos bandas, la primera de alto peso molecular puede atribuirse a fragmentos proteicos derivados de degradación parcial, isoformas truncadas o subunidades de la lectina.

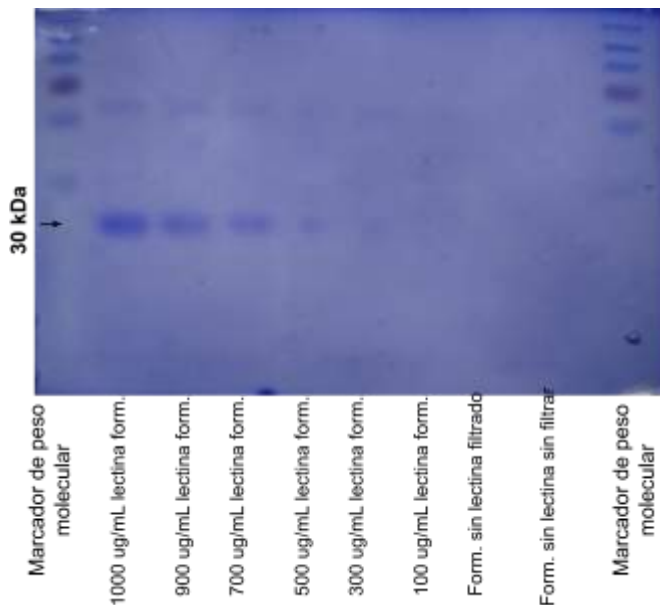


Fig. 2 Electroforesis para detección de proteínas en el formulado

La segunda banda que presenta una coloración más intensa, ubicada en aproximadamente 30 kDa, es el indicador de lectina rTBL-1. Se observa ausencia de bandas en el formulado sin lectina por lo que podemos destacar que no hay presencia de algún componente proteico en el formulado que pudieran interferir con la actividad de la biomolécula.

Finalmente en los resultados del ensayo *in vitro* se demostró que la presencia del formulado no elimina la actividad biológica de la biomolécula, pero sí la reduce, en la figura 3 observamos que la dosis letal 50 se encuentra en 612.3 µg/mL. Anteriormente se realizó el análisis únicamente de la lectina rTBL-1 y se determinó que su DL50 es de 418 µg/mL (Hernández Guzmán et al., 2025). Esto sugiere que el formulado mantiene la integridad de la proteína, aunque con una actividad citotóxica menos eficiente en comparación con la proteína libre.

En los controles utilizados encontramos que no hay efecto sobre las células de cáncer de colon, el control negativo (DMEM) presenta una supervivencia del 100% y el control de formulado sin lectina una supervivencia superior al 80%, de esta forma podemos decir que el formulado por sí solo no tiene efecto significativo sobre la proliferación celular.

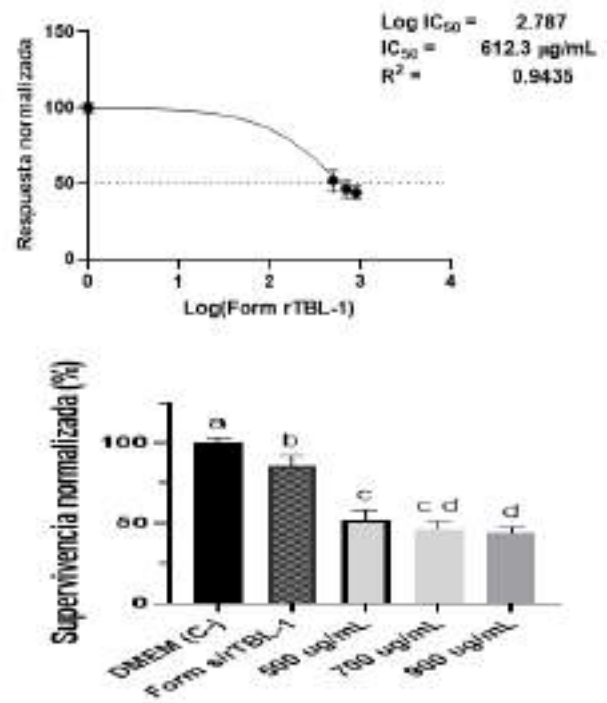


Fig. 3. Dosis-respuesta: MC-38 vs formulado con rTBL-1.

Discusión

El alginato de sodio ha sido objeto de estudio como una forma de encapsulación, (Ramdhan et al., 2020) observó que los geles de alginato puro tienen buena biocompatibilidad pero limitada resistencia mecánica, al combinar otros polímeros como quitosano o gelatina con alginato de sodio se incrementa la elasticidad y estabilidad térmica. Además destaca la capacidad del alginato de sodio para modificarse y ajustar su porosidad, resistencia y cinética de liberación.

Por otro lado, en la encapsulación de proteínas o biomoléculas se conocen diversos métodos, entre ellos la técnica de inverse Flash NanoPrecipitation (iFNP). (Markwalter et al., 2021) utiliza esta técnica

para encapsular proteínas como BSA (bovine serum albumin) y lisozima en nanocarriers poliméricos que mantienen su actividad biológica. Sin embargo esta técnica presenta limitaciones al requerir equipamiento especializado y condiciones estrictas de mezcla rápida.

El formulado planteado con alginato de sodio ha demostrado tener una encapsulación eficaz al mantener la concentración esperada de la lectina (López de Lucio et al., 2025), también tiene ventajas frente a otros métodos de encapsulación al ser un material económico, biocompatible y fácil de manipular.

Respecto a los resultados obtenidos en electroforesis tenemos la presencia de fenómenos comunes en proteínas recombinantes sometidas a condiciones de preparación o almacenamiento. En un estudio reciente (Hajba et al. 2023) destacan que la electroforesis capilar permite separar proteínas nativas y desnaturalizadas, revelando diferencias en tamaño y carga, lo que resulta esencial para el análisis de proteínas recombinantes y terapéuticas. Esto consolida la interpretación de que la banda de mayor peso molecular corresponde a derivados de la lectina.

La rTBL-1 ha demostrado tener aplicaciones en la inhibición del crecimiento de células de cáncer de colon, (Luján-Méndez et al., 2025) encontraron que en modelos murinos, la rTBL-1 inhibió el crecimiento tumoral en ratones inmunocompetentes, pero no en ratones inmunodeficientes, sugiriendo un papel del sistema inmune en la respuesta antitumoral. Por otra parte (Martínez-Alarcón et al., 2024) demostró que la sustitución de residuos críticos de arginina en la lectina recombinante rTBL-1 reduce de manera significativa su efecto citotóxico frente a células de cáncer de colon. En este caso no se modificó la estructura de la lectina, sin embargo, se adicionan compuestos en la formulación del encapsulado que podían alterar o interferir con su efecto citotóxico, sin embargo, el ensayo *in vitro* demuestra que el formulado no afecta significativamente la actividad antitumoral de la lectina.

Conclusiones

Este proyecto permitió comprobar la viabilidad que tiene el formulado de alginato de sodio como sistema de encapsulación para una proteína recombinante con potencial terapéutico frente al cáncer de colon. Se comprobó que no interfiere con la actividad biológica de la lectina encapsulada y, por tanto, preserva su potencial efecto citotóxico frente a células cancerígenas.

Además, la falta de bandas en la electroforesis del formulado nos sugiere que el sistema de encapsulación no aporta proteína detectable, lo que respalda su capacidad como matriz inerte.

Finalmente la aportación principal del trabajo es que se demostró la viabilidad de un sistema sencillo y reproducible para transportar una biomolécula con actividad antitumoral sin comprometer su función, lo que abre la puerta a futuras aplicaciones en este campo.

Agradecimientos

Laboratorio de biología celular y molecular, Facultad de Ciencias Naturales, por prestar sus instalaciones para el desarrollo y aprendizaje durante este proyecto.

Dr. Christian Hernández, por su acompañamiento y enseñanza durante la realización del proyecto.

Referencias bibliográficas

B. Reig-Vano, B. Tylkowski, X. Montané & M. Giamberini, "Alginate-based hydrogels for cancer therapy and research", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 170, pp 424-436. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.161>.

Markwalter, C. E., Pagels, R. F., Hejazi, A. N., Ristroph, K. D., Wang, J., Chen, K., Li, J., & Prud'homme, R. K. (2021). Sustained release of peptides and proteins from polymeric nanocarriers produced by inverse Flash NanoPrecipitation. *Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society*, 334, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.04.002>

C. Hernández Guzmán, B. Álcala Camacho, D. M. Palmerín Carreño, M. Ríos Ortiz, L. A. Ibarra Sánchez & T. García Gasca, “Evaluación de la dosis respuesta de una lectina recombinante sobre células de cáncer de colon”, Memorias del XXI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, Oaxaca, Oax. septiembre-octubre 2025

D. Martínez-Alarcón, J. L. Castro-Guillén , E. Fitches, J. A. Gatehouse, S. Przyborski, U. Moreno-Celis, A. Blanco-Labra & T. García-Gasca, (2024). Directed Mutagenesis for Arginine Substitution of a Phaseolus acutifolius Recombinant Lectin Disrupts Its Cytotoxic Activity. International journal of molecular sciences, 25(24), 13258. <https://doi.org/10.3390/ijms252413258>

F. Luján-Méndez, P. García-López, L. C. Berumen, G. García-Alcocer, R. Ferriz-Martínez, A. Ramírez-Carrera, J. González-Barrón, & T. García-Gasca, (2025). Phaseolus acutifolius recombinant lectin exerts differential proapoptotic activity on EGFR+ and EGFR- colon cancer cells and provokes T cell-assisted antitumor responses in mice. Pharmaceuticals (Basel, Switzerland), 18(2), 213. <https://doi.org/10.3390/ph18020213>

L. Hajba, S. Jeong, D. S. Chung & A. Guttman, “Capillary Gel Electrophoresis of Proteins: Historical overview and recent advances”, TrAC Trends in Analytical Chemistry, Vol. 162. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117024>.

S. López de Lucio, D. M. Palmerín-Carreño, D. Rodríguez Gómez & T. García Gasca, “Potencial anticancerígeno: encapsulación de una lectina recombinante con alginato como material polimérico principal”, (2025).

T. Ramdhan, S. H. Ching, S. Prakash, & B. Bhandari, (2020). Physical and mechanical properties of alginate based composite gels. Trends in Food Science & Technology, 106, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.002>

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PLÁSMIDO pPICZαA-CHPV1.9 MEDIANTE SU PROPAGACIÓN EN *Escherichia coli* TOP10

[Cabrera-Galván Regina]¹, [Hernández-Silva-Diego Josimar]², [Pérez-Almeida-Chyntia-Quetzalli]³

¹Licenciatura en Ingeniería en Biotecnología, Universidad Autónoma de Querétaro.

²[Laboratorio BIOMIVA/Facultad de Ciencias Naturales/Universidad Autónoma de Querétaro].

Correo electrónico: [rcabrera10@alumnos.uaq.mx], [diego.hernandez@uaq.mx]

Resumen

La babesiosis bovina es una enfermedad parasitaria de gran impacto económico. En este estudio se propagó el plásmido pPICZαA-CHPV1.9 (que codifica una proteína quimérica de *Babesia bigemina*) en *Escherichia coli* TOP10, como paso previo a su expresión en *Pichia pastoris*. Tras la transformación bacteriana por choque térmico y la selección por PCR, se eligió la colonia 4 para la extracción de ADN. Mediante modificaciones en el protocolo de MiniPrep, se incrementó la recuperación de ADN plasmídico hasta alcanzar 1269.46 ng/μL. Finalmente, se confirmó la identidad y linealización del plásmido mediante digestiones enzimáticas, asegurando la fuente bacteriana para la futura expresión recombinante.

Palabras clave: babesiosis bovina, CHPV1.9, *Escherichia coli* TOP10, pPICZαA, proteína recombinante.

Abstract

Bovine babesiosis is an economically significant tick-borne parasitic disease. This study focused on propagating the pPICZαA-CHPV1.9 construct—encoding a *Babesia bigemina* chimeric protein—in *Escherichia coli* TOP10 prior to its heterologous expression in *Pichia pastoris*. Following heat-shock transformation and PCR screening, colony 4 was selected for plasmid isolation. Protocol modifications during MiniPrep extraction improved DNA recovery, achieving concentrations up to 1269.46 ng/μL. Plasmid identity and linearization were verified via restriction assays, successfully establishing a bacterial source ready for subsequent protein expression.

Keywords: bovine babesiosis, CHPV1.9, *Escherichia coli* TOP10, pPICZαA, recombinant protein.

1. Introducción

La babesiosis bovina es una parasitosis transmitida por garrapatas y causada por protozoarios del género *Babesia*, la cual ocasiona severas pérdidas económicas a la ganadería debido a cuadros de anemia, hemoglobinuria, fiebre y alta mortalidad [1], [2].

Frente a las desventajas de seguridad, conservación y estandarización que presentan las vacunas atenuadas tradicionales, las proteínas recombinantes y vacunas de subunidades han cobrado relevancia como una alternativa eficaz, en México actualmente no existe una vacuna comercial para esta parasitosis [1], [2]. En *Babesia bigemina*, la identificación de proteínas con epítomos conservados y su expresión heteróloga en *Escherichia coli* han facilitado el desarrollo de antígenos útiles para vacunas y diagnósticos [3], [4].

Dentro de este contexto se desarrolló la proteína quimérica CHPV1.9, constituida por diferentes péptidos inmunogénicos derivados de proteínas de *B. bigemina*. Estudios previos realizados en la UAQ demostraron que la proteína puede ser producida de manera recombinante y que presenta reconocimiento por anticuerpos dirigidos contra diferentes regiones incluidas en su diseño. Además, los anticuerpos generados contra CHPV1.9 han mostrado reconocimiento de proteínas nativas de *B. bigemina* y *B. bovis*, lo que respalda su interés como antígeno para estudios inmunológicos [5].

Posteriormente, su empleo como antígeno en un ensayo ELISA indirecto confirmó un elevado desempeño en especificidad y sensibilidad diagnóstica [6].

Para escalar la producción de esta molécula, se recurre a un sistema de expresión heteróloga. Mientras que *E. coli* es idónea para la clonación y propagación rápida de ADN, la levadura *Pichia pastoris* permite obtener elevadas densidades celulares, modificaciones postraduccionales complejas y la secreción de la proteína al medio [7], [8].

El vector pPICZ α A resulta particularmente apropiado para una estrategia de este tipo debido a que contiene elementos que permiten su propagación en *E. coli* y su posterior expresión en *Pichia pastoris*. Entre ellos se encuentran el promotor AOX1, la señal de secreción α -factor y un marcador de selección con zeocina, además de una etiqueta de histidinas que puede facilitar la detección y purificación de la proteína recombinante [7].

En el presente trabajo se enfocó esta etapa mediante la transformación en *E. coli* TOP10, el cribado de colonias, la extracción plasmídica por MiniPrep (optimizada) y la preparación del constructo como etapa previa indispensable para la futura transformación en *P. pastoris*.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Obtener y verificar el plásmido recombinante pPICZ α A-CHPV1.9 mediante su propagación en *Escherichia coli* TOP10, como etapa previa a su posterior transformación y expresión heteróloga en *Pichia pastoris*.

2.2 Objetivos específicos

- Transformar células competentes de *E. coli* TOP10 con el constructo pPICZ α A-CHPV1.9.
- Confirmar la presencia del constructo mediante PCR de colonia.
- Extraer el ADN plasmídico mediante un procedimiento de MiniPrep.
- Verificar el plásmido mediante digestiones con enzimas de restricción y electroforesis.
- Realizar la linealización del vector mediante PmeI como preparación para una futura transformación de *Pichia pastoris*.

3. Metodología

3.1 Transformación de *Escherichia coli* TOP10

Se utilizaron células competentes de *E. coli* TOP10 y el constructo plasmídico pPICZ α A-CHPV1.9. Las células competentes se descongelaron sobre hielo durante aproximadamente 30 min. Posteriormente se adicionó 1 μ L de la solución de trabajo del plásmido y la mezcla se mantuvo durante aproximadamente 4–5 min antes de realizar el choque térmico. Las células se sometieron a 42 °C durante 30 s y posteriormente se colocaron inmediatamente sobre hielo durante 5 min.

Después del choque térmico se adicionaron 250 μ L de medio SOC y las células se incubaron durante 1 h a 37 °C con agitación. Posteriormente se sembraron en placas de LB suplementado con zeocina. Se utilizaron 200 μ L de la suspensión celular en una

placa y el volumen restante en otra placa. También se incluyó un control positivo. Las placas se incubaron a 37 °C durante 12–16 h.

3.2 PCR de colonia

Para verificar la presencia del gen CHPV1.9 se seleccionaron inicialmente las colonias 2, 4, 5, 6 y 10. Para cada reacción de PCR se preparó un volumen final de 10 µL compuesto por 5 µL de Master Mix, 0.8 µL de oligo F, 0.8 µL de oligo R y agua grado biología molecular para completar el volumen. Debido a que las colonias no se encontraban inicialmente en cultivo líquido, se utilizó material directamente de la colonia como molde.

El programa de amplificación consistió en una etapa inicial de 95 °C durante 3 min. Posteriormente se realizaron nueve ciclos de 95 °C durante 15 s, 62 °C durante 15 s y 72 °C durante 15 s. Después se realizaron 19 ciclos de 95 °C durante 15 s, 69 °C durante 15 s y 72 °C durante 15 s. Finalmente, se realizó una extensión a 72 °C durante 15 s y las muestras se mantuvieron a 4 °C. Los productos obtenidos fueron analizados mediante electroforesis.

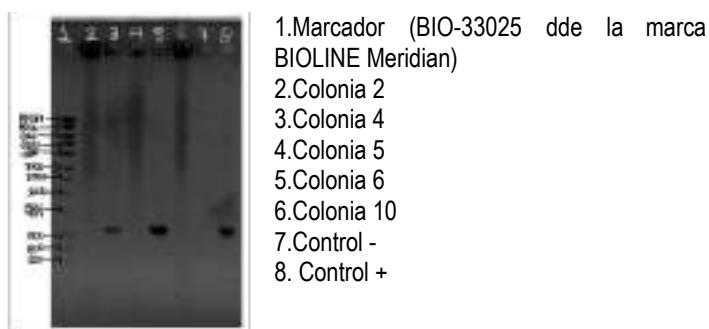


Figura 1. Análisis mediante PCR de colonias de *E. coli* TOP10 transformadas con el constructo pPICZαA-CHPV1.9. Se muestran el marcador molecular, los controles y las colonias evaluadas.

3.3 Selección y propagación de la colonia 4

Después del análisis de las colonias mediante PCR, se seleccionó la colonia 4 para la propagación y extracción del plásmido. La colonia seleccionada se inoculó en 5 mL de caldo LB suplementado con

zeocina y se incubó durante 10–12 h a 32 °C con agitación.

3.4 Extracción plasmídica mediante MiniPrep

La extracción del plásmido se realizó inicialmente utilizando como referencia el procedimiento del sistema **Wizard® Plus SV Minipreps DNA Purification System**.

Se recolectaron alícuotas de 1 mL del cultivo bacteriano mediante centrifugación a 7,000 rpm durante 5 min, repitiendo el procedimiento hasta procesar aproximadamente 5 mL de cultivo. El sobrenadante fue descartado y el pellet bacteriano se resuspendió completamente en 250 µL de solución de resuspensión celular mediante vortex.

Posteriormente se adicionaron 250 µL de solución de lisis celular y se mezcló mediante cuatro inversiones. La suspensión se incubó aproximadamente entre 1 y 5 min hasta observar aclaramiento. Se adicionaron 10 µL de proteasa alcalina y se mezcló nuevamente mediante cuatro inversiones, seguido de una incubación de 5 min a temperatura ambiente.

Después se adicionaron 350 µL de solución de neutralización y se mezcló inmediatamente mediante cuatro inversiones. El lisado se centrifugó a 7,000 rpm durante 20 min a temperatura ambiente y el sobrenadante clarificado se transfirió a una columna de purificación.

La columna se centrifugó durante 2 min. Posteriormente se realizaron dos lavados, utilizando 750 µL y 250 µL de solución de lavado previamente preparada con etanol. Después del segundo lavado se realizó una centrifugación adicional de 4 min para eliminar residuos de la solución de lavado.

Para la recuperación del ADN, se adicionaron sucesivamente alícuotas de agua grado biología molecular, incubando la columna a 37 °C durante 1 min y centrifugando durante 2 min después de cada adición. Finalmente, se recuperó el ADN en un volumen adicional de agua grado biología molecular.

3.5 Verificación del plásmido mediante digestión con EcoRI

Para evaluar la presencia y estructura del plásmido obtenido se realizó un ensayo de restricción con EcoRI. La mezcla de reacción estuvo constituida por 2 μL de enzima/buffer 10X, 0.2 μL de BSA, 4.902 μL de ADN plasmídico, 1 μL de EcoRI y 11.898 μL de agua grado biología molecular. La reacción se incubó durante 1 h 30 min a 37 °C y posteriormente se analizó mediante electroforesis. Se evaluó la colonia 4, además de controles positivo y negativo.

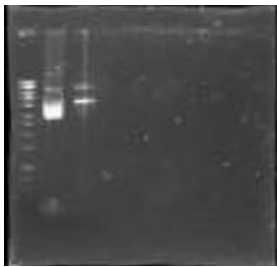


Figura 2. Análisis de restricción del ADN plasmídico obtenido de la colonia 4 mediante digestión con EcoRI. Se muestran el marcador molecular, las muestras de ADN plasmídico sin digerir y digeridas respectivamente.

3.6 Verificación mediante digestión con SacI

Como segundo análisis de restricción se utilizó la enzima SacI. La mezcla estuvo constituida por 6.4 μL de agua grado biología molecular, 1 μL de buffer 10X, 0.1 μL de BSA, 2 μL de ADN plasmídico y 0.5 μL de enzima SacI. La reacción se incubó durante 1 h a 37 °C y se analizaron mediante electroforesis muestras de ADN plasmídico digeridas y sin digerir. A partir de este análisis se confirmó la presencia del plásmido de interés en la colonia 4.

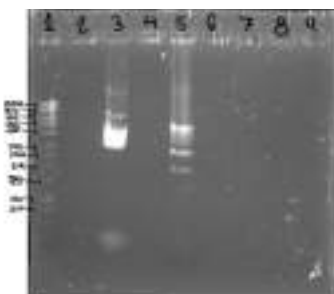


Figura 3. Análisis de restricción del ADN plasmídico obtenido de la colonia 4 mediante digestión con SacI. Se muestran el marcador molecular (1), las muestras de ADN plasmídico sin digerir (3) y digeridas (5) respectivamente.

3.7 MiniPrep modificado

Debido a que la primera extracción no proporcionó una cantidad suficiente de ADN plasmídico para continuar con las etapas posteriores, se modificó el procedimiento de MiniPrep incrementando el volumen de cultivo y ajustando los volúmenes de algunos reactivos.

La colonia 4 se cultivó en 125 mL de caldo LB suplementado con zeocina durante aproximadamente 10–12 h a 37 °C con agitación. La biomasa obtenida se recolectó mediante centrifugación y se resuspendió en 500 μL de solución de resuspensión celular. Posteriormente se adicionaron 500 μL de buffer de lisis y se mezcló mediante cuatro inversiones. Se añadieron 10 μL de proteasa alcalina y se incubó durante 5 min a temperatura ambiente.

Posteriormente se adicionaron 700 μL de solución de neutralización y se mezcló mediante cuatro inversiones. El lisado se centrifugó y el sobrenadante se transfirió a la columna en dos fracciones debido al incremento del volumen de muestra. Los lavados se realizaron utilizando 750 μL de solución de lavado en cada etapa.

Para la elución se utilizó agua grado biología molecular calentada a 90 °C. Se recuperaron inicialmente 30 μL mediante adiciones sucesivas de 10 μL y posteriormente se adicionaron 100 μL adicionales a la columna para recuperar el ADN restante.



Figura 4. Electroforesis del ADN plasmídico obtenido mediante el procedimiento de MiniPrep modificado a partir de *E. coli* TOP10 colonia 4.

3.8 Cuantificación y concentración del ADN plasmídico

La concentración de ADN plasmídico se determinó mediante espectrofotometría utilizando NanoDrop. En el procedimiento inicial se obtuvieron concentraciones promedio de 344.36 ng/ μ L para la fracción de 30 μ L y 203.96 ng/ μ L para la fracción de 50 μ L. Posteriormente, mediante el procedimiento de MiniPrep modificado, se obtuvieron concentraciones promedio de 435.6 ng/ μ L en la fracción de 30 μ L y 357.4 ng/ μ L en la fracción de 100 μ L.

Para incrementar la concentración del ADN, se combinaron las muestras y se adicionó etanol en una relación 2:1 respecto al volumen de ADN. La mezcla se incubó durante 30 min a baja temperatura y posteriormente se centrifugó a 7,000 rpm durante 10 min. Se eliminó el sobrenadante y el residuo de etanol se evaporó a 60 °C. Finalmente, el ADN se resuspendió en 10 μ L de agua grado biología molecular. Después de este procedimiento se obtuvo una concentración promedio de 1269.46 ng/ μ L.

3.9 Linealización del vector para la futura transformación de *Pichia pastoris*

Como etapa previa a la transformación de *Pichia pastoris*, se realizó un ensayo de linealización del plásmido pPICZ α A-CHPV1.9 mediante la enzima PmeI. La reacción contenía 3.5 μ L de ADN plasmídico, 0.7 μ L de buffer CutSmart 10X y 2.8 μ L de enzima PmeI. La mezcla se incubó a 37 °C durante 2 h y posteriormente se tomó una alícuota de 1 μ L para evaluar el resultado mediante electroforesis.

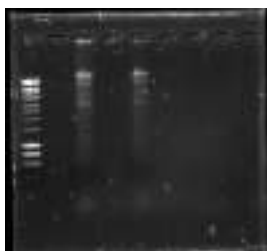


Figura 5. Evaluación de la linealización del vector pPICZ α A-CHPV1.9 mediante PmeI. Se muestra el marcador molecular, el vector sin digerir y el vector sometido a digestión durante 2 h respectivamente.

La linealización representa la preparación del constructo para la siguiente etapa experimental, correspondiente a su transformación en *Pichia pastoris*. Esta etapa no se completó durante el periodo de trabajo, por lo que la expresión de CHPV1.9 quedó planteada como una fase posterior del proyecto.

4. Resultados

La transformación de *E. coli* TOP10 permitió obtener colonias bacterianas capaces de crecer bajo selección con zeocina. A partir de las placas de selección se aislaron 12 colonias para su posterior análisis molecular.

La presencia del constructo fue evaluada mediante PCR de colonia. Debido a problemas experimentales durante una de las primeras corridas, fue necesario repetir el análisis de las colonias seleccionadas. Finalmente, la colonia 4 fue seleccionada para la propagación del plásmido y extracción de ADN.

La extracción plasmídica inicial permitió recuperar ADN, con una concentración promedio de 344.36 ng/ μ L en una fracción de 30 μ L. Sin embargo, la cantidad obtenida no fue suficiente para las etapas posteriores, por lo que se modificó el procedimiento aumentando el volumen de cultivo y ajustando los volúmenes de los reactivos. Con este procedimiento se obtuvo una concentración promedio de 435.6 ng/ μ L en la fracción de 30 μ L.

El análisis de restricción mediante SacI permitió corroborar la presencia del plásmido de interés en la colonia 4, por lo que esta colonia se utilizó como fuente para las siguientes extracciones plasmídicas.

Posteriormente, la combinación de las muestras y su concentración mediante precipitación con etanol permitió obtener una concentración promedio de 1269.46 ng/ μ L.

Finalmente, se realizó la linealización del vector pPICZ α A-CHPV1.9 con PmeI como preparación para la transformación de *Pichia pastoris*.

5. Discusión

La obtención de una clona bacteriana portadora del constructo pPICZ α A-CHPV1.9 constituye una etapa fundamental para continuar con la producción de CHPV1.9 mediante expresión heteróloga. *E. coli* es ampliamente utilizada en procesos de clonación y producción de proteínas recombinantes debido a su crecimiento rápido y a la disponibilidad de herramientas moleculares para la propagación y caracterización de ADN recombinante [7], [8]. En el presente trabajo, la utilización de *E. coli* TOP10 permitió recuperar y mantener el constructo necesario para continuar con el proyecto.

La selección mediante zeocina fue consistente con las características del vector pPICZ α A, que incorpora un marcador de resistencia a este antibiótico y permite la selección tanto en *E. coli* como en *Pichia pastoris* [7]. La posterior confirmación molecular mediante PCR y digestiones de restricción permitió establecer la colonia 4 como la fuente bacteriana utilizada para las etapas posteriores.

La extracción de ADN plasmídico representó uno de los principales puntos de optimización del procedimiento. El MiniPrep inicial permitió recuperar ADN, pero la cantidad obtenida no fue suficiente para continuar con las etapas de preparación del vector. El incremento del volumen de cultivo y la modificación de los volúmenes de algunos reactivos permitió obtener una mayor concentración en algunas de las preparaciones. Sin embargo, los resultados posteriores mostraron que un mayor volumen de cultivo no necesariamente se traduce en un incremento proporcional de la concentración final, debido a que el rendimiento también depende de factores como la eficiencia de

resuspensión y lisis, la recuperación del sobrenadante, la capacidad de la columna y la eficiencia de elución.

La etapa de linealización con PmeI representó el último punto alcanzado durante el periodo experimental. El vector pPICZ α A está diseñado para la expresión heteróloga en *Pichia pastoris*, y contiene elementos que permiten la expresión y, en determinados diseños, la secreción de proteínas recombinantes [7].

La utilidad de esta estrategia también ha sido demostrada para antígenos destinados al desarrollo de vacunas de subunidades. Por ejemplo, proteínas candidatas a vacunas producidas en *Pichia pastoris* han mostrado altos rendimientos y conservación de características antigénicas, lo que respalda el uso de este sistema como una plataforma para la producción de antígenos recombinantes [8].

En el caso particular de CHPV1.9, trabajos previos han demostrado su capacidad para ser producida como proteína recombinante y su reconocimiento por anticuerpos asociados con la infección por *Babesia* [5], [6].

Aunque la transformación de *Pichia pastoris* no se completó durante el periodo experimental, los resultados obtenidos permitieron avanzar desde la recuperación del constructo bacteriano hasta su preparación para la etapa de transformación de la levadura. De esta manera, el trabajo realizado estableció una base experimental para continuar posteriormente con la expresión y caracterización de CHPV1.9.

6. Conclusiones

Se logró obtener y propagar el constructo recombinante pPICZ α A-CHPV1.9 en *Escherichia coli* TOP10 mediante transformación bacteriana y selección con zeocina.

La presencia del constructo fue evaluada mediante PCR de colonia y ensayos de restricción,

permitiendo seleccionar la colonia 4 para la propagación y extracción del ADN plasmídico.

La transformación y expresión de CHPV1.9 en la levadura quedaron como etapas posteriores del proyecto.

En conjunto, el trabajo permitió establecer una preparación bacteriana del constructo pPICZ α A-CHPV1.9 y avanzar en su caracterización y preparación para futuras etapas de expresión recombinante, contribuyendo al desarrollo experimental de una plataforma para el estudio de CHPV1.9 como antígeno de interés en babesiosis bovina.

7. Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro y al laboratorio de BIOMIVA por las instalaciones, materiales y equipos proporcionados para la realización del proyecto. Asimismo, se agradece al Dr. Diego Josimar Hernández Silva y la Dra. Quetzalli Pérez por la orientación y acompañamiento durante el desarrollo de las actividades experimentales.

8. Referencias bibliográficas

- A. Altangerel, A. Alhassan, H. Iseki, T. Sivakumar, D. Boldbaatar, N. Yokoyama, and I. Igarashi, "Evaluation of *Babesia bigemina* 200 kDa recombinant antigen in enzyme-linked immunosorbent assay," *Parasitology Research*, vol. 105, no. 1, pp. 249–254, 2009, doi: 10.1007/s00436-009-1392-2.
- R. M. Bill, "Recombinant protein subunit vaccine synthesis in microbes: a role for yeast?" *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, vol. 67, no. 3, pp. 319–328, 2015, doi: 10.1111/jphp.12353.
- S. M. Cárdenas Rodríguez, "Desarrollo y estandarización de un inmunoensayo ligado a enzima indirecto basado en la proteína CHPV 1.9 para el diagnóstico de *Babesia bovis* y *Babesia bigemina*," Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, 2022.
- J. Antonio Álvarez-Martínez, C. Rojas-Martínez, J. J. Lira-Amaya, and J. V. Figueroa-Millán, "Live Attenuated Vaccine for the Control of Bovine Babesiosis in México: A Review," *Newest Updates in Agriculture and Veterinary Science*, vol. 1, 2022, doi: 10.9734/bpi/nuavs/v1/4168E.
- D. D. Hartwig, T. L. Oliveira, F. K. Seixas, K. M. Forster, C. Rizzi, C. P. Hartleben, A. J. A. McBride, and O. A. Dellagostin, "High yield expression of leptospirosis vaccine candidates LigA and LipL32 in the methylotrophic yeast *Pichia pastoris*," *Microbial Cell Factories*, vol. 9, art. no. 98, 2010, doi: 10.1186/1475-2859-9-98.
- art. no. 98, 2010, doi: 10.1186/1475-2859-9-98.
- S. Shompole, L. E. Perryman, F. R. Rurangirwa, T. F. McElwain, D. P. Jasmer, A. J. Musoke, C. W. Wells, and T. C. McGuire, "Monoclonal antibody to a conserved epitope on proteins encoded by *Babesia bigemina* and present on the surface of intact infected erythrocytes," *Infection and Immunity*, vol. 63, no. 9, pp. 3507–3513, 1995, doi: 10.1128/IAI.63.9.3507-3513.1995.
- L. Schnittger, A. M. Rodriguez, A. Florin-Christensen, and G. Morrison, "Vaccines against bovine babesiosis: where we are now and possible roads ahead," *Parasitology*, 2012.
- M. Weidner, M. Taupp, and S. J. Hallam, "Expression of recombinant proteins in the methylotrophic yeast *Pichia pastoris*," *Journal of Visualized Experiments*, no. 36, art. no. 1862, 2010, doi: 10.3791/1862.

Desarrollo de un electrodo de trabajo para un biosensor amperométrico de glucosa.

Velázquez Sánchez Johanna Fátima¹, Ledesma García Janet¹, Arriaga Hurtado Luis Gerardo², Escalona Villalpando Ricardo Antonio¹.

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Campus Aeropuerto Carr. a Chichimequillas s/n C.P. 76140, Querétaro, Qro. jvelazquez46@alumnos.uaq.mx, janet.ledesma@uaq.mx, ricardo.escalona@uaq.edu.mx

²Tecnológico de Monterrey. Institute of Advance Materials for Sustainable Manufacturing, 76130, Santiago de Querétaro, México. larriaga@cideteq.mx

Resumen — En esta investigación se evaluó el uso de la glucosa oxidasa como biorreceptor y del ferrocianuro como mediador redox, ambos depositados sobre un electrodo de trabajo, para el desarrollo de un sensor electroquímico de glucosa. La caracterización del sensor se realizó mediante técnicas amperométricas, con el propósito de determinar su respuesta electroquímica y establecer el rango de detección de glucosa.

Palabras clave — amperometría, corriente, glucosa, enzima.

Abstract — In this study, glucose oxidase was evaluated as a bioreceptor and ferricyanide as a redox mediator, both deposited onto a working electrode for the development of an electrochemical glucose sensor. The sensor was characterized using amperometric techniques to evaluate its electrochemical response and determine the glucose detection range.

Keywords — amperometry, current, glucose, enzyme.

I. INTRODUCCIÓN

La monitorización de glucosa en sangre es primordial para el control de la diabetes, ya que permite identificar patrones glucémicos relacionados con la dieta, la actividad física, los medicamentos o diversos procesos patológicos (Mathew & Zubair, 2026). La concentración de glucosa en personas sanas se mantiene en un rango de 4.1 a 5.5 mmol/L, o bien, de 74 a 99 mg/dL (Sacks et al., 2023).

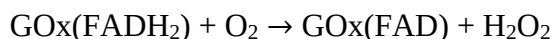
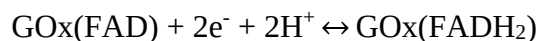
En este contexto, los biosensores son herramientas de diagnóstico que utilizan reacciones bioquímicas para la detección de compuestos químicos (Waly et al., 2026). Están formados por tres componentes principales: un biorreceptor, que detecta de forma selectiva la molécula de interés; un transductor, que transforma la interacción en una señal cuantificable; y un sistema de procesamiento y lectura (Weber et al., 2026).

Los biosensores electroquímicos basados en glucosa oxidasa (GOx) poseen una alta selectividad y sensibilidad, un rango lineal adecuado y bajo límite de detección (Sakalauskiene et al., 2022). GOx es una enzima oxidorreductasa compuesta por dos subunidades idénticas unidas a un complejo de flavina adenina dinucleótido (FAD) (Alatzoglou et al., 2024).

En un biosensor, la enzima GOx se inmovilizada sobre la superficie del electrodo de trabajo, cuando se agrega glucosa cataliza la reacción utilizando oxígeno molecular como aceptor de electrones, produciendo D-glucono-δ-lactona (GDL) y peróxido de hidrogeno (H₂O₂) (He et al., 2026). La reacción general es:



Durante el proceso catalítico, el cofactor FAD, presente en el sitio activo de la glucosa oxidasa, se reduce a FADH₂ al aceptar los electrones provenientes de la oxidación de la glucosa. Posteriormente, al aplicar un potencial fijo, aproximadamente de 400 mV, el FADH₂ se reoxida a FAD (Li et al., 2024). El proceso puede expresarse mediante las siguientes reacciones:



Los electrones son transferidos a la superficie del electrodo a través de un mediador como el ferrocianuro (Jara Fornerod et al., 2023). La corriente resultante es directamente proporcional a la concentración de glucosa (Soranzo et al., 2022).

II. OBJETIVOS

- Desarrollar electrodos de trabajo para un biosensor enzimático de glucosa mediante la inmovilización de glucosa oxidasa.
- Evaluar electroquímicamente los electrodos desarrollados mediante amperometría en una solución tampón con pH 7.4, simulando condiciones sanguíneas.
- Analizar la respuesta de corriente obtenida frente a diferentes concentraciones de glucosa para determinar su rango de detección.

III. METODOLOGÍA

a) Preparación de los electrodos de trabajo.

Se preparó una solución tampón de fosfatos (PBS) usando fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4) y fosfato de sodio dibásico (Na_2HPO_4), ajustando el pH a 7.4 con ácido clorhídrico (HCl). Posteriormente, la glucosa oxidasa se dispersó en una alícuota de PBS y se mezcló con una solución de ferroceno $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ en una mezcla de agua y metanol. Finalmente, se añadió glutaraldehído al 5% y la solución resultante se depositó sobre la superficie del electrodo de trabajo.

b) Preparación de solución de glucosa.

Se preparó una solución madre 1 M agregando 1.8 g de glucosa a un matraz volumétrico y aforando con PBS hasta alcanzar un volumen final de 10 mL. Se tomó una alícuota de 5 μL de la solución 1 M para obtener una concentración 1mM en un volumen de 5 mL de solución.

c) Pruebas amperométricas.

Las mediciones electroquímicas se realizaron empleando un potenciostato Epsilon conectado a una celda de tres electrodos, integrada por un electrodo de trabajo, un contraelectrodo de grafito y un electrodo de referencia de Ag/AgCl, sumergidos en 5 mL de solución tampón de fosfatos contenidos en un vaso de precipitado con una tapa perforada para sostener cada electrodo en su posición durante las pruebas. La evaluación se llevó a cabo seleccionando la técnica de amperometría, aplicando un potencial constante de 400 mV, durante un periodo de 180 segundos. La respuesta de la corriente se registró mediante adiciones sucesivas de glucosa en incrementos de 1 mM, hasta alcanzar una concentración final de 6 mM.

IV. RESULTADOS

Al iniciar la amperometría, se observan valores elevados, principalmente entre 40-50 μA , mientras que la respuesta de la concentración de 1mM comienza en 13.79 μA , Figura 1. Sin embargo, la corriente inicial no presenta un orden creciente con la concentración de glucosa, debido principalmente a fenómenos fisicoquímicos dentro del sistema, como la presencia de una alta corriente capacitiva.

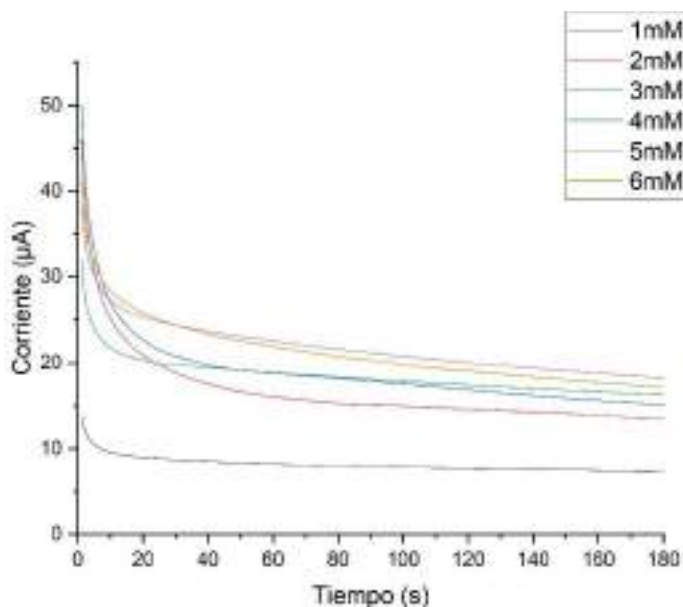


Figura 1. Amperometría a diferentes concentraciones de glucosa en PBS (pH 7.4).

A partir de los 90 s, las curvas muestran una tendencia general hacia corrientes mayores conforme aumenta la concentración de glucosa, siendo más evidente la separación entre valores a los 180 s, Tabla 2.

Figura 2. Respuesta amperométrica a diferentes concentraciones de glucosa en PBS (pH 7.4), a 180 s.

Concentración de glucosa	Corriente
1 mM	7.30 μ A
2 mM	13.47 μ A
3 mM	15.10 μ A
4 mM	16.26 μ A
5 mM	18.22 μ A
6 mM	17.14 μ A

La respuesta de la corriente respecto a la concentración de glucosa aumenta en el rango de 1 mM a 5 mM, sin embargo, a 6 mM la corriente cae aproximadamente 1 μ A.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La disminución de la corriente observada entre 5 y 6 mM es probable que se deba al desprendimiento parcial del recubrimiento del electrodo de trabajo o a la saturación de los sitios catalíticos de la enzima.

Asimismo, existen diversas áreas de mejora para el biosensor, entre ellas destaca la estabilidad temporal, a pesar de que las curvas alcanzan una pendiente menor después de los 90 s, no se alcanza una corriente completamente constante en el intervalo evaluado. También se plantea la reducción del tiempo de estabilización y aumentar la separación entre las señales de concentraciones próximas, con el fin de lograr mediciones rápidas y precisas que permitan cuantificar los niveles de glucosa de un paciente en tiempo real.

Por otro lado, dentro de las características a resaltar es que el intervalo de funcionamiento esta de dentro del rango de concentración fisiológica de la glucosa. No obstante, se deben hacer cambios en la metodología que permitan extender el rango de detección hasta 30 mM para permitir la identificación de hiperglucemia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro por hacer posible la realización del Verano de la Ciencia UAQ 2026. Al Laboratorio Nacional de Micro y Nano Fluídica por brindarme la oportunidad de llevar a cabo esta estancia de investigación en sus instalaciones.

VI. REFERENCIAS

Alatzoglou, C., Tzianni, E. I., Patila, M., Trachioti, M. G., Prodromidis, M. I., & Stamatis, H. (2024). Structure-Function Studies of Glucose Oxidase in the Presence of Carbon Nanotubes and Bio-Graphene for the Development of Electrochemical Glucose Biosensors. *Nanomaterials*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/nano14010085>

He, J., Chen, B., Wang, J., & Wang, Q. (2026). A brief description of electrochemical glucose biosensors and their future challenges. In *Nano Biomedicine and Engineering* (Vol. 18, Number 3). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.nbe.2025.100020>

Jara Fornerod, M. J., Alvarez-Fernandez, A., Michalska, M., Papakonstantinou, I., & Guldin, S. (2023). Glucose Oxidase Loading in Ordered Porous Aluminosilicates: Exploring the Potential of Surface Modification for Electrochemical Glucose Sensing. *Chemistry of Materials*, 35(18), 7577–7587. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c01202>

Li, L.-L., Zhao, Y., Pan, L.-J., Xu, J.-B., & Shi, Y. (2024). A direct electrochemical biosensor for rapid glucose detection based on nitrogen-doped carbon nanocages. <https://doi.org/10.1007/s12598>

Mathew, T. K., & Zubair, M. (2026). Blood Glucose Monitoring. *Medical Devices and Systems*, 66-1-66–10. <https://doi.org/10.1201/9781420003864.ch66>

Sacks, D. B., Arnold, M., Bakris, G. L., Bruns, D. E., Horvath, A. R., Lernmark, Å., Metzger, B. E., Nathan, D. M., & Kirkman, M. S. (2023). Guidelines and Recommendations for Laboratory Analysis in the Diagnosis and Management of Diabetes Mellitus.

Diabetes Care, 46(10), e151–e199.
<https://doi.org/10.2337/dci23-0036>

Sakalauskiene, L., Popov, A., Kausaite-Minkstimiene, A., Ramanavicius, A., & Ramanaviciene, A. (2022). The Impact of Glucose Oxidase Immobilization on Dendritic Gold Nanostructures on the Performance of Glucose Biosensors. *Biosensors*, 12(5).
<https://doi.org/10.3390/bios12050320>

Soranzo, T., Ben Tahar, A., Chmaysem, A., Zelsmann, M., Vadgama, P., Lenormand, J. L., Cinquin, P., K. Martin, D., & Zebda, A. (2022). Electrochemical Biosensing of Glucose Based on the Enzymatic Reduction of Glucose. *Sensors*, 22(19).
<https://doi.org/10.3390/s22197105>

Waly, Y., Hussain, A., Al-Majmoui, A., Alatoom, M., Alaraibi, A. J., Alaysereen, A., & Deen, G. R. (2026). Evolution of Biosensors and Current State-of-the-Art Applications in Diabetes Control. In *Biosensors* (Vol. 16, Number 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/bios16010039>

Weber, T. E., Fritschen, A., Prins, M. W. J., & Blaeser, A. (2026). What Is a Biosensor?—A Terminological Guide From Biomolecular Recognition to Bioindicators. In *Engineering in Life Sciences* (Vol. 26, Number 2). John Wiley and Sons Inc.
<https://doi.org/10.1002/elsc.70068>



Desarrollo de un método de germinación *in vitro* de plantas de tomate nativo

Monica Guadalupe Jimenez Rojo^a, Dr. Javier López Baltazar^b, Dr. Josué Manríquez Núñez^a y Dr. Ángel Ramón Flores Sosa^a.

^aFacultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Colonia Las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Qro.

^bInstituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México, Ex hacienda de Nazareno, C.P. 71233, Xoxocotlan, Oaxaca, Mexico.

mjimenez142@alumnos.uaq.mx, javier.lb@voaxaca.tecnm.mx
josue.manriquez@uaq.mx, angel.ramon.flores@uaq.mx

Resumen

La alta salinidad en el suelo agrícola es un grave problema para la producción de cultivos. Por ello el objetivo del presente estudio fue evaluar un método para germinar *in vitro* semillas de tres variedades de tomate nativo: 'IMTE Cónico', 'IMTE Redondo' y 'XOXO Tee' que permita evaluar su potencial tolerancia al estrés salino.

Se estableció un protocolo de propagación *in vitro* utilizando medio MS suplementado con diferentes concentraciones de BAP (0.5, 1.0 y 1.5 mg/L). A la par se aplicó estrés salino (NaCl 100 mM) a plantas de tomate durante 7 días para cuantificar la capacidad antioxidante mediante el ensayo DPPH en tejido foliar y radicular.

Los resultados indicaron que el BAP en concentración de 1 mg/L optimizaron el establecimiento *in vitro* para 'IMTE Cónico', mientras que 1 mg/L y 0.5 mg/L de BAP optimizaron a 'IMTE Redondo'. Bajo las condiciones de salinidad las plantas presentaron una baja capacidad antioxidante; en hojas de las plantas sometidas al estrés salino se observó ligero aumento en la inhibición del radical; mientras que en raíz, tanto en el tratamiento control como en el sometido a estrés salino, la capacidad antioxidante fue

prácticamente nula. Por lo cual se concluye que el método para cultivo *in vitro* es viable para los tipos de semilla 'IMTE Cónico' e 'IMTE Redondo', mientras que el uso de tejido foliar es mejor para medir capacidad antioxidante.

Palabras clave: Cultivo *in vitro*, estrés salino, capacidad antioxidante, tomate nativo.

Abstract

High soil salinity is a serious problem for agricultural crop production. Therefore, the objective of this study was to evaluate a method for *in vitro* germination of seeds from three native tomato varieties: 'IMTE Cónico', 'IMTE Redondo', and 'XOXO Tee', to assess their potential tolerance to saline stress.

An *in vitro* propagation protocol was established using MS medium supplemented with different concentrations of BAP (0.5, 1.0, and 1.5 mg/L). Simultaneously, saline stress (100 mM NaCl) was applied to tomato plants for 7 days to quantify antioxidant capacity using the DPPH assay in leaf and root tissue.

The results indicated that 1 mg/L of BAP optimized *in vitro* establishment for 'IMTE Cónico', while 1 mg/L and 0.5 mg/L of BAP optimized it for 'IMTE Redondo'. Under saline stress conditions, the plants exhibited low antioxidant capacity; in the leaves of plants subjected to saline stress, a slight increase in free radical inhibition was observed, whereas in the roots—both in the control and saline stress treatments—the antioxidant capacity remained unchanged.

Keywords:

In vitro culture, saline stress, antioxidant capacity, native tomato.

Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es uno de los cultivos más importantes a nivel global, tanto por su valor nutricional como por su relevancia económica. En México, su consumo anual per cápita alcanzó los 14.1 kg en 2023, y el país se posicionó como el séptimo



exportador mundial de este producto (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SEDAR], 2025). Sin embargo, su producción enfrenta desafíos crecientes debido a la salinización de los suelos, un problema ambiental que limita la productividad agrícola en regiones áridas y semiáridas (Hernandez et al, 2025). Los cultivos de tomate, al ser plantas glicófitas (sensibles a la salinidad), ven afectado su crecimiento y rendimiento cuando el potencial hídrico del suelo disminuye. Esto genera en las plantas un estrés abiótico caracterizado por desequilibrios iónicos, efectos tóxicos específicos por iones como el sodio (Na^+) y el cloro (Cl^-), y un aumento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Ahmed et al., 2024). Estas últimas provocan estrés oxidativo, dañando componentes celulares como lípidos, proteínas y ADN, lo cual finalmente afecta el desarrollo de la planta.

Para contrarrestar este daño, algunas plantas han desarrollado mecanismos de defensa enzimáticos, como incremento en la actividad de las enzimas catalasa y superóxido dismutasa, y no enzimático, como aumento en la síntesis de fenoles y flavonoides (Zhao et al., 2020). Estos metabolitos ayudan a neutralizar las ROS generadas por el estrés salino, por lo que pueden servir como indicador para evaluar la tolerancia al estrés salino de las plantas.

Para estudiar variedades de tomate que potencialmente tengan la capacidad de tolerar este tipo de estrés, el cultivo *in vitro* emerge como una herramienta clave para evaluar la resistencia de las plantas, ya que es posible controlar variables ambientales y acelerar el crecimiento mediante el uso de fitohormonas como BAP(6-bencilaminopurina), hormona vegetal del tipo citoquinina que promueve la división celular, la ramificación radicular y la organogénesis (Werner et al., 2001), así como establecer condiciones estandarizadas para evaluar respuestas de las plantas.

Aunque existen protocolos establecidos para la propagación *in vitro* de tomate, estos suelen ser específicos para variedades comerciales y no necesariamente aplicables a cultivares nativos. Por lo cual en esta investigación se busca implementar condiciones para cultivo *in vitro* y el uso de BAP para la

germinación de semillas nativas de Oaxaca, con potencial capacidad de tolerar estrés salino. Así como establecer qué parte de la planta es ideal para medir su capacidad antioxidante mediante ensayos como el DPPH con el fin de identificar los genotipos más tolerantes al estrés salino.

Objetivos

Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (0.5,1.0 y 1.5 mg/L de BAP) en la germinación *in vitro* de las semillas de tomate nativo.

Inducir estrés salino en plantas de tomate mediante la aplicación de cloruro de sodio (NaCl a 100 mM) para simular condiciones de salinidad agrícola.

Determinar la capacidad de neutralización de radicales libres (ensayo DPPH) en hojas y raíces para evaluar el nivel de respuesta de defensa de la planta.

Metodología

Cultivo In Vitro

La investigación se llevó a cabo en los Laboratorios de la Facultad de Química de la UAQ: Estrés oxidativo y Salud y el de Fisiología y Bioquímica Poscosecha de Frutos y Hortalizas. El material vegetal consistió en semillas de tomate nativo originarias del estado de Oaxaca, correspondientes a los cultivares 'IMTE Cónico', 'IMTE Redondo' y 'XOXO Tee' [estos materiales fueron proporcionados por el Dr. Javier López Baltazar del ITVO]. Para cada cultivar, se seleccionaron nueve semillas homogéneas que no presentan coloraciones oscuras ni daños visibles.

La desinfección de las semillas se realizó bajo condiciones asépticas dentro de una campana de flujo laminar. Inicialmente, las semillas se sumergieron en una solución de hipoclorito de sodio (cloro comercial) al 20% (v/v) durante 30 segundos, seguido de una inmersión en etanol al 70% (v/v) por 30 segundos.



Para la germinación, se prepararon 250 mL de medio de cultivo utilizando 1.11 g de medio basal Murashige y Skoog (MS), suplementado con 7.5 g de dextrosa y 0.93 g de agar como agente gelificante. El pH del medio se ajustó a 5.8 mediante la adición de una solución de NaOH 0.1 N. Finalmente, el medio se distribuyó en frascos de cultivo y se esterilizó en una autoclave a 121 °C y 0.1 MPa de presión durante 15 minutos.

Con el objetivo de evaluar el efecto de la 6-bencilaminopurina (BAP) en el establecimiento, se probaron tres concentraciones: 0.5, 1.0 y 1.5 mg/L. En condiciones de estricta asepsia dentro de la campana de flujo laminar, se dosificaron volúmenes específicos de la solución madre de BAP concentrada en frascos de cultivo previamente lavados y esterilizados.

Posteriormente, en cada frasco se llevó a un volumen final de 10 mL con el medio de cultivo MS. El sembrado se realizó colocando tres semillas en el centro del medio de cultivo de cada variante de tomate por cada tratamiento de BAP.

Análisis Bioquímico de la respuesta al estrés salino en plantas de tomate.

Para evaluar las respuestas bioquímicas, se utilizaron 10 plantas de tomate proporcionadas por la Dra. Carmen González, de la Facultad de Química. De estas plantas, cinco se sometieron a un tratamiento de estrés salino mediante la aplicación de riego diario con 100 mL de una solución de NaCl a una concentración de 100 mM. Las cinco plantas restantes conformaron el grupo control, el cual se regó de igual forma utilizando 100 mL de agua destilada. Este régimen de tratamientos se mantuvo durante un periodo de siete días. Finalizado este tiempo, se procedió a la recolección del material vegetal, conservando exclusivamente las hojas y las raíces. Finalmente, el tejido radicular se lavó con abundante agua destilada hasta eliminar por completo cualquier residuo de tierra o sustrato.

Preparación de extractos vegetales.

Para la extracción de los compuestos antioxidantes, se pesaron 0.5 g de hojas y 1.5 g de raíces y se añadió con 25 mL de metanol al 80 %, se realizaron triplicado de cada extracto, las muestras se homogeneizaron en un ultraturrax a 10,000 rpm. Posteriormente, los extractos se centrifugaron a 12000 rpm durante 15 minutos a 4°C. Se recuperó el sobrenadante y se almacenó para su posterior análisis.

Evaluación de la capacidad antioxidante mediante el método de DPPH.

La capacidad para neutralizar radicales libres se evaluó utilizando el método del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH). Inicialmente, se preparó una solución de DPPH a una concentración de 0.15 mM en 100 mL de metanol al 80 %, la cual se estandarizó para obtener una absorbancia de 1.25 a una longitud de onda de 517 nm.

Para el ensayo, se hicieron reaccionar 100 µL de cada extracto vegetal con 2.9 mL del reactivo DPPH previamente estandarizado. La mezcla se incubó en completa oscuridad durante 30 minutos. Después de este periodo, la reducción del radical libre DPPH se cuantificó en el espectrofotómetro a 517 nm, empleando metanol como blanco. La capacidad antioxidante se calculó a partir de una curva estándar de Trolox y los resultados finales se expresaron como mmol equivalentes de Trolox por gramo de muestra (mmol ET/g de tejido).

Resultados:

Germinación De Las Semillas Con BAP.

Para evaluar el efecto de las diferentes concentraciones de BAP en las semillas de tomate nativo, se realizó un seguimiento fotográfico desde el día del cultivo hasta la sexta semana. El desarrollo de las plántulas se documenta en las figuras 1, 2 y 3.



Figura 1. Día uno del cultivo *in vitro* de semillas de tomate nativo con concentraciones de BAP de 0.5, 1.0 y 1.5 mg/L.

El establecimiento *in vitro* de las tres variedades de semillas usadas 'IMTE Cónico', 'IMTE Redondo' y 'XOXO Tee', mostraron respuesta en la germinación dependiendo de la concentración de BAP utilizada y el tipo de semilla. Siendo la variedad 'IMTE' que tuvo mejor respuesta al BAP como se puede observar en la figuras 2 y 3. Siendo la variedad IMTE Redondo la que tuvo mejores resultados con las concentraciones de 0.5 y 1 mg /L de BAP. Mientras que las semillas IMTE Cónico solamente tuvieron respuesta con 1 mg/ L de BAP.

Las semillas de la variedad XOXO Tee no mostraron respuesta ante el tratamiento con BAP en ninguna de las concentraciones como se puede ver en la figura 4.

Como se puede observar en la figura 4 los tres tipos de semilla con concentración más alta de BAP (1.5 mg/L) no mostraron crecimiento alguno. En el caso de la concentración de 0.5 mg/L las semilla IMTE Cónico y XOXO no tuvieron cambios durante las seis semanas.



Figura 2. Crecimiento de las plántulas después de una semana y media. a) Crecimiento de semilla IMTE Cónico con 1 mg/L de BAP, b) Crecimiento de semilla IMTE Redondo con 1 mg/L de BAP, C) Crecimiento de semilla IMTE Redondo con 0.5 mg/L.



Figura 3. Crecimiento de las plántulas después de 6 semanas. a) Crecimiento de semilla IMTE Redondo con 1 mg/L de BAP, b) Crecimiento de semilla IMTE Redondo con 0.5 mg/L de BAP, C) Crecimiento de semilla IMTE Cónico con 1 mg/L.



Figura 4. 1) Semillas IMTE Cónico, IMTE Redondo y XOXO Tee sin germinar en medio suplementado con 1.5 mg/L de BAP, 2) Semillas IMTE Cónico sin germinar en medio suplementado con 0.5 mg/L de BAP y XOXO Tee sin germinar en medio suplementado con 0.5 mg/L y 1 mg/L de BAP.

Capacidad Antioxidante Bajo Condiciones De Salinidad.

Para determinar el impacto de la salinidad en el sistema de la planta, se evaluó la capacidad de neutralización de radicales libres mediante el ensayo DPPH en hojas y raíces. Los resultados obtenidos en las plantas control y aquellas expuestas al tratamiento de NaCl se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Efecto del estrés salino sobre la capacidad antioxidante (inhibición del radical DPPH) en tejido vegetal foliar y radicular.

Tratamiento	Tejido	% De inhibición
Control	Hojas	51.85± 5
Control	Raíces	26.68±2
Estrés salino	Hojas	54.01±3
Estrés salino	Raíces	25.20±0.5

Tabla 2. Micromoles de trolox equivalentes presentes por gramo de tejido analizado..

Tratamiento	Tejido	umol Eq. de Trolox/ g de tejido
Control	Hojas	36.15±5
Control	Raíces	6.47±3
Estrés salino	Hojas	$1.2332 \cdot 10^{-6} \cdot 637.58 \pm 0.0003 \pm 0.02$
Estrés salino	Raíces	$1.428 \cdot 10^{-6} \cdot 66.15 \pm$

El análisis demostró que el porcentaje de inhibición y la cantidad de Trolox por extracto fue similar entre las plantas control y las sometidas al estrés con NaCl 100 mM. Sin embargo hubo diferencia en la respuesta de las hojas respecto a raíz. Siendo el tejido folicular el que tuvo mejor respuesta, teniendo 51.8% en el control y 54.04% con estrés de NaCl en contraste de las raíces que inhibieron 26.68 % en el control y 25.20%.

Discusión.

Durante la germinación de las semillas *in vitro*, se observó que el BAP tuvo un efecto directo. El tratamiento indicó que la concentración de 1 mg/ L promovió el desarrollo de las plántulas, mostrando brotes a los 11 días después de realizar el cultivo. En comparación con las concentración más baja y más alta que no generaron germinación de la semilla en este periodo de tiempo. En cuanto a las variedades el cultivar IMTE Redondo presentó una respuesta favorable ante



los medios suplementados con 1 mg/L y 0.5 mg/L respectivamente, contrastando con las otras dos variedades que no tuvieron tal respuesta.

Este comportamiento responde al mecanismo de acción de las citoquininas en las semillas que es el de regular la transmisión de una semilla en estado de latencia a un sistema con metabolismo rápido para generar el crecimiento de la planta, por lo cual las citoquininas como el BAP reducen la cantidad de inhibidores y aumenta la acumulación de promotores, generando la germinación de la semilla (Sharma et al., 2022). Sin embargo el efecto de la fitohormona puede variar dependiendo de la especie vegetal, además del equilibrio de la cantidad de citoquininas y otras fitohormonas. Esto puede explicar porque algunas semillas germinaron mientras que otras no.

Estudios previos han demostrado que el éxito de la germinación *in vitro* depende no solo de la concentración de citoquininas, sino también de la combinación con auxinas (Ventura et al., 2005). Por ejemplo, Ventura et al. (2005) reportaron que en *Physalis ixocarpa*, la combinación de 1.5 mg/L de BAP con 1.5 mg/L de AIA (ácido indolacético) resultó en una mayor respuesta de germinación. En contraste, nuestros resultados indican que, para las variedades de tomate nativo evaluadas, el BAP solo en concentraciones específicas (1 mg/L o 0.5 mg/L) fue suficiente para promover la germinación. Este resultado sugiere que es necesario optimizar el proceso de germinación y que posiblemente sea necesario la adición de auxinas para incrementar la tasa de germinación de las semillas de tomate nativo.

La evaluación de la capacidad antioxidante mostró que ante el estrés salino (100 mM NaCl) las plantas mostraron baja capacidad antioxidante, de manera similar a la plantas que solo recibieron riegos con agua destilada. En hojas se observó que las plantas sometidas a estrés salino presentaron ligero incremento en la capacidad antioxidante; mientras que en el tejido

radicular la capacidad antioxidante fue casi inexistente y se observó valores más elevados en el grupo control en comparación con el que se sometió a estrés. Esto nos indica que las hojas podrían ser el tejido que más interés evaluar en estudios de tolerancia al estrés salino, y que probablemente la evaluación de metabolitos como fenoles, flavonoides o enzimas del sistema antioxidante aporten más evidencia que la inhibición del radical DPPH.

Las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) ante condiciones de estrés salino, pueden experimentar cambios bioquímicos significativos. Estos ajustes incluyen alteraciones en las concentraciones de hormonas vegetales, especies reactivas de oxígeno (ROS) y compuestos antioxidantes, como señalan Mihaela et al. (2023). La respuesta de la planta al estrés salino es bifásica y depende del tiempo de exposición: inicialmente, se presenta una fase osmótica (en los primeros días o semanas), caracterizada por la alteración del balance hídrico y la reducción del crecimiento. Posteriormente, tras varias semanas, se activa una fase de toxicidad, donde la acumulación de iones tóxicos (como Na^+ y Cl^-) induce daño celular y estrés oxidativo (Mihaela et al., 2023). La producción de antioxidantes en plantas de tomate varía en función de múltiples factores, entre ellos: La concentración de sal aplicada, la edad fisiológica de la planta y el órgano vegetal analizado.

Según lo reportado por Abdel (2020, citado en Mihaela et al., 2023), en un estudio donde plantas de tomate de 27 días fueron expuestas a concentraciones de 25, 50, 100 y 200 mM de NaCl, no se observaron cambios significativos en la capacidad antioxidante de las hojas. Este hallazgo coincide con los resultados obtenidos en nuestro estudio, donde prácticamente no se observaron cambios apreciables en la capacidad antioxidante del tejido foliar bajo condiciones de estrés salino (100 mM de NaCl durante 7 días).



Manríquez Núñez por su colaboración en la enseñanza en el establecimiento de los cultivos in vitro, al apoyo económico otorgado por parte de la universidad y a mis Papas por apoyarme.

Conclusión.

El presente trabajo evaluó el efecto de BAP en la germinación in vitro de tres variedades de tomate nativo 'IMTE Cónico', 'IMTE Redondo' y 'TeeXOXO', así como la respuesta bioquímica ante el estrés salino (100 mM NaCl). Se confirmó que el BAP es una potencial fitohormona para el uso en la germinación y el desarrollo inicial de plántulas de tomate nativo, actuando como regulador entre el estado de latencia a un metabolismo activo. Sin embargo solo un tipo de semilla 'IMTE Redondo' respondió favorablemente a dos concentraciones a 0.5 mg/L y 1 mg/L. Por lo cual este hallazgo permite tener un punto de partida para continuar con la optimización en el cultivo in vitro de estas variedades cambiando concentraciones o probando otras hormonas vegetales. En cuanto a la capacidad antioxidante bajo el estrés salino, el ensayo DPPH reveló que, tras siete días de exposición a 100 mM de NaCl, no se observaron cambios significativos en la actividad en el tejido foliar y de raíces. Por lo cual se puede tomar como punto de referencia para los posteriores análisis con especies de plantas de tomates resistentes a la salinidad.

Agradecimientos.

Expreso mi más profundo agradecimiento al Dr. Ángel Ramón Flores Sosa por hacerme parte de este proyecto y guiarme durante este verano de la ciencia, al Dr. Josué

Referencias.

C. Zhao, H. Zhang, C. Song, J. K. Zhu, and S. Shabala, "Mechanisms of Plant Responses and Adaptation to Soil Salinity," *Innovation*, Vol. 1, no. 1, p. 100017, 2020.

"E. Ventura, U. Maldonado, A. García, C. Bazaldúa, G. Salcedo, A. Jiménez y G. Trejo T "PROPAGACIÓN IN VITRO DE PLANTAS DE TOMATE (*Physalis ixocarpa* Brot.) CON TOLERANCIA A ENFERMEDADES DE TIPO VIRAL," Congreso de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería.[Online].Available:https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_II/CII-19.pdf

Gobierno de México, "Jitomate, pilar de la alimentación saludable," 2021.[Online].Available:<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/jitomate-pilar-de-la-alimentacion-saludable>

M. Hasanuzzaman and M. Fujita, "Plant Oxidative Stress: Biology, Physiology and Mitigation," *Plants*, Vol. 11, no. 9, p. 1185, 2022.

M. Roşca, G. Mihalache, and V. Stoleru, "Tomato responses to salinity stress: From morphological traits to genetic changes," *Front. Plant Sci.*, Vol. 14, p. 1118383, 2023.

T. Werner, V. Motyka, M. Strnad, and T. Schmülling, "Regulation of plant growth by cytokinin," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol. 98, no. 18, pp. 10487–10492, 2001.

V. Goykovic Cortés and G. Saavedra del Real, "Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo," *Idesia (Arica)*, Vol. 25, no. 3, pp. 47–58, 2007.

Biodegradación de plásticos por *Pleurotus ostreatus* y *Pestalotiopsis microspora* : Evaluación de micorremediación

Angel Raziel Guevara Cervantes¹, Uriel Alejandro Padrón Flores², Monserrat Escamilla García³, Aldo Amaro Reyes⁴, Silvia Lorena Amaya Llano⁵ y José Ángel Granados Arvizu⁶ — Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro

⁶ jose.angel.granados@uaq.edu.mx

¹ aguevara@alumnos.uaq.mx

Resumen

La contaminación por residuos plásticos constituye uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial debido a su elevada producción, uso masivo y lenta degradación natural. Entre los materiales más utilizados destacan el tereftalato de polietileno (PET), el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno (PP), los cuales pueden permanecer durante décadas en el ambiente. En los últimos años diversos estudios han demostrado el potencial de algunos microorganismos para participar en procesos de biodegradación de polímeros sintéticos mediante mecanismos enzimáticos. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la capacidad de los hongos *Pleurotus ostreatus* y *Pestalotiopsis microspora* para crecer e interactuar con distintos tipos de plásticos, explorando su posible aplicación en procesos de micorremediación. Para ello

se desarrollaron dos sistemas experimentales: cultivo en rastrojo de avena suplementado con los plásticos y cultivo en medio PDA suplementado con partículas finas de los mismos polímeros. Se evaluó el crecimiento micelial, la colonización del sustrato, la interacción hongo-plástico y la variación de masa de los polímeros tras la incubación. Los resultados mostraron que ambas especies fueron capaces de desarrollarse en presencia de los tres tipos de plástico, colonizando adecuadamente tanto el sustrato lignocelulósico como los medios de cultivo suplementados. Aunque se observaron ligeras variaciones en la masa de algunos polímeros, estas no fueron suficientes para confirmar procesos de biodegradación. Los resultados obtenidos sugieren que ambas especies poseen potencial para futuras aplicaciones de micorremediación, pero se requiere de estudios complementarios mediante FTIR y microscopía electrónica de barrido para confirmar modificaciones estructurales en los polímeros.

Palabras clave: *Pleurotus ostreatus*, *Pestalotiopsis microspora*, biodegradación, micorremediación, plásticos.

Abstract

Plastic waste pollution is one of the world's major environmental problems due to its high production, massive use, and slow natural degradation. Among the most widely used materials are polyethylene terephthalate (PET), high-density polyethylene (HDPE), and polypropylene (PP), which can persist in the environment for decades. In recent years, several studies have demonstrated the potential of certain microorganisms to participate in the biodegradation of synthetic polymers through enzymatic mechanisms. This study aimed to evaluate the ability of the fungi *Pleurotus ostreatus* and *Pestalotiopsis microspora* to grow and interact with different types of plastics, exploring their potential application in

mycoremediation processes. To this end, two experimental systems were developed: a culture on oat straw supplemented with the plastics and a culture on PDA medium supplemented with fine particles of the same polymers. Mycelial growth, substrate colonization, fungus-plastic interaction, and polymer mass variation after incubation were evaluated. The results showed that both species were able to develop in the presence of all three types of plastic, successfully colonizing both the lignocellulosic substrate and the supplemented culture media. Although slight variations in the mass of some polymers were observed, these were not sufficient to confirm biodegradation processes. The results suggest that both species have potential for future mycoremediation applications, but further studies using FTIR and scanning electron microscopy are required to confirm structural modifications in the polymers.

Keywords: *Pleurotus ostreatus*, *Pestalotiopsis microspora*, biodegradation, mycoremediation, plastics.

Introducción

La producción mundial de plásticos ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas debido a sus propiedades físicas, químicas y económicas, convirtiéndolos en materiales indispensables para múltiples actividades industriales y domésticas, sin embargo, la elevada generación de residuos y su lenta degradación han provocado una acumulación masiva de estos materiales en ecosistemas terrestres y acuáticos. Se estima que miles de millones de toneladas de residuos plásticos se encuentran actualmente depositadas en vertederos o dispersas en el ambiente, donde pueden permanecer durante largos periodos de tiempo (Ekanayaka et al., 2022).

Entre los materiales más utilizados se encuentran el tereftalato de polietileno (PET), el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno (PP), polímeros

caracterizados por su elevada resistencia mecánica y química. Estas propiedades dificultan su degradación natural y favorecen la formación de microplásticos.(Ullah et al., 2024).

Ante esta problemática se han desarrollado diferentes estrategias para el tratamiento de residuos plásticos, incluyendo métodos físicos, químicos y biológicos. Dentro de las alternativas biológicas, diversos microorganismos han demostrado capacidad para transformar polímeros sintéticos mediante la producción de enzimas extracelulares capaces de modificar sus estructuras químicas. Se ha reportado que bacterias y hongos poseen sistemas enzimáticos que favorecen la fragmentación y transformación de materiales plásticos en compuestos de menor complejidad (Ibrahim et al., 2025; Yousafzai et al., 2025).

Dentro de los organismos con potencial degradativo destaca *Pleurotus ostreatus*, un hongo ligninolítico ampliamente estudiado por la producción de enzimas oxidativas como lacasas y peroxidasas. Estudios recientes han reportado modificaciones morfológicas y químicas en microplásticos de ácido poliláctico (PLA) expuestos a esta especie, sugiriendo su posible aplicación en procesos de biorremediación (Economou et al., 2025).

EL *Pestalotiopsis microspora* ha sido descrito como un hongo capaz de degradar poliuretano bajo condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas, lo que lo convierte en un microorganismo de interés para el estudio de la biodegradación de materiales poliméricos recalcitrantes (Angi, 2024).

Considerando el potencial de ambos hongos y la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles para el manejo de residuos plásticos, el objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de *Pleurotus ostreatus* y *Pestalotiopsis microspora* para crecer e interactuar con PET, HDPE y PP en sistemas de cultivo con sustrato lignocelulósico y medio PDA suplementado con polímeros,

explorando su posible aplicación en procesos de micorremediación.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la capacidad de *Pleurotus ostreatus* y *Pestalotiopsis microspora* para crecer e interactuar con los polímeros PET, HDPE y PP bajo diferentes condiciones de cultivo, con el fin de determinar su potencial para aplicaciones de micorremediación de residuos plásticos.

Objetivos específicos

- Evaluar el crecimiento de *P. ostreatus* y *P. microspora* en presencia de PET, HDPE y PP.
- Observar la interacción entre los hongos y los diferentes polímeros mediante microscopía.
- Determinar las variaciones de masa de los polímeros después del periodo de incubación.

Metodología

Material biológico

Se utilizaron las cepas fúngicas *Pleurotus ostreatus* CCAB 263/F y *Pestalotiopsis microspora* CCAB 144/6c. Ambas cepas fueron mantenidas en medio Papa Dextrosa Agar (PDA) e incubadas a 30 °C durante 5 días para favorecer su crecimiento micelar.

Preparación del inóculo semilla

Las esporas de cada hongo fueron recolectadas mediante la extracción a partir de una solución de Tween 80 al 2 % sobre cultivos previamente desarrollados en placas de PDA. La suspensión obtenida se utilizó para inocular 500 g de sorgo humedecido con 250 mL de agua esterilizada. Posteriormente, el sorgo inoculado se incubó a 30 °C durante 5 días, obteniéndose el inóculo semilla empleado en los experimentos posteriores.

Diseño experimental

Se evaluó la interacción de dos especies fúngicas (*P. ostreatus* y *P. microspora*) con tres tipos de polímeros plásticos: tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP). Para cada hongo se establecieron tratamientos con cada uno de los polímeros y un tratamiento control sin plástico.

Cultivo en sustrato lignocelulósico

Se utilizaron 200 g de rastrojo de avena como sustrato para cada experimento. El material fue esterilizado mediante inmersión en agua hirviendo durante 45 minutos con adición de cloruro de calcio para reducir la presencia de microorganismos contaminantes.

Posteriormente, el sustrato fue distribuido en ocho bolsas estériles. Seis bolsas fueron suplementadas con fragmentos de PET, HDPE o PP a una concentración de 2 % p/p (dos réplicas por cada polímero), mientras que dos bolsas se mantuvieron sin plástico como control.

Cada bolsa fue inoculada con el inóculo semilla previamente propagado en sorgo y posteriormente incubada bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Durante el periodo experimental se monitoreó el crecimiento del hongo y la interacción de los hongos con los materiales plásticos.

Cultivo en medio PDA suplementado con plástico

Se evaluó el crecimiento de los hongos en medio sólido PDA suplementado con plástico. Fragmentos de PET, HDPE y PP fueron triturados hasta obtener partículas finas y posteriormente incorporados al medio de cultivo.

El medio PDA fue distribuido en cuatro matraces: tres de fueron suplementados con 4 g de cada polímero y uno se mantuvo sin plástico como control, posteriormente, el medio fue vertido en placas petri estériles y

se prepararon tratamientos por duplicado para cada polímero y el control.

Una vez solidificado el agar, las placas fueron inoculadas con *P. ostreatus* y *P. microspora* e incubadas a 30 °C durante 5 días. El crecimiento micelial fue registrado mediante observación visual y documentación fotográfica.

Evaluación de pérdida de peso

La degradación de los polímeros se evaluó mediante análisis gravimétrico. Antes de iniciar los tratamientos, los fragmentos plásticos fueron pesados en una balanza analítica para registrar su peso inicial.

Al finalizar el periodo de incubación, los plásticos fueron recuperados, separados del sustrato y limpiados para eliminar residuos de micelio, posteriormente se registró su peso final y se comparó con los valores iniciales para determinar posibles pérdidas de peso asociadas a la actividad biológica de los hongos.

Observación microscópica

Las muestras de los tratamientos con plástico fueron observadas mediante microscopía óptica con un aumento de 40× para evaluar la interacción física entre el micelio y los fragmentos plásticos.

Resultados

Evaluación del desarrollo del cuerpo fructífero de *P. ostreatus* y *P. microspora*

Ambas especies lograron colonizar eficazmente el sustrato de rastrojo de avena. Su crecimiento micelial se observó en los tratamientos con polímeros, así como en los controles. No se identificaron diferencias significativas en su velocidad de propagación.

Se visualizaron cuerpos fructíferos en los distintos experimentos evaluados, lo que indicó una adecuada adaptación del hongo *Pleurotus Ostreatus* al medio. Por otro lado, *Pestalotiopsis Microspora* presentó una colonización eficiente en el sustrato, pues se

observaron pequeñas estructuras circulares de coloración oscura compatibles con lo que podría ser un proceso de esporulación, lo que indica que se desarrollaron estructuras reproductivas características de esa especie

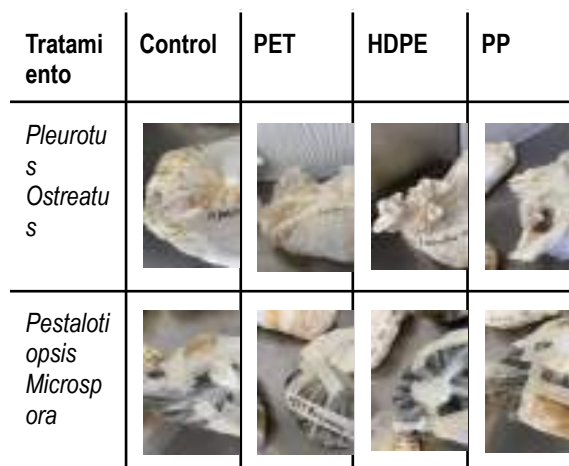


Figura 1. Registro fotográfico de los tratamientos inoculados con *P.Ostreatus* y *P.Microspora* tras haber finalizado el periodo de incubación. Se observan los controles y tratamientos suplementados con plásticos como PET, HDPE Y PP, permitiendo la evaluación de las estructuras y la colonización del sustrato.

Crecimiento fúngico en medios PDA suplementados con plásticos

Con la finalidad de evaluar el crecimiento de las cepas en presencia de los polímeros utilizados en la experimentación, se realizaron medios de cultivo PDA, en donde se cultivaron los hongos correspondientes a la metodología, los cuales fueron suplementados con PET, PP Y HDPE al 1% p/v. Dichos plásticos, fueron fragmentos en porciones diminutas para una mejor distribución en las placas.

Las observaciones realizadas indicaron un crecimiento micelial eficiente en la mayoría de las placas trabajadas con medio PDA. Tanto *P. Ostreatus* y *P. Microspora* tuvieron la capacidad de colonizar los medios suplementados con polímeros, indicando que la presencia de dichos materiales adicionados no afectan el desarrollo de las cepas bajo ciertas condiciones empleadas experimentalmente.

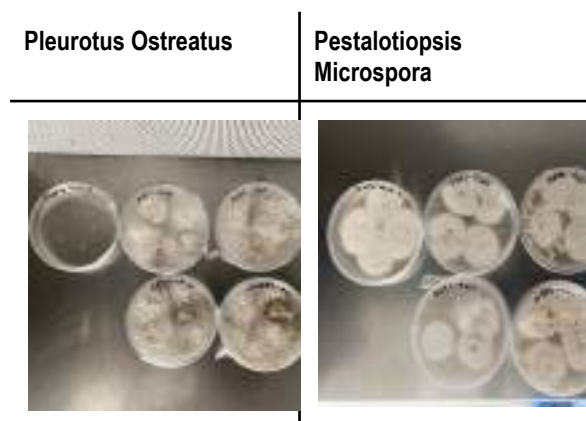
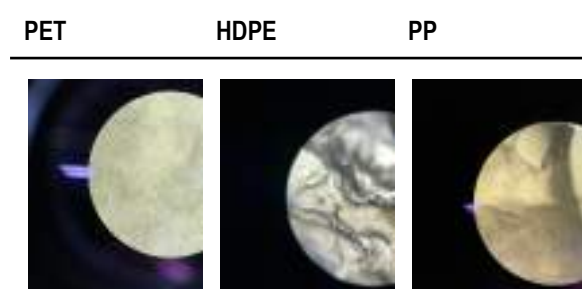


Figura 2. Crecimiento y desarrollo micelial de ambos hongos en medio PDA suplementado con fragmentos de polímeros PET, HDPE Y PP al 1% p/v. Se observa crecimiento en las muestras tratadas a excepción del control de Pleurotus Ostreatus.

Análisis microscópico de la interacción hongo-plástico en medio PDA suplementado con plástico

Se realizó un análisis microscópico a los distintos tratamientos con PET, HDPE Y PP para observar la interacción hongo-plástico. En las fotografías tomadas a las muestras analizadas en microscopio con un enfoque de 40x, fue posible distinguir fragmentos de los materiales poliméricos adheridos a la matriz del agar, así como zonas colonizadas con el micelio. La proximidad de las hifas y los fragmentos indicaron una interacción directa durante el desarrollo de los hongos.

(A) *Pleurotus Ostreatus*



(B) *Pestalotiopsis microspora*

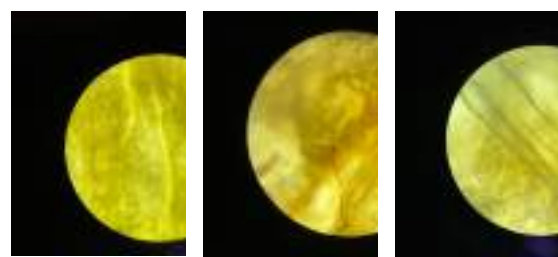


Figura 3. Muestras observadas en microscopía a 40x de los tratamientos suplementados con plásticos PET, HDPE Y PP. Las imágenes corresponden a las dos especies de hongos trabajadas evaluando y observando su crecimiento fúngico sobre los polímeros.

Análisis gravimétrico de plásticos después de tratamientos con *P. ostreatus* y *P. microspora*.

Para realizar la evaluación de la capacidad degradativa de *P.ostreatus* y *P.microspora*, se incorporó el 2% p/p de plásticos correspondientes en bolsas que contenían 200 g de sustrato a base de rastrojo de avena, lo que representa 4g de peso inicial de plástico para cada bolsa previamente inoculada con el hongo propagado en sorgo. Durante el periodo de incubación se dio seguimiento al crecimiento micelial y a la interacción que tuvieron los hongos en los distintos polímeros utilizados en la prueba.

Tras haber finalizado el periodo de incubación para los 3 tipos de polímeros utilizados durante la experimentación, se sometieron a un análisis gravimétrico para detectar posibles variaciones respecto a la cantidad de masa que poseían. En algunos tratamientos, se observó una disminución en el peso final con respecto al peso inicial, mientras que en otros la masa fue similar o ligeramente superior a lo determinado.

<i>Pleurotus Ostreatus</i>	<i>Pestalotiopsis Microspora</i>
----------------------------	----------------------------------

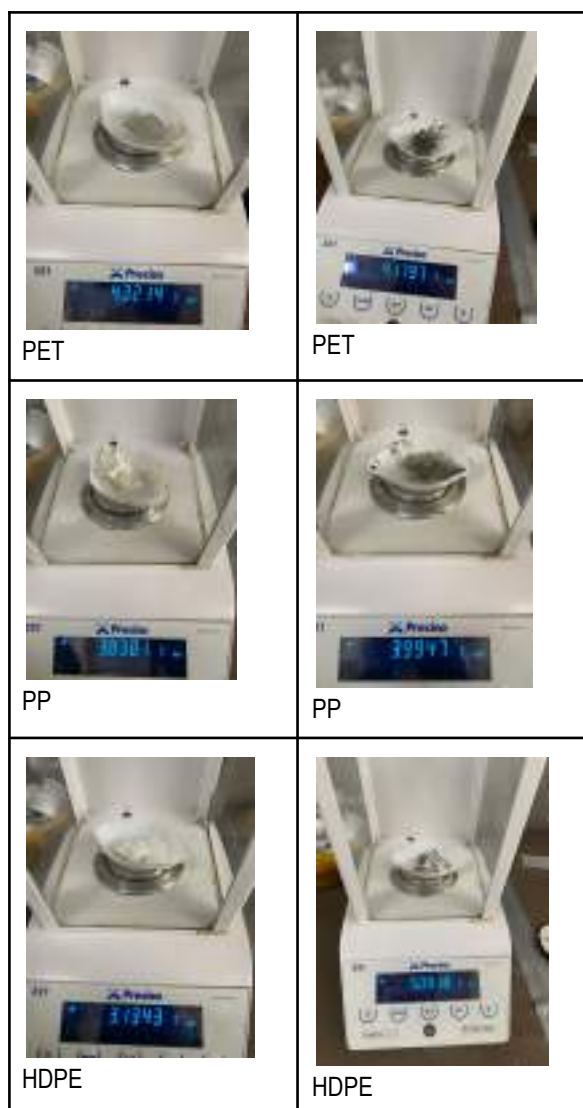


Figura 4. Registro fotográfico del pesaje final de los fragmentos recuperados de los sistemas experimentales tras un periodo de incubación de 25 días con *P. Ostreatus* y *P. Microspora*. Los plásticos fueron extraídos de los sustratos colonizados, limpiados y sometidos a pesaje para la evaluación de posibles cambios en su masa

Discusión

Los resultados obtenidos de ambas cepas fúngicas demostraron que fueron capaces de desarrollarse en un medio con la adición de los polímeros PET, HDPE Y PP. Por otra parte, *Pleurotus Ostreatus* tuvo la capacidad de formar cuerpos fructíferos en las muestras experimentales, lo cual indica que el hongo completo satisfactoriamente su ciclo de desarrollo, mientras que *Pestalotiopsis Microspora* presentó una abundante colonización micelial y posibles estructuras compatibles con la

esporulación, a lo cual se le atribuye una eficiente adaptación al sustrato incorporado. Las pruebas coinciden con lo reportado por Ekanayaka et al. (2022) , quienes describen que múltiples hongos tienen la capacidad de colonizar materiales como plásticos y además de ello llevar a cabo su actividad metabólica.

Tras la recuperación de los fragmentos de los empaquetados con sustrato, se pudo observar una variación de los pesos finales a comparación de los pesos iniciales, además de ello, no se detectaron cambios macroscópicos en su textura o apariencia. Si bien, se puede deducir que hubo una nueva interacción entre los hongos y los materiales evaluados, los resultados no son lo suficientemente concretos para demostrar que existen procesos de biodegradación. Economou et al. (2025) menciona que la degradación de polímeros mediante la presencia de hongos está relacionada con modificaciones químicas y estructurales, las cuales requieren técnicas analíticas complementarias para su confirmación. Por ello, el realizar estudios futuros que involucren una microscopia por barrido o una espectroscopia infrarroja por transformada de fourier (FTIR) permitirán demostrar con mayor precisión el potencial de las cepas fúngicas en aplicaciones de micorremediación.

Conclusiones

Se identificó a *Pleurotus Ostreatus* y a *Pestalotiopsis Microspora* como organismos funcionales para aplicaciones de micorremediación de residuos plásticos. Ambas cepas tuvieron la capacidad de mantenerse activas en sistemas que poseían PET, HDPE Y PP, lo cual representa un punto de partida para el desarrollo de investigaciones que involucren el aprovechamiento de hongos para impulsar el manejo sostenible de estos materiales. No obstante, para poder comprender la naturaleza de los organismos y los polímeros utilizados, es necesario incorporar herramientas analíticas que permitan caracterizar los

materiales antes y después de un tratamiento biológico. La aplicación de estos análisis podría permitir determinar a mayor precisión la actividad fúngica observada para posibles transformaciones o degradación de materiales.

Agradecimientos.

ARGC y UAPF: Experimentación y escritura de proyecto, MEG: Interpretación de resultados y asesoría, AAR: Validación de resultados y asesoría, SLAL: Adquisición de financiamiento y recursos, JAGA: Administración de proyecto, diseño experimental y recursos.

Agradecimiento a la doctora Aurea Karina Ramirez por la asistencia técnica de este proyecto y a la Secretaría de investigación, innovación y posgrado UAQ y al programa de verano de la ciencia UAQ por las becas proporcionadas.

Referencias

Angi, M. P. K. (2024). Bio-Degradation of Landfills by Plastic Eating Mushroom (*Pestalotiopsis microspora*). Longdom Publishing. <https://doi.org/10.35248/2375-4397.24.12.288>

Economou, C. N., Bertozzi, S. M., & Ferrari, G. (2025). *Pleurotus ostreatus-mediated bioremediation of polylactic acid microplastics: Unveiling a sustainable solution*. ACS Omega, 10(49), 60945–60954. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c0999>

Ekanayaka, A. H., Tibpromma, S., Dai, D., Xu, R., Suwannarach, N., Stephenson, S. L., Dao, C., & Karunarathna, S. C. (2022). *A review of the fungi that degrade plastic*. Journal of Fungi, 8(8), 772. <https://doi.org/10.3390/jof8080772>

Ibrahim, N., Rahman, A. M. N. A. A., Shafiq, M. D., et al. (2025). Microplastic pollution: Sources, degradation mechanisms, analytical advances, and mitigation strategies for environmental sustainability. Reviews in Environmental Contamination and Toxicology, 263, 27. <https://doi.org/10.1007/s44169-025-00098-0>

Ullah, H., Alam, K., Khan, F., Mohsin, A., Hayat, M., & Afridi, J. (2024). Microplastics in the environment: Sources, impacts, and remediation strategies. The Research of Medical Science Review. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17587993>

Yousafzai, S., Farid, M., Zubair, M., Naeem, N., Zafar, W., Asam, Z. U. Z., Farid, S., & Ali, S. (2025). Detection and degradation of microplastics in the environment: A review. Environmental Science: Advances, 4, 1142–1165. <https://doi.org/10.1039/D5VA00064E>

Evaluación de la microbiota del frass de *Hermetia illucens* como biofungicida y bioestimulante de crecimiento en plantas de tomate.

María Inés Alanís Díaz Leal¹, Monserrat Escamilla García², Lucía Guadalupe Abadía García³, Aldo Amaro Reyes⁴, Silvia Lorena Amaya Llano⁵ y José Ángel Granados Arvizu⁶ – Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro

⁶ jose.angel.granados@uaq.edu.mx

Resumen

El frass producido en la bioconversión de residuos orgánicos por las de mosca soldado-negra (*Hermetia illucens*) representa un subproducto con potencial para la agricultura sostenible, esto por su alto contenido de nutrientes y la presencia de comunidades microbianas con posibles efectos bioestimulantes o de biocontrol. Sin embargo, la composición microbiológica depende del sustrato y de las condiciones de producción, por lo cual es necesaria la caracterización de la microbiota y su evaluación antes de su aplicación como insumo agrícola. Por lo cual, el presente proyecto tuvo como objetivo caracterizar la microbiota del frass de mosca soldado-negra (*Hermetia illucens*) y evaluar su potencial como agente biofungicida frente a *Aspergillus niger* y *Fusarium Oxysporum*, así como su capacidad para estimular el crecimiento vegetal usando como modelo plántulas de tomate. Para ello, se llevó a cabo el aislamiento y caracterización fenotípica de microorganismos mediante cultivos en medios selectivos y

tinciones diferenciales. Los microorganismos aislados se propagaron y sometieron a ensayos de antagonismo in vitro contra los hongos fitopatógenos, además de evaluar su efecto sobre variables de crecimiento vegetal.

Los resultados evidenciaron una elevada diversidad microbiana conformada por bacterias, levaduras y hongos filamentosos con diferentes características morfológicas y metabólicas. Diversos aislamientos mostraron actividad antagonista frente *Aspergillus niger*, y se mostró crecimiento diferencial positivo en la prueba con plantas de tomate.

Los resultados pueden contribuir al aprovechamiento integral del subproducto, impulsando la economía circular y promoviendo alternativas biotecnológicas que reduzcan la dependencia de fertilizantes y fungicidas sintéticos, fortaleciendo sostenibilidad y competitividad de los sistemas agrícolas.

Palabras clave: *Hermetia illucens*, frass, microbiota, actividad antimicrobiana, hongos fitopatógenos, biocontrol, estimulante de crecimiento.

Abstract

Frass produced through the bioconversion of organic waste by the black soldier fly (*Hermetia illucens*) represents a by-product with potential applications in sustainable agriculture due to its high nutrient content and the presence of microbial communities with potential biostimulant and biocontrol effects. However, its microbiological composition depends on the substrate and production conditions; therefore, microbial characterization and evaluation are necessary prior to its application as an agricultural input. Accordingly, the present study aimed to characterize the microbiota of black soldier fly (*Hermetia illucens*) frass and evaluate its potential as a biofungicidal agent against *Aspergillus niger* and *Fusarium oxysporum*, as well as its ability to

promote plant growth using tomato seedlings as a model. To this end, microorganisms were isolated and phenotypically characterized through cultivation on selective media and differential staining techniques. The isolated microorganisms were propagated and subjected to in vitro antagonism assays against the phytopathogenic fungi, in addition to evaluating their effects on plant growth parameters.

The results revealed high microbial diversity, including bacteria, yeasts, and filamentous fungi with distinct morphological and metabolic characteristics. Several isolates exhibited antagonistic activity against *Aspergillus niger*, while positive differential growth responses were observed in the assays using tomato plants.

These findings may contribute to the comprehensive utilization of frass as a by-product, promoting the circular economy and supporting the development of biotechnological alternatives that reduce dependence on synthetic fertilizers and fungicides, thereby strengthening the sustainability and competitiveness of agricultural systems.

Introducción

El crecimiento acelerado de la población mundial y el incremento en las actividades agroindustriales han provocado una generación masiva de residuos orgánicos, convirtiéndose en uno de los principales desafíos ambientales actuales (Worldometer, s.f.). Los métodos tradicionales de disposición, como los rellenos sanitarios, el compostaje convencional y la incineración, presentan limitaciones relacionadas con la emisión de gases de efecto invernadero, altos costos operativos y pérdida de biomasa potencialmente aprovechable. Ante esta problemática, la economía circular ha surgido

como un modelo orientado al reaprovechamiento de materiales y residuos mediante procesos sostenibles que permitan reincorporarlos a cadenas productivas con valor agregado (Parlamento Europeo, s.f.).

En este contexto, la mosca soldado negra, *Hermetia illucens*, ha despertado gran interés biotecnológico debido a su capacidad para transformar eficientemente residuos orgánicos en biomasa rica en proteínas y lípidos, además de generar un subproducto conocido como frass (Hernández-Trejo et al., 2024). Este material está conformado por excretas larvarias, restos de alimento parcialmente degradados, microorganismos asociados y exuvias provenientes del desarrollo larval. Diversos estudios han demostrado que el frass posee nutrientes esenciales y una microbiota diversa con potencial agrícola y biotecnológico (Lomonaco et al., 2024).

Adicionalmente, se ha reportado que el frass alberga bacterias, levaduras y hongos filamentosos provenientes tanto del intestino larvario como del sustrato utilizado durante la bioconversión (Lomonaco et al., 2024). Esta diversidad microbiana resulta de gran interés debido a que algunos microorganismos asociados poseen capacidad para producir metabolitos secundarios y compuestos antimicrobianos con posible aplicación en agricultura sustentable (Arabzadeh et al., 2023).

En años recientes, el uso de microorganismos antagonistas como estrategia de control biológico ha cobrado relevancia debido a la necesidad de reducir la dependencia de fungicidas químicos y disminuir su impacto ambiental. Hongos fitopatógenos como *Aspergillus niger* y *Fusarium oxysporum* representan importantes agentes causales de enfermedades vegetales y pérdidas agrícolas, por lo que la búsqueda de alternativas

biológicas para su control constituye una prioridad dentro de los sistemas agrícolas sostenibles (Fravel et al., 2003; Harman et al., 2004). Diversos estudios han demostrado que bacterias asociadas al frass de *H. illucens* presentan actividad antifúngica mediante mecanismos relacionados con producción de metabolitos bioactivos y competencia microbiana (Arabzadeh et al., 2023).

Objetivos

Objetivo General

Caracterizar la microbiota del frass proveniente de las larvas de *Hermetia illucens* y evaluar su efecto como agente biofungicida contra hongos fitopatógenos, así como su potencial bioestimulante del crecimiento vegetal en plántulas de tomate.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la microbiota presente en el frass de larvas de *Hermetia illucens* mediante aislamiento en medios diferenciales y tinción de Gram.
2. Propagar los microorganismos de forma individual y evaluar su potencial efecto antifúngico contra *Aspergillus niger* y *Fusarium oxysporum*.
3. Evaluar el efecto bioestimulante de los microorganismos aislados en plántulas de tomate y su efecto en diferentes parámetros de crecimiento.

Materiales y Métodos

Materiales

El frass proveniente de las larvas de *Hermetia illucens* (FLH) será proporcionado por la planta piloto de producción de mosca soldado (*Hermetia illucens*) del Laboratorio de Bioingeniería del Campus Amazcala de la Universidad Autónoma

de Querétaro conservándolo en bolsas plásticas en condiciones de refrigeración a 8 °C hasta su uso.

Métodos

Caracterización de la microbiota presente en el frass: Para la caracterización microbiológica del FLH se emplearon materiales y reactivos destinados al cultivo, aislamiento e identificación de bacterias, hongos filamentosos y levaduras.

Se realizaron disoluciones en serie de frass sólido con solución salina al 0.85%. Posteriormente se sembraron sobre Agar nutritivo, Agar Sabouraud Dextrosa, Agar Papa Dextrosa (PDA) y Agar bacteriológico dependiendo del grupo microbiano a evaluar. Las placas se incubaron en condiciones óptimas para cada grupo microbiano: 37 °C durante 24 a 48 horas para bacterias, y 25–28 °C durante aproximadamente 5 días para hongos y levaduras. Para el aislamiento de cultivos puros se seleccionaron colonias representativas que presenten diferencias morfológicas evidentes, considerando características como tamaño, color, forma, textura y elevación. Las colonias seleccionadas se sembraron en los mismos medios empleados previamente para un crecimiento uniforme.

Se caracterizaron los aislamientos bacterianos mediante tinción de Gram y se observó por microscopio para analizar morfología celular.

También se realizaron diferentes pruebas bioquímicas con Agar citrato de Simmons, Agar MacConkey, Agar de hierro Kligler y Medio MIO. Para hongos y levaduras se realizó tinción con azul de lactofenol y al igual, se analizó morfología con el microscopio.

Propagación de los microorganismos y evaluación de su potencial efecto antifúngico: Una vez llevados a cabo los aislamientos, cada uno se propagó en caldo de acuerdo a su naturaleza. Se evaluó cada aislado a una concentración de 105

UFC/mL de FLH contra *Aspergillus Niger* y *Fusarium Oxysporum*. Para el ensayo de difusión en agar, las placas con PDA fueron inoculadas mediante la extensión del micelio activo con un asa estéril. Una vez sembrado el hongo, se realizaron pozos de aproximadamente 6–8 mm de diámetro en la superficie del agar utilizando un sacabocados y se depositaron 100 µL de la solución de aislado de FLH, para ello se incluyó un control positivo (antifúngico comercial) y un control negativo (dilución estéril). Las placas se incubaron a 25–28 °C. Tras un periodo de incubación de 3 a 7 días (dependiendo de la velocidad de crecimiento del hongo).

Evaluación del efecto bioestimulante de los microorganismos en plantas: Se emplearon plántulas de tomate con 2 semanas de crecimiento, utilizando 5 plántulas por tratamiento. Para ello se utilizó un diseño unifactorial de cuatro niveles, donde se evaluó el tipo de bioestimulante aplicado a la plántula, evaluando frass sólido mezclado con sustrato (10% de frass en sustrato), el extracto líquido del frass (10 g de frass disuelto en 100 mL de agua estéril y filtrado) y 10 mL de la solución de los aislados de FHL. Las plantas se mantuvieron a temperatura ambiente con riegos de 60 mL por planta cada tercer día manteniéndolas por 4 semanas. En el proceso se midió la altura de la planta y al finalizar se midió la longitud de la raíz principal.

Resultados

Aislamiento y caracterización de morfología microbiana

A partir del frass de *Hermetia illucens* obtenido de desechos orgánicos se obtuvieron catorce aislamientos microbianos utilizando diferentes medios de cultivo. En agar bacteriológico y agar

nutritivo se observó principalmente crecimiento bacteriano, mientras que en agar Papa Dextrosa y agar maltosa favoreció el crecimiento de hongos filamentosos y levaduras.

Los aislamientos presentaron diferencias morfológicas en tamaño, color, textura y elevación colonial, evidenciando diversidad microbiológica en las muestras analizadas.

Tabla 1. Microorganismos aislados de FLH

Medio de cultivo	Tipo de crecimiento observado	Número de aislamientos
Agar bacteriológico	Bacterias	3
Agar nutritivo	Bacterias	5
Agar Papa Dextrosa (PDA)	Hongos filamentosos	3
Agar maltosa	Levaduras/hongos	3

Figura 1 Y 2 Tinción de Gram

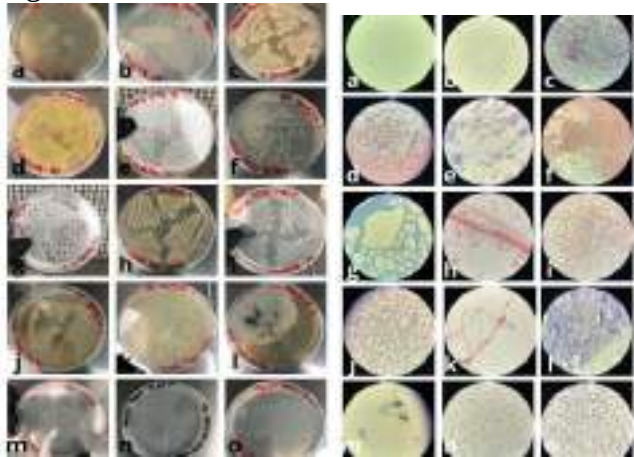


Figura 2. Morfología colonial de los aislamientos bacterianos obtenidos. Se muestran las colonias cultivadas en medio sólido correspondientes a los códigos del estudio (a–o), evaluadas de manera previa a la caracterización microbiológica.

Figura 3. Microfotografías de la tinción de Gram de los aislamientos seleccionados. Observación microscópica (40x) de los cultivos (a–o), donde se aprecia la morfología celular (bacterias, levaduras y hongos) y la afinidad tintórea bacteriana (Gram positivos en color violeta/morado y Gram negativos en color rosa/rojo).

Pruebas bioquímicas y reto con hongos

Tabla 2. Caracterización microbiológica y bioquímica de los aislamientos bacterianos obtenidos del frass de *Hermetia illucens*.

La tabla muestra la tinción de Gram y las características morfológicas macroscópicas de cada aislamiento bacteriano, incluyendo forma, textura, pigmentación y tipo de crecimiento colonial. Asimismo, se presentan los resultados de actividad antagonista frente a *Aspergillus niger* y *Fusarium oxysporum*, así como las pruebas bioquímicas realizadas: utilización de citrato en agar Simmons; resultados de motilidad (M) y actividad de la enzima ornitina descarboxilasa (O) en medio MIO, donde los símbolos (+) y (–) indican presencia o ausencia de motilidad o activación enzimática; crecimiento en agar MacConkey; y perfiles metabólicos observados en agar hierro Kligler relacionados con fermentación de carbohidratos y producción de sulfuro de hidrógeno (H₂S). En la nomenclatura de Kligler, K/K indica ausencia de fermentación de glucosa y lactosa; K/A corresponde a fermentación exclusiva de glucosa; A/A indica fermentación de glucosa y lactosa; mientras que la presencia de H₂S se evidencia por precipitado negro en el medio. Los símbolos ✓ y ✗ indican resultados positivos y negativos, respectivamente, mientras que el símbolo / indica pruebas no realizadas.

Identificación	Tinción Gram	Características macroscópicas	Crecimiento en agar Simmons	Motilidad (M)	Actividad de la enzima ornitina descarboxilasa (O)	Crecimiento en agar MacConkey	Perfil metabólico en agar hierro Kligler	Resultado de actividad antagonista
AJ01	Gram negativo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	K/A + 100%
AP01	Gram negativo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	K/A
AP02	Gram negativo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	K/K
AP03	Gram positivo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	K/K
AP04	Gram negativo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	K/K
AJ02	Gram negativo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	A/A
AP05	Gram positivo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	K/K
AJ03	Gram negativo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	/
AP06	Gram negativo	Colonias blancas, redondas, elevadas, con borde irregular	✓	+	+	Me / G+	✓	/

Prueba del efecto bioestimulante

Gráfica 1: Promedio por tratamientos de crecimiento en centímetros. FS: Frass sólido; FL: Frass líquido; PA: Pool aislados; C: Control.

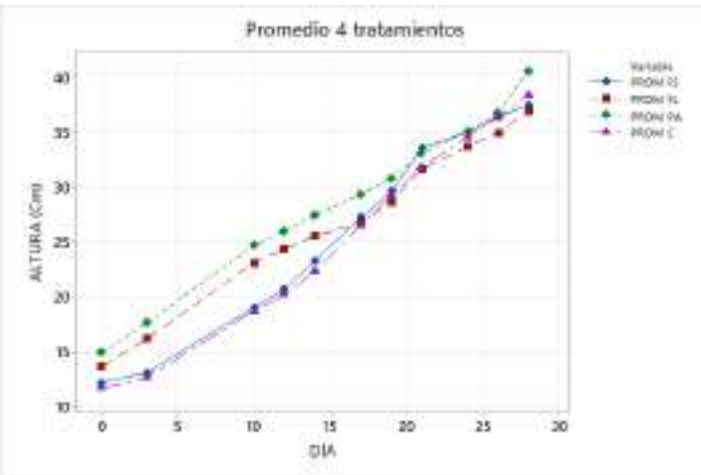


Tabla 3. Promedio por tratamiento de pendiente de altura y raíz principal.

Tratamiento	Pendiente de altura	Promedio de raíz principal
Frass Sólido	0.9925 cm/ día	13.6 cm
Frass Líquido	0.8121 cm/día	28.4 cm
Pool aislados	0.8522 cm/día	28.1 cm
Control	1.013 cm/día	18.7 cm

Discusiones

El aislamiento de microorganismos a partir del frass de *Hermetia illucens* evidenció una microbiota diversa, constituida por bacterias, levaduras y hongos filamentosos. La obtención de 14 aislamientos con características morfológicas y bioquímicas diferentes confirma que el frass constituye una fuente de microorganismos con características potencialmente aprovechables en aplicaciones agrícolas. Esta diversidad puede estar relacionada con la microbiota asociada a las larvas y con los microorganismos presentes en el sustrato utilizado durante la bioconversión, como se ha señalado previamente para este subproducto.

En cuanto a la actividad antagonista, 9 de los 14 aislamientos evaluados (64.3%) inhibieron completamente el crecimiento de *Aspergillus niger*, mientras que ninguno presentó inhibición frente a *Fusarium oxysporum*. Este comportamiento demuestra que la actividad antagonista fue dependiente del microorganismo fitopatógeno evaluado. La inhibición observada frente a *A. niger* indica que algunos de los microorganismos presentes en el frass poseen potencial como agentes de biocontrol; sin embargo, debido a que los aislamientos no fueron identificados molecularmente, no es posible establecer qué especies son responsables de esta actividad ni determinar el mecanismo específico de inhibición.

El ensayo de bioestimulación permitió evaluar el efecto sobre el crecimiento de plantas de jitomate mediante la altura y la longitud de la raíz principal. Se evaluaron cuatro tratamientos: control, frass sólido, extracto líquido y pool de

microorganismos durante cuatro semanas.

El análisis de las pendientes de crecimiento mostró que el control presentó la mayor tasa de crecimiento (1.013 cm/día), seguido del frass sólido (0.9925 cm/día), el pool de microorganismos (0.8522 cm/día) y el extracto líquido (0.8121 cm/día). Por lo tanto, ninguno de los tratamientos superó al control en el crecimiento de la parte aérea, aunque el frass sólido presentó un comportamiento cercano al control. Los valores de R^2 ajustado (97.99–99.24 %) indicaron un buen ajuste de las regresiones lineales, pero no permiten determinar por sí mismos diferencias significativas entre tratamientos.

En contraste, la longitud de la raíz presentó una respuesta diferente. El frass sólido presentó la menor longitud promedio (13.6 cm), seguido del control (18.7 cm), mientras que el extracto líquido y el pool alcanzaron 28.4 y 28.1 cm, respectivamente. Esto representa una longitud radical aproximadamente 50 % mayor que la del control, sugiriendo un posible efecto favorable de estos tratamientos sobre el desarrollo de la raíz. Sin embargo, al haberse evaluado únicamente la longitud de la raíz principal, no es posible determinar un incremento general de la biomasa o arquitectura radical.

Los resultados indican que el efecto del frass fue diferencial según la variable evaluada: no se observó una mayor tasa de crecimiento aéreo, pero el extracto líquido y el pool mostraron un mayor desarrollo de la raíz principal. Estos resultados sugieren un posible efecto bioestimulante principalmente sobre el sistema radical, aunque se requieren análisis estadísticos, mayor número de réplicas y la evaluación de diferentes concentraciones y frecuencias de aplicación para confirmar este efecto.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que el frass derivado de *Hermetia illucens* constituye una

matriz con diversidad microbiana y potencial de aplicación agrícola, debido a la presencia de microorganismos con actividad antagonista y a las respuestas diferenciales observadas en plantas de jitomate. La inhibición completa de *Aspergillus niger* por nueve de los 14 aislamientos evidencia un posible potencial de biocontrol, aunque la ausencia de inhibición frente a *Fusarium oxysporum* indica que este efecto no es generalizado y puede depender del fitopatógeno evaluado. En cuanto al crecimiento vegetal, ninguno de los tratamientos superó al control en la tasa de crecimiento de la parte aérea, sin embargo, el extracto líquido y el pool de microorganismos presentaron una mayor longitud de la raíz principal respecto al control, lo que sugiere una posible respuesta favorable en el desarrollo radical. Estos resultados indican que el efecto del frass puede manifestarse de manera diferencial dependiendo de la estructura vegetal y del tratamiento aplicado, por lo que su potencial no debe evaluarse únicamente mediante el crecimiento aéreo. Finalmente, aunque los resultados obtenidos son prometedores, se requiere complementar el estudio mediante la identificación molecular de los aislamientos, un mayor número de réplicas y análisis estadísticos que permitan determinar la significancia de las diferencias observadas, así como evaluar diferentes concentraciones y frecuencias de aplicación para establecer con mayor precisión el potencial bioestimulante y de biocontrol del frass de *H. illucens*.

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado y apoyado por la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como por el Dr. José Ángel Granados Arvizu.

Se agradece el apoyo de Andrea De Anda-Contreras, María José Martínez-Pantoja y Valeria Reyes-Arteaga para el desarrollo de este proyecto.

Referencias

Arabzadeh, G., Delisle-Houde, M., Vandenberg, G. W., Derome, N., Deschamps, M.-H., Dorais, M., Vincent, A. T., & Tweddell, R. J. (2023). Assessment of antifungal/antioomycete activity of frass derived from black soldier fly larvae to control plant pathogens in horticulture: Involvement of *Bacillus velezensis*. *Sustainability*, 15(14), 10957. <https://doi.org/10.3390/su151410957>

Fravel, D., Olivain, C., & Alabouvette, C. (2003). *Fusarium oxysporum* and its biocontrol. *New Phytologist*, 157(3), 493–502. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00700.x>

Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species—Opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>

Hernández-Trejo, D. A., Aquino, E., Islas-Pelcastre, M., et al. (2024). Aprovechamiento potencial de *Hermetia illucens* para la bioconversión de residuos orgánicos. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 10(19), 7–10.

Lomonaco, G., Franco, A., De Smet, J., Scieuzo, C., Salvia, R., & Falabella, P. (2024). Larval frass of *Hermetia illucens* as organic fertilizer: Composition and beneficial effects on different crops. *Insects*, 15(4), 293. <https://doi.org/10.3390/insects15040293>

Parlamento Europeo. (s. f.). *Economía circular: definición, importancia y beneficios* | Temas | Parlamento Europeo. Temas | Parlamento Europeo. <http://europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Worldometer. (s. f.). *Reloj de población mundial: 8,3 mil millones de personas (EN VIVO, 2026)*. Worldometer. <https://www.worldometers.info/es/poblacion-mundial/>

El retorno del tren de pasajeros en México: evidencia internacional de su impacto económico.

Benjamín Ruan Ortega (Universidad Autónoma de Querétaro) ruan.ortega.benjamin@gmail.com

Enrique Leonardo Kato Vidal (Universidad Autónoma de Querétaro) enriquekato@uaq.mx

Claudia Cárdenas Aguilar (Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social) claucardenas.ag@outlook.com

Resumen

Nuevos proyectos que apuntan a una mayor red ferroviaria de pasajeros se planean actualmente por el gobierno federal en México. La falta de evidencia suficiente de este sistema operando en el país invita al estudio de casos similares de nuevas redes construidas en regiones, para poder medir el impacto económico en ellas y ser consideradas en general. Este trabajo explora el contexto de este medio de transporte a través de la historia y el presente, y sintetiza los descubrimientos en otras regiones del mundo para que sus impactos puedan ser tomados en cuenta en los futuros proyectos.

Abstract

New projects aiming at a larger railroad network focused on passengers are being planned by the federal government of Mexico. The lack of sufficient evidence of this kind of system operating in the country begs the study of similar cases of new networks built in regions so the economic impact there can be measured and thus, considered at large. This work explores the context of the means of

transportation through history and the present and synthesizes discoveries in other regions around the world to take these impacts into account.

Palabras clave / Key Words

Tren, transporte, economía.

Train, transportation, economics.

Introducción

En cuanto a trenes en México, el periodo del porfiriato comprendido desde 1876 y 1911 muestra un precedente muy importante, pues se vio marcado por la expansión de vías férreas a lo largo del país, siendo en ese entonces la principal forma de mover mercancías y personas entre poblaciones. La red ferroviaria que existía en ese entonces era de capital privado con fuerte apoyo gubernamental.

La revolución mexicana implicó un cambio en el paradigma del transporte ferroviario pues resultó en una nacionalización de este por parte del estado. Un suceso relevante para el tren en México fue el decreto del presidente Lázaro Cárdenas en 1937 que establecía, entre otras cosas, la creación de la compañía pública Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), esto implicaba un monopolio de las redes ferroviarias del país por parte de dicha compañía.

En la década de los años noventa, se establecieron políticas de privatización de los sistemas ferroviarios y pasan a manos del sector privado mediante concesiones. Ramírez (2013) describe un proceso durante el periodo desde la creación de la FNM a su privatización de una tendencia a la baja de pasajeros en los trenes, reflejado en el número de locomotoras que drásticamente disminuyó a lo largo de los años, dejando en 1990 un saldo de 1,677 unidades, mismo que se redujo a 1,236 en 2011. Esto implica que, aunque la red de vías existía y operaba con regularidad, transportaba casi exclusivamente

mercancías. Esto marcaba la historia del tren de pasajeros en México como una anécdota cuyos vestigios no quedaron en la infraestructura o la cultura del transporte.

El transporte de personas en México en la actualidad se explica en su gran mayoría por la utilización del automóvil privado, Román-Cedillo y Bautista-Hernández (2026) identifican el modelo de expansión de la mancha urbana como un factor importante en la proliferación en el país de este medio de transporte. En cuanto a trenes de pasajeros, los mismos autores apuntan a la falta de transporte multimodal como un reto que compromete el potencial del país a desarrollar formas de transporte más sostenibles en términos de contaminación y desigualdad económica.

La diferencia de uso entre transporte por medio de tren de pasajeros y a través de carreteras se ve representada en la amplia brecha que existe entre una extensa y compleja red de caminos y carreteras para vehículos automotrices y la limitada extensión de la red de trenes. Dicha brecha se puede medir empíricamente en la relación que existe entre kilómetros de carretera y los kilómetros de vías férreas. Si consideramos la red nacional de carreteras omitiendo las brechas y la red rural, la extensión de esta consistía en 2024 de 190,532 kilómetros (SICT, 2024), mientras que la red principal de vías férreas contaba en el mismo año con 19,042.5 (ARTF, 2025). Estas cifras implican una relación de 1:10, por cada kilómetro de vía férrea que opera, existen diez de carretera para vehículos automotores. La brecha resulta aún más llamativa tomando en cuenta que de la red nacional de vías férreas tan solo 2,223.3 kilómetros corresponden a transporte de pasajeros, un 11.6% de la red principal.

Dicha brecha también se refleja en la limitada lista de líneas de trenes de pasajeros que opera en el país. Aunque habido un ligero aumento en los últimos años,

por mucho tiempo favoreció, según datos oficiales de la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (ARTF) exclusivamente la línea de tren suburbano de la Zona Metropolitana del Valle de México que, como su nombre bien lo indica, se trata de una línea que conecta al centro de la Ciudad de México con la periferia de la mancha urbana. Si bien esta línea es interestatal, no es considerado un tren interurbano por la misma ARTF, quien lo categoriza más bien como tren suburbano (ARTF, 2025). Esta diferencia implica que, durante muchos años, no existió una línea que comunicara dos ciudades con vida económica propia que transportara exclusiva o principalmente pasajeros.

En la actualidad, la lista de trenes de pasajeros consiste en siete casos que cumplen funciones específicas, mismas que son categorizadas como modalidades por la ARTF en regulares o turísticas. De las siete líneas, cinco se categorizan dentro de la modalidad especial, que engloba trenes con enfoque a un uso turístico o de uso particular, siendo el tren Insurgente (Toluca-CDMX) y el Suburbano como los únicos que cumplen una función específicamente no turística. Esto muestra una clara prioridad del uso de trenes en el país como instrumentos para el fortalecimiento del sector turístico o como atractivo turístico por sí mismo, como en el caso de “El Chepe”. Esta diferencia entre un uso turístico por encima de la conexión de ciudades por inercia económica en general marca un precedente poco usual a nivel mundial.

Objetivo

En el contexto presentado, bajo una revisión de la literatura, el objetivo de este trabajo es visualizar parte de los retos que el Estado mexicano debe contemplar para instrumentalizar el proyecto de creación de una red ferroviaria de transporte de personas en el país al identificar el contexto actual del mismo, así como

encontrar casos en el mundo que muestren los impactos económicos de estos proyectos.

Metodología

Para encontrar las diferencias en los efectos de trenes en las localidades que reciben presencia del servicio contra las rezagadas se buscaron trabajos de investigación que estudiaran casos que, bajo metodologías rigurosas, encontraran resultados que formaran un panorama más completo y variado. Se analizaron principalmente nueve publicaciones que mostraban hallazgos en diversos casos del mundo que aportaran conocimiento relevante. Estos casos mostraban trenes de pasajeros que respondían al contexto socioeconómico de cada país o región, pero permiten enriquecer la visión de lo que se puede interpretar de los efectos observados en las distintas variables analizadas en las respectivas investigaciones, principalmente indicadores de actividad económica o efectos demográficos, así como efectos en vivienda y reorganización del espacio.

Los trabajos estudiados presentaban metodologías en su mayoría cuantitativas y se analizaban estadísticamente a lo largo del tiempo y con respecto a grupos distintos. Esto último responde a una metodología de diferencias, misma que fue utilizada en gran parte de los trabajos estudiados. Esta metodología es una técnica cuasiexperimental de carácter econométrico, en la cual por medio de la observación cuantitativa de los efectos en grupos que recibieron alguna intervención (grupo tratado), y cómo éstos se diferencian con respecto a algún grupo que no recibió dicha intervención (grupo de control) a lo largo del tiempo. Su naturaleza como herramienta estadística implica el uso de datos y promedios para encontrar si hay cambios significativos de acuerdo con los valores de análisis estadístico y de esa manera determinar causalidad.

Esta metodología resalta por el hecho de que no se aplica la intervención de manera aleatoria, ya que los grupos están predefinidos estrictamente por su condición de recibir alguna intervención o no, a diferencia de otras metodologías de análisis estadístico donde las observaciones son seleccionadas de manera aleatoria, con el motivo de reducir sesgos de selección. Por lo tanto, la razón de que esta metodología sea usada en la mayoría de las investigaciones consideradas resulta necesaria dado un principio fundamental de las líneas de trenes, que es que estas no son establecidas de manera aleatoria, sino en localidades o regiones que cumplen con ciertas características que se asumen de alta importancia durante la planeación de los proyectos. Aquellos lugares donde se establezcan las estaciones forman el grupo tratado y aquellos en donde no tengan presencia de estaciones son, de facto, el de control.

Este conocimiento robustecido por su condición cuantitativa será particularmente útil para entender la congruencia o disonancia entre los efectos esperados y los resultados observados en el tiempo, y las brechas que se forman en localidades que reciban los beneficios del tren de pasajeros y el cómo contrastan con aquellos en donde no se obtienen dichos beneficios. Además, en términos generales, pueden mostrar el rezago implícito dado el crecimiento de alguna ciudad y región y las brechas que en estas se forman de acuerdo con lo expuesto en la causación circular acumulativa, pues es a partir de estas brechas que se mide el impacto del sesgo y la tendencia a agudizarlas.

Resultados

En México hay un rezago frente a otros países con redes ferroviarias grandes y que brindan un servicio con beneficios particulares que otros medios no pueden replicar, como la vía aérea y el automóvil

privado. El tren supone una forma de transporte rápida y eficiente al concentrarse en una sola línea como infraestructura que comunica dos localidades, se trata a su vez de un sistema cerrado, con poca o a veces nula competencia con unidades que usen la misma vía de manera simultánea, acortando tiempos y siendo más eficiente en tanto a la relación distancia – tiempo que puede llegar a ser muy competitiva con respecto a otros medios de transporte. Esto requiere de la asignación estratégica de estaciones que estén localizadas de manera que faciliten su uso para la mayor cantidad de personas posibles y mantengan una velocidad pertinente al reducir el número de paradas. La estación representa en ese sentido una centralización del transporte por tren, pues es el punto de acceso al servicio que necesita estar establecido en donde en sí mismo llegar a ellas sea fácil y, más importante aún, que estén en lugares a donde las personas quieran o necesiten llegar, marcando la demanda existente en viajar de un lugar determinado a otro.

La centralización resulta también de la búsqueda de encontrar la eficiencia del tren al reducir el costo en tiempo y recursos, así como aprovechar las economías de aglomeración que se forman en los lugares en el que este llega. Sin embargo, esta centralización no es un fenómeno aislado pues implica una descentralización en algún otro lugar al enfocar la oferta en un área particular (usualmente la central) y se extrae de las áreas no centrales como efecto secundario (Mesentier y Orrico, 2024). La concentración de actividades en puntos particulares con facilidad de acceso dada nueva infraestructura crea a su vez mayor demanda en las áreas centrales, al ser lugares más atractivos relativo a aquellos donde no se presentan los beneficios de la aglomeración y, debido a su baja demanda como destino, muestran un rezago de actividades y posiblemente la ausencia absoluta del acceso a la red de comunicación.

La centralización de la estación como punto de acceso genera en la zona o localidad en donde se encuentra un punto de encuentro de la vida económica. En los trabajos estudiados persistió las constantes de la población, el empleo y la estructura de los sectores productivos en las regiones en las que el tren llegaba como variables de cambio. La mayoría de los casos encontraron un aumento en la población en las áreas aledañas a las estaciones. Incluso cuando mostraban una tendencia a la reducción de población y esta no paró, aun así, se presentó un incremento de población y densidad de esta solo en localidades primarias, es decir, los polos de desarrollo de la región donde sí llegaba el servicio de trenes y es destino principal de la línea. Otras estimaciones realizadas que mostraban que la densidad de población incrementaba en un 4% en un radio de un kilómetro a la redonda de las estaciones del tren regional de París, mientras que el empleo incrementó en un 9% (García-López *et al.*, 2017) Otro análisis aplicado a un rango mayor de área de la misma red potencialmente beneficiada encontró incremento del 12.8% (Mayer y Trevien, 2017).

Más personas implica un cambio en el mercado laboral de la región, pues hace más atractivo el vivir cerca de las estaciones o en localidades fácilmente conectadas a otras con mayores oportunidades. A su vez, la población que muestra un incremento en las áreas cercanas a las estaciones suele ser de mayor ingreso salarial y en algunos casos con mayor grado de educación, potencialmente al migrar de aquellas secundarias, fortaleciendo la idea de que mayor accesibilidad a las grandes ciudades o áreas primarias de la región sumada a la aglomeración implica el aumento de trabajos que requieren de mayor cualificación debido al sector de servicios e industria especializada en aumento.

Una de las razones de porqué esto pasa según la evidencia encontrada es que las empresas tienen inicialmente una reacción rápida al relocizarse a

localidades cercanas a las estaciones, causando una reestructuración de los sectores, principalmente el secundario al tener cambios en el tipo de manufacturas que se llevaban cabo en las respectivas regiones (Yang et al., 2024; Ahlfeldt & Feddersen, 2018). En general, se descentralizan los sectores primario y secundario, pues el empleo en estos sectores tiende a alejarse de ciudades principales, mientras que con los empleos del sector servicio ocurre el caso opuesto y se concentran más en estas, notoriamente cuando existe una distancia considerable entre las áreas secundarias y las principales (Li y Xu, 2018).

En ese sentido, existe un beneficio colateral al integrarse a las economías de la aglomeración entre dos ciudades con inercia económica importante a localidades intermedias que reciban una estación. Sin embargo, este derrame económico se debilita a mayor distancia de una de las ciudades principales. (Ahlfeldt y Feddersen, 2018)

A un nivel regional, esta dinámica propicia la formación de círculos virtuosos para unas y viciosos para otras, pues el desplazamiento de la población y el capital que trae consigo demanda laboral, productividad y mayores utilidades hacia las áreas centrales contrasta con las rezagadas que, comenzando por la migración y la falta de inversión, se consideran como características inherentes a la región y pueden generar un sesgo en la consideración de las actividades económicas de la misma. Dicha percepción reduce aún más su atractivo como punto de desarrollo económico y existe menor incentivo a un cambio al paradigma, agudizando la distancia entre ambas regiones mientras se mantenga esa tendencia (Jackson, 2019).

Discusión y conclusiones

El fenómeno que describe la formación de los círculos viciosos es la causación circular acumulativa, esta teoría económica fue presentada por Gunnar Myrdal *et al* (1944) en el libro *An American Dilemma: The Negro Problem and Modern Democracy*, en el que explora estos círculos como vehículo de mantenimiento del *status quo* en donde dos fenómenos se generan mutuamente dado que la presencia de uno mantiene o agudiza al otro aunque esta dinámica sea accidental, lo que implica que el cambio en alguno de los factores de uno de estos impacta en una serie de consecuencias que terminan por afectar al sistema completo (Myrdal *et al.*, 1944). Esta estructura fue presentada como herramienta de análisis para el cambio social en general, pues describe una estructura para comprender un problema dado que es acumulativo porque los efectos en un fenómeno pueden suceder en un sentido positivo o negativo, pero siempre en respuesta mutua a los cambios ocasionados por un choque en alguno de los factores implicados.

Esta herramienta es útil para el análisis de nuevos proyectos ferroviarios en México al poder describir por qué en tanto la centralización continúe y concentre actividades económicas en ciertas áreas, se seguirá empujando el sistema de manera que incrementa la centralización y los efectos se trasladan al crecimiento de la brecha para con las rezagadas. En un caso opuesto, la descentralización empujaría el sistema hacia una disminución del atractivo de áreas centrales, que se diluyen en un espacio con mayor dispersión de las actividades económicas, causando mayor dificultad en concretar infraestructura particularmente beneficiada por un fortalecimiento de lugares o regiones que presenten aglomeración.

Esta dinámica crea una tensión entre los beneficios tangibles que se presentan por la llegada de infraestructura que reduzca los costos de transporte y las ya mencionadas economías de la aglomeración a

localidades que se conectan a una red de comunicación férrea y aquellas que no estén conectadas a la red, convirtiéndolas de facto en el rezago de desarrollo impulsado por la infraestructura. Sobre todo, si no se encuentra un equilibrio para que un choque muy grande no culmine en el efecto acumulativo de la causación circular, manteniendo las áreas con poco desarrollo en un profundo círculo vicioso de poco o nulo desarrollo económico.

La historia y el presente del tren de pasajeros en México representan una notoria carencia de casos que muestren los efectos de impactos económicos en las localidades que estos conectan o, en su defecto, aquellas que no reciban una estación o forma de acceso al servicio de transporte. La llegada de nueva infraestructura supondría entonces un choque al sistema, que dada la estructura de análisis de la causación circular acumulativa implica pertinente el estudio de los efectos que esta puede traer a largo plazo, y entender de manera fundamental las variables que se ven afectadas y que construyen en sí la brecha entre las regiones, de manera que se pueda determinar el cómo se pueden contrarrestar el ensanchamiento de esta.

Referencias

- Ahlfeldt, G. M., y Feddersen, A. (2018). *From periphery to core: measuring agglomeration effects using high-speed rail*. *Journal Of Economic Geography*, 18(2), 355-390. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbx005>
- Alvarenga, A. B., Junior, A. A. B., y Da Silva Freguglia, R. (2024). *Rapid Transit, Labor Market, and Business Growth: The case of São Paulo, Brazil*.
- ARTF. (2025). *Anuario Estadístico Ferroviario 2024*. Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario. <https://www.gob.mx/artf/documentos/anuario-estadistico-ferroviario-2024>
- García-López, M., Hémet, C., y Viladecans-Marsal, E. (2017). *How does transportation shape intrametropolitan growth? An answer from the Regional Express Rail*. *Journal Of Regional Science*, 57(5), 758-780. <https://doi.org/10.1111/jors.12338>
- García-López, M., Hémet, C., y Viladecans-Marsal, E. (2017). *Next train to the polycentric city: The effect of railroads on subcenter formation*. *Regional Science And Urban Economics*, 67, 50-63. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2017.07.004>
- Jackson, W. A. (2019). *Cumulative causation*. En Elsevier eBooks (pp. 131-134). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102295-5.10038-1>
- Li, Z., y Xu, H. (2018). *High-speed railroads and economic geography: Evidence from Japan*. *Journal Of Regional Science*, 58(4), 705-727. <https://doi.org/10.1111/jors.12384>
- Mayer, T., y Trevien, C. (2017). *The impact of urban public transportation evidence from the Paris region*. *Journal Of Urban Economics*, 102, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2017.07.003>
- Mesentier, T., y Orrico, R. (2024). *Transportation oriented to urban development*. *Cadernos Metrópole*, 26(60), 489-509. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2024-6005.e>
- Myrdal, G., Sterner, R., y Rose, A. M. (1944). *An American Dilemma: The Negro Problem and Modern Democracy* (Vol. 1). Harper.
- Ramírez, S. M. (2013). *El transporte ferroviario en México*. *Comercio Exterior*, 63(4), 7-13. http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/157/2/el_transporte.pdf
- Román-Cedillo, D., y Bautista-Hernández, D. A. (2026). *Transportation systems in Mexico: Challenges and trends*. *Latin American Transport Studies*, 4, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.latran.2026.100060>
- SICT. (2024). *Anuario Estadístico del Sector Infraestructura, Comunicaciones y Transportes*. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. https://micrs.sct.gob.mx/images/DireccionesGrales/DGP/PDF/DEC-PDF/Anuario_Estadistico_SICT_2024.pdf
- Talebian, A., Zou, B., y Hansen, M. (2018). *Assessing the impacts of state-supported rail services on local population and employment: A California case study*. *Transport Policy*, 63, 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.12.013>
- Yang, Y., Zhang, J., Tong, Y., Liu, W., y Ma, Z. (2024). *High-speed rail in shrinking cities: A weapon for downturn or a catalyst for change*. *Cities*, 155, 105483. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105483>

Compresión Morfológica a Escala de Grises para Videovigilancia

Fernando Cárdenas González

Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, fcardenas04@alumnos.uaq.mx

Hugo Jiménez Hernández

Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, hugo.jimenez@uaq.edu.mx

Resumen

Algunas de las codificaciones y métodos de compresión de imágenes y de videos notables dependen de transformaciones que pueden causar pérdida de información, por lo que se plantea el desarrollo de un algoritmo de compresión de imágenes a escala de grises con pérdida reducida basado en transformaciones de Morfología Matemática (MM), un área de estudio de las matemáticas enfocada en las formas de piezas dentro de un espacio, es decir, las formas de regiones de píxeles en imágenes.

Una de las revisiones de este trabajo comparado con un reporte previo de los autores es la evaluación del algoritmo con medidas de evaluación usadas en propuestas similares, haciendo que los resultados presentados sean comparables con los de otros trabajos. Estos resultados muestran que el algoritmo tiene potencial de utilidad en varios ámbitos y que si se implementa una codificación más eficiente para las imágenes se podría reducir el almacenamiento requerido; pero los componentes de procesamiento del algoritmo necesitan ser evaluados individualmente para determinar su impacto y saber cómo se deberían modificar o si es mejor reemplazarlos para aumentar la fidelidad y magnitud de compresión.

Finalmente se resalta la necesidad del uso de lenguajes de programación con buen manejo de

memoria para permitir procesamiento de imágenes a mayor escala.

Palabras clave: compresión, imágenes, grises, morfología matemática, pérdida de información.

Abstract

Some important image and video compression and encoding algorithms rely on transformations that make them lossy. Because of this issue, the authors propose a minimal loss grayscale image compression algorithm which uses transformations from Mathematical Morphology (MM), a field of study from mathematics focused on the shape of components in a space, and in this case the shape of pixel regions in images.

An improvement of this proposal compared to a previous proposal of the same authors is the inclusion of standardized image compression metrics for the results, allowing the comparison of these results with other papers. Said results prove that the proposed algorithm is a functional proof of concept, potentially useful in many use cases, and could reduce necessary storage space if paired with a more efficient image encoding scheme; however, each processing component of the algorithm needs to be evaluated independently to determine its impact on fidelity and compression rate and decide on its modification or replacement to increase both factors.

Finally, the requirement of programming languages with robust memory management for greater scale image processing tasks has been highlighted.

Keywords: compression, images, greyscale, mathematical morphology, information loss.

Introducción

Existen técnicas de compresión de imágenes para aprovechar las propiedades del sistema visual humano, además de reducir la información redundante; un subconjunto de estas técnicas procura fragmentar la señal a comprimir en regiones para extraer la información más relevante de cada partición. Esto hace que cada partición tenga su propio conjunto de correlaciones entre píxeles y

propiedades geométricas no lineales únicas, llegando al uso de herramientas geométricas; entre ellas, se encuentra la MM, que ha sido de suma utilidad en varias tareas de procesamiento y codificación de señales [8].

MM es una subdisciplina de las matemáticas que surgió en Francia en la década de 1960 [9, Ch. 1]. Las operaciones fundamentales, la erosión y dilatación, involucran el uso de un patrón básico, conocido como elemento estructurante (EE), que se centra en un píxel y determina si tal píxel o una región de la imagen original se modifica y cómo. En imágenes binarias (únicamente de píxeles blancos y negros), la erosión sólo retiene píxeles que al centrar el EE sobre tales hace que el EE esté lleno de píxeles activados, mientras que la dilatación activa regiones donde los píxeles centro del EE están activados; en imágenes a escala de grises, hace que el píxel centro del EE adopte el valor del píxel más oscuro dentro de la región marcada por el EE, mientras que la dilatación hace que el píxel centro tome el valor del píxel más claro de la región marcada por el EE. Además, este EE puede ser plano o bien no plano (en caso de operaciones a escalas de grises), este último tipo puede modificar momentáneamente los valores de los píxeles antes de determinar el valor mínimo o máximo delimitado [9, Ch. 3].

Como establecen [2], los estándares de codificación y compresión JPEG y MPEG disponen de la *Direct Cosine Transform* (DCT) para comprimir imágenes, sin embargo, ambos estándares son conocidos por tener pérdidas, aumentando el potencial de que se remueva información relevante de las señales comprimidas; lo que puede ser indeseable en varios contextos, incluso considerando el formato JPEG 1 fue creado en 1992 y sigue siendo el formato de imagen más usado según [5].

Por lo tanto, dentro del Centro de Investigación e Innovación en Ciencias de la Computación y Tecnología Educativa (CIICCTE) se está desarrollando una alternativa para compresión de imágenes basado en operaciones de MM, maximizando la magnitud de compresión y la reducción de pérdida posible para escalarlo para su

uso en sistemas de videovigilancia, específicamente para casos en los que se requiere aprovechar al máximo el ancho de banda disponible, como sistemas de seguridad. Además, existen varios tipos de análisis que son beneficiados por más eficiencia del equipo de recolección de imágenes, como de flujo vehicular y de peatones.

Ya se han desarrollado algoritmos de compresión de imágenes basados en MM, como aquel presentado en [4], que usa pirámides morfológicas (conjuntos de operaciones consecutivas sobre una imagen) para fragmentar imágenes en versiones mínimas con la información relevante junto a residuos de información, y cuantización de vectores para aumentar la magnitud de compresión.

Previamente se desarrolló un algoritmo para compresión de imágenes binarias y se evaluaron sus resultados durante el 19° Verano de Introducción a la Ciencia, que también fueron presentados en el 13° Encuentro de Jóvenes Investigadores e Investigadoras por los autores.

En este trabajo se presenta una expansión de los reportes previamente mencionados, se evalúa el desempeño de una iteración de un algoritmo de compresión de imágenes a escala de grises basado en operaciones de MM desarrollado, el cual depende del algoritmo usado durante los reportes anteriores. Una mejora considerable en este trabajo es el uso de métricas de fidelidad reales que se han usado en otras obras similares.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un algoritmo de compresión de imágenes a escala de grises basado en aquel cuyos resultados fueron presentados por [3] y evaluar la fidelidad y magnitud de compresión de este avance.

Objetivos específicos

- Diseñar componentes teóricos del algoritmo para compresión a escala de grises y

desarrollar una implementación computacional.

- Elegir métricas de evaluación de imágenes comúnmente usadas en literatura similar, o bien crearlas, para medir fidelidad y espacio necesarios, y traducirlas a una implementación computacional.
- Utilizar imágenes a escala de grises de un conjunto de datos de referencia que muestre algunos casos de uso para el algoritmo desarrollado.
- Someter el conjunto de datos a la implementación del algoritmo y usar las imágenes recuperadas para calcular las métricas.
- Presentar los resultados de las métricas en una forma generalizada.

Metodología

Los componentes del algoritmo en cuestión se implementaron en GNU Octave, una alternativa de uso libre a MATLAB, en su versión 11.1.0 [6] y el paquete *image* en su versión 2.20.0 [1].

De la base de datos de imágenes procesadas *CDNet 2014*, se usaron los conjuntos de imágenes *highway*, *pedestrians*, (de *baseline*), *winter driveway* (de *intermittentObjectMotion*), *cubicle* (de *shadow*) y *diningRoom* (de *thermal*), específicamente su versión *input* (versiones originales) transformada a escala de grises (usando la función *rgb2grey* de Octave) para realizar pruebas con el algoritmo; de cada uno de los conjuntos de imágenes previamente mencionados, se extrajeron 200 imágenes (a excepción de *highway*, de ese conjunto de datos se extrajeron sólo 198 imágenes por problemas técnicos que se explicarán más adelante) para obtener las métricas por cada conjunto y de esa manera determinar la fidelidad de los resultados del algoritmo de compresión en diferentes casos.

Las siguientes métricas se aplicaron a cada imagen que pudo ser procesada.

En primer lugar, se aplicó la Máxima Proporción Señal-Ruido (*Peak Signal-to-Noise Ratio*, PSNR), medida en decibelios. que según [10], mide la razón

entre la potencia de la señal máxima y la potencia del ruido que distorsiona su representación y se suele usar para medir la calidad de reconstrucción de códecs de compresión con pérdida. Dado que esta métrica se ha usado para evaluar las propuestas presentadas por [2] y [4], se ha incluido que el desempeño del algoritmo evaluado en este trabajo para que sea comparable con propuestas similares.

La siguiente definición; donde n representa la cantidad de bits por píxel (por lo tanto, $n = 8$), M representa la cantidad de píxeles que tiene la imagen, p_i representa el i -ésimo píxel de la imagen original y $\tilde{p}_i$ representa el i -ésimo píxel de la imagen recreada; ha sido presentada por [2] y se usó para esta evaluación.

$$PSNR = 10 \log \left[\frac{(2^n - 1)^2}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (p_i - \tilde{p}_i)^2} \right]$$

En este caso, entre más similares sean las imágenes original y recreada, su *PSNR* será mayor, por lo tanto, si las imágenes son idénticas, el denominador será 0 y PSNR tenderá al infinito.

En segundo lugar, se aplicó el Método del Índice de Similitud Estructural (*Structure Similarity Index Method*, SSIM). [10] expone que esta métrica evalúa el cambio en la estructura de las imágenes, haciendo que destaquen píxeles interdependientes o parcialmente cerrados; se usa para estimar la percepción humana de la calidad de imágenes y videos y la similitud entre dos imágenes.

Depende de tres términos para su cálculo: luminancia ($l(x, y)$, para comparar el brillo de ambas imágenes), contraste ($c(x, y)$, diferencia entre la región más clara y oscura de las imágenes) y correlación/estructura ($s(x, y)$, patrón de iluminación entre dos imágenes para determinar su similitud). Presenta 3 constantes: α , β y γ , que son positivas.

Para esta evaluación, se usó un caso especial de la métrica tal que $\alpha = \beta = \gamma = 1$. Tal que x y y representan las imágenes original y recuperada (o regiones en posiciones equivalentes) respectivamente, mientras que μ_x y μ_y son los

promedios y σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las imágenes respectivas; [11] recomiendan que el cálculo de estas medidas sea mediante ventanas locales por distorsiones que dependan del espacio y cómo los humanos sólo pueden percibir un área de la imagen a la vez en alta resolución; para esta evaluación se replicó el uso de ventanas locales de $8\text{px} \times 8\text{px}$.

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_x\sigma_y + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_1)}$$

C_1 y C_2 se obtuvieron bajo la definición dada por [11], donde L representa el rango dinámico de los valores de píxeles (para este caso, $L = 255$) y K_1 y K_2 son constantes a definir por los investigadores.

$$C_i = (K_i L)^2, i = 1, 2$$

$$K_i \ll 1, i = 1, 2$$

Se eligieron $K_1 = 0.01$ y $K_2 = 0.03$, valores que también fueron usados en [11].

Finalmente se obtuvo el promedio de los SSIM de cada ventana (*mean SSIM*, *MSSIM*) para evaluar la calidad en general de la imagen recreada, donde X representa la imagen original, Y representa la imagen recreada y M la cantidad de ventanas locales.

El resultado de esta métrica está entre 0 y 1, donde 1 representa que ambas imágenes son idénticas y 0 representa que las imágenes son completamente diferentes.

$$\text{MSSIM} = (X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \text{SSIM}(x_j, y_j)$$

En tercer lugar, se calculó la magnitud de crecimiento, una métrica propia para determinar qué tanto ha crecido (o idealmente disminuido) la información comprimida de la imagen y los datos necesarios para descomprimir la imagen (cabecera o *header*) respecto al tamaño de la imagen original.

La forma de calcular esta métrica es la siguiente, tal que T_o es el tamaño de la imagen original, t_i es el tamaño del i -ésimo componente elemental y h

representa el tamaño de la cabecera. Estos tamaños están en bytes.

$$\text{Crecimiento} = \frac{h + \sum_{i=1}^n t_i}{T_o}$$

Idealmente esta métrica sería menor que 1. El valor inverso de esta métrica representa la magnitud de la compresión.

Finalmente, la última métrica usada es la razón de tonos, una métrica propia que representa el potencial de codificar una imagen recreada con menos bits, permitiendo que su tamaño sea menor, ya que por defecto una imagen a escala de grises se codifica con 8 bits.

Sea Co_o la cantidad de valores únicos en la imagen original y Co_R la cantidad de valores únicos en la imagen recuperada.

$$\text{RT} = \frac{Co_o}{Co_R}$$

Por lo tanto, la cantidad teórica de bits necesarios para codificar una imagen reconstruida es $[8\text{RT}]$.

Para probar el algoritmo se usaron las configuraciones de los siguientes parámetros internos: Tamaño Cuadrado Mínimo de Reducción (que indica la cantidad de píxeles que deben tener ambas dimensiones de un componente para que pueda ser reducido) en 120px, y la cantidad de grupos de tonos de grises (para que la imagen probada pueda ser descompuesta en varias subimágenes binarias) en 5.

Se aplicó cada métrica a cada uno de los conjuntos de imágenes mencionadas, por lo que se pudieron obtener 3,992 resultados. De estos resultados se calculó el valor esperado de cada métrica para cada conjunto de resultados mediante la representación de una selección específica de resultados como un histograma (de 20 barras), la búsqueda del intervalo con mayor frecuencia y la obtención del promedio entre tal intervalo y el de la posición anterior.

Resultados

A continuación, se presentan los valores esperados de cada métrica de la evaluación para reducción de

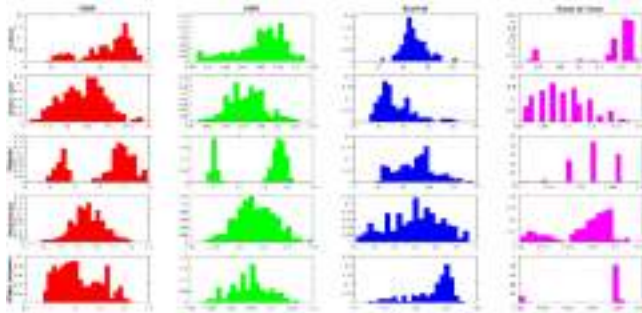
pérdida. Primero se presentan las tablas con los valores esperados de las métricas usadas con las magnitudes de compresión correspondientes para cada conjunto de imágenes usado para la evaluación.

Tabla 1: Valores esperados de métricas

Dataset	PSNR	SSIM	Crec.	RT
cubicle	12.935	0.48031	40.755	0.1207
dinningRoom	18.468	0.44947	40.792	0.092773
highway	13.382	0.087741	98.319	0.081806
pedestrians	4.5445	0.053745	85.702	0.049621
winter driveway	7.1534	0.094629	124.67	0.08585

Además, se adjuntan las distribuciones empíricas de cada métrica, descompuestas por cada conjunto de datos como una visualización más detallada de la tabla anterior.

Fig. 1: Histogramas de resultados de métricas



Desafortunadamente, en todo caso analizado la versión comprimida de una imagen y su encabezado tienen un mayor tamaño que la imagen original. Sin embargo, esto es atribuible a la implementación del *header*, dado que todo elemento de estos datos adicionales no se recodificó a archivos individuales con metadatos que ocupan poco espacio (como TXT o BSON), simplemente se usó el espacio que cada elemento usaba como variable de GNU Octave.

En términos de fidelidad (PSNR y SSIM), el algoritmo presentó mejores resultados para los conjuntos *cubicle* y *dinningRoom*, esto se puede atribuir al rango de tonos de grises y su distribución bidimensional en las imágenes, dado que *cubicle* tiene regiones muy claras y oscuras sin regiones intermedias que actúen como gradientes entre estas

regiones, mientras que conjuntos como *pedestrians* y *winter driveway* tienen sí presentan estas regiones de gradientes, por lo que al agrupar regiones de píxeles por rangos de tonos específicos, se exacerba el siguiente problema.

El algoritmo utilizado en este experimento (implementación B) depende del algoritmo evaluado durante el 19° Verano de Introducción a la Ciencia (implementación A). La sección de reconstrucción de la implementación A desplazaba los componentes en las imágenes binarias reconstruidas por 1 píxel en una dimensión o dos dimensiones en comparación de las imágenes binarias originales.

La implementación B divide una imagen a escala de grises en z sub-imágenes binarias, por lo que la cantidad de desplazamientos se magnifica en esa escala. Y este problema también puede ser expandido por el componente de esta implementación para saturar y desaturar la imagen gris usado para mejorar el agrupamiento.

Los resultados de la métrica de razón de tonos muestran que para todos los casos esta es menor que 0.15, indicando que, bajo los parámetros usados para implementación B, sería posible codificar imágenes recreadas con alrededor 15% de 8 bits, es decir $[8 \text{ bits} \times 0.15] = [1.2 \text{ bits}] = 2 \text{ bits}$. Esto implica que las imágenes podrían, teóricamente, almacenarse en un cuarto del espacio de memoria necesario (sin considerar el encabezado de codificación) si existiese un estándar de codificación de imágenes que permitiera usar menos bits.

Discusión y conclusiones

Aunque la implementación B fue realizada en GNU Octave 11.1.0 en una computadora con 16GB de RAM y Windows 11, para hacer las pruebas finales se tuvo que migrar el código a MATLAB Online Basic debido a que al realizar pruebas en Octave, el intérprete siempre colapsaba. Al mismo tiempo que esto sucedía, el SO reportaba un error de corrupción de montículo de memoria (un espacio de manejo de memoria dinámica), que según [7] tiene varias causas posibles, entre ellas la más probable es el manejo incorrecto de RAM causado por fallos en aplicaciones, dependencias o librerías ya que se

observó que antes de esos colapsos, el intérprete e IDE de Octave usaron menos de 50MB de RAM. Por lo tanto, se puede ubicar el problema de mala administración de memoria en un componente de Octave, especialmente porque este error no sucedió en MATLAB Online.

La migración temporal del código de Octave a MATLAB Online Basic fue rápida, dado que la sintaxis de ambos lenguajes de programación es muy similar.

El uso de métricas ampliamente aprovechadas para la evaluación de algoritmos que procesan imágenes permitió identificar que es necesario hacer una revisión extensa de los componentes de preprocesamiento de las imágenes en implementación B (como la división de estas en subimágenes binarias) y de implementación A, específicamente la lógica de recolocación de elementos de imágenes binarias para evitar distorsiones mínimas pero acumulativas; junto a la inclusión de conversiones de encabezados a formatos de archivos ligeros para implementaciones reales. Y la presencia de errores computacionales por mal uso de memoria confirma y realza la necesidad de crear implementaciones con mejor manejo de memoria previamente establecidas en [3]. Sin embargo, los resultados de PSNR y SSIM en los subconjuntos *cubicle* y *dinningRoom* demuestran que implementación B es una prueba de concepto para la compresión de imágenes a escala de grises usando transformadas esenciales de MM, y con revisiones sí es posible tener aplicaciones reales en varios ámbitos que dependen del manejo de imágenes; además los resultados de razón de tonos muestran que es posible codificar imágenes con menos bits por píxel con poca pérdida de información.

Para tareas similares de procesamiento de imágenes a grande escala, se recomienda el uso de otros lenguajes de programación en lugar de intentar escalar proyectos en GNU Octave.

A futuro, se plantea la migración de implementación B a Julia, un lenguaje de programación científica, para procurar el escalamiento del algoritmo para que maneje imágenes a escala de grises adecuadamente y pueda trabajar con imágenes a colores (que tienen

espectros de color con intensidades que difieren en ciertas regiones), la búsqueda de puntos de fallo en los procesos de ambas implementaciones para su modificación o reemplazo y la evaluación de tiempo necesario para procesar imágenes en Julia en comparación con GNU Octave.

Agradecimientos

El autor principal desea agradecer a la Secretaría de Investigación, Innovación y Posgrado de la UAQ y al Dr. Hugo Jiménez Hernández por el apoyo económico dirigido al desarrollo del proyecto; además de agradecer al colega Gianluca Franceschi Bofill por haber colaborado en el proyecto mediante la codificación de las métricas de evaluación en Octave.

Referencias bibliográficas

- [1] C. Draug, H. Gimpel y A. Kalma. *image*. (11 de marzo de 2026). Octave Packages. (2.20.0). Disponible: <https://gnu-octave.github.io/packages/image/>
- [2] E. Guzmán, Pogrebnyak, O., Yañez, C., y L. P. Sánchez Fernández, "Morphological Transform for Image Compression," (en inglés), *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2008, no. 426580 (2008), pp. 1–9, abr., 2008, doi: 10.1155/2008/426580.
- [3] F. Cárdenas González y H. Jiménez Hernández, "Compresión Morfológica en Sistemas de Videovigilancia Inteligente," *Memoria de Encuentro*, vol. 13, pp. 873-876, nov., 2025.
- [4] H. Al-Otum y M. Al-Dwairi, "Image compression based on color morphological pyramidal decomposition," (en inglés), *2007 9th Int. Symp. on Signal Process. and Its Appl.*, Sarja, Emiratos Árabes Unidos, 2007, pp. 1–4, doi: 10.1109/ISSPA.2007.4555288.
- [5] ISO/IEC SC29 WG1. "Overview of JPEG 1." JPEG. 20 de julio de 2026. [En línea] Disponible: <https://jpeg.org/jpeg/index.html>
- [6] J. W. Eaton, D. Bateman, S. Hauberg y R. Wehbring. *GNU Octave*. (2026). GNU Octave. (11.1.0). J. W. Eaton. Disponible: <https://octave.org/>
- [7] N. Umar, "Re: My app is crashing due to ntdll.dll application error (0xc0000374)." Microsoft Q&A. 13 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://learn.microsoft.com/en-us/answers/questions/1387118/my-app-is-crashing-due-to-ntdll-dll-application-error>
- [8] P. Salembier, P. Brigger, J. R. Casas y M. Pardas, "Morphological operators for image and video compression," (en inglés), *IEEE Trans.*

on *Image Process.*, vol. 5, no. 6, p. 881, jun., 1996, doi: 10.1109/83.503906.

[9] P. Soille, *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Ed., 2° ed., Heidelberg, Alemania (en inglés), 2004.

[10] U. Sara, M. Akter. y M. S. Uddin, "Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—A Comparative Study," (en inglés), *J. of Comput. and Commun.*, vol. 7, no. 3, pp. 10–12, mar., 2019, doi: 10.4236/jcc.2019.73002.

[11] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh y E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," (en inglés), *IEEE Trans. on Image Process.*, vol. 13, no. 4, pp. 604–607, abr., 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.

Análisis exploratorio para identificar patrones asociados con depresión estudiantil.

Peña Sánchez Ana Luisa¹

Romero González Julio Alejandro²;

Resumen

La depresión estudiantil es un problema relacionado con aspectos académicos, económicos, sociodemográficos o de estilo de vida. El objetivo de este estudio fue explorar patrones y variables asociadas con la presencia de depresión en estudiantes. Se utilizó un conjunto de datos de 27,876 registros. Se realizó un análisis exploratorio de datos (EDA), seguido de un análisis de componentes principales (PCA) para reducir la dimensionalidad y facilitar la interpretación de las variables. Posteriormente, se aplicaron pruebas ANOVA y chi-cuadrada para identificar diferencias y asociaciones estadísticamente significativas con la depresión. Los dos primeros componentes principales explicaron el 41.68 % de la variabilidad total. El ANOVA identificó diferencias significativas en edad, presión académica, CGPA, satisfacción académica, horas de estudio/trabajo y estrés financiero. La prueba chi-cuadrada mostró asociaciones significativas con ciudad, horas de sueño, hábitos alimenticios, carrera, pensamientos suicidas e historial familiar de enfermedades mentales. Los resultados muestran que la depresión se relaciona principalmente con los factores académicos y económicos dentro del conjunto analizado.

Palabras Clave

Depresión estudiantil, análisis exploratorio de datos, análisis de componentes principales, ANOVA, chi-cuadrada, estudiantes universitarios.

Abstract

Student depression is a problem associated with academic, economic, sociodemographic, and lifestyle factors. The objective of this study was to explore patterns and variables associated with the presence of depression among students. A dataset containing 27,896 records was used, from which 19 records were removed during preprocessing. Exploratory data analysis (EDA) was performed, followed by principal component analysis (PCA) to reduce dimensionality and facilitate the interpretation of the variables. ANOVA and chi-square tests were subsequently applied to identify statistically significant differences and associations with depression. The first two principal components explained 41.68% of the total variance. ANOVA identified significant differences in age, academic pressure, CGPA, academic satisfaction, work/study hours, and financial stress. The chi-square test showed significant associations with city, sleep duration, dietary habits, degree, suicidal thoughts, and family history of mental illness. These findings indicate that depression is associated with academic and economic factors within the analyzed dataset.

Key Words

Student depression, exploratory data analysis, principal component analysis, ANOVA, chi-square, university students.

Introducción

La salud mental de los estudiantes universitarios se ha convertido en una preocupación creciente debido a la elevada presencia de ansiedad, estrés y depresión y a sus efectos sobre el rendimiento

¹ Estudiante de Licenciatura en Ingeniería en Computación de la Universidad Autónoma de Querétaro. apena34@alumnos.uaq.mx

² Investigador y docente de la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro. julio.romero@uaq.mx

académico y la permanencia escolar, el cual es un fenómeno multivariable asociado a características sociodemográficas, aspectos académicos, económicos, sociales y familiares, por lo que investigaciones recientes han comenzado a identificar factores y perfiles de vulnerabilidad. En el trabajo desarrollado por Gastelú y Hurtado (2022) señalan que la salud mental universitaria presenta diferencias relacionadas con el sexo, nivel socioeconómico, cultura, país y carrera de estudio, identificando que los patrones de depresión dependen del contexto y de las características de la población estudiada. En este mismo sentido, Veloz Alvarado et al. (2024) identifica la relación entre la presión académica y deterioro de la salud mental debido a la sobrecarga académica, las dificultades económicas, el escaso apoyo social, conflictos familiares, problemas de adaptación universitaria y el uso inadecuado de tecnologías, han sido los principales generadores de ansiedad, estrés y depresión. En el estudio realizado por Bedoya Sandoval et al. (2025) encontraron que la elevada carga académica, las prácticas clínicas, las exigencias emocionales, la mala calidad del sueño, la presión económica y el aislamiento social se relacionan recurrentemente con síntomas depresivos, además encontraron mayor vulnerabilidad de estos síntomas en mujeres y estudiantes menores de 22 años, personas con bajos ingresos y estudiantes con redes de apoyo limitada. Peng et al. (2023) también encontraron que ser mujer, ser joven y encontrarse en etapas iniciales o preclínicas se asociaba con mayor riesgo de problemas de salud mental. En conjunto, estas evidencias sugieren que los factores relacionados con el estrés, la ansiedad y la depresión responden a múltiples condiciones personales y contextuales, las cuales pueden ser categorizadas en tres dimensiones principales: sociodemográfica, académica y de estilo de vida (Mansilla Soto et al., 2021).

Dentro de estas dimensiones, algunos son condicionantes para incrementar la vulnerabilidad, mientras que otros pueden contribuir a disminuir sus efectos. Uno de estos aspectos es el sueño, ya que el estrés puede deteriorar su calidad y, a su vez, un descanso insuficiente puede afectar el

rendimiento académico e incrementar los niveles de estrés, generando un ciclo que favorece la aparición de síntomas depresivos (Limone y Toto, 2022). A ello se suman las dificultades económicas, el aislamiento social, los conflictos familiares y la ausencia de redes de apoyo, que pueden intensificar el impacto de las exigencias académicas sobre la salud mental. En contraste, la actividad física favorece la autoestima, la autopercepción y la regulación emocional disminuyendo los niveles de depresión y estrés (Cusme Torres, 2023), mientras que el apoyo social, familiar e institucional es un recurso para afrontar las demandas académicas, observándose menores niveles de estrés entre los estudiantes (Limone y Toto, 2022). Por otra parte, las tecnologías digitales presentan efectos contrastantes, debido a que el uso excesivo de internet, teléfonos inteligentes y redes sociales, pueden incrementar la frustración, los problemas de concentración, debido a las dificultades de acceso tecnológico; sin embargo, cuando existe una adecuada accesibilidad tecnológica, acompañamiento docente y una gestión apropiada de las herramientas digitales, estas pueden favorecer el desarrollo de las actividades académicas (Aguirre Sifuentes et al., 2024).

La pandemia de COVID-19 incorporó nuevos elementos al análisis, en el estudio realizado por Véliz-Castro et al. (2025) se identificó aislamiento, pérdida de rutinas, educación a distancia, sobrecarga universitaria, dificultades económicas y miedo al contagio como factores asociados al deterioro emocional. Peng et al. (2023), realizó un metaanálisis de 201 estudios y en el que aproximadamente 198,000 estudiantes de medicina en el que estimaron una prevalencia de depresión del 41 % durante la pandemia. No obstante, a pesar de identificar una variabilidad asociada con la región geográfica y los instrumentos utilizados entre los estudios, no puede atribuirse únicamente a un acontecimiento general como el confinamiento, sino que está condicionada por las características del contexto y de la población estudiada.

En este contexto, este proyecto analiza las variables características como información demográfica, rendimiento académico, hábitos, entre otras, para

explorar patrones que permitan identificar factores que contribuyen a la depresión estudiantil. Este artículo se estructura de la siguiente forma: Sección I Introducción, Sección II. Metodología, Sección III Resultados y Sección IV Conclusiones.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó una base de datos relacionado con la depresión estudiantil (Jatmiko, 2024), el cual contiene información sobre diferentes variables entre los estudiantes y factores que pueden estar relacionados con la presencia de depresión.

Para el preprocesamiento se analizó la información y se realizó limpieza de la base de datos, identificando valores duplicados, vacíos o inconsistencias con la información. De la cual se identificaron 27896 registros que, tras el procesamiento, se eliminaron 16 duplicados y 3 registros vacíos.

Entre las 10 variables que se preservaron fueron: edad, horas de sueño, género, ciudad, profesión, presión académica, presión laboral, indicador de depresión, historial familiar.

Se realizó un análisis exploratorio de datos (EDA), para examinar el conjunto de datos, con el propósito de comprender la estructura de datos y analizar el comportamiento de las variables. En este análisis caracterizó el conjunto de datos y se examinó el comportamiento de las variables, se calcularon estadísticas descriptivas, como frecuencia, media, mediana y moda, a partir de estos resultados, se generaron representaciones gráficas que permitieron examinar las distribuciones, identificar patrones y tendencias, así como explorar posibles relaciones entre las variables asociadas con la depresión estudiantil.

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA), el cual de acuerdo con **Jolliffe y Cadima (2016)** es una técnica utilizada para reducir la

dimensionalidad de un conjunto de datos, creando nuevas variables no correlacionadas, que maximizan la varianza y permiten conservar la mayor cantidad posible de información. En este estudio, el PCA permitió transformar las variables originales en un conjunto reducido de componentes principales. Con el análisis realizado se conservaron dos componentes principales, los cuales fueron utilizados para analizar la información de forma más sencilla.

Se realizaron pruebas estadísticas con el propósito de identificar posibles diferencias o similitudes entre las variables que se estudiaron y la presencia de indicador de depresión. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), con la finalidad de identificar si dos o más grupos presentan diferencias estadísticamente significativas. Además, fue aplicada la prueba de chi-cuadrada (χ^2), para analizar la relación entre variables categóricas y determinar si existe una asociación estadísticamente significativa entre ellas (McHugh, 2013).

Resultados

Para realizar el análisis de componentes principales, se utilizaron las siguientes variables del conjunto: edad, presión académica, presión laboral, CGPA, satisfacción académica, satisfacción laboral, horas de sueño, hábitos alimenticios, horas de estudio/trabajo y estrés financiero. El análisis permitió transformar las variables originales en componentes principales para poder facilitar la representación de las observaciones en menos dimensiones.

En la siguiente tabla se observa que PC1 representa la mayor proporción de variabilidad. Estos dos primeros componentes representan un 41.68% del total de los datos, el otro 58.32% restante de la variabilidad se encuentra en los componentes posteriores. Para interpretar el comportamiento de los componentes principales, se analizaron las cargas correspondientes a cada variable. Los

resultados para PC1 y para PC2 se representan en la Tabla 1.

Variable	PC1	PC2
Age	-0.0465	-0.0033
Academic Pressure	0.2873	0.2095
Work pressure	-0.0801	-0.0002
CGPA	0.0026	0.0007
Study Satisfaction	-0.1413	-0.1200
Job Satisfaction	0.0000	-0.0003
Sleep Duration	-0.0343	-0.1837
Dietary Habits	-0.1502	-0.0020
Work/Study Hours	0.2492	0.9980
Financial Stress	0.9000	-0.3441

Tabla 1. Cargas de las variables en los dos primeros componentes principales.

En PC1 se observó un mayor peso en estrés financiero, con una carga de 0.9000, siendo la variable más grande en este componente. También presentaron contribuciones positivas presión académica (0.2873) y horas de estudio (0.2492). Por otra parte, variables como satisfacción académica presentaron cargas negativas de menor magnitud. Esto indica que PC1 está principalmente caracterizado por las diferencias que se asocian con el estrés financiero, y también, pero en menor medida por la presión académica y las horas de estudio.

Para observar la distribución de estas observaciones después de aplicar el PCA, se representaron los 27,876 registros en un gráfico formado por PC1 y PC2. Cada punto corresponde a un estudiante y se comparó en relación con la variable Depresión en la Figura 1.

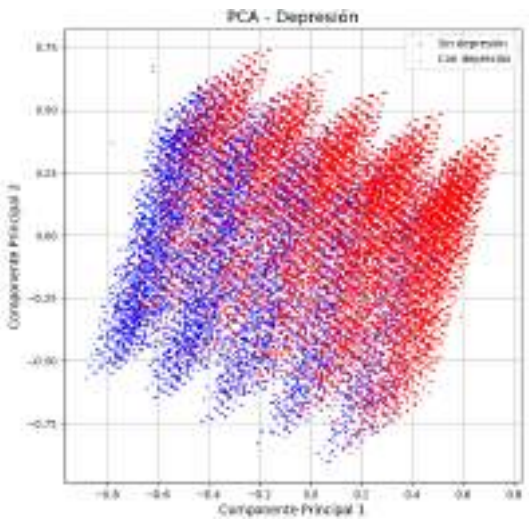


Figura 1. Distribución de estudiantes para PC1 y PC2.

La gráfica muestra los 2 tipos de estudiantes, unos con indicador de depresión y otros sin indicador de depresión. Los estudiantes sin depresión se concentran mayormente hacia valores negativos de PC1, y los estudiantes con indicador hacia valores positivos, indicando las principales variaciones de los datos y visualizar algunas diferencias en la distribución de los grupos.

2-Comparación de variables numéricas con ANOVA

Para determinar si existían diferencias entre los estudiantes con y sin depresión, se realizó el análisis de varianza (ANOVA), en las cuales se utilizaron los grupos definidos por la variable Depresión donde 0 es sin depresión y 1 es con depresión. Se utilizó un nivel de significancia de 0.05.

Variable	F	p-value	Resultado
Age	1506.0242	<0.001	Significativa
Academic Pressure	8114.2758	<0.001	Significativa
Work Pressure	0.3133	0.5757	No significativa
CGPA	13.3330	<0.001	Significativa
Study Satisfaction	811.0396	<0.001	Significativa
Job Satisfaction	0.3383	0.5608	No significativa
Work/Study Hours	1268.0479	<0.001	Significativa
Financial Stress	4238.3737	<0.001	Significativa

Tabla 2. Resultados del análisis ANOVA.

La Tabla 2, muestra las diferencias estadísticamente significativas entre los grupos con y sin depresión para edad, presión académica, CGPA, satisfacción académica, horas de estudio/trabajo y estrés financiero, debido a que presentaron valores de p inferiores a 0.05. Por otro lado, presión y satisfacción laboral no mostraron diferencias significativas entre ambos grupos, con valores de p de 0.576 y 0.561, respectivamente.

Para complementar los resultados, se compararon las medias de las variables numéricas entre los estudiantes con y sin depresión.

Variable	Sin depresión	Con depresión
Age	27.1426	24.8873
Academic Pressure	2.3618	3.6834
Work Pressure	0.0006	0.0003
CGPA	7.6177	7.6830
Study Satisfaction	3.2183	2.7517
Job Satisfaction	0.0009	0.0006
Work/Study Hours	6.2379	7.8079
Financial Stress	2.5196	3.5794

Tabla 3. Medias de las variables numéricas.

La comparación de las medias permitió observar que los estudiantes con depresión presentaron una mayor presión académica, con una media de 3.69 frente a 2.36 en los estudiantes sin depresión. De igual manera, el estrés financiero presentó una media de 3.58 en el grupo con depresión, mientras que en el grupo sin depresión fue de 2.52.

También se observó una mayor cantidad de horas dedicadas al trabajo o estudio entre los estudiantes con depresión, con una media de 7.81 horas, en comparación con 6.24 horas en los estudiantes sin depresión. Por otro lado, satisfacción académica presentó un valor promedio menor en el grupo con depresión, con una media de 2.75 frente a 3.22 en el grupo sin depresión.

3- Comparación de variables categóricas mediante χ^2

Para analizar la relación entre la variable depresión y las variables categóricas se realizaron pruebas de independencia mediante chi-cuadrada (χ^2). Se utilizó nuevamente un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Variable	χ^2	p-value	Resultado
Gender	0.0864	0.7688	No significativa
City	165.8044	<0.001	Significativa
Profession	14.2867	0.3540	No significativa
Sleep Duration	277.1518	<0.001	Significativa
Dietary Habits	1200.7552	<0.001	Significativa
Degree	529.7503	<0.001	Significativa
Have you ever had suicidal thoughts?	8319.6822	<0.001	Significativa
Family History of Mental Illness	79.4889	<0.001	Significativa

Tabla 4. Resultados de las pruebas de χ^2 .

Los resultados mostraron asociaciones entre depresión y ciudad, horas de sueño, hábitos alimenticios, carrera, pensamientos suicidas e historial familiar de enfermedades mentales, debido a que presentaron valores de p inferiores a 0.05. Por otra parte, género y profesión no presentaron asociaciones estadísticamente significativas con depresión, con valores de p de 0.769 y 0.354, respectivamente.

En general, los resultados obtenidos muestran que las variables relacionadas con presión académica, estrés financiero, carga de trabajo o estudio y pensamientos suicidas presentan diferencias o asociaciones importantes con la variable Depresión dentro del conjunto de datos analizado.

Conclusiones

De acuerdo con el análisis realizado, el estudio permitió identificar patrones asociados con la depresión estudiantil, el análisis de componentes principales mostró que los dos primeros componentes concentraron el 41.68 % de la variabilidad total, relacionado al estrés financiero como la variable con mayor peso en el primer componente, seguido de la presión académica y las horas dedicadas al estudio. Las pruebas estadísticas mostraron diferencias significativas entre los estudiantes con y sin indicador de depresión, mostrando que la presión académica y el estrés financiero tuvieron los valores mayores en el grupo con depresión, al igual que las horas dedicadas al estudio o trabajo, mientras que los estudiantes que presentaban satisfacción académica fueron menores en cuanto a depresión.

Por otra parte, el análisis de las variables categóricas mostró asociaciones de la depresión con la ciudad, la duración del sueño, los hábitos alimenticios, la carrera, los pensamientos suicidas y el historial familiar de enfermedades mentales. Estos resultados indican que los factores académicos y económicos adquieren mayor relevancia para diferenciar a los estudiantes con y sin indicador de depresión, aunque también intervienen condiciones relacionadas con los hábitos y el contexto personal, los cuales pueden

servir como base para orientar estudios posteriores hacia la identificación de perfiles de vulnerabilidad y el desarrollo de estrategias de prevención y apoyo, como trabajo futuro se pretender desarrollar un instrumento de entrevista para aplicar a los estudiantes y determinar los factores locales que ayuden a robustecer los patrones encontrados.

Agradecimientos

Agradecemos al programa de Verano de la Ciencia 2026 por la oportunidad de participar. Agradecemos al Doctor Romero González Julio Alejandro por el acompañamiento.

Referencias bibliográficas

- Aguirre Sifuentes, E., Guajardo Espinoza, J. M., Rivera Morales, M. T., & Fernández Heredia, B. de la L. (2024). Descripción de los ansiógenos educativos y elementos inhibidores del desempeño académico de alumnos de secundaria. *CienciAcierta*, 77, 207–220.
- Bedoya Sandoval, J. F., Chamorro Eraso, N. M., Riascos Mora, D. A., & Revelo Chiran, D. M. (2025). Factores asociados a la depresión en estudiantes de profesiones de la salud: Una revisión de literatura entre 2018 y 2024. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(5), 7968–7983. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20130
- Cusme Torres, A. C. (2023). Efectos de la actividad física sobre la depresión en estudiantes universitarios: Revisión sistemática. *GADE: Revista Científica*, 3(2), 35–50.
- Gastelú Soto, S. J., & Hurtado Deudor, L. E. (2022). Salud mental en universitarios: Una revisión de la literatura científica en el tiempo. *Journal of Neuroscience and Public Health*, 2(3), 253–263. <https://doi.org/10.46363/jnph.v2i3.2>
- Hidalgo-Tapia, E. C., Sandoval-Espinoza, G. F., Díaz-Álava, M. E., & Arias-Pardo, L. M. (2025). El impacto de la educación superior en la salud mental de los profesionales de la salud: Una revisión bibliográfica. *Polo del Conocimiento*, 10(6), 1863–1879. <https://doi.org/10.23857/pc.v10i6.9765>
- Jatmiko, N.A. (2024) *Depression student dataset*, Kaggle. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/ikynahidwin/depression-student-dataset/data> (Accessed: 17 May 2026).
- Limone, P., & Toto, G. A. (2022). Factors that predispose undergraduates to mental issues: A cumulative literature review for future research perspectives. *Frontiers in Public Health*, 10, 831349. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.831349>
- Mansilla Soto, J., Muñoz Toledo, V., Pérez Linsam Barth, T., Quelopana Ramírez, C., & Ramírez Vera, M. V. (2021). *Factores asociados al malestar psicológico en estudiantes de enfermería: Una revisión narrativa*.
- Peng, P., Hao, Y., Liu, Y., et al. (2023). The prevalence and risk factors of mental problems in medical students during COVID-19 pandemic: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Affective Disorders*, 321, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2022.10.040>
- Véliz-Castro, T., Alcívar, E., Zavala, A., & Valero-Cedeño, N. (2025). Factores asociados a la salud emocional de estudiantes universitarios durante la pandemia de COVID-19: Una revisión de alcance. *GICOS*, 10(3), 115–127.
- Veloz Alvarado, I. C., Villamar Bueno, J. E., & González López, N. E. (2024). Salud mental en estudiantes universitarios: Revisión bibliográfica de los factores de riesgo y estrategias de intervención. *E-IDEA 4.0 Revista Multidisciplinar*, 6(21), 16–26. <https://doi.org/10.53734/mj.vol6.id343>



VERANO DE LA CIENCIA
★ 2026 ★

Membrana selectiva de iones para sensor de potasio

A. Alpízar Cejudo¹, D. G. García-Gutiérrez², J. Rodríguez-Reséndiz¹, L.G. Arriaga², J. Ledesma-García¹, R.A. Escalona-Villalpando^{1*}.

¹División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro 76010, México

² Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, Mexico

* E-mail: ricardo.escalona@uaq.edu.mx

Resumen

Se propone el desarrollo de un sensor de iones de K^+ presentes en una celda electroquímica mediante el depósito de una membrana de ion selectivo a base del ionóforo I de potasio, sobre papel toray. Se llevó a cabo una metodología que abarca la elaboración de un cóctel donde se deposita la valinomicina, el depósito de la membrana en la superficie del papel toray y se medición del voltaje generado por la diferencia de potencial de la membrana en presencia de iones de potasio. De la medición de diferencia de voltaje se obtendrán variables de límite de detección, rango dinámico de concentración, selectividad y reproducibilidad. El sensor tiene como propósito la medición en tiempo real de las concentraciones del ion K^+ mediante un circuito abierto, el cual no requiere de corriente, más bien se basa en el cambio de potencial en función de la concentración de iones potasio en el medio lo cual además puede establecer una relación de déficit o exceso del ion K^+ .

Abstract

The development of a K^+ ion sensor present in an electrochemical cell is proposed by depositing an ion-selective membrane based on potassium ionophore I onto microneedles. A methodology was carried out that encompasses the preparation of a cocktail in which valinomycin is deposited, the deposition of the membrane on the surface of toray paper, and the measurement of the voltage generated by the potential difference of the membrane in the presence of potassium ions. From the measurement of the voltage difference, variables such as detection limit, dynamic concentration range, selectivity, and reproducibility will be obtained. The sensor is intended for the real-time measurement of K^+ ion concentrations through an open circuit, which does not require current; rather, it is based on the change in potential as a function of the concentration of potassium ions in the medium,

which can also establish a relationship of K^+ ion deficiency or excess.

Palabras clave: Sensor de Potasio 1; Membrana Selectiva de Iones 2; Ionóforo 3; Microagujas 4; Sensor Potenciométrico 5

Keywords: Potassium Sensor; Ion-Selective Membrane; Ionophore; Microneedles; Potentiometric Sensor

Introducción

La ISM (Ion Selective Membrane) se fundamenta en la selectividad de moléculas o partículas con las que interacciona una superficie a la que denominamos membrana. La ISM tiene tres etapas históricas relevantes. En la primera se tiene la evaluación del potencial eléctrico en la superficie de algunas celdas cristalinas a finales de los años 30, en esta etapa se tiene registro de que este término fue usado por primera vez en 1937 por Izaak Kolthoff para describir el potencial eléctrico en la superficie de diversas celdas cristalinas de halogenuros de plata (Kolthoff and Sanders, 1937). La segunda etapa relevante para la ISM ocurre entre los 60s y 80s. Durante esas décadas se implementan membranas líquidas a base de polímeros para medir la actividad iónica de calcio y cloruros (Frant and Ross, 1966). En 1973 se establece el mecanismo de acción para describir la actividad de una ISM (Pungor and Tóth, 1973) y en 1986 se empiezan a buscar aplicaciones biomédicas (Oggenfuss et al., 1986). Para la tercera etapa contemplando las aplicaciones biomédicas durante la primera y segunda década del 2000 se contemplan diferentes aplicaciones enfocadas en la industria biomédica para metabolitos, electrolitos, fluidos corporales y gases (Yan et al., 2016). También se observan aplicaciones en la industria de alimentos, ambiental, química analítica, energía, baterías entre otros (Ejeian et al., 2023). En la actualidad existe una variedad considerable de sistemas de membrana

selectiva, entre los que destacan los basados en ionóforos. Estos consisten en moléculas específicas que sirven como receptores específicos para el transporte celular de iones a través de la membrana (Ejeian et al., 2023). La elaboración de este sensor se sustenta en elementos teóricos como lo son la ISM y la ecuación de Nernst. Aplicando estos conceptos teóricos, tenemos un sistema que consta de dos elementos de los cuales depende la actividad del sensor.

Varios de los trabajos asociados a microagujas para detección de K^+ utilizan como ISM el complejo de valinomicina (Li et al., 2021; Miller et al., 2014; Parrilla et al., 2018). Este complejo surge como un complejo presente en la membrana de la mitocondria y sirve como transportador de iones K^+ , lo cual también se aprovecha desde los años 60 para generar antibióticos usando la valinomicina como complejo de transporte (Pinkerton et al., 1969). Existe un problema al usar un sistema basado en la valinomicina, pues los sensores de microagujas que usan este complejo son exclusivamente para uso ex vivo, esto debido a que hace tiempo se ha reportado que el complejo de valinomicina es citotóxico (Parrilla et al., 2018). En los últimos años se han diseñado diferentes sistemas basados en microagujas para la detección del ion K^+ . Aunque la base o la funcionalización de los ionóforos en el sensor potenciométrico sea distinta, existen algunas similitudes en los sistemas reportados. Los sistemas reportados suelen usar microagujas de acero inoxidable, cobre, PVC (policloruro de vinilo), PMMA (polimetilmetacrilato), entre otros polímeros. A cada microaguja se le coloca una capa que sirve para funcionalizar el ionóforo en la punta, por lo general se utiliza un material a base de carbono como lo son grafeno, nanotubos de carbono o algún polímero. Puede ser una capa simple o doble para mejorar las propiedades de la funcionalización. Una vez que se tiene la punta con una capa de

funcionalización se coloca el ionóforo. Las microagujas reportadas para detectar potasio utilizan la valinomicina reducida en un cóctel donde se tiene integrado el complejo. De modo que para desarrollar un sensor potenciométrico que pueda usarse en pruebas in vivo se elabora un cóctel que permite al complejo de valinomicina mantener sus propiedades selectivas y generar un sistema de detección bioseguro. El sistema más detallado (Parrilla et al., 2018) consiste en la construcción de un sensor de potasio usando una microaguja como electrodo de trabajo y otra como electrodo de reconocimiento. Cada una de las agujas está hecha de acero inoxidable y tienen tres capas. El electrodo de trabajo tiene un recubrimiento de carbono, otro de nanotubos de carbono de pared múltiple y por último, se adhiere un cóctel el cual usa una cantidad pequeña del ionóforo de potasio I.

Objetivos

Objetivo General: Desarrollar un sensor de potasio utilizando una membrana de ion selectivo depositado sobre papel toray de acero inoxidable para la cuantificación de potasio.

Objetivos específicos:

1. Inmovilización de la ISM de potasio sobre las papel toray de acero inoxidable y establecer su estabilidad por técnicas electroquímicas.
2. Determinar la actividad de la respuesta de la ISM para potasio sobre papel toray de acero inoxidable por técnicas electroquímicas.

Metodología

Elaboración del electrodo selectivo de potasio.

Se diluye el poliuretano en una concentración de 41.25 mM en THF, se sonifican en un vortex durante una hora aproximadamente.

Se mezclan 0.048 de porcentaje en volumen de nanotubos de carbono en metanol y se dejan sonificando durante 30 minutos. Tras sonicar el THF con el poliuretano, se añaden el 17.5 μ L de solución de tetrakis (0.61%v/v), el ionóforo de potasio(5.79%v/v) y el subsebato(93.6%v/v) y 0.1ml de THF. Se sonifica en el vortex hasta quedar totalmente disperso.

Se depositan nanotubos de carbono de pared múltiple en papel toray, se deja secar y se coloca una segunda capa cubriendo el área de medición. Después se adhiere mediante dip coat la membrana recubriendo la superficie recubierta con nanotubos. Una vez que se añade la membrana se deja secar. Para probar la efectividad del electrodo se utiliza una solución buffer para generar un medio acuoso con un pH estable y una solución madre de 0.5 mM de KCl de la cual se hacen pequeñas adiciones al buffer para probar la respuesta de circuito abierto a diferentes concentraciones de potasio en un pH fisiológico específico.

Resultados

Se evaluaron las membranas depositadas en papel toray utilizando la técnica electroquímica de potencial a en un circuito abierto (OCP-open circuit potential siglas en inglés), donde el electrodo de trabajo fué la papel toray y el electrodo de referencia fue uno comercial de calomelano. Se conectaron a un potencióstato Epsilon mediante la técnica OCP (Open Circuit Potential). Para que funcione la detección de potasio es necesario evaluar la estabilidad en el medio y que solo exista un cambio cuando la concentración de potasio cambie en el medio acuoso.

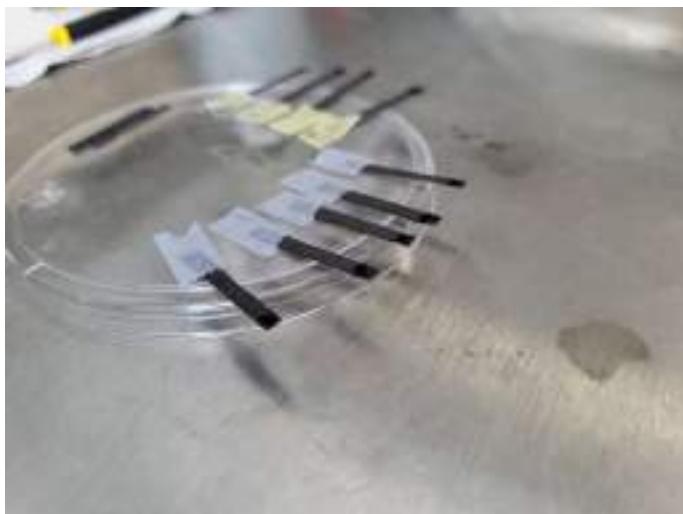


Fig. 1 Electrodo de papel toray con la membrana selectiva de potasio depositada en la punta

En la Figura 1 se puede observar el depósito en papel toray. La Figura 2 muestra el modelo experimental de 4 capas del cóctel ISM selectivo para K^+ .

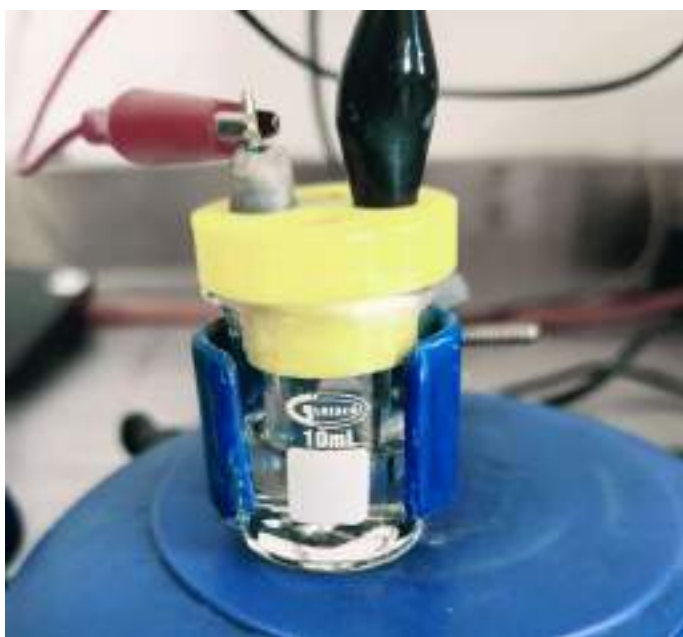


Fig. 2 Modelo experimental. El caiman rojo conecta el electrodo de calomero (referencia) con el potenciostato, el negro conecta con el electrodo de trabajo con la membrana depositada

En la Figura 3 se puede apreciar un cambio de potencial conforme cambia la concentración del medio, a su vez se observa que se mantiene estable a

lo largo del tiempo. Un rango estable en sangre es de 3.6 a 5.52 mM y de 2 a 8mM en sudor (Baker et al., 2020), por lo que se maneja un rango de concentración 0 y que excede hasta 16 mM con el fin de obtener una respuesta dentro y fuera del rango estable de K^+ . Se puede observar como de 0 a 2 mM existe un salto mayor de voltaje y se va replicando esa respuesta dentro del rango experimental, tanto en estático como en agitación, un comportamiento típico para este tipo de sistema.

Ahora bien, al observar una respuesta positiva en la Figura 3, se puede inferir que es un proceso reproducible, sin embargo hace falta corroborar mediante más replicaciones experimentales algunos datos relevantes como lo son la respuesta promedio de voltaje, la desviación estándar, su respuesta y sensibilidad para de ese modo poder estandarizar el método y su aplicación. Además, se observa que mediante adiciones a lo largo del tiempo en pequeños lapsos se genera un cambio escalonado pero que mantiene su estabilidad.

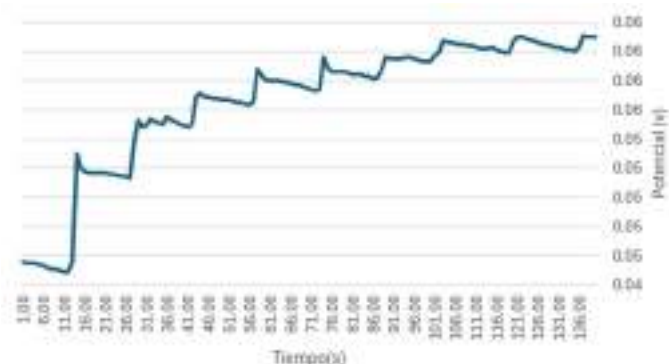


Fig. 3 La respuesta de voltaje de la membrana depositada en papel toray, evaluada en un potenciostato epsilon en agitación mediante técnica de potencial contra tiempo en circuito abierto.

En la figura 4 se puede observar una función lineal con un valor de pendiente de 19.9 mV/década. Otros artículos donde se desarrollan otros sistemas para medir el ión potasio mediante papel toray reportan pendientes con valores mayores que van desde 50 hasta 60 mV/década. En estos artículos el sustrato

principal consiste en nanotubos de carbono, cobre, PMMA, PVC, entre otros.

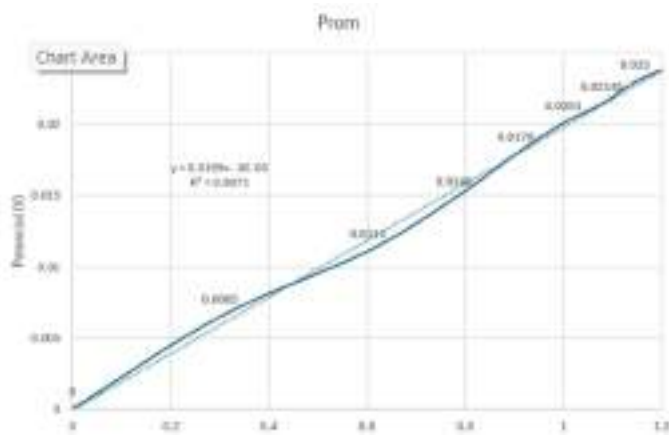


Fig. 4 Logaritmo de la concentración de iones K^+ contra el potencial de la papel toray analizada en la Figura 1

Discusión y Conclusiones

Las papel toray son capaces de detectar los cambios de concentración del ión K^+ en una solución PBS (Phosphate Buffered Saline) de pH biológico de 7,4. Mantienen su estabilidad y son funcionales dentro de los rangos propuestos, los cuales contemplan concentraciones estables en el cuerpo humano tanto en sangre como en sudor, fluidos que son principalmente utilizados para la contabilización de potasio en el cuerpo. El estudio aporta datos relevantes para la medición del potasio en el cuerpo humano, sin embargo, requiere ser replicado para de ese modo determinar si el método genera una buena respuesta en cuanto a reproducibilidad y sensibilidad. Aún falta determinar si existe una interferencia significativa estando presentes otros metabolitos como lo son el sodio, el calcio o la glucosa, además de contemplar condiciones reales como lo es con muestras de sangre o sudor.

Agradecimientos

Al Laboratorio Nacional de Micro y Nano Fluídica y al Dr Ricardo Antonio Escalona Villalpando que proporcionaron las instalaciones, el conocimiento y el

apoyo necesario para hacer este proyecto posible. Además, de la oportunidad de generar una visión que servirá para el futuro desempeño como investigador, gracias.

Referencias Bibliográficas

- Baker, L. B., & Wolfe, A. S. (2020). Physiological mechanisms determining eccrine sweat composition. *European journal of applied physiology*, 120(4), 719-752.
- Ejeian, F., Sadeghi, S., Zargar, M., Arshadi, F., Noorisafa, F., & Razmjou, A. (2023). Ion selective membranes.
- Frant, M.S., Ross Jr, J.W., 1966. Electrode for sensing fluoride ion activity in solution. *Science* 154 (3756), 1553–1555.
- Kolthoff, I.M., Sanders, H.L., 1937. Electric potentials at crystal surfaces, and at silver halide surfaces in particular. *Journal of the American Chemical Society* 59 (2), 416–420.
- Li, H., Wu, G., Weng, Z., Sun, H., Nistala, R., & Zhang, Y. (2021). Microneedle-based potentiometric sensing system for continuous monitoring of multiple electrolytes in skin interstitial fluids. *ACS sensors*, 6(6), 2181-2190.
- Miller, P. R., Xiao, X., Brener, I., Burckel, D. B., Narayan, R., & Polsky, R. (2014). Microneedle-based transdermal sensor for on-chip potentiometric determination of K^+ . *Advanced healthcare materials*, 3(6), 876-881.
- Oggenfuss, P., Morf, W.E., Oesch, U., et al., 1986. Neutral-carrierbased ion-selective electrodes. *Analytica Chimica Acta* 180, 299–311.
- Parrilla, M., Cuartero, M., Padrell Sánchez, S., Rajabi, M., Roxhed, N., Niklaus, F., & Crespo, G. A. (2018). Wearable all-solid-state potentiometric microneedle patch for intradermal potassium detection. *Analytical chemistry*, 91(2), 1578-1586.
- Pinkerton, M., Steinrauf, L. K., & Dawkins, P. (1969). The molecular structure and some transport properties of valinomycin. *Biochemical and biophysical research communications*, 35(4), 512-518.
- Sempionatto, J. R., Martin, A., García-Carmona, L., Barfidokht, A., Kurniawan, J. F., Moreto, J. R., ... & Wang, J. (2019). Skin-worn soft microfluidic potentiometric detection system. *Electroanalysis*, 31(2), 239-245.

Ventrelli, L., Marsilio Strambini, L., & Barillaro, G. (2015). Microneedles for transdermal biosensing: current picture and future direction. *Advanced healthcare materials*, 4(17), 2606-2640.

Yan, R., Qiu, S., Tong, L., Qian, Y., 2016. Review of progresses on clinical applications of ion selective electrodes for electrolytic ion tests: From conventional ISEs to graphene-based ISEs. *Chemical Speciation & Bioavailability* 28 (1–4), 72–77.

Identificación de hemoparásitos en sangre de murciélago mediante PCR.

Minerva Velazquez Quintanar¹, Guillermo de Jesús Valero Rosillo², Edwin Esaú Hernández Arvizu³, Juan Joel Mosqueda Gualito³.

¹ Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Querétaro. ² Escuela de Bachilleres Plantel Sur, Universidad Autónoma de Querétaro. ³ Laboratorio de Investigación en Inmunología y Vacunas (LINVAS), Universidad Autónoma de Querétaro.

Contacto: mvelazquez77o@alumnos.uaq.mx,
gvalero03@alumnos.uaq.mx, esau.hernandez@uaq.mx,
joel.mosqueda@uaq.mx

Resumen

Las herramientas de diagnóstico molecular basadas en la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) se han consolidado como una metodología fundamental en el estudio epidemiológico de patógenos en fauna silvestre. En comparación con las técnicas parasitológicas tradicionales como el frotis sanguíneo, cuya sensibilidad se ve limitada por parasitemias bajas o volúmenes reducidos de muestra, los ensayos moleculares como la PCR anidada ofrecen niveles superiores de sensibilidad y especificidad diagnóstica. La PCR anidada, en particular, incrementa la precisión analítica mediante un proceso de amplificación en dos etapas consecutivas: una reacción externa que delimita una región amplia del ADN diana, seguida de una reacción interna que amplifica un fragmento más específico. Si bien esta elevada sensibilidad analítica incrementa la susceptibilidad a artefactos por contaminación cruzada, la estandarización de controles estrictos de bioseguridad permite garantizar la validez diagnóstica de los resultados.

Palabras clave: Hemoparásitos, piroplásmidos, PCR anidada, diagnóstico molecular.

Abstract

Molecular diagnostic tools based on the polymerase chain reaction (PCR) have established themselves as a fundamental methodology in the epidemiological study of wildlife pathogens. Compared to traditional parasitological techniques such as blood smear microscopy—whose sensitivity is limited by low parasitemia or small sample volumes—molecular assays such as nested PCR offer superior levels of diagnostic sensitivity and specificity. Nested PCR, in particular, enhances analytical precision through a two-step consecutive amplification process: an external reaction that targets a broad region of the target DNA, followed by an internal reaction that amplifies a more specific fragment. Although this high analytical sensitivity increases susceptibility to cross-contamination artifacts, the standardization of strict biosafety controls ensures the diagnostic validity of the results.

Key words: Hemoparasites, piroplasms, nested PCR, molecular diagnosis.

1. Introducción

Dentro de la clase Mammalia, los murciélagos representan el segundo grupo más diverso y cumplen un rol ecológico clave; sin embargo, sus hábitos coloniales y gregarios favorecen el parasitismo por diversos agentes ya que, por sus particularidades ecológicas, conductuales y de hábitat propician la transmisión de patógenos, tanto entre individuos de la misma especie como entre especies distintas (Szentiványi *et al.*, 2019). Investigaciones recientes demuestran que, aunque generalmente se les relaciona con la transmisión de agentes virales, también albergan patógenos no virales con los que mantienen estrechas relaciones coevolutivas, como algunos

parásitos entre los cuales están los protozoos como *Trypanosoma cruzi* y *Babesia* spp., además de bacterias eritrocíticas como *Bartonella* spp. (Brook & Dobson, 2015). Por ello, su monitoreo es crucial para la vigilancia epidemiológica en salud animal y pública, ya que existe la posibilidad de presentación de zoonosis dentro de las zonas donde estos organismos coexisten con el ser humano.

A pesar de su importancia, el diagnóstico tradicional mediante frotis sanguíneo carece de sensibilidad ante parasitemias bajas y, en estas especies, los microvolúmenes de muestra que se llegan a obtener dificultan su realización (Corduneanu *et al.*, 2023). Para superar esto, la PCR anidada es la alternativa más precisa, pues al emplear dos juegos consecutivos de iniciadores permite amplificar ADN aun con cargas parasitarias mínimas (Corduneanu *et al.*, 2023). No obstante, esta técnica requiere una estandarización rigurosa, siendo indispensable optimizar la extracción de ADN para eliminar inhibidores sanguíneos y garantizar la calidad del templado a partir de volúmenes menores, además de que las medidas de bioseguridad son realmente importantes para garantizar exámenes correctos (Kumar *et al.*, 2024).

2. Objetivos

Objetivo general

Identificar la presencia de hemoparásitos transmitidos por vectores en murciélagos de la Sierra Gorda de Querétaro, utilizando métodos moleculares.

Objetivos específicos

- Extraer y evaluar la calidad del ADN genómico obtenido de muestras de sangre de murciélagos de Concá, Arroyo Seco, Querétaro.
- Estandarizar las condiciones de reacción de la PCR anidada utilizando iniciadores

específicos para un fragmento del gen 18S ARNr de piroplásmidos.

3. Metodología

El trabajo experimental se llevó a cabo en los laboratorios de docencia y en el Laboratorio de Investigación en Inmunología y Vacunas (LINVAS) de la Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro (campus Juriquilla).

3.1 Preparación de soluciones y reactivos de trabajo

Para la ejecución de los protocolos de extracción y electroforesis, se preparó un litro de solución salina tamponada con fosfato (PBS, pH 7.4) disolviendo en agua destilada: NaCl (8.0 g), KCl (0.2 g), Na₂HPO₄ (1.44 g) y KH₂PO₄ (0.24 g). La solución se homogeneizó mediante agitación constante, ajustando el pH a 7.4 con ácido acético utilizando un potenciómetro, para posteriormente esterilizarse en autoclave y conservarse en alícuotas bajo refrigeración. De igual manera, se preparó búfer TAE a concentración de trabajo 1X mediante la dilución en agua destilada de una solución stock concentrada 50X.

3.2 Extracción y cuantificación de ADN genómico

La extracción de ADN genómico a partir de las muestras de sangre de murciélago se realizó con el kit comercial *DNeasy® Blood & Tissue* (Qiagen, Hilden, Alemania), siguiendo el protocolo estandarizado para sangre total. En tubos cónicos de 1.5 mL se colocaron 20 µL de Proteinasa K junto con un volumen de 50 a 100 µL de muestra sanguínea (ajustando a 200 µL con PBS). Se adicionaron 200 µL de búfer AL, homogeneizando en vórtex por 5 a 10 s e incubando a 56 °C durante 10 min para favorecer la lisis celular. A continuación, se añadieron 200 µL de etanol absoluto (96–100% grado biología molecular) y la mezcla se transfirió a una columna de sílica *DNeasy Mini Spin*. Se realizaron centrifugaciones a 10,000 rpm descartando el efluente, seguidas de lavados

sucesivos con 500 μ L de búfer AW1 (8,000 rpm por 1 min) y 500 μ L de búfer AW2 (14,000 rpm por 3 min). Se aplicó una centrifugación adicional por 1 min para asegurar la eliminación total de trazas de etanol de la membrana. La elución del ADN purificado se llevó a cabo aplicando entre 18 y 75 μ L (dependiendo de la muestra) de búfer AE directamente en la columna, incubando a temperatura ambiente por 1 min y centrifugando a 10,000 rpm; este paso se repitió en dos ocasiones para maximizar el rendimiento. Finalmente, las extracciones se cuantificaron y evaluaron en pureza utilizando un espectrofotómetro NanoDrop, además de que se evaluó la integridad del ADN extraído mediante un gel de agarosa al 1%.

3.3 Estandarización de la PCR anidada y electroforesis

Todo el ensamblaje de las reacciones de PCR se llevó a cabo dentro de una cabina de PCR desinfectada con etanol al 70% e irradiada con luz ultravioleta (UV) durante 15 min antes y después de su uso. Tomando como base el protocolo descrito por Jefferies et al. (2006), se ajustaron las siguientes condiciones térmicas y de reacción:

3.3.1 Reacción externa

Se prepararon dos reacciones positivas y una negativa con un volumen final de 25 μ L utilizando Máster Mix (MedChemExpress, Monmouth Junction, NJ, EE. UU.), agua grado biología molecular y ADN molde del control positivo *Babesia bigemina* (muestra Bb2), véase las cantidades en el **Cuadro 1**. Se evaluaron dos concentraciones de iniciadores (0.4 y 0.2 μ M). La amplificación en termociclador constó de una desnaturalización inicial a 94 °C por 5 min; 40 ciclos de desnaturalización a 94 °C (30 s), alineamiento a 58 °C (30 s) y extensión a 72 °C (30 s); concluyendo con un periodo de extensión final a 72 °C por 7 min.

Cuadro 1: Cantidad de reactivos empleados para las tres reacciones externas iniciales de la PCR.

Reactivo	0.4*	0.2*	(-)
Máster Mix	12.5 μ L		
Primer Forward	2 μ L	1 μ L	1 μ L
Primer Reverse	2 μ L	1 μ L	1 μ L
ADN molde**	4.25 μ L	4.25 μ L	-
H ₂ O grado biología molecular	4.25 μ L	6.25 μ L	10.5 μ L

*Concentración de los cebadores en cada reacción, valores presentados en μ M, ** La muestra de ADN que se empleó, dentro de las extracciones, se nombró como Bb2 y se usó para estandarizar el protocolo.

3.3.2 Reacción interna

Se mantuvo el volumen final de 25 μ L ajustando la adición de cebadores a 1 μ L (concentración final de 0.2 μ M) y utilizando 1 μ L del amplicón o ADN molde. El perfil térmico se modificó incrementando la temperatura de alineamiento a 62 °C a lo largo de 35 ciclos.

3.4 Visualización por electroforesis en gel de agarosa

La verificación de los amplicones se realizó mediante geles de agarosa (GoldBio, #Catálogo A201-100G, St. Louis, Missouri, Estados Unidos) al 1% disueltos en búfer TAE 1X mediante calentamiento hasta lograr una solución traslúcida y vertidos en casetes para su polimerización. Se mezclaron 5 μ L de producto de PCR con 1 μ L de búfer de carga con agente intercalante GelRed. Las muestras se cargaron junto a un marcador de talla molecular de 1 Kb (New England Biolabs, Ipswich, Massachusetts, Estados Unidos) y la electroforesis se corrió durante aproximadamente 30 min. Finalmente, la presencia de las bandas esperadas se documentó en el equipo fotodocumentador ChemiDoc.

4. Resultados

4.1 Extracción de ADN

La extracción de ADN a partir de las muestras de sangre utilizando un kit comercial, permitió recuperar concentraciones que oscilaron entre 2.9 y 86.5 ng/μL, las cuales se desglosan en el **Cuadro 2**.

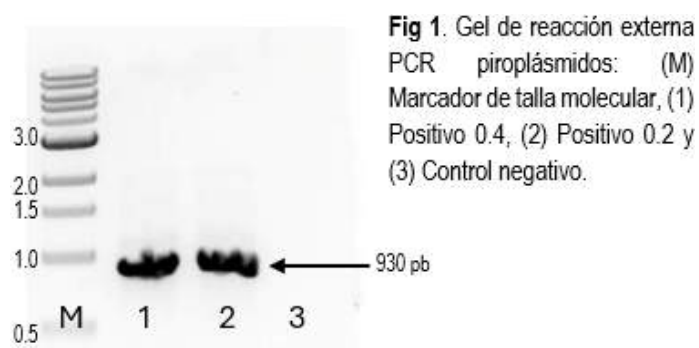
Cuadro 2. Resultados obtenidos posteriores a la evaluación de las extracciones en el equipo NanoDrop.

Número	Concentración	Relación	
		260/280	230/280
0723	35ng/μl	2.95	-1.75
0634	45.5 ng/μl	2.13	6.46
0632	8.7 ng/μl	1.45	2.75
0637	10.6 ng/μl	2.47	2.01
Dr.011	6.5 ng/μl	2.42	2.32
0902	12.9 ng/μl	2.09	1.88
0443	86.5 ng/μl	2.08	1.89
0415	13.4 ng/μl	2.29	3.02
Dr.020	22.9 ng/μl	2.26	1.74
0635	53.6 ng/μl	1.95	2.15
7	9.6 ng/μl	2.48	0.55
8	8.9 ng/μl	1.97	0.39
9	10.2 ng/μl	2.84	0.27
10	6.5 ng/μl	3.11	0.09
3	11.2ng/μl	1.97	0.47
4	7.0 ng/μl	2.24	1.16
5	2.9 ng/μl	3.90	0.33
6	36.5 ng/μl	1.64	0.64
Bb1	5.5 ng/μl	2.57	4.56

Bb2	12.7 ng/μl	2.19	0.76
-----	------------	------	------

4.2 PCR Externa (*Babesia* spp.)

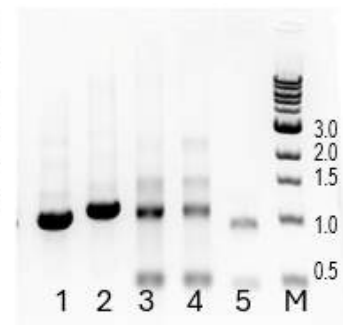
La optimización de la PCR externa para el gen 18S ARNr en la muestra control produjo una banda única del tamaño molecular esperado (930 pb) en el gel de agarosa al 1% en ambas reacciones positivas, mientras que el control negativo no mostró amplificación (**Figura 1**).



4.3 PCR Interna y Ensayos de Control

La PCR interna mostró el amplicón esperado en los controles positivos, pero registró amplificación no deseada recurrente en el control negativo (**Figura 2**).

Fig 2. Gel de reacción interna: (1 y 2) Positivos de la reacción externa, (3 y 4) Positivos de la reacción interna, (5) Control negativo interno con evidente contaminación y (M) Marcador de talla molecular.



Ante la detección de amplificación en los controles negativos, se llevaron a cabo ensayos sistemáticos de control que incluyeron descontaminación de instrumental, uso de puntas y material nuevo esterilizado, evaluación de migración en gel, sustitución por componentes nuevos y la evaluación de controles negativos externos e internos (**Figura 3**).

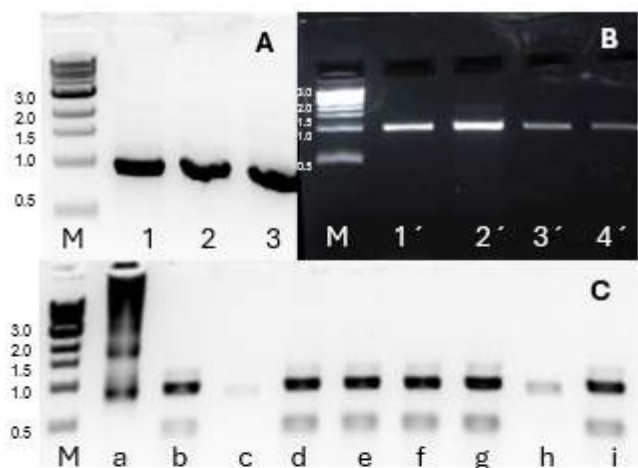


Fig 3. Electroforesis representativas de los ensayos de control de contaminación para la PCR interna. Marcador de talla molecular (M). **A**, Gel de reacción externa donde se elaboraron dos controles negativos (1 y 2) y uno positivo (3), donde se aprecian bandas de amplificación signo de contaminación. **B**, Gel de reacción externa donde se emplearon 2 pipetas diferentes para hacer 4 controles negativos (1' y 2' con la pipeta de la cabina, 3' y 4' con otra pipeta). **C**, Gel de reacción interna con un control positivo y 9 negativos, donde **a** es el positivo, **b** contiene todos los reactivos que estábamos empleando en el momento posiblemente contaminados, **c** tenía agua grado biología molecular nueva (es importante mencionar que en esta reacción y las que le siguen, los demás reactivos son los que se estaban empleando), **d** tenía Máster Mix nuevo, **e** tenía iniciador forward virgen, **f** tenía iniciador reverse nuevo, **g** y **h** tenían todos los reactivos nuevos y **i** tenía todos los reactivos usados antes excepto el Máster Mix. Se hicieron de esta manera debido a errores humanos en el transcurso de la elaboración de las reacciones.

5. Discusión

Las fluctuaciones observadas en la pureza del ADN (evaluada mediante las relaciones de absorbancia 260/280 y 230/280 en el espectrofotómetro NanoDrop) representan un hallazgo frecuente durante el procesamiento de volúmenes sanguíneos reducidos. Está documentada como un efecto de la cercanía al límite inferior de detección del equipo (concentraciones $< 10 \text{ ng}/\mu\text{l}$), donde trazas de sales caotrópicas de lisis alteran significativamente los índices de absorbancia (Desjardins & Conklin, 2010). A pesar de estas variaciones en los perfiles de pureza espectrofotométrica, la calidad del ADN extraído en la muestra evaluada resultó adecuada para la

amplificación, sirviendo como prueba de concepto de que la reacción puede tolerar ligeras desviaciones en los índices de absorbancia sin comprometer la actividad de la polimerasa (Schrader *et al.*, 2012). No obstante, al haberse realizado este ensayo de optimización con una muestra de referencia, la presencia heterogénea de inhibidores o concentraciones variables de ADN en el resto de las muestras del estudio representa una limitación que requerirá evaluación individualizada en ensayos posteriores (Wilson, 1997).

Durante la optimización de la PCR externa, se confirmó la especificidad del ensayo al amplificar la diana molecular en el control positivo. Al no contar con secuenciación nucleotídica, la especificidad y correcta amplificación se verificaron mediante la migración electroforética, confirmando que el peso molecular de la banda obtenida coincidió con el tamaño en pares de bases (pb) esperado para el gen 18S ARNr según lo estandarizado por Jefferies *et al.* (2006) y en comparación directa con el marcador de peso molecular de 1 Kb.

No obstante, la fase de amplificación interna evidenció de forma persistente la aparición de bandas no deseadas en los controles negativos. La PCR anidada es ampliamente reconocida por su elevada sensibilidad analítica, pero esta misma cualidad la vuelve extremadamente susceptible a la contaminación cruzada por arrastre de amplicones generados en la primera reacción (Association of Public Health Laboratories [APHL], 2024). Tal como lo describen la APHL (2024) y Starolis (2024), la generación de aerosoles durante la apertura de tubos post-PCR primaria representa una de las fuentes de contaminación más comunes e invisibles en el flujo de trabajo molecular.

Ante dicha divergencia, se articuló un protocolo sistemático de diagnóstico y resolución de fallas estructurado para discriminar analíticamente

cualquier sesgo instrumental, operacional o de reactivos:

Se ejecutaron procedimientos de saneamiento profundo mediante la aplicación de hipoclorito de sodio al 10%, agua destilada y etanol al 70% sobre la cabina, el material y el instrumental de pipeteo de volumen variable, complementados con ciclos prolongados de fotólisis por radiación ultravioleta. Paralelamente, se restringió el trabajo al uso exclusivo de insumos estériles de un solo uso certificados como libres de nucleasas, incluyendo la renovación total de tubos de PCR y puntas de micropipeta (Prince & Andrus, 1992).

Se verificó la integridad del perfil electroforético para descartar que las señales en los controles negativos respondieran a un artefacto de siembra, desbordamiento de pozos o migración anómala en la matriz de agarosa, se corrieron reacciones de verificación integrando de forma simultánea los controles negativos correspondientes a la PCR externa e interna, con el propósito de aislar la etapa procedimental exacta de introducción del agente contaminante y se diseñaron ensayos comparativos pareados evaluando el desempeño de los insumos en uso (*alícuotas previas*) en contraste con lotes virgen sin exposición previa. Esta estrategia incluyó la sustitución modular de reactivos individuales dentro de la mezcla maestra, así como la confrontación directa de reacciones constituidas en su totalidad con insumos de nuevo ingreso frente a formulaciones previas. Se corrieron reacciones de verificación integrando de forma simultánea los controles negativos correspondientes a la PCR externa e interna, con el propósito de aislar la etapa procedimental exacta de introducción del agente contaminante (Mifflin, 2007).

A pesar de la implementación sistemática de este diseño experimental de control, la amplificación inespecífica en la reacción interna se mantuvo

constante, imposibilitando la identificación puntual de la fuente del artefacto debido a las restricciones del tiempo experimental. Este riguroso proceso de evaluación demuestra que la extrema sensibilidad de la PCR anidada demanda, más allá del estricto control de insumos y barreras químicas de descontaminación, la segregación física e infranqueable de las áreas de trabajo pre-PCR y post-PCR (APHL, 2024).

6. Conclusión

Se confirmó que la extracción mediante columnas de matriz de sílica permite purificar ADN a partir de volúmenes reducidos de muestra sanguínea de murciélagos, además de que se obtuvieron muestras que su integridad y calidad fueron idóneas dentro de los estándares dentro de los protocolos de extracción, lo cual fue evaluado tanto por espectrofotometría como por electroforesis. Respecto a la integridad del ADN, la obtención del amplicón esperado en la muestra de referencia confirmó la presencia de cadenas de alta masa molecular aptas para la amplificación enzimática; sin embargo, debido a la variabilidad intrínseca del muestreo de campo, la integridad estructural del ADN en el resto de las muestras recolectadas representa un parámetro que deberá evaluarse individualmente. Asimismo, se logró estandarizar las condiciones de reacción para la PCR externa dirigida a pioplásmidos, determinando que una concentración de cebadores de 0.2 μM es suficiente para la amplificación específica del gen *18S ARNr*. Finalmente, la presencia de amplificación inespecífica en la fase interna evidenció que la elevada sensibilidad analítica de la PCR anidada exige la implementación estricta de barreras químicas, físicas y de segregación espacial pre y post-PCR para prevenir la contaminación cruzada y asegurar la fiabilidad del diagnóstico molecular.

Agradecimientos

Al Dr. Edwin Esaú Hernández Arvizu, docente investigador a cargo, y al Dr. Juan Joel Mosqueda Gualito, encargado del Laboratorio de Investigación en Inmunología y Vacunas (LINVAS), por su valiosa

dirección, asesoría científica y por brindar las facilidades, instalaciones y equipamiento necesarios para el desarrollo de esta investigación. De igual manera, se expresa un sincero agradecimiento a la Facultad de Ciencias Naturales y al programa del Verano de la Ciencia UAQ por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto de formación académica e investigación.

Referencias bibliográficas

1. APHL. (2024). Molecular Workflow and Laboratory Design. *Association of Public Health Laboratories (APHL)*. <https://aphl.org/focus-areas/newborn-screening/screening/molecular-resources/molecular-workflow>
2. Brook, C. E., & Dobson, A. P. (2015). Bats as 'special' reservoirs for emerging zoonotic pathogens. *Trends in microbiology*, 23(3), 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2014.12.004>
3. Corduneanu, A., Zając, Z., Kulisz, J., Wozniak, A., Foucault-Simonin, A., Moutailler, S., Wu-Chuang, A., Peter, Á., Sándor, A. D., & Cabezas-Cruz, A. (2023). Detection of bacterial and protozoan pathogens in individual bats and their ectoparasites using high-throughput microfluidic real-time PCR. *Microbiology Spectrum*, 11(5), e0153123. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01531-23>
4. Desjardins, P. R., & Conklin, D. S. (2011). Microvolume quantitation of nucleic acids. *Current protocols in molecular biology*, Appendix 3, 3J. <https://doi.org/10.1002/0471142727.mba03js93>
5. Jefferies, R., Ryan, U. M., & Irwin, P. J. (2007). PCR-RFLP for the detection and differentiation of the canine piroplasm species and its use with filter paper-based technologies. *Veterinary parasitology*, 144(1-2), 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2006.09.022>
6. Kumar, B., Brahmabhatt, N. N., Thakre, B., Maharana, B. R., Parmar, V. L., & Kumar, M. (2024). Molecular identification of haemoparasites in animals using blood lysate PCR: a quick and inexpensive alternative to purified whole genomic DNA. *Animal biotechnology*, 35(1), 2390935. <https://doi.org/10.1080/10495398.2024.2390935>
7. Mifflin T. E. (2007). Setting up a PCR laboratory. *CSH protocols*, 2007, pdb.top14. <https://doi.org/10.1101/pdb.top14>
8. Prince, A. M., & Andrus, L. (1992). PCR: how to kill unwanted DNA. *BioTechniques*, 12(3), 358–360.
9. Starolis, M. W. (2024). The contamination monitoring toolbox: Best practices for molecular microbiology testing. *Clinical Microbiology Newsletter*, 47, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.clinmicnews.2024.07.001>
10. Wilson I. G. (1997). Inhibition and facilitation of nucleic acid amplification. *Applied and environmental microbiology*, 63(10), 3741–3751. <https://doi.org/10.1128/aem.63.10.3741-3751.1997>

Generación automática de animaciones 3D para la Lengua de Señas Mexicana

Diana Camila Tamariz López, Diana Margarita Córdova Esparza
Facultad de Informática, Campus Juriquilla, Av. De las Ciencias S/N, Querétaro, Qro.
Correo: dtamariz09@alumnos.uaq.mx, diana.cordova@uaq.mx

Resumen

Este trabajo de investigación explora el uso de herramientas basadas en inteligencia artificial para generar automáticamente animaciones 3D aplicadas a la representación de la Lengua de Señas Mexicana (LSM). Para ello, se utilizaron videos de señas como referencia y se procesaron mediante las plataformas como DeepMotion y QuickMagic. Ambas herramientas permitieron transformar los movimientos presentes en los videos en secuencias tridimensionales aplicadas a avatares digitales. A partir de una comparación visual de los resultados, QuickMagic mostró un mejor desempeño en la continuidad y representación general de los movimientos analizados. Estos resultados muestran el potencial de las técnicas actuales de captura de movimiento basadas en video para facilitar la creación de contenidos digitales en LSM.

Palabras clave: Lengua de Señas Mexicana, cámara RGB, avatares 3D

Summary

This research explores the use of artificial intelligence-based tools to automatically generate 3D animations for the representation of Mexican Sign Language (LSM). To this end, sign language videos were used as references and processed

using platforms such as DeepMotion and QuickMagic. Both tools enabled the movements captured in the videos to be transformed into three-dimensional sequences applied to digital avatars. Based on a visual comparison of the results, QuickMagic showed better performance in terms of movement continuity and the overall representation of the analyzed motions. These findings demonstrate the potential of current video-based motion capture techniques to facilitate the creation of digital content in LSM.

Keywords: Mexican Sign Language, RGB camera, 3D avatars

Introducción

La Lengua de Señas Mexicana (LSM) constituye un medio de comunicación fundamental para la comunidad sorda en México. Sin embargo, existen diversas barreras para acceder a contenidos digitales y educativos en esta lengua. En este contexto, el desarrollo de tecnologías digitales puede contribuir a generar nuevas alternativas que favorezcan la accesibilidad. Una de estas posibilidades es el uso de avatares tridimensionales capaces de representar señas mediante animaciones. Este tipo de recursos se ha estudiado como una alternativa para presentar información en diferentes lenguas de señas y facilitar el acceso a contenidos digitales (Naert et al., 2020; Ebling & Glauert, 2016).

Tradicionalmente, producir una animación 3D requiere conocimientos especializados en modelado, rigging y animación (Song et al., 2025; Wu et al., 2025). Actualmente, los avances en inteligencia artificial y visión por computadora permiten capturar los movimientos de una persona directamente desde un video convencional y transferirlos de forma automática a un personaje tridimensional.

En este trabajo se exploró el uso de herramientas de captura de movimiento basada en video para generar animaciones 3D orientadas a la representación de la Lengua de Señas Mexicana. Particularmente, se utilizaron DeepMotion y QuickMagic (Xi & Chung, 2024; QuickMagic, n.d.), con el propósito de analizar su capacidad para recuperar los movimientos presentes en videos de LSM y transferirlos a un avatar tridimensional. Los videos utilizados para la generación de los avatares

3D fueron retomados del conjunto presentado por Rivera-Cervantes et al. (2025), en el que se emplearon grabaciones de señas realizadas por un intérprete de LSM.

Este estudio se estructura en las siguientes secciones: en la segunda sección se describe la metodología empleada para la generación automática de animaciones 3D a partir de videos de señas, incluyendo la selección de las secuencias, su procesamiento mediante las plataformas DeepMotion y QuickMagic y la generación de animaciones aplicadas a avatares digitales. En la tercera sección se presentan y comparan los resultados obtenidos con ambas herramientas, considerando principalmente la continuidad y la representación general de los movimientos. Finalmente, en la cuarta sección se desarrolla la discusión de los resultados, así como las conclusiones y las principales líneas de trabajo futuro.

Metodología

En la Fig. 1 se muestra el procedimiento para la generación automática de animaciones 3D a partir de videos.

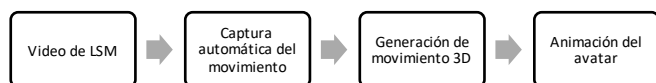


Figura 1. Proceso general para la generación automática de animaciones 3D a partir de videos de Lengua de Señas Mexicana.

La captura de movimiento, conocida como motion capture, consiste en registrar los movimientos realizados por una persona para reproducirlos posteriormente mediante un modelo digital (Menolotto et al., 2020). Los sistemas tradicionales utilizan sensores, marcadores corporales o conjuntos especializados de cámaras. Aunque estas tecnologías ofrecen una alta precisión, también requieren infraestructura, calibración y equipamiento especializado.

Las soluciones actuales basadas en inteligencia artificial han simplificado considerablemente este procedimiento. A partir de una secuencia de video es posible identificar distintas partes del cuerpo, estimar su posición y reconstruir el movimiento realizado por una persona. Posteriormente, esta

información puede transferirse al esqueleto digital de un avatar tridimensional.

Este procedimiento puede permitir la generación de contenidos en LSM, debido a que es posible usar videos previamente grabados y transformarlos en secuencias de animación sin necesidad de definir manualmente el movimiento de cada articulación.

Enseguida se describen cada una de las etapas de la metodología.

Etap 1. Selección de los videos de referencia en LSM

En esta etapa se seleccionaron los videos de señas en LSM utilizados como referencia para la generación de las animaciones 3D. Las secuencias fueron retomadas del conjunto de datos presentado por Rivera-Cervantes et al. (2025), desarrollado previamente para un entrenador virtual orientado al aprendizaje de LSM.

Para el presente trabajo, se procesaron 27 videos correspondientes al abecedario dactilológico de la LSM. Cada video contiene la ejecución de una seña realizada por un intérprete frente a la cámara. El enfoque permite observar principalmente la parte superior del cuerpo, incluyendo cabeza, torso, brazos y manos, elementos básicos para analizar la dinámica de cada seña.

A partir de este conjunto se seleccionaron secuencias en las que el movimiento fuera claramente visible y pudiera seguirse durante toda la ejecución. Se consideraron aspectos como una adecuada iluminación, la vista frontal del intérprete, la visibilidad de brazos y manos y la ausencia de oclusiones importantes. Estas características son relevantes debido a que las herramientas de captura de movimiento basadas en video estiman la postura corporal a partir de la información visual presente en cada fotograma.

Etap 2. Procesamiento mediante las herramientas de captura de movimiento

En esta fase, los videos seleccionados de LSM se utilizaron como entrada para las plataformas DeepMotion y QuickMagic, ambas basadas en técnicas de inteligencia artificial para realizar captura de movimiento (motion capture) a partir de secuencias de video. A diferencia de los sistemas clásicos, estas herramientas no requieren marcadores colocados sobre el cuerpo y el uso de sensores adicionales, ya que estiman el movimiento directamente a partir de cada frame.

Cada video fue procesado de manera independiente en ambas plataformas. Durante este proceso, las herramientas identificaron la posición y el

desplazamiento de diferentes partes del cuerpo del intérprete a lo largo de la secuencia, principalmente cabeza, torso, brazos y manos. A partir de esta información se estimó una representación del esqueleto humano y la evolución temporal de sus articulaciones, lo que permitió reconstruir tridimensionalmente el movimiento realizado durante cada señal.

Para mantener condiciones comparables, los mismos videos de referencia fueron procesados tanto con DeepMotion como con QuickMagic. De esta manera, las diferencias observadas en las animaciones estuvieron asociadas principalmente con la capacidad de cada herramienta para estimar y reconstruir los movimientos presentes en una misma secuencia original.

Durante el procesamiento se priorizó el análisis los movimientos de las extremidades superiores, debido a su importancia en la representación de la LSM. En particular, se observó la correspondencia de la posición de los brazos, la trayectoria de las manos, la postura corporal y la continuidad temporal del movimiento. Estos elementos permitieron realizar posteriormente una comparación visual entre el video original y las animaciones obtenidas con cada plataforma.

Aunque ambas herramientas lograron generar secuencias tridimensionales a partir de los videos, se observaron diferencias en la recuperación de algunos movimientos. QuickMagic produjo representaciones visualmente más próximas a las secuencias originales, principalmente en términos de continuidad del movimiento y seguimiento general de las extremidades superiores. Esta observación motivó su selección como la alternativa con mejores resultados para las pruebas realizadas.

Etapas 3. Estimación y transferencia del movimiento hacia un esqueleto digital

Una vez procesados los videos de referencia, las herramientas estimaron la postura y el movimiento del intérprete a lo largo de cada secuencia. Para ello, se identificó la posición de diferentes puntos anatómicos asociados con las principales articulaciones del cuerpo, como hombros, codos, muñecas, cadera y otras regiones relevantes. El seguimiento de estos puntos a través de los

fotogramas permitió reconstruir la trayectoria y los cambios de postura que conforman cada señal.

A partir de esta información, el movimiento estimado se representó mediante un esqueleto digital, es decir, una estructura jerárquica de articulaciones y segmentos que reproduce de manera simplificada la organización del cuerpo humano. Cada articulación contiene información sobre su posición y orientación a lo largo del tiempo, lo que permite reconstruir digitalmente la ejecución de la señal.

Posteriormente, el movimiento obtenido se transfirió al esqueleto asociado con un avatar tridimensional mediante un proceso conocido como retargeting. Este procedimiento adapta los movimientos recuperados del video a las proporciones y características del personaje 3D, de manera que los desplazamientos del intérprete puedan ser reproducidos por el avatar, aun cuando existan diferencias en tamaño o proporciones corporales. En el caso de la LSM, se prestó especial atención a la transferencia del movimiento de la parte superior del cuerpo, principalmente hombros, brazos, codos, muñecas y manos, debido a su relevancia en la ejecución de las señales. La correcta estimación de las trayectorias y orientaciones de estas articulaciones es fundamental para conservar las características principales del movimiento original.

Una vez realizada la transferencia, se obtuvo una secuencia de animación asociada con el esqueleto digital. Esta secuencia pudo reproducirse en el avatar 3D y compararse visualmente con el video original para identificar posibles diferencias en la postura, trayectoria y continuidad de los movimientos.

En esta etapa se observaron diferencias entre las dos plataformas utilizadas. Aunque ambas permitieron transferir el movimiento hacia un esqueleto digital, QuickMagic mostró una mejor correspondencia visual con algunos de los movimientos realizados en las secuencias originales, particularmente en el seguimiento de las extremidades superiores. Estos resultados permitieron posteriormente analizar la calidad de las animaciones generadas con cada herramienta.

Etapas 4. Generación de la animación correspondiente en un avatar tridimensional

Una vez transferido el movimiento al esqueleto digital, se generó la animación correspondiente en un avatar tridimensional. En esta etapa, la secuencia de posiciones y orientaciones estimadas para las articulaciones se

aplicó al modelo 3D, permitiendo reproducir de manera continua los movimientos realizados originalmente por el intérprete de LSM.

El avatar funcionó como la representación visual final del movimiento capturado. A medida que avanzaba la secuencia, el esqueleto digital controló la postura del personaje y permitió reproducir los desplazamientos de cabeza, torso, brazos, codos, muñecas y manos. De esta manera, cada video de referencia dio lugar a una animación tridimensional asociada con la seña correspondiente.

La generación de la animación permitió observar de forma directa qué tan fielmente cada herramienta reproducía la dinámica del movimiento original. Para ello, se compararon visualmente los videos de referencia con las secuencias generadas por DeepMotion y QuickMagic.

En las pruebas realizadas, ambas plataformas lograron producir animaciones 3D a partir de los videos de entrada. Sin embargo, QuickMagic generó secuencias visualmente más consistentes con los movimientos originales, especialmente en la continuidad de las trayectorias y en la representación general de brazos y manos. Estas diferencias fueron más evidentes al analizar fotogramas equivalentes de una misma seña.

Las animaciones obtenidas pueden almacenarse y reutilizarse posteriormente dentro de una biblioteca digital de señas, lo que representa una ventaja para el desarrollo de aplicaciones futuras orientadas a la traducción o representación automática de contenidos en LSM. No obstante, la calidad de la animación no debe evaluarse únicamente desde una perspectiva visual, ya que en una lengua de señas también es necesario conservar con precisión aspectos como la configuración de las manos, la orientación, el lugar de articulación y los componentes no manuales.

Resultados

El procesamiento de los videos de referencia permitió generar animaciones tridimensionales de las señas seleccionadas mediante las plataformas DeepMotion y QuickMagic. En ambos casos fue posible recuperar el movimiento general del

intérprete y transferirlo a un avatar 3D, lo que confirmó la viabilidad de utilizar herramientas de captura de movimiento basada en video para este tipo de aplicación. La evaluación realizada en esta etapa fue principalmente visual y comparativa, tomando como referencia los videos originales de LSM. Para ello, se observaron diferentes momentos de cada secuencia y se analizaron aspectos como la postura corporal, la trayectoria de los brazos y las manos, la continuidad temporal del movimiento y la correspondencia general entre la ejecución original y la animación generada.

Los resultados mostraron diferencias entre las animaciones producidas por ambas plataformas como se observa en la Fig. 2. DeepMotion logró reproducir de manera general los movimientos corporales presentes en los videos, especialmente aquellos relacionados con los desplazamientos amplios de brazos y torso. Sin embargo, en algunas secuencias se observaron variaciones en la trayectoria de las extremidades superiores y cambios en la postura que redujeron la correspondencia visual con la ejecución original.

Por su parte, QuickMagic presentó una mayor correspondencia visual con los videos de referencia en las secuencias analizadas. Los movimientos de brazos y manos mostraron una trayectoria más continua y una representación general más cercana a la realizada por el intérprete. También se observó una mayor estabilidad entre fotogramas consecutivos, lo que produjo animaciones visualmente más naturales.



a) Seña “A” con DeepMotion



b) Seña “A” con QuickMagic

Figura 2. Comparación de la seña “A” procesada mediante las dos herramientas. a) Resultado obtenido mediante DeepMotion y b) Resultado generado mediante QuickMagic.

La comparación de fotogramas correspondientes a diferentes momentos de una misma seña permitió identificar con mayor claridad estas diferencias. En DeepMotion se observaron, en algunos casos, desviaciones en la posición de brazos o manos respecto al video original. En QuickMagic, la posición relativa de las extremidades superiores presentó una mayor similitud con la secuencia de referencia como se muestra en la Fig. 3.

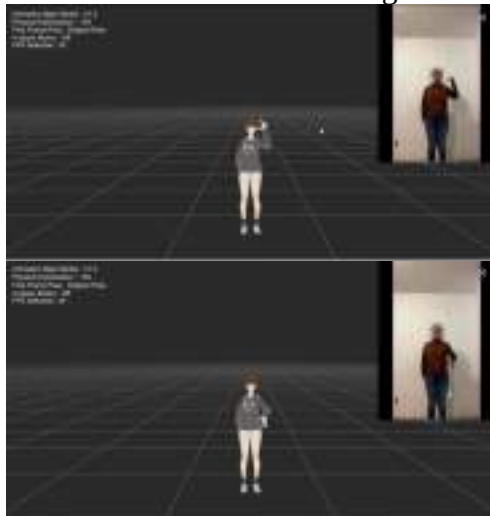


Figura 3. Comparación de diferentes instantes de la seña “L”.

Continuidad del movimiento

Otro aspecto relevante fue la continuidad de las animaciones. Debido a que una seña está constituida por una secuencia temporal y no únicamente por posturas independientes, resulta necesario que las transiciones entre posiciones se reproduzcan de manera fluida.

En este aspecto, QuickMagic mostró un comportamiento más favorable, al conservar con mayor estabilidad la trayectoria general de los movimientos durante la ejecución de las señas evaluadas. En contraste, algunas animaciones obtenidas mediante DeepMotion presentaron cambios más notorios entre determinadas posiciones del avatar.

Estas diferencias son particularmente relevantes para la representación de la LSM, ya que modificaciones en la trayectoria, orientación o ubicación de las manos pueden alterar la percepción visual de una seña.

Representación de las extremidades superiores

Dado que gran parte de la información visual de las señas analizadas se concentra en la región superior del cuerpo, se prestó especial atención a la representación de hombros, brazos, codos, muñecas y manos.

Ambas herramientas fueron capaces de recuperar la estructura general de estos movimientos. Sin embargo, los resultados evidenciaron que la captura automática presenta todavía dificultades cuando existen movimientos rápidos, proximidad entre las manos o posiciones en las que una extremidad puede ocultar parcialmente a otra.

A pesar de estas limitaciones, QuickMagic presentó resultados visualmente más consistentes en la representación global de las extremidades superiores, por lo que fue considerada la herramienta con mejor desempeño dentro de las pruebas realizadas.

De manera general, los resultados mostraron que las dos plataformas pueden utilizarse para transformar videos RGB de LSM en secuencias de animación tridimensional. No obstante, la comparación visual realizada permitió identificar una ventaja de QuickMagic sobre DeepMotion para el conjunto de señas analizado, principalmente en tres aspectos: continuidad del movimiento, correspondencia de las extremidades superiores y similitud general con la ejecución original. Estos resultados deben interpretarse como una evaluación preliminar, ya que en esta etapa no se utilizaron métricas cuantitativas para medir el error entre la postura del intérprete y la del avatar. Asimismo, la calidad lingüística de las animaciones deberá ser evaluada posteriormente con la participación de especialistas y usuarios de LSM.

Aun con estas consideraciones, los resultados obtenidos muestran que la captura de movimiento basada en inteligencia artificial constituye una alternativa viable para reducir el trabajo requerido en la creación manual de animaciones 3D y avanzar hacia la construcción de bibliotecas digitales de señas que puedan integrarse en futuros sistemas de representación o traducción automática de LSM.

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que las herramientas actuales de captura de movimiento basadas en video pueden utilizarse como una alternativa para generar animaciones 3D a partir de secuencias de la Lengua de Señas Mexicana. Tanto DeepMotion como QuickMagic

permitieron recuperar el movimiento general del intérprete y transferirlo a un avatar 3D, reduciendo la necesidad de realizar manualmente cada etapa del proceso de animación.

La comparación visual evidenció que QuickMagic presentó un mejor desempeño que DeepMotion en las secuencias analizadas, principalmente en la continuidad del movimiento, la estabilidad entre fotogramas y la correspondencia general de brazos y manos respecto a los videos originales. Estos resultados indican que la calidad de la estimación del movimiento puede variar entre plataformas, aun cuando se utilicen las mismas secuencias de entrada. No obstante, la generación automática de animaciones para una lengua de señas representa un reto mayor que la reproducción de movimientos corporales convencionales. En la LSM es necesario conservar con precisión elementos como la configuración y orientación de las manos, la trayectoria del movimiento y componentes no manuales, debido a que todos ellos intervienen en la correcta comprensión de las señas (Naert et al., 2020). En las pruebas realizadas, los movimientos amplios de las extremidades superiores fueron reproducidos con mayor facilidad que algunos movimientos más detallados de manos y dedos, lo que constituye una de las principales áreas de oportunidad para este tipo de herramientas.

También debe considerarse que DeepMotion y QuickMagic son plataformas de propósito general y no fueron desarrolladas específicamente para la representación de la LSM. A pesar de ello, los resultados obtenidos muestran su potencial para automatizar una parte importante del proceso de generación de animaciones 3D y facilitar la creación de contenidos digitales basados en señas. La evaluación realizada en este trabajo fue principalmente visual, por lo que los resultados deben considerarse como una primera aproximación. Una animación que presenta una mayor similitud visual con el video original no necesariamente garantiza una representación lingüísticamente correcta de la seña. Por esta razón, será necesario incorporar posteriormente métricas cuantitativas que permitan comparar las trayectorias y posiciones del intérprete con las generadas por el avatar, así como evaluaciones

realizadas por especialistas, intérpretes y usuarios de LSM. Como trabajo futuro, se propone incorporar métricas cuantitativas, ampliar el número de señas analizadas y realizar evaluaciones con especialistas y usuarios de LSM. Asimismo, se plantea integrar las animaciones en una biblioteca digital y explorar su uso en sistemas automáticos de traducción y aplicaciones educativas.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por el apoyo brindado para la realización de este proyecto, desarrollado en el marco del programa Verano de la Ciencia 2026.

Referencias

- Ebling, S., Glauert, J. Building a Swiss German Sign Language avatar with JASigning and evaluating it among the Deaf community. *Univ Access Inf Soc* 15, 577–587 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10209-015-0408-1>
- Menolotto, M., Komaris, D.-S., Tedesco, S., O’Flynn, B., & Walsh, M. (2020). Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review. *Sensors*, 20(19), 5687.
- Naert, L., Larboulette, C., & Gibet, S. (2020). A survey on the animation of signing avatars: From sign representation to utterance synthesis. *Computers & Graphics*, 92, 76-98.
- QuickMagic. (n.d.). QuickMagic: AI motion capture—Video to 3D animation. QuickMagic.
- Rivera-Cervantes, F. d. J., Córdova-Esparza, D.-M., Terven, J., Romero-González, J.-A., González-Rodríguez, J.-R., Ibarra-Corona, M.-A., & Ramírez-Pedraza, P.-A. (2025). Virtual Trainer for Learning Mexican Sign Language Using Video Similarity Analysis. *Technologies*, 13(12), 540.
- Song, C., Li, X., Yang, F., Xu, Z., Wei, J., Liu, F., ... & Zhang, J. (2026). Puppeteer: Rig and animate your 3d models. *Advances in neural information processing systems*, 38, 72152-72184.
- Wu, R., Su, W., Ma, K., & Liao, J. (2025). Aniclipart: Clipart animation with text-to-video priors. *International Journal of Computer Vision*, 133(6), 3149-3165.
- Xi, C., & Chung, J.-H. (2024). A case study on AI-driven DeepMotion motion capture technology. *The International Journal of Internet, Broadcasting and Communication*, 16(2), 87–92.



Expresión de CHPV1.9 en *Pichia pastoris* X-33

Abril Sofia Alcántara-Chávez¹, Dra. Cynthia Quetzalli Perez-Almeida², Dr. Diego Josimar Hernández-Silva³

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, Licenciatura en Biotecnología. Santiago de Querétaro, Qro., México

^{2,3} Laboratorio de Investigación en Biomoléculas y Microbiología Veterinaria Aplicada (BIOMIVA), Medicina Veterinaria y Zootecnia, Facultad de Ciencias Naturales, UAQ.

Resumen

Este trabajo evaluó la expresión e inmunodetección de la proteína recombinante CHPV1.9 empleando la clona 1.6 de *Pichia pastoris* X-33 en un biorreactor automatizado de 600 mL frente al cultivo en matraz. La fermentación en biorreactor se llevó a cabo durante 144 h (pH 6.0 ± 0.5 , 20–25 °C) con inducción con metanol al 0.5% v/v. Mediante SDS-PAGE y Western Blot, se confirmó la presencia de señales de una masa molecular que se asemeja al de CHPV1.9 en la biomasa (24–144 h) y en la secreción del sobrenadante (24–72 h), a diferencia del matraz, donde no hubo expresión detectable. La inmunodetección con anticuerpos anti-His no generó señal, lo cual sugiere un posible impedimento estérico en el epítipo. Se concluye que el control de variables en biorreactor es indispensable para la producción de CHPV1.9, requiriéndose un análisis de expresión a nivel

transcripcional y caracterización de la cepa mutante, para asegurar la presencia del gen y posteriormente estandarizar cultivos, condiciones, medios, etc... para verificar si de esta forma se expresa.

Palabras clave: *Pichia pastoris*, CHPV1.9, biorreactor, Western Blot, expresión recombinante.

Summary

This study evaluated the expression and immunodetection of the recombinant CHPV1.9 protein using *Pichia pastoris* X-33 clone 1.6 in an automated 600-mL bioreactor compared to flask culture. Fermentation in the bioreactor was carried out for 144 h (pH 6.0 ± 0.5 , 20–25 °C) with induction using 0.5% v/v methanol. Using SDS-PAGE and Western blot, the presence of signals with a molecular weight similar to that of CHPV1.9 was confirmed in the biomass (24–144 h) and in the supernatant secretion (24–72 h), in contrast to the flask culture, where no detectable expression was observed. Immunodetection with anti-His antibodies did not generate a signal, suggesting a possible steric hindrance at the epitope. It is concluded that controlling variables in the bioreactor is essential for the production of CHPV1.9, requiring an analysis of expression at the transcriptional level and characterization of the mutant strain to ensure the presence of the gene and subsequently standardize cultures, conditions, media, etc., to verify whether expression occurs under these conditions.

Keywords: *Pichia pastoris*, CHPV1.9, bioreactor, Western Blot, recombinant expression.

Introducción

Pichia pastoris es una levadura metilotrófica que está establecida como un sistema de expresión de proteínas recombinantes ampliamente utilizado en

la industria biotecnológica de interés médico e industrial. Esta levadura es un organismo con la capacidad de crecer a altas densidades celulares, que, si al mismo tiempo se encuentra acoplada al promotor de la alcohol oxidasa I inducida por metanol (AOX1), permite obtener rendimientos altos de proteína con modificaciones postraduccionales complejas. (Shemesh & Fishman, 2024)

La proteína recombinante CHPV1.9 representa una molécula de alto valor comercial debido a su alto potencial como vacuna que ayude a prevenir la babesiosis. Sin embargo, la optimización de su producción a mayor escala requiere un control estricto de parámetros fisicoquímicos como el pH, la temperatura, la tensión de oxígeno disuelto y el régimen de alimentación del inductor (metanol), factores que son difíciles de controlar en sistemas tradicionales como los matraces Erlenmeyer.

En este trabajo se aborda el escalamiento del proceso de expresión de CHPV1.9 utilizando la clona mutante X-33 (clona 1.6) en un biorreactor de tanque agitado con volumen operativo de 600 mL en medio tamponado rico en metanol (BMMY), comparando su desempeño frente al cultivo en matraz con medio a base de extracto de levadura y peptona (YP) mediante análisis SDS-PAGE y Western Blot.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el perfil de expresión e inmunodetección de la proteína recombinante CHPV1.9 empleando la clona 1.6 de la cepa mutante de *Pichia pastoris* X-33 en un sistema de biorreactor tipo batch y en matraz.

Objetivos específicos

- Establecer el cultivo en biorreactor en medio BMMY con control automatizado de parámetros físico-químicos.
- Evaluar el esquema de inducción por metanol suministrado de forma fraccionada cada 24 h durante un periodo de 144 h.
- Comparar el perfil de producción en biomasa y secreción en sobrenadante entre el biorreactor automatizado y el cultivo en matraz con medio YP.

Metodología

Preinóculo y Cultivo en Biorreactor

Se prepararon dos preinóculos de 300 mL cada uno, en medio complejo con glicerol tamponado (BMGY) empleando la clona 1.6 de *P. pastoris* X-33, incubados durante 16 h a 30 °C y 150 rpm. El pellet total obtenido fue inoculado en un biorreactor BIOSTAT A con 600 mL, el mínimo volumen operativo, de medio BMMY. Las condiciones operativas se fijaron en 20-25 °C y pH 6.0 ± 0.5. La fase de inducción se mantuvo mediante la adición de 3 mL de metanol al 100% cada 24 h para mantener una concentración final constante del 0,5% (v/v) durante 144 h.

Cultivo Comparativo en Matraz

Se inoculó la cepa mutante frente a la cepa silvestre en matraces Erlenmeyer con 50 mL de medio YP. Se indujo con metanol para mantener una concentración de 0.5% cada 24 h.

Procesamiento de Muestras y Lisis Celular

Se tomaron alícuotas del cultivo en biorreactor a las 0, 24, 48, 72 y 144 h, también a las 0, 24 y 48 h de los cultivos en matraces de aproximadamente 1 mL. Se centrifugaron las muestras para separar la biomasa (pellet) del sobrenadante. La lisis

celular de la biomasa se llevó a cabo mediante la congelación de los pellets celulares para macerarlos hasta obtener un polvo fino al que se le agregó buffer de lisis, para finalmente combinar tres ciclos de choque térmico a 56 °C con congelación en nitrógeno líquido.

SDS-PAGE y Western Blot

Las muestras de biomasa y medio se prepararon con buffer de carga Laemmli ajustado a 1X. Se realizó electroforesis en geles de poliacrilamida (SDS-PAGE) al 12%. Para la inmunodetección, la transferencia se realizó a membranas de nitrocelulosa. Se emplearon diferentes anticuerpos primarios dependiendo del caso: en el primero, una mezcla de sueros de bovinos inmunizados con CHPV1.9 (evaluando diluciones 1:500 y 1:1000) y anticuerpo monoclonal Anti-His (dilución 1:500). Igualmente se emplearon diferentes anticuerpos secundarios Anti-bovino y Anti-rata respectivamente. Para finalmente ser revelados mediante quimioluminiscencia (ECL) exponiendo de 15 a 900 s.

Resultados

En el biorreactor, la operación se mantuvo estable de forma continua durante 144 h de fermentación estéril (Tabla 1). La disminución en los parámetros del régimen de agitación y aireación permitió corregir la acumulación inicial de espuma.

Tiempo	pH	Temp. (°C)
0	6.13	22.8
24	6.31	23.5
48	6.01	23.2
72	6.03	23.5

144	6.10	23.5
-----	------	------

Tabla 1. Parámetros operativos del cultivo de *P. pastoris* X-33 en biorreactor BIOSTAT A.

En el análisis inmunológico, la reducción de la concentración del anticuerpo primario de la mezcla de sueros de bovinos inmunizados con CHPV1.9 a una dilución 1:1000 resultó crítica para eliminar la saturación y el alto ruido de fondo que interfiere en los primeros geles (Fig. 1).

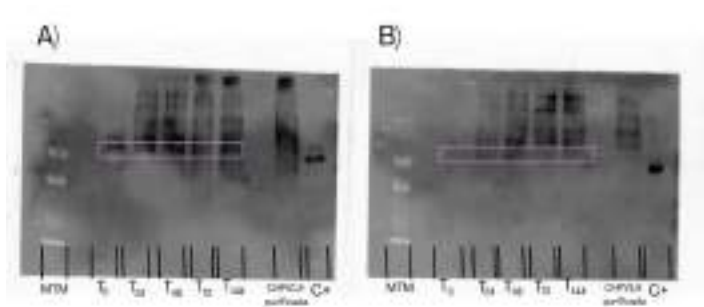


Fig. 1. Perfil de inmunodetección por Western Blot (dilución 1:1000) a los 1800 s de la proteína CHPV1.9 en A) Biomazas y B) Sobrenadantes a diferentes tiempos de inducción.

En la biomasa, se confirmó una banda definida correspondiente a la masa molecular aproximada para CHPV1.9 en los tiempos de 24, 48, 72 y 144 h. En el sobrenadante, la secreción fue evidente entre las 24 y 72 h, observándose una disminución progresiva hacia las 144 h.

Por el contrario, los ensayos paralelos en matraz Erlenmeyer utilizando medio YP no mostraron señales de expresión significativas ni en el gel teñido con Coomassie ni en la membrana de transferencia; sin embargo, en esta prueba de inmunodetección con el anticuerpo monoclonal a la cola de histidinas tampoco se detectaron señales de expresión para las muestras obtenidas de la prueba en el biorreactor. (Fig. 2).

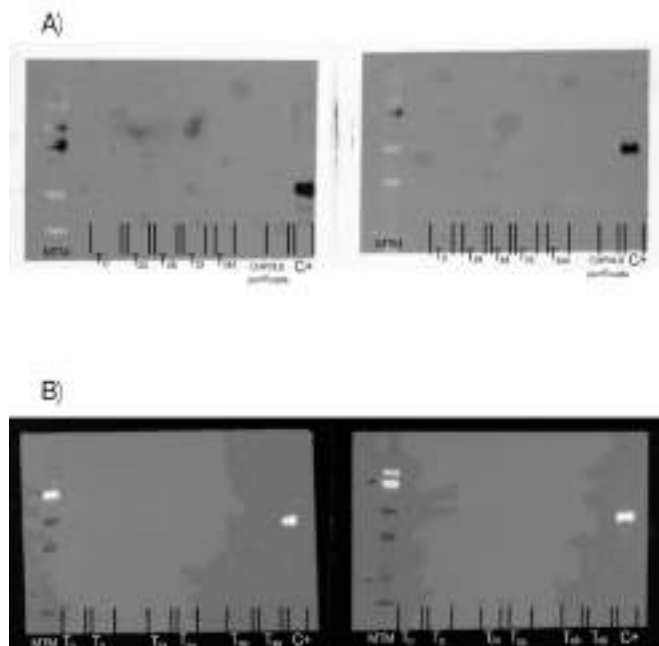


Fig. 2. Comparación del perfil de inducción entre el cultivo en A) biorreactor (medio BMMY) y B) matraz (medio YP).

Discusión

La producción de la proteína recombinante CHPV1.9 en la levadura *Pichia pastoris* X-33 bajo el control del promotor de la alcohol oxidasa I (AOX1) está condicionado al control de los parámetros operacionales y fisicoquímicos del proceso.

En este trabajo, los resultados obtenidos en el sistema de cultivo en biorreactor demostraron una mejor obtención de la proteína frente al cultivo en matraz Erlenmeyer. Este comportamiento coincide con lo reportado por Karbalaie et al. (2020), quienes señalan que los biorreactores automatizados garantizan un control preciso del pH, la temperatura y la transferencia de oxígeno disuelto, lo cual evita la acumulación de metabolitos tóxicos o la limitación de nutrientes que suelen inhibir el crecimiento y la expresión heteróloga. En contraste, la falta de control en los

diferentes parámetros, como la evaporación del metanol y la fluctuación del pH, en los cultivos en matraz podrían estar afectando la activación sostenida del promotor AOX1, por lo que la expresión de la proteína se vería afectada (Shemesh & Fishman, 2024).

En lo que respecta a la caracterización e inmunodetección de la proteína recombinante, la optimización del protocolo de Western Blot mediante la disminución de la concentración del anticuerpo policlonal a 1:1000 resultó fundamental para eliminar el ruido de fondo observado en el primer ensayo realizado con estos anticuerpos.

Referente a los protocolos realizados para ambas pruebas de Western Blot con anticuerpo monoclonal Anti-His y a falta de detección de señales en las muestras, puede atribuirse a lo descrito por Debeljak et. al (2006), quienes demostraron que la inmunodetección de proteínas recombinantes provistas de la etiqueta de histidinas presenta una variabilidad e inespecificidad inherente, ya que, según lo presentan los anticuerpos Anti-His son altamente sensibles a la concentración operacional, al entorno electrostático y a la accesibilidad estérica del epítipo.

Finalmente, la disminución gradual de la señal de secreción en la prueba del biorreactor a partir de las 72 h de inducción sugiere la probabilidad de que ocurrieran eventos de proteólisis o alteraciones en el medio de cultivo. Tal como propone la literatura, aunque se hubiera detectado con éxito la etiqueta terminal, esto no garantiza la integridad total de la molécula, por lo que resultaría indispensable implementar un análisis de expresión a nivel transcripcional y caracterización de la cepa mutante, para asegurar la presencia del gen y posteriormente estandarizar cultivos,

condiciones, medios, etc... para verificar si de esta forma se expresa (Debeljak et al., 2006).

Conclusión

El proceso automatizado en biorreactor (BMMY) superó al cultivo tradicional en matraz gracias al control preciso de pH, temperatura e inducción del promotor AOX1. Mediante Western Blot con suero bovino (1:1000), confirmamos la producción de proteína del tamaño aproximado de CHPV1.9 tanto en biomasa (24-144 h) como en el sobrenadante (24-72 h). Sin embargo, la cola de histidinas no sirvió como marcador, probablemente debido a impedimentos estéricos que bloquearon la detección con el anticuerpo Anti-His. Por último, la caída en la proteína secretada a partir de las 72 h sugiere degradación proteolítica, por lo que el siguiente paso indispensable es un análisis de expresión a nivel transcripcional, caracterización de la cepa mutante y estandarización de cultivos, condiciones, medios, etc... para verificar la expresión.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y al programa Verano de la Ciencia UAQ 2026 por el financiamiento y las facilidades brindadas para la realización de esta estancia de investigación. Asimismo, se reconoce el apoyo técnico del personal del laboratorio durante las operaciones llevadas a cabo.

Referencias bibliográficas

Debeljak, N., Feldman, L., Davis, K. L., Komel, R., & Sytkowski, A. J. (2006). Variability in the immunodetection of His-tagged recombinant proteins. *Analytical Biochemistry*, 359(2), 216–223. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ab.2006.09.017> [consultado en 2026]

Karbalaei, M., Rezaee, S. A., & Farsiani, H. (2020). *Pichia pastoris*: A highly successful expression system for optimal synthesis of heterologous proteins. *Journal of Cellular Physiology*, 235(9), 5867–5881. Disponible en <https://doi.org/10.1002/jcp.29583> [consultado en 2026]

Shemesh, P., & Fishman, A. (2024). Optimal fermentation conditions for growth and recombinant protein production in *Pichia pastoris*: Strain selection, ploidy level and carbon source. *Current Research in Food Science*, 9, 100840. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100840> [consultado en 2026]

“Cambio estructural y etapas del desarrollo económico de Querétaro”

Aidee Alvarez Mayorga, Enrique Kato Vidal
Facultad de Contaduría y Administración,
Universidad Autónoma de Querétaro.
correo - Aidee Alvarez Mayorga:
aalvarez117@alumnos.uaq.mx
correo - Enrique Kato Vidal:
enrique.kato@uaq.mx

Resumen

Esta investigación analiza e identifica las principales etapas de desarrollo económico en el estado de Querétaro entre 1940 y 2024 y el impacto que tuvieron en su cambio estructural como estado basándose en la teoría de cambio estructural de Etelberto Ortiz Cruz. Se utilizaron datos históricos del INEGI, se calculó la TCAC del PIB y se relaciono con evidencia documental. Los resultados muestran que Querétaro logró evolucionar de manera exitosa en términos de matriz productiva pasando de una economía agrícola a una economía industrial, tecnológica y digital.

Palabras Clave: Cambio estructural, desarrollo económico, Querétaro.

Abstract

This research analyzes and identifies the main stages of economic development in the state of Querétaro between 1940 and 2024 and their impact on the state's structural change, based on Etelberto Ortiz Cruz's theory of structural change. Historical data from INEGI (the Mexican National Institute of Statistics and Geography) were used, the CAGR (Coefficient of Growth Rate) of GDP was calculated, and this was correlated with documentary evidence. The results show that Querétaro successfully evolved in terms of its production matrix, transitioning from an

agricultural economy to an industrial, technological, and digital one.

Keywords: Structural change, economic development, Querétaro.

1. Introducción

En las últimas décadas, el estado de Querétaro ha experimentado transformaciones económicas, consolidándose como uno de los principales polos industriales y tecnológicos de México. Este proceso ha estado impulsado por el desarrollo de actividades estratégicas como el sector exportador, la industria automotriz, el clúster aeronáutico y, recientemente, la instalación de centros de datos.

1.2. Objetivos

El propósito de esta investigación es identificar y analizar las principales etapas del desarrollo económico de Querétaro y su impacto en el cambio estructural, superando la tendencia común de estudiar sus sectores estratégicos —como el exportador, el automotriz, el aeronáutico y el de centros de datos—. A partir de esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles han sido las principales etapas del desarrollo económico de Querétaro? Para dar respuesta a este cuestionamiento, el objetivo general de este trabajo consiste en analizar las etapas del desarrollo económico del estado a través de sus procesos de cambio estructural y especialización productiva, mientras que el objetivo específico se centra en identificar dichas etapas de evolución económica y precisar las diferencias que existen entre cada una de ellas.

2. Metodología

Esta investigación utiliza un enfoque mixto y un método cronológico-comparativo basado en la teoría de cambio estructural de Etelberto Ortiz Cruz para analizar la economía de Querétaro entre 1940 y 2024. Con datos históricos del INEGI, se calculó la Tasa de Crecimiento Anual Compuesto (TCAC) del PIB.

Finalmente, al cruzar estos resultados con la evidencia documental, el periodo se dividió en cinco etapas para evaluar la tecnología de los sectores líderes y el perfil del mercado laboral.

Tabla 1. Tasa de crecimiento PIB Querétaro (1940-2025).			
Años	Período	TCMA PIB	Etapas
40	1940-1980	5.3%	Industrialización inicial
10	1980-1990	2.0%	Industrialización + consolidación exportadora
19	1990-2008	4.0%	Automotriz + Exportación
6	2008-2015	4.3%	Automotriz + Aeronáutico + Exportación
10	2015-2025	0.8%	Automotriz + Aeronáutico + Data Centers

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI: Censo de Población e Indicador de Actividad Económica

La base cuantitativa que sustenta y permite evaluar el ritmo de este proceso se analiza a través de un indicador clave de control: la tasa de crecimiento del PIB presentado en la **Tabla 1. Tasas de crecimiento Querétaro (1940-2025).**

3. Resultados

A partir del enfoque de cambio estructural de Ortiz Cruz, el verdadero desarrollo regional no se mide por el crecimiento inercial de la producción, sino por las mutaciones cualitativas de su matriz productiva. Este proceso implica que un territorio desplace gradualmente las actividades tradicionales de baja productividad para dar paso a sectores de alta complejidad tecnológica que transformen profundamente el mercado laboral.

3.1. Industrialización inicial (1940-1980)

La literatura indica que en este periodo Querétaro dejó de depender del campo para convertirse en un estado industrial. El gran motor de este cambio fue la inauguración de la autopista México-Querétaro, que facilitó la llegada de las primeras grandes fábricas desde la Ciudad de México. Según estudios de Miranda Correa (2005), llegaron principalmente empresas textiles y de alimentos.

Datos del INEGI muestran que la economía creció a un ritmo sólido del **5.3% anual**, el estado vivió su época de oro impulsado por el modelo nacional de producción interna que llenó las primeras zonas

industriales con fábricas de hilos, alimentos y talleres mecánicos.

3.2. Apertura comercial y consolidación exportadora (1980-1990)

Los textos de (Pacheco, 2007) y (Pacheco, 2010) sugieren que, tras las crisis de los años ochenta, el estado cambió su estrategia para comenzar a venderle al mundo. El evento clave de esta etapa fue la firma del TLCAN en 1994. Como ejemplo concreto, en estos años nacieron los primeros parques industriales privados para albergar empresas extranjeras de química y maquinaria. Sin embargo, el enfoque advierte que muchas de estas fábricas importaban casi todos sus insumos, dejando pocas ganancias a los proveedores locales.

Esta etapa se caracteriza por un freno que desplomó el crecimiento al **2.0%**, podría interpretarse como consecuencia de las crisis de la deuda externa que obligaron al estado a reconvertirse y empezar a mirar hacia los mercados extranjeros.

3.3. Consolidación del sector automotriz (1990-2008)

Querétaro se ha consolidado como un referente internacional en la producción de autopartes avanzadas (como transmisiones y neumáticos), el ensamble de tractocamiones (Scania, Man y Neohyundai) y el desarrollo tecnológico, logrando expandir su sector un 165% entre 1999 y 2014 (Banda, 2016).

Tras la crisis financiera de 2008, la industria experimentó un cambio estructural con dos efectos opuestos: mientras que a nivel nacional México se volvió radicalmente exportador—donde cada 10% de aumento en exportaciones impulsó un 9% la producción de vehículos—, el clúster de Querétaro se volvió menos dependiente del mercado externo (creciendo solo un 2.9% ante el mismo estímulo) debido a que las armadoras incrementaron su consumo de proveedores locales, fortaleciendo así el

mercado interno y la proveeduría de la región (Banda, 2016).

En esta etapa se registra una tasa del **4.0%**, podríamos considerar la firma del TLCAN como impulsor para que Querétaro fuera un atractivo para las grandes armadoras globales, aunque autores como (Pimentel, 2020) advierten que depender tanto de un solo sector hizo que el estado sufriera fuertes caídas durante las crisis mundiales de 2001 y 2008.

3.4. Consolidación del clúster aeronáutico (2008-2015)

A partir de 1990, Querétaro comenzó a desarrollar e introducir sectores de alta tecnología, estableciendo el sector aeroespacial como una de las áreas más prioritarias dentro de sus planes de desarrollo (como el Plan Querétaro 2010-2015).

Aunque el clúster compite en nichos globales avanzados, enfrenta debilidades importantes como la falta de ingenieros y especialistas altamente calificados, el escaso desarrollo de tecnología propia y una fuerte dependencia del extranjero. Para contrarrestar esto, el gobierno, universidades y organizaciones como **CONACYT**, **FUMEC**, **FEMIA** y el **Consejo Mexicano de Educación Aeroespacial** aliaron esfuerzos para capacitar personal, financiar la investigación y vincular a las pequeñas y medianas empresas locales con las grandes corporaciones internacionales (RIVERA, 2013).

(Pacheco, 2010) y (Pérez, 2010) describen que el gobierno local impulsó la alta tecnología para no depender tanto de los autos y mejorar la calidad de los empleos. El hito y ejemplo empresarial definitivo fue la llegada de la compañía canadiense Bombardier. destacan que el éxito se logró gracias al modelo de "Triple Hélice" (gobierno, empresas y escuelas), que incluyó como hito educativo la fundación de la Universidad Aeronáutica en Querétaro (UNAQ) para capacitar a los jóvenes de la región.

El PIB creció en un **4.3% anual**, gracias a la aviación y al modelo de "Triple Hélice" (gobierno, empresas y escuelas como la UNAQ), blindando la economía con tecnología de punta.

3.5. Repunte de los centros de datos (2015-2025)

La etapa actual marca un quiebre con la manufactura tradicional para entrar al mundo digital intangible. El detonante fue el almacenamiento en la nube y el internet. En su estudio, Ruiz García, Ángeles Avendaño y Viramontes Romero (2026) señalan que el estado pasó de tener un solo espacio en 2003 a consolidar un gran ecosistema digital. El ejemplo que caracteriza este periodo es la llegada de los **centros de datos masivos (Hyperscale Data Centers)**.

En este periodo, el PIB creció un **0.8% anual**, Cruzando esto con la teoría de Ortiz Cruz, se pudiera revelar una gran paradoja: aunque estos centros tecnológicos generan mucho dinero por metro cuadrado, utilizan muy pocos empleados en comparación con las fábricas tradicionales. Así podríamos explicar por qué la gran riqueza digital ya no se refleja visiblemente en los ingresos del habitante.

5. Discusión y conclusiones

El análisis del desarrollo económico de Querétaro entre 1940 y 2024, bajo el enfoque de cambio estructural de Etelberto Ortiz Cruz, demuestra que la entidad no ha experimentado un simple crecimiento inercial, sino una auténtica mutación cualitativa de su matriz productiva. A lo largo de ocho décadas, el estado logró transitar con éxito de una economía agrícola a un ecosistema industrial, tecnológico y digital, posicionándose como un referente de desarrollo regional en México.

6. Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Secretaría de Investigación, Innovación Y Posgrado. A grandes autores como Etelberto Ortiz Cruz, cuyas

aportaciones fueron fundamentales para estructurar este análisis.

CONCYTEQ. <https://www.concyteq.edu.mx/concyteq/uploads/publicacionArchivo/2017-06-862.pdf>

7. Referencias

Banda Ortiz, H., Gómez Hernández, D., & Carrión Ruiz, L. A. (2016). La industria automotriz en el estado de Querétaro: ¿cambio estructural?. *Pensamiento & Gestión*, (41), 36-59. <http://ref.scielo.org/d68kkw>

Carrillo Pacheco, M. A., & García, R. J. S. Siglo XXI. Los Sectores Industriales Emergentes en Querétaro. *La ciencia, el desarrollo tecnológico y la innovación en Querétaro. Historia, Realidad y Proyecciones*, CONCYTEQ, 339. <https://www.concyteq.edu.mx/concyteq/uploads/publicacionArchivo/2017-06-862.pdf>

Carrillo Pacheco, M. A. (2007). La industria maquiladora de exportación en el estado de Querétaro. *El cotidiano*, 22(142), 32-39. <https://www.redalyc.org/pdf/325/32514205.pdf>

Cruz Rivera, S. (2013). Sectores de alta innovación y desarrollo como impulsores del crecimiento regional: la industria aeronáutica en el Estado de Querétaro. <https://ru.dgb.unam.mx/items/71ea91d8-4065-44e2-b668-6f99c3e62727>

E. Ortiz, "Cambio estructural y desarrollo: Hacia la construcción de una visión desde la experiencia mexicana", en *Políticas de cambio estructural en la economía mexicana: Evaluación y perspectivas para un nuevo proyecto de nación*, Ed. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México, 2007, pp. 23–42.

E. Ortiz, "Perfil del cambio estructural en la economía mexicana", en *Políticas de cambio estructural en la economía mexicana: Evaluación y perspectivas para un nuevo proyecto de nación*, Ed. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México, 2007, pp. 43–80.

García, A. R., Avendaño, A. A., & Romero, M. Á. V. (2026). Centros de Datos en Querétaro: Gestión Tecnológica Estratégica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 10(1), 5878-5886. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1.22700

Miranda Correa, E. (2005). Del Querétaro rural al industrial, 1940-1973. México: H. Cámara de Diputados, LIX Legislatura. <https://maporrua.com.mx/product/queretaro-rural-al-industrial-del/>

Montes Pimentel, D. (2020). Configuración de la industria de autopartes en Querétaro (Tesis doctoral, Universidad Autónoma Metropolitana). <https://doi.org/10.24275/uami.4q77fr47z>

Pérez, E., & Hernandez, M. (2010). // No se cita ningún capítulo // La ciencia, el desarrollo tecnológico y la innovación en Querétaro. *Historia, Realidad y Proyecciones*.

LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE JUSTICIA ORAL EN MATERIA CIVIL Y FAMILIAR EN EL DISTRITO JUDICIAL DE SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO¹

Autora: Arely Lizardi Sánchez
(sanchezarely844@gmail.com).

Asesor: Leonardo Senén Cabello Álvarez
(leonardo.cabello@uaq.mx).

Universidad Autónoma de Querétaro – Facultad de Derecho.

Resumen

La transformación del sistema de justicia civil y familiar en México representa uno de los cambios procesales e institucionales más relevantes de las últimas décadas, derivado de la expedición del Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares (CNPCyF). Su objetivo principal es uniformar la regulación procesal en el país mediante los principios de oralidad, inmediación, concentración, publicidad y acceso efectivo a la justicia.

El presente proyecto analiza la transición hacia el nuevo modelo en el Distrito Judicial de San Juan del Río, Querétaro, abordándolo como un fenómeno jurídico-social que abarca la reorganización del Poder Judicial y la adaptación de los operadores del derecho. La metodología combina el análisis documental legislativo y doctrinal con el trabajo de campo exploratorio, incluyendo la observación institucional de la Ciudad Judicial de San Juan del Río y una breve entrevista con el secretario del Juzgado Cuarto Civil y Familiar.

Entre los hallazgos principales destaca que la implementación no depende únicamente de una reforma normativa, sino de una profunda adecuación material y tecnológica. En el caso de San Juan del Río, este se encuentra actualmente aún en proceso de la construcción y habilitación de tres salas de oralidad, que según lo establecido en el CNPCyF deberían ir equipadas con sistemas audiovisuales, la remodelación del edificio judicial, la adaptación de áreas y expediente electrónico, la reorganización de los cinco juzgados civiles del distrito, así como la capacitación de actualización desde marzo de 2026. La reprogramación de la entrada en vigor en septiembre de 2026 permitió estudiar la etapa preparatoria, evidenciando los retos institucionales indispensables para garantizar la tutela judicial efectiva y la protección de los derechos de las personas usuarias.

Palabras clave: Justicia oral, Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares, Poder Judicial de Querétaro, San Juan del Río, Ciencias Sociales, Infraestructura judicial, Tutela judicial efectiva.

Abstract

The transformation of Mexico's civil and family justice system represents one of the most significant procedural and institutional changes of recent decades, resulting from the enactment of the National Code of Civil and Family Procedure (CNPCyF). Its primary objective is to standardize procedural regulations throughout the country based on the principles of oral proceedings, immediacy, concentration, public access, and effective access to justice.

This project analyzes the transition to the new model in the Judicial District of San Juan del Río, Querétaro, approaching it as a legal and social phenomenon that encompasses the reorganization of the judiciary and the adaptation of legal practitioners. The methodology combines legislative and doctrinal document analysis with exploratory fieldwork, including institutional observation of the San Juan del Río Judicial Complex and a brief interview with the clerk of the Fourth Civil and Family Court.

¹ Trabajo realizado con apoyo del Verano Ciencia UAQ-2026.

Among the main findings is that implementation depends not only on regulatory reform but also on a profound material and technological adaptation. In the case of San Juan del Río, the process is currently still underway, involving the construction and outfitting of three oral proceedings courtrooms—which, according to the CNPCYF, should be equipped with audiovisual systems—the remodeling of the courthouse, the adaptation of various areas and the implementation of electronic case files, the reorganization of the district's five civil courts, as well as refresher training beginning in March 2026. The rescheduling of the effective date to September 2026 allowed for a thorough review of the preparatory phase, highlighting the institutional challenges that must be addressed to ensure effective judicial protection and the protection of users' rights.

Key words: Oral proceedings, National Code of Civil and Family Procedure, Querétaro Judicial Branch, San Juan del Río, Social Sciences, Judicial infrastructure, Effective judicial protection.

Introducción

Las ciencias sociales estudian las estructuras, normas e instituciones mediante las cuales las sociedades organizan la convivencia y resuelven sus conflictos. Dentro de este campo, el Derecho constituye una disciplina dinámica que analiza tanto la validez de las normas como su eficacia real dentro de la estructura estatal y social. La administración de justicia es una función pública esencial; por ende, cualquier modificación en sus procedimientos impacta de manera directa en la relación entre la ciudadanía y las instituciones públicas.

En México, los procedimientos civiles y familiares se caracterizaron históricamente por un modelo predominantemente escrito, rígido y formalista, caracterizado por el diferimiento de audiencias, la acumulación documental y la lejanía del juzgador respecto de las partes. La aprobación del Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares transforma radicalmente este paradigma al imponer un sistema oral basado en audiencias públicas, contacto directo (inmediación) y uso intensivo de tecnologías.

En el Estado de Querétaro, el Distrito Judicial de San Juan del Río representa un escenario clave para examinar cómo una política judicial de escala nacional se materializa en un contexto local. Esta investigación unifica la perspectiva procesal y el análisis jurídico-social para comprender la transición institucional previa a la operatividad plena del nuevo sistema.

La efectividad de un nuevo sistema procesal no se logra de manera automática con la publicación de un código. La transición de la justicia escrita a la oralidad requiere recursos presupuestales, adecuación de infraestructura, modernización tecnológica, reestructuración administrativa y un cambio cultural en los operadores jurídicos.

En San Juan del Río surgieron interrogantes críticas sobre si el distrito contaba con las condiciones físicas y organizacionales para operar el nuevo modelo, especialmente tras la reprogramación de la entrada en vigor proyectada para el segundo semestre de 2026. Por lo anterior, es pertinente cuestionar ¿Cuáles son los principales retos institucionales, jurídicos, tecnológicos y sociales que enfrenta el Distrito Judicial de San Juan del Río, Querétaro, para implementar el Sistema de Justicia Oral en Materia Civil y Familiar conforme al marco del Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares?

La materia civil y familiar impacta de forma directa los aspectos más sensibles de la vida social: la custodia de menores, el patrimonio, el estado civil, los alimentos y el cumplimiento de contratos. Por ello, estudiar la implementación del (CNPCyF) en San Juan del Río resulta indispensable para evaluar si las instituciones están preparadas para garantizar una justicia pronta, completa e imparcial (Art. 17 Constitucional). Asimismo, la investigación aporta valor al documentar la fase preparatoria y de infraestructura, una etapa frecuentemente omitida en los estudios jurídicos tradicionales que suelen centrarse únicamente en el análisis de sentencias o procedimientos ya concluidos.

El objetivo general consistió en analizar el proceso de implementación del Sistema de Justicia Oral Civil y Familiar en el Distrito Judicial de San Juan del Río,

Querétaro, desde una perspectiva jurídico-social y procesal, identificando sus avances en infraestructura, adecuaciones institucionales, capacitación y los retos asociados a la transición hacia el nuevo Código Nacional.

Se partió del supuesto de que la aplicación efectiva del Sistema de Justicia Oral Civil y Familiar en San Juan del Río no depende exclusivamente de la entrada en vigor formal del CNPCyF, sino de la culminación integral de las obras de infraestructura (salas de audiencia y tecnología audiovisual), la reestructuración de los órganos jurisdiccionales y la constante capacitación práctica de los operadores jurídicos.

El Derecho como Ciencia Social y la Administración de Justicia

El Derecho no es una abstracción normativa aislada; es una ciencia social que estudia las reglas de conducta y las instituciones encargadas de dirimir conflictos en la colectividad. Desde la sociología jurídica, la administración de justicia representa la capacidad del Estado para sostener la paz social a través de procesos legítimos, accesibles y transparentes.

Principios Rectores del Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares

El CNPCyF introduce un modelo donde destacan:

Oralidad e Inmediación: Obliga a que el juez dirija en persona todas las audiencias, interactuando cara a cara con las partes y desahogando directamente las pruebas.

Concentración y Continuidad: Reducción de trámites dispersos, concentrando el desahogo de pruebas y alegatos en audiencias continuas.

Justicia Probatoria: Cambio en las reglas de ofrecimiento y valoración de la prueba, exigiendo mayor preparación técnica y habilidades de argumentación verbal por parte de los litigantes y juzgadores.

Audiencias Preliminares: Actúan como un filtro procesal para depurar el procedimiento, fijar acuerdos sobre hechos no controvertidos y conciliar a las partes.

Doctrina Especializada y Nuevos Enfoques del CNPCyF

Protección de Niñas, Niños y Adolescentes (NNA) y Ejercicio de la Abogacía: La especialización del litigio en materia familiar exige un estándar reforzado de protección de los derechos de la infancia, imponiendo pautas procesales diferenciadas en los juicios orales.

Procedimientos Especiales: La homologación nacional sustituye los esquemas heterogéneos de los códigos estatales (como el de Guanajuato o Querétaro) por procedimientos uniformes que priorizan la celeridad y la justicia restaurativa.

Litigio Internacional de NNA (Análisis del Art. 666 CNPCyF): Establece pautas procesales claras para tramitar controversias transfronterizas (como restitución internacional o custodia con elementos extranjeros), priorizando el interés superior de la infancia y la cooperación judicial.

Se parte del siguiente marco jurídico:

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 1º: Obligación de promover, respetar y garantizar los derechos humanos conforme a los principios de universalidad, interdependencia, indivisibilidad y progresividad. Artículo 17: Garantía del derecho humano de acceso a una justicia pronta, completa, expedita e imparcial, priorizando la solución del fondo del conflicto sobre los formalismos procedimentales.

Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares (CNPCyF): El marco regulatorio nacional unificado para las 32 entidades federativas. Regulación de audiencias orales, expediente digital, juicio en línea y reglas especiales procesales. **Acuerdos del Consejo de la Judicatura del Poder Judicial del Estado de Querétaro:** Acuerdos institucionales que norman el Plan General de

Implementación y la reorganización de los distritos judiciales.

Metodología

La investigación empleó un enfoque cualitativo, documental y descriptivo-exploratorio: Primera fase Documental: Revisión legislativa, acuerdos del Poder Judicial de Querétaro y análisis doctrinal especializado. Segunda; Trabajo de Campo y Observación Institucional: Visitas e inspección física en las instalaciones de la Ciudad Judicial de San Juan del Río para constatar las obras de infraestructura y remodelación. Tercera; Técnica Entrevista Exploratoria: Entrevista efectuada al personal del Juzgado Civil y Familiar de San Juan del Río para indagar sobre la distribución interna de competencias, la participación inicial de juzgados y los calendarios operativos.

Implementación en San Juan del Río: Resultados y Trabajo de campo

Reorganización Jurisdiccional y Estrategia Gradual

De acuerdo con la información institucional y la entrevista exploratoria realizada en los Juzgados Civil y Familiar, el Poder Judicial del Estado de Querétaro. Los juzgados Cuarto y Quinto Civil y Familiar fueron seleccionados para encabezar la transición inicial hacia la oralidad en el distrito. Los cinco juzgados civiles del distrito experimentaron modificaciones en su denominación y competencias para adaptarse a la convivencia temporal entre el sistema tradicional escrito y el modelo del CNPCyF.

Adecuaciones de Infraestructura en Ciudad Judicial San Juan del Río

A partir de la remodelación integral iniciada en septiembre de 2025, la infraestructura física del recinto judicial fue transformada sustancialmente para atender los requerimientos del modelo oral:

Construcción de Tres Salas de Audiencia Oral: Se habilitarán y equiparán tres salas de oralidad dedicadas exclusivamente a materias civil y familiar. Dichas salas, según lo establecido en el CNPCyF deberán contar con distribución estratégica (estrado

para el juez, área para partes/abogados, zona de testigos y espacio para el público).

Espacios de Apoyo e Intermediación: Se encuentran aún en construcción salas privadas de deliberación para jueces, oficinas para facilitadores de mecanismos alternativos, áreas para notificadores, secretarios de audiencia y espacios seguros para el resguardo de servidores del expediente electrónico.

Adecuación de Áreas Públicas: Creación de salas de espera confortables para las partes e itinerarios de circulación que separan el flujo de usuarios del paso de los juzgadores.

Modernización Tecnológica y Expediente Electrónico

La transición oral en San Juan del Río va de la mano con la digitalización judicial. Las tres salas orales según el CNPCyF deberán contar con:

Sistemas informáticos de registro y gestión judicial.

Equipos de videgrabación y micrófonos omnidireccionales con registro integral de audio para la integración del expediente digital. Pantallas de alta definición para el desahogo de pruebas documentales y periciales en tiempo real durante las audiencias.

Capacitación Impartida y Simulaciones Practicas

El factor humano constituyó una prioridad del Plan General de Implementación. Durante 2025 y de manera intensiva desde marzo de 2026, se llevaron a cabo cursos de actualización, sin embargo, existe un retraso significativo en realizar algún tipo de simulaciones periódicas de audiencias dentro de las propias instalaciones remodeladas de la Ciudad Judicial. Jueces, secretarios, actuarios y personal administrativo practicaron la conducción de audiencias preliminares y de juicio, el manejo del equipamiento tecnológico y la resolución de incidencias en vivo.

El Aplazamiento de la Entrada en Vigor y la Fecha de Operatividad (Septiembre de 2026)

Aunque la entrada en funcionamiento en San Juan del Río estuvo prevista originalmente para junio de 2026,

la judicatura ajustó el calendario fijando septiembre de 2026 para el inicio pleno de operaciones. Este aplazamiento estratégico garantizó que la entrega de obra civil, la puesta a punto de los sistemas tecnológicos de grabación y la certificación del personal estuvieran concluidas al 100%, evitando colapsos procesales iniciales.

Cuadro 1. Observación en Ciudad Judicial San Juan del Río

<i>Elemento Observado</i>	<i>Situación Identificada en San Juan del Río</i>
<i>Salas de Audiencia Oral</i>	Tres salas aun en proceso de construcción y equipamiento
<i>Infraestructura Tecnológica</i>	Cámaras HD, micrófonos, pantallas de desahogo probatorio y red para expediente electrónico.
<i>Áreas Administrativas</i>	Oficinas aun en proceso de adaptación para secretarios de audiencia, facilitadores y notificadores.
<i>Capacitación del Personal</i>	Cursos de actualización se llevaron a cabo en marzo de 2026 y simulaciones prácticas de audiencias en desarrollo
<i>Órganos de Inicio</i>	Reorganización de los 5 juzgados civiles; participación inicial fijada en Juzgados 4° y 5°.
<i>Entrada en Operación</i>	Reprogramada para septiembre de 2026, garantizando instalaciones concluidas.

Discusión y conclusiones

Integración Jurídico-Social: La reforma procesal civil y familiar en Querétaro no es un mero cambio normativo, sino una transformación social que exige adecuar las instituciones físicas y la cultura de servicio público.

Infraestructura Completa: El Distrito Judicial de San Juan del Río cuenta con las condiciones materiales necesarias gracias a la edificación de tres salas de oralidad, la remodelación del recinto y la incorporación de plataformas digitales.

Efecto Positivo del Aplazamiento: La reprogramación de junio a septiembre de 2026 resultó acertada, permitiendo al personal judicial realizar simulaciones de audiencias en vivo y perfeccionar el manejo de la tecnología antes del arranque formal.

Propuestas

Capacitación Continua para Litigantes: Extender las simulaciones y capacitaciones que se imparten al personal judicial hacia las barras y colegios de abogados de San Juan del Río, asegurando un desempeño óptimo en la litigación oral.

Mecanismos de Evaluación Post-Apertura: Implementar un sistema de indicadores a partir de septiembre de 2026 para medir tiempos promedio de resolución, satisfacción ciudadana y efectividad de las audiencias preliminares.

Vinculación Academia-Poder Judicial: Consolidar convenios entre la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y el Poder Judicial para realizar observaciones de audiencias reales y promover estancias de investigación jurídica.

Referencias

- Altamirano Sánchez, G. del R., Pérez Estrada, L. C., Altamirano Castañeda, R. L., & Pérez Estrada, M. del C. (2026). La justicia probatoria en el Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares. *Revista Electrónica del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la Universidad Veracruzana*, (13).
- Aude Díaz, R., & García Villegas, J. E. (2026). Juicios orales en México y el Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2023). Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares. *Diario Oficial de la Federación*.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2026). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Márquez, U. (2026). Regulación legal, constitucional y convencional de los principios y reglas que operan en el nuevo sistema de justicia civil y familiar. *Universos Jurídicos. Revista de Derecho Público y Diálogo Multidisciplinar*, 14(26), 25–42.
- Perfiles de las Ciencias Sociales. (2025). El ejercicio de la abogacía en materia de derechos de niñas, niños y adolescentes en el Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares: retos y

diferenciaciones en la especialización. Perfiles de las Ciencias Sociales, 12(24). DOI: 10.19136/pcs.a12n24.6605.

- Poder Judicial del Estado de Querétaro. (2025). Inician remodelación en Ciudad Judicial San Juan del Río para la oralidad civil y familiar. Reportaje institucional.
- Poder Judicial del Estado de Querétaro. (2026). Acuerdo ACJ-2/2026 del Consejo de la Judicatura del Poder Judicial del Estado de Querétaro: Plan General de Implementación en San Juan del Río.
- Reyes Zárate, Y. (2025). Procedimientos Civiles Especiales en el Código de Procedimientos Civiles para el Estado de Guanajuato, frente a los Procedimientos Especiales en el Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares. Facultad de Derecho, Criminología y Gobernanza, Universidad La Salle Bajío.
- Urbina Rodríguez, S. J. (2026). Las audiencias preliminares en el Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares. Perfiles de las Ciencias Sociales, 13(25). DOI: 10.19136/pcs.a13n25.6688.
- Venta Santos, A. (2025). Crítica propositiva sobre el nuevo Código Nacional de Procedimientos Civiles y Familiares. Perfiles de las Ciencias Sociales, 13(37).
- (2025). Análisis del artículo 666 del nuevo Código de Procedimientos Civiles y Familiares mexicano en relación con los procesos de carácter internacional sobre niñas, niños y adolescentes.