CIENCIA CONECTADA

UPTLAX
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE TLAXCALA



DIRECTORIO

Lic. Lorena Cuellar Cisneros
Gobernadora del Estado de Tlaxcala

Dr. José Alonso Trujillo Domínguez
Secretario de Educación Pública del Estado de Tlaxcala

Mtra. y D.H.C. Rosalía Nalleli Pérez Estrada, Rectora
Rectora de la Universidad Politécnica de Tlaxcala.

Mtro. Jorge Arturo Cuatepotzo Sánchez
Secretario Académico de la Universidad Politécnica de Tlaxcala

Dr. Jacobo Tolamatl Michcol
Director de Investigación y Posgrado de la Universidad Politécnica de Tlaxcala

Mtro. Carlos David Moctezuma Ortiz
Director del Programa Educativo de Ingeniería Financiera de la de la Universidad Politécnica de Tlaxcala

Editor en Jefe
Dr. Román Torres Romero
Profesor Tiempo Completo de la Universidad Politécnica de Tlaxcala

Co-Editora en Jefe
Dra. Lilia Sánchez Minutti
Profesora Tiempo Completo de la Universidad Politécnica de Tlaxcala

Editores
Dr. Cesar Saldaña Carro
Dr. Juan Crescenciano Cruz Victoria
Profesores Tiempo Completo de la Universidad Politécnica de Tlaxcala

Ciencia Conectada. Año 1, núm. 1, Julio-Diciembre 2026, es una publicación semestral editada por la Universidad Politécnica de Tlaxcala, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado. Av. Universidad Politécnica No. 1, San Perdo Xalcatzinco, 90180, Tepeyanco, Tlaxcala, México. Teléfono 246 465 1300

Página electrónica de la revista:
https://uptlax.edu.mx/ciencia-conectada-2/
Correo electrónico: revista.cientifica@uptlax.edu.mx

Editor responsable: Dr. Roman Torres Romero. Co-editora: Dra. Lilia Sánchez Minutti. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo **No. 04-2026-092317043900-102**, ISSN: **(en trámite)** — ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número: Dra. Lilia Sánchez Minutti, Av. Universidad Politécnica No. 1, San Perdo Xalcatzinco, 90180, Tepeyanco, Tlaxcala, México. Fecha de última modificación: 5 de noviembre de 2026. Tamaño del archivo: 3072 KB.



CIENCIA CONECTADA

Ciencia Conectada es una revista multidisciplinaria de ciencia y tecnología cuya publicación es editada por la Universidad Politécnica de Tlaxcala, México. Fue creada en 2025 con el objetivo de proporcionar una plataforma académica de alto impacto para la publicación de investigaciones originales y de revisión en diversas disciplinas, que promuevan el intercambio de conocimiento, colaboración interdisciplinaria y contribuya al avance científico y tecnológico a nivel nacional e internacional.

La publicación de los artículos es gratuita y en formato electrónico y los manuscritos pueden ser enviados y revisados en cualquier momento para su publicación y formarán parte de un volumen semestral.

Todos los manuscritos sometidos a publicación son sometidos a un proceso de revisión por pares doble ciego para asegurar la imparcialidad y la calidad científica del contenido. La revista publica artículos de investigación: originales y de revisión. os artículos de revisión se realizan bajo invitación del comité editorial. Los manuscritos son aceptados en el idioma español o inglés.



Índice

Página

Comparación metabólica y de expresión entre Pichia pastoris y Hansenula polymorpha para la producción funcional de proteínas virales del dengue
Maza Lara, E y Márquez Domínguez, L…….. 1

Actividad antioxidante del micelio y cuerpo fructífero de *Pleurotus djamor* crecido sobre diferentes sustratos
Cardona-Pérez, DM, Téllez-Téllez, M, Acosta-Urdapilleta ML, Ortiz-Caltempa A, Miranda-Labra RU, Castro-Bustos D, Aguilar-Marcelino L……. 15

Modeling and control of a pneumatic levitator, from the process to plant control
Castro-Ramírez J, Ramírez-Vasquez JF, González-Cortés HM…….. 28

Panorama general de las Micro y Pequeñas Empresas (Mypes) en la zona metropolita Tlaxcala-Apizaco
Delgado Serrano, VE, Arenas Muñoz, A, Suárez González, G……. 41

Expansión urbana y Vulnerabilidad social del municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala
Arenas-Muñoz, A, Delgado-Serrano, VE…….. 65

CIENCIA CONECTADA

Ciencia Conectada (2026) Volumen 1, 1-14
https://uptlax.edu.mx/ciencia-conectada-2/



Comparación metabólica y de expresión entre *Pichia pastoris y Hansenula polymorpha* para la producción funcional de proteínas virales del dengue

Maza Lara, E[1] y Márquez Domínguez, L[2*]

[1]Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Posgrado en Biotecnología, Puebla, Puebla, México, 72410.

[2]Centro de Investigación Biomédica de Oriente, Instituto Mexicano del Seguro Social. Laboratorio de Virología. Metepec, Puebla, México, 74360.

Correspondencia:
*Márquez Domínguez, L.
lumardo80@gmail.com

Abstract

Dengue virus (DENV), a member of the Flavivirus genus, is transmitted by Aedes mosquitoes and causes a range of clinical manifestations, from mild fever to severe forms such as dengue shock syndrome (DSS). The virus has four serotypes (DENV-1, DENV-2, DENV-3, and DENV-4), each with distinct genetic characteristics that contribute to variability in immune response and complications during secondary infections. The yeast systems *Pichia pastoris* and *Hansenula polymorpha* have shown promise in the recombinant expression of viral proteins, such as the pre-membrane (prM) and membrane (M) proteins, which are essential for viral assembly and maturation. These yeast-based platforms provide a valuable tool for producing functional viral proteins needed for the development of diagnostics, therapies, and vaccines. This article analyzes the role of prM and M proteins in the dengue replication cycle and reviews the application of expression systems for these proteins, considering key aspects such as the metabolic pathways involved in protein synthesis, the use of inducible promoters, post-translational modifications especially glycosylation and the comparison of their treatment as structural viral proteins versus secondary metabolites in *Pichia pastoris* and *Hansenula polymorpha*. The potential of recombinant proteins derived from these systems is also highlighted for the development of antiviral drugs and their use in diagnostic assays, emphasizing their contribution to understanding DENV pathogenesis and prevention strategies.

Key words: Dengue virus, *Pichia pastoris*, *Hansenula polymorpha*, yeast expression system prM y M



Resumen

El virus del dengue (DENV), miembro del género *Flavivirus*, es transmitido por mosquitos *Aedes* y causa una variedad de manifestaciones clínicas, desde fiebre leve hasta formas graves como el síndrome de shock por dengue (DSS). El virus tiene cuatro serotipos (DENV-1, DENV-2, DENV-3, y DENV-4), cada uno con características genéticas distintas que conibuyen a la variabilidad en la respuesta inmune y a las complicaciones durante infecciones secundarias. Los sistemas de levadura *Pichia pastoris* y *Hansenula polymorpha* han mostrado ser prometedores en la expresión recombinante de proteínas virales, como las proteínas pre-membrana (prM) y membrana (M), esenciales para la ensamblaje y maduración viral. Estas plataformas basadas en levadura ofrecen una herramienta valiosa para producir proteínas virales funcionales necesarias para el desarrollo de diagnósticos, terapias y vacunas. En este artículo, se analiza el papel de las proteínas prM y M en el ciclo de replicación del dengue y se revisa la aplicación de sistemas de expresión de estas proteínas, considerando aspectos clave como las rutas metabólicas involucradas en la síntesis de proteínas, el uso de promotores inducibles, las modificaciones postraduccionales, especialmente la glicosilación y la comparación entre su tratamiento como proteínas estructurales de origen viral frente a metabolitos secundarios en *Pichia pastoris* y *Hansenula polymorpha*. También se destaca el potencial de las proteínas recombinantes derivadas de estos sistemas para el desarrollo de medicamentos antivirales y su uso en ensayos diagnósticos, subrayando su contribución a la comprensión de la patogénesis del DENV y las estrategias de prevención.

Palabras clave: Virus del dengue, *Pichia pastoris, Hansenula polymorpha*, expresión recombinante, prM y M

Introducción

Las levaduras metilotróficas, particularmente *Pichia pastoris* y *Hansenula polymorpha*, tienen la capacidad de utilizar el metanol como única fuente de carbono y energía, lo cual constituye una de sus principales ventajas biotecnológicas, este proceso comienza con la oxidación del metanol en el peroxisoma por la acción de la enzima alcohol oxidasa (AOX), generaron formaldehído y peróxido de hidrógeno, el formaldehído puede ser canalizado hacia dos rutas principales, la vía disimilatoria, que lo convierte en dióxido de carbono para la obtención de energía, y la vía asimilatoria, que lo incorpora a intermediarios del ciclo de Calvin o de la ruta de la xilulosa monofosfato para la biosíntesis celular, esta flexibilidad metabólica no solo permite el crecimiento eficiente en condiciones limitadas (Klepach *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2010). También se han consolidado

como plataformas clave para la producción de proteínas recombinantes de interés industrial, farmacéutico y médico (Ganeva & Kranz, 2023; Karbalaei *et al.*, 2020). Su capacidad para realizar modificaciones postraduccionales similares a las células eucariotas superiores, su rápido crecimiento y la facilidad para su cultivo y manipulación genética. Estas características las posicionan como sistemas de expresión preferidos frente a bacterias como *Escherichia coli* y representan una alternativa más económica y escalable que utilizar células de mamífero (Cereghino & Cregg, 2000, Ahmad *et al.*, 2014). No obstante, optimizar la producción recombinante en estos sistemas exige una comprensión detallada de su fisiología, metabolismo central y respuestas celulares frente a la carga proteica (Baghban *et al.*, 2019). La elección entre *P. pastoris y H. polymorpha* puede depender de factores como la eficiencia de la secreción, la estabilidad del plásmido, la tolerancia al metanol, los perfiles de glicosilación y la adaptación a distintas condiciones de cultivo.

En este artículo se revisan las características generales de *Pichia pastoris* y *Hansenula polymorpha* como sistemas de expresión heteróloga con el objetivo de evaluar cuál de estas levaduras podría ofrecer mejores ventajas para la producción funcional de las proteínas estructurales prM y M del virus del dengue, cuya correcta expresión es esencial para estudios de ensamblaje viral, desarrollo de vacunas y diseño de antivirales.

Dengue

El dengue es una enfermedad viral que genera un síndrome febril, transmitida por mosquitos del género *Aedes*, particularmente *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*, constituyendo un problema de salud pública (B.A. Seixas *et al.*, 2024). Se estima que más de 400 millones de infecciones ocurren cada año a nivel mundial, afectando principalmente a regiones tropicales y subtropicales con limitaciones en infraestructura sanitaria (Rehman *et al.*, 2024).

Aunque la mayoría de los casos son leves, con síntomas como fiebre, mialgia, artralgia, náuseas y exantema (Figura 1), ciertos grupos vulnerables como niños menores de un año, personas mayores con enfermedades crónicas y mujeres embarazadas, presentan mayor riesgo de desarrollar formas graves de la enfermedad (Lin *et al.*, 2018). Un factor importante en la progresión clínica de dengue es la potenciación mediada por anticuerpos (ADE, por sus siglas en ingles de A*ntibody-Dependent Enhancement*), fenómeno en el que anticuerpos generados tras una infección primaria por un serotipo viral facilita la entrada de un serotipo distinto en las células hospederas, lo que incrementa la viremia y la respuesta inflamatoria severa (Sarker *et al.*, 2023).

En este contexto, las proteínas estructurales prM (precursor de la proteína de membrana) y M (proteína de membrana) del virus de dengue desempeñan un papel esencial en el ensamblaje del virión y en el proceso de maduración viral. Por ello, la producción

eficiente de estas proteínas virales mediante sistemas recombinantes en levaduras metilotróficas representa una estrategia prometedora para el desarrollo de vacunas y estudios de ensamblaje viral (Rodenhuis-Zybert *et al.*, 2010, Thomas & Endy, 2011).

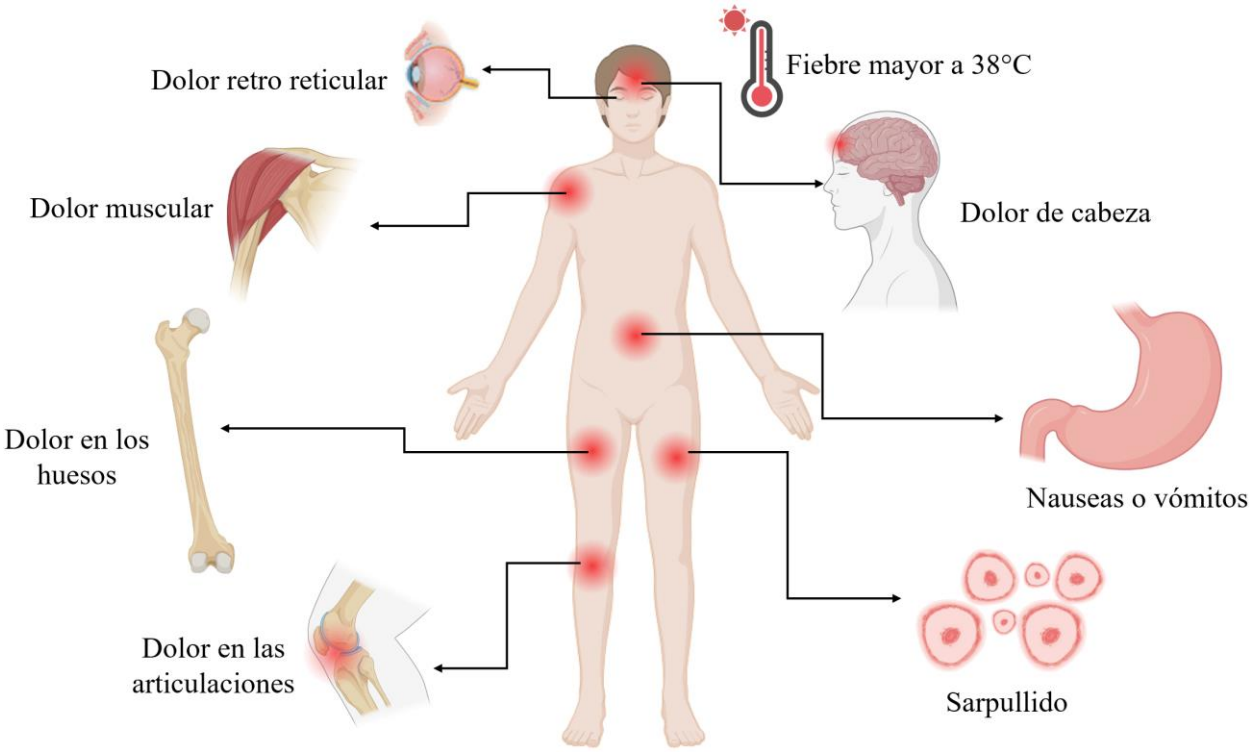


Figura 1. Manifestaciones clínicas de la infección por dengue.

Creado con Biorender.com

Características generales de las levaduras

Pichia pastoris

Es una levadura metilotrófica del filo Ascomycota, ampliamente utilizada como sistema de expresión de proteínas recombinantes en aplicaciones industriales, farmacéuticas y de investigación (Barone *et al.*, 2023). Su principal ventaja radica en la capacidad de utilizar metanol como única fuente de carbono y energía, los cual esta mediado por el promotor AOX1, altamente inducible por metanol. Este promotor regula la expresión de la enzima alcohol oxidasa (AOX), que participa en la oxidación del metanol y cuya actividad permite la transcripción eficiente de genes heterólogos. Como resultado, *P. pastoris* puede alcanzar niveles elevados de expresión proteica sin afectar significativamente su metabolismo central (Kielkopf et al., 2021). Otra característica relevante es su capacidad de realizar

modificaciones postraduccionales como la glicosilación y el plegamiento adecuado de proteínas. No obstante, su patrón de N-glicosilación difiere del humano, tendiendo a producir glicanos de tipo hipermaniado lo que puede ser un factor por considerar en la producción de proteínas virales para aplicaciones inmunológicas (Wang et al., 2022). Estas propiedades hacen de *P. pastoris* una plataforma prometedora para la expresión de proteínas del virus de dengue.

Hansenula polymorpha

Hansenula polymorpha (también conocida como *Ogataea polymorpha)* es otra levadura metilotrófica del filo Ascomycota, reconocida por su capacidad de metabolizar metanol y otras fuentes de carbono alternativas como glucosa, glicerol y etanol (Manfrao-Netto *et al.*, 2019). Su notable robustez fisiológica, estabilidad genética y capacidad de crecimiento a temperaturas elevadas (hasta 48°C) la convierten en una plataforma emergente para la producción de proteínas recombinantes (Manfrao-Netto *et al.*, 2021). Esta termotolerancia es particularmente útil para facilitar el plegamiento correcto de proteína termolábiles, como las de origen viral.

H. polymorpha expresa un conjunto de enzimas específicas para el metabolismo del metanol, entre ellas la metanol oxidasa (MOX) y la formaldehído deshidrogenasa (FMD), cuyos promotores son utilizados para inducir la expresión de genes heterólogos de manera eficiente (Genu et al., 2003). Además, cuenta con un sistema de transformación altamente efectivo, que permite la integración estable de los genes de interés en su genoma. Su patrón de glicosilación es menos extenso que el de otras levaduras como *P. pastoris*, lo que podría representar una ventaja de expresión de proteínas virales que requieren un patrón de glicosilación más cercano al humano.

Ambas levaduras presentan ventajas distintas para la producción de proteínas recombinantes. Mientras *P. pastoris* ofrece altos niveles de expresión bajo control del promotor AOX1, *H. polymorpha* destaca por su termotolerancia y menor hiperglicosilación, características que podrían favorecer la expresión de proteínas virales como prM y M con una conformación más cercana a la nativa.

Métodos

Esta investigación se llevó a cabo mediante una revisión documental centrada en artículos científicos disponibles en la base de datos de PubMed. Se seleccionaron publicaciones entre los años 2000 y 2024 que abordaran aspectos metabólicos, fisiológicos y aplicados de *Pichia pastoris* y *Hansenula polymorpha* como sistemas de expresión de proteínas recombinantes. Los criterios de inclusión fueron: acceso al texto completo, revisión por pares y relevancia temática directa con la expresión de proteínas virales, metabolismo del metanol, y estrés oxidativo. Se priorizaron aquellos estudios con enfoque en la expresión de proteínas virales, metabolismo del metanol y



mecanismos relacionados con el estrés oxidativo. La información recopilada fue analizada de forma crítica y sintetizada para identificar tendencias, avances y vacíos en el conocimiento actual.

Resultados

Metabolismo y expresión proteica

El rendimiento en la expresión de proteínas heterólogas en levaduras metilotróficas depende en gran medida del estado metabólico de la célula, particularmente del metabolismo de carbono, la capacidad oxidativa y el equilibrio redox (Zhang *et al.*, 2022). Tanto *P. pastoris* como *H. polymorpha* metabolizan el metanol a través de rutas específicas, que no solo le permiten utilizarlo como fuente de energía, sino también inducir la expresión de genes bajo promotores metanol-regulados (Brunner *et al.*, 2020, Suppi *et al.*, 2013).

El proceso del metabolismo del metanol en *P. pastoris* comienza con la entrada del metanol a la célula, seguido por su oxidación a formaldehído mediante la acción de la alcohol oxidasa (AOX), es una enzima abundante localizada en los peroxisomas, esta reacción genera peróxido de hidrógeno como subproducto, una especie reactiva que debe ser degradada por catalasas para evitar el daño celular, parte del formaldehído se canaliza hacia la vía de asimilación, donde se incorpora al ciclo del xilulosa monofosfato para la generación de intermediarios metabólicos y energía, el resto se oxida a dióxido de carbono a través de la vía disimilatoria, contribuyendo a la generación de NADH. Todo este proceso implica una alta demanda de oxígeno y un control estricto del balance redox, ya que el exceso de especies reactivas de oxígeno puede inducir estrés oxidativo. Durante este metabolismo, la célula genera ATP, NADH y compuestos precursores necesarios para la síntesis y modificación postraduccional de proteínas, pero el ambiente oxidativo puede afectar negativamente el plegamiento correcto y la eficiencia de secreción de proteínas recombinantes, representando un desafío importante en procesos de producción a gran escala (Cereghino & Cregg, 2000).

En contraste con *P. pastori*, *H. polymorpha* presenta una actividad peroxisomal más moderada durante la metabolización del metanol, lo que se asocia con una menor producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Esta levadura utiliza la enzima metanol oxidasa (MOX), cuya expresión está regulada por el promotor MOX, pero a diferencia del sistema AOX1 de *P. pastori*, no requiere niveles tan elevados de transcripción para lograr una expresión funcional de proteínas recombinantes, esta menor exigencia oxidativa contribuye a un ambiente intracelular más estable desde el punto de vista redox, reduciendo el riesgo de estrés oxidativo y favoreciendo un plegamiento más eficiente de las proteínas (Suppi *et al.*, 2013)

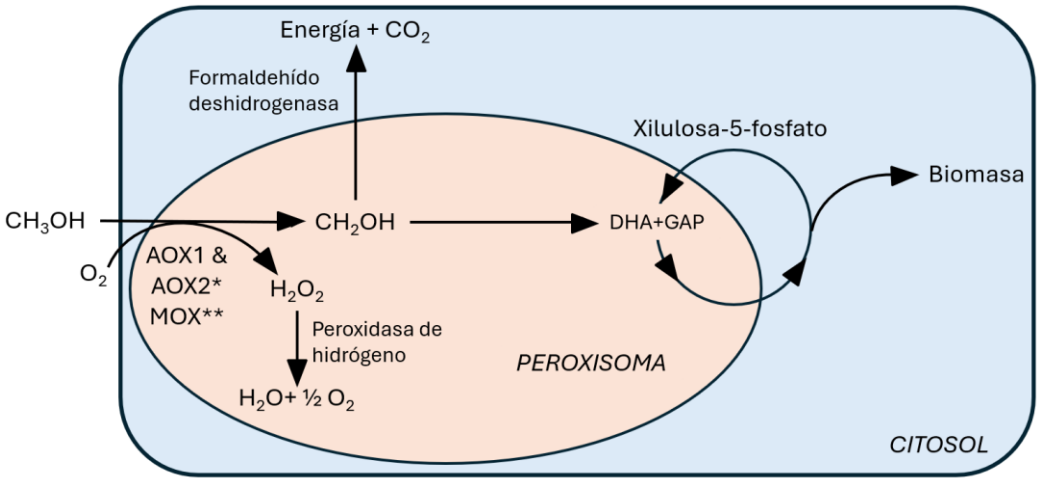


Figura 2. Metabolismo del metanol *Pichia pastoris* y *Hansenula polymorpha. Imagen modificada de Ali N. et al., 2020.* **Pichia pastoris*; ***Hansenula polymorpha*

Además *H. polymorpha* es capaz de crecer a temperaturas más altas y presenta una cinética metabólica más gradual, lo que puede beneficiar la estabilidad estructural de proteínas sensibles. Esta flexibilidad puede ser ventajosa al escalar procesos industriales para proteínas como prM y M del virus del dengue, cuyo correcto plegamiento y ensamblaje dependen tanto de la disponibilidad energética como del mantenimiento de condiciones redox favorables (Wang *et al.*, 2009).

La estrecha relación entre el metabolismo del metanol y la maquinaria de expresión heteróloga constituye un factor determinante en la elección de la levadura hospedadora para la producción de proteínas recombinantes. Tanto en *P. pastoris* como en *H. polymorpha*, el diseño adecuado de las condiciones de cultivo es esencial para alcanzar una expresión eficiente y funcional. La optimización del régimen de alimentación con metanol incluyendo la concentración, el tiempo, y la tasa de adición, así como una adecuada aireación y monitoreo del oxígeno disuelto, son fundamentales para sostener la actividad oxidativa sin inducir niveles perjudiciales de estrés oxidativo, como el uso de antioxidantes o la ingeniería de cepas más tolerantes, puede mejorar significativamente la calidad del producto final (van Zutphen *et al.*, 2010).

Aunque los estudios directos sobre la expresión diferencial de las proteínas virales prM y M en *P. pastoris* y *H. polymorpha* son escasos, es posible anticipar ciertas variaciones en su eficiencia de producción a partir de las características metabólicas de cada



hospedador. En *P. pastoris*, el alto flujo de metanol necesario para inducir el promotor AOX1 puede generar condiciones de estrés oxidativo que afecten negativamente el plegamiento y la estabilidad de proteínas estructurales como prM y M, que son sensibles al entorno redox y requieren un procesamiento adecuado en el retículo endoplasmático (Singh & Narang, 2020).

En cambio *H. polymorpha*, con su menor actividad peroxisomal y menor acumulación de ROS, puede ofrecer un ambiente intracelular más favorable para el ensamblaje y maduración de estas proteínas, la flexibilidad metabólica de *H. polymorpha* también permite una inducción más suave y sostenida, lo que podría favorecer una expresión más continua y funcional de proteínas recombinantes complejas (Ozimek *et al.*, 2004). Estas diferencias sugieren que la selección de condiciones de cultivo específicas como el régimen de metanol, la oxigenación y el manejo del estrés celular podría tener un impacto significativo en la calidad y el rendimiento de proteínas virales expresadas en cada sistema (Manfrao-Netto *et al.*, 2019).

Implicaciones para las proteínas prM y M

Aunque no se encontraron estudios que evalúen directamente la expresión de prM y M del virus del dengue en estos sistemas, los datos recopilados permiten inferir que su correcta producción dependería fuertemente del control del estrés oxidativo y de una inducción metabólica moderada. Las características fisiológicas de *H. polymorpha* podrían favorecer una mejor eficiencia de expresión y secreción de estas proteínas, especialmente en contextos industriales donde se requiere robustez y estabilidad del sistema.

Discusión

La comparación entre *P. pastoris y H. polymorpha* como sistemas de expresión para proteínas virales, como prM y M del virus del dengue, revela diferencias metabólicas y fisiológicas que influyen directamente en la eficiencia de producción y calidad de las proteínas recombinantes. *P. pastoris* ha sido ampliamente utilizada debido a su capacidad de alcanzar altos niveles de expresión bajo el control del promotor AOX1, inducido por metanol. No obstante, esta vía de expresión está estrechamente relacionada con una intensa actividad oxidativa en los peroxisomas, lo que incrementa la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y puede comprometer el correcto plegamiento y secreción de las proteínas heterólogas (Ahmad *et al.*, 2014; Karbalaei *et al.*, 2020). Esto es particularmente relevante para proteínas como prM y M, que requieren un ambiente redox equilibrado para mantener su conformación funcional (Rodenhuis-Zybert *et al.*, 2010). En contraste, *H. polymorpha* muestra una regulación más flexible del metabolismo del metanol y una actividad peroxisomal más moderada, lo que



Tabla 1. Comparación de sistemas de expresión y metabolismo en *Pichia pastoris* y *Hansenula polymorpha*

Levadura	Promotores principales	Uso de metanol / vía energética	Características destacadas	Referencias
P. pastoris	AOX1, GAP, TEF	Oxidación de metanol → formaldehído → formiato → CO_2	Alta inducción con metanol, sistema robusto adaptable a cultivo industrial.	Ahmad *et al.*, 2014; Barone *et al.*, 2023
			Optimización genética mejora la producción.	Singh & Narang, 2021
			Represión por hexosas vía Hxt1 y PpHxt1; papel del transporte de glucosa.	Zhang *et al.*, 2010
H. polymorpha	MOX, FMD, MPP1, MAL1	Crecimiento eficiente con metanol; MOX inducido por metanol; regulación dependiente de fosforilación	Sistema versátil, menos estudiado que *P. pastoris*, pero adaptable a bioprocesos.	Genu et al., 2003; Manfrao-Netto et al., 2019
			Expresión coordinada de genes peroxisomales; adaptación transcripcional al uso de metanol.	van Zutphen et al., 2010; Suppi et al., 2013
Ambas	AOX1, GAP, MOX, FMD	Uso eficiente de metanol	Diferencias contextuales según proteína objetivo; ventajas distintas según la levadura y condiciones.	Baghban et al., 2019

resulta en menores niveles de estrés oxidativo (Genu *et al.*, 2003; Manfrao-Netto *et al.*, 2019). Esta característica podría conferir ventajas al escalar procesos industriales, al minimizar la acumulación de proteínas mal plegadas y reducir la necesidad de condiciones estrictamente controladas para la aireación y alimentación con metanol. Además, se ha demostrado que esta levadura puede expresar de manera eficiente proteínas complejas,

incluso con modificaciones postraduccionales importantes (Ganeva & Kranz, 2023). Los resultados recopilados refuerzan la importancia de considerar no solo el nivel de expresión, sino también la calidad estructural y funcional de las proteínas obtenidas como se observa en la Tabla 1. Como indicaron Barone *et al.* (2023), la optimización de parámetros como la temperatura, la tasa de alimentación con metanol y la oxigenación son críticos para maximizar el rendimiento sin comprometer la integridad proteica. En este sentido, la elección del sistema hospedador debe alinearse con las características bioquímicas de la proteína objetivo, así como con la finalidad del producto (diagnóstico, vacuna o terapia).

Finalmente, si bien ambos sistemas presentan ventajas particulares, la relación entre el metabolismo del metanol, la respuesta al estrés oxidativo y la eficiencia de la maquinaria de plegamiento celular emerge como un eje decisivo para la producción funcional de proteínas del dengue, lo que abre la puerta a estudios comparativos más profundos para ajustar estrategias de cultivo y expresión según la proteína viral de interés (Baghban *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2022).

Conclusión

Las levaduras metilotróficas *P. pastoris* y *H. polymorpha* representan plataformas versátiles y eficientes para la producción de proteínas recombinantes, incluyendo antígenos virales de relevancia como las proteínas prM y M del virus del dengue. Si bien *P. pastoris* destaca por sus altos niveles de expresión bajo el promotor AOX1, su metabolismo altamente oxidativo implica un mayor riesgo de estrés intracelular, lo que puede comprometer el correcto plegamiento de proteínas sensibles. En contraste *H. polymorpha* ofrece una alternativa con menores niveles de estrés oxidativo, mayor estabilidad fisiológica y una inducción más gradual, condiciones que podrían favorecer la expresión funcional y estructuralmente adecuada de proteínas virales complejas. La elección entre uno u otro sistema debe considerar no solo el rendimiento en términos de cantidad, sino también la calidad estructural y conformacional del producto expresado. En este sentido *H. polymorpha* emerge como una opción prometedora para aplicaciones que requieren un ambiente redox más controlado, como es el caso de las proteínas estructurales del dengue. Estudios comparativos experimentales futuros serán esenciales para validar estas observaciones teóricas y optimizar las condiciones de producción a escala industrial.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de interés.

Bibliografía

Ali, N., Zhang, Q., Liu, ZY., Li, FL., Lu, M. & Fang, XC. (2020). Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic materials for bio-based products. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 455-473. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10158-w

Ahmad, M., Hirz, M., Pichler, H. & Schwab, H. (2014). Protein expression in *Pichia pastoris*: recent achievements and perspectives for heterologous protein production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *98*(12), 5301-5317. https://doi.org/10.1007/s00253-014-5732-5

Baghban, R., Farajnia, S., Rajabibazl, M., Ghasemi, Y., Mafi, A., Hoseinpoor, R., Rahbarnia, L. & Aria, M. (2019). Yeast expression systems: overview and recent advances. *Molecular Biotechnology*, *61*(5), 365-384. https://doi.org/10.1007/s12033-019-00164-8

Barone, G. D., Emmerstorfer-Augustin, A., Biundo, A., Pisano, I., Coccetti, P., Mapelli, V. & Camattari, A. (2023). Industrial production of proteins with *Pichia pastoris-Komagataella phaffii*. *Biomolecules*, *13*(3), 441 . https://doi.org/10.3390/biom13030441

B.A. Seixas, J., Giovanni Luz, K., & Pinto Junior, V. (2024). [Clinical Update on Diagnosis, Treatment and Prevention of Dengue]. *Acta Med Port*, *37*(2), 126-135. https://doi.org/10.20344/amp.20569

Brunner, V., Siegl, M., Geier, D. & Becker, T. (2020). Biomass soft sensor for a *Pichia pastoris* fed-batch process based on phase detection and hybrid modeling.. *Biotechnology and bioengineering*, *117*(9), 2749-2759. https://doi.org/10.1002/bit.27454

Cereghino, JL. & Cregg, JM. (2000). Heterologous protein expression in the methylotrophic yeast *Pichia pastoris*. *FEMS Microbiology Reviews*, *24*(1), 45-66. https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2000.tb00532.x

Ganeva, V. & Kranz, A. (2023). Selective extraction of recombinant membrane proteins from *Hansenula polymorpha* by pulsed electric field and lytic enzyme pretreatment. *Microbial cell factories*, *22*(1), 251. https://doi.org/10.1186/s12934-023-02259-z

Genu, V., Godecke, S., Hollenberg, CP. & Pereira, GG. (2003). The *Hansenula polymorpha* MOX gene presents two alternative transcription start points differentially utilized and sensitive to respiratory activity. *European journal of biochemistry*, *270*(11), 2467-2475. https://doi.org/10.1046/j.1432-1033.2003.03618.x

Karbalaei, M., Rezaee, SA. & Farsiani, H. (2020). *Pichia pastoris*: A highly successful expression system for optimal synthesis of heterologous proteins. *Journal of cellular physiology, 235*(9), 5867-5881. https://doi.org/10.1002/jcp.29583

Kielkopf, CL., Bauer, W. & Urbatsch, I. L. (2021). Expression of cloned genes in *Pichia pastoris* using the methanol-inducible promoter AOX1. *Cold Spring Harbor Protocols*, *2021*(1), pdb-prot102160. https://doi.org/10.1101/pdb.prot102160

Klepach, HM., Zakalskiy, AE., Zakalska, OM., Gayda, GZ., Smutok, OV. & Gonchar, M. V. (2021). Alcohol oxidase from the methylotrophic yeast *Ogataea polymorpha*: Isolation, purification, and bioanalytical application. *Flavins and Flavoproteins: Methods and Protocols*, *2280*, 231-248. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1286-6_15

Lin, GL., McGinley, JP., Drysdale, SB. & Pollard, AJ. (2018). Epidemiology and immune pathogenesis of viral sepsis. *Frontiers in immunology*, *9*, 2147. https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.02147

Manfrao-Netto, JHC., Gomes, AMV. & Parachin, NS. (2019). Advances in using *Hansenula polymorpha* as chassis for recombinant protein production. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, *7*, 94. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00094

Manfrao-Netto, JHC., Queiroz, EB., Rodrigues, KA., Coelho, CM., Paes, HC., Rech, EL. & Parachin, NS. (2021). Evaluation of *Ogataea* (Hansenula) *polymorpha* for hyaluronic acid production. *Microorganisms*, *9*(2) 312. https://doi.org/10.3390/microorganisms9020312

Ozimek, P., Lahtchev, K., Kiel, JA., Veenhuis, M. & van der Klei, IJ. (2004). *Hansenula polymorpha* Swi1p and Snf2p are essential for methanol utilisation. *FEMS yeast research*, *4*(7), 673-682. https://doi.org/10.1016/j.femsyr.2004.01.009



Rehman, B., Ahmed, A., Khan, S., Saleem, N., Naseer, F. & Ahmad, S. (2024). Exploring plant-based dengue therapeutics: from laboratory to clinic. *Tropical Diseases, Travel Medicine and Vaccines*, *10*(1), 23. https://doi.org/10.1186/s40794-024-00232-1

Rodenhuis-Zybert, IA., Wilschut, J. & Smit, JM. (2010). Dengue virus life cycle: viral and host factors modulating infectivity. *Cellular and molecular life sciences*, *67*(16), 2773-2786. https://doi.org/10.1007/s00018-010-0357-z

Sarker, A., Dhama, N. & Gupta, RD. (2023). Dengue virus neutralizing antibody: a review of targets, cross-reactivity, and antibody-dependent enhancement. *Frontiers in Immunology*, *14*, 1200195. https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1200195

Singh, A. & Narang, A. (2020). The Mut^{+} strain of *Komagataella phaffii* (*Pichia pastoris*) expresses P_{AOX1} 5 and 10 times faster than Mut^{s} and Mut^{-} strains: evidence that formaldehyde or/and formate are true inducers of P_{AOX1}. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *104*(18), 7801-7814. https://doi.org/10.1007/s00253-020-10793-8

Suppi, S., Michelson, T., Viigand, K. & Alamae, T. (2013). Repression vs. activation of MOX, FMD, MPP1 and MAL1 promoters by sugars in *Hansenula polymorpha*: the outcome depends on cell's ability to phosphorylate sugar. *FEMS Yeast Research*, *13*(2), 219-232. https://doi.org/10.1111/1567-1364.12023

Thomas, SJ. & Endy, TP. (2011). Critical issues in dengue vaccine development. *Current opinion in infectious diseases*, *24*(5), 442-450. https://doi.org/10.1097/QCO.0b013e32834a1b0b

van Zutphen, T., Baerends, RJ., Susanna, KA., de Jong, A., Kuipers, OP., Veenhuis, M. & van der Klei, IJ. (2010). Adaptation of Hansenula polymorpha to methanol: a transcriptome analysis. *BMC Genomics*, *11*, 1-12. https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-1

Wang, N., Yang, C., Peng, H., Guo, W., Wang, M., Li, G. & Liu, D. (2022). The introduction of an N-glycosylation site into prochymosin greatly enhances its production and secretion by *Pichia pastoris*. *Microbial Cell Factories*, *21*(1), 177. https://doi.org/10.1186/s12934-022-01904-3

Wang, PG., Kudelko, M., Lo, J., Siu, LY., Kwok, KT., Sachse, M., Nicholls, JM., Bruzzone, R., Altmeyer, RM. & Nal, B. (2009). Efficient assembly and secretion of recombinant subviral particles of the four dengue serotypes using native prM and E proteins. *PLoS One*, *4*(12), e8325. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008325

Zhang, P., Zhang, W., Zhou, X., Bai, P., Cregg, J. M. & Zhang, Y. (2010). Catabolite repression of Aox in *Pichia pastoris* is dependent on hexose transporter PpHxt1 and pexophagy. *Applied and Environmental Microbiology*, *76*(18), 6108-6118. https://doi.org/10.1128/AEM.00607-10

Zhang, Q., Wang, X., Luo, H., Wang, Y., Wang, Y., Tu, T., Qin, X., Su, X., Huang, H., Yao, B., Bai, Y. & Zhang, J. (2022). Metabolic engineering of *Pichia pastoris* for myo-inositol production by dynamic regulation of central metabolism. *Microbial Cell Factories*, *21*(1), 112. https://doi.org/10.1186/s12934-022-01837-x

CIENCIA CONECTADA

Ciencia Conectada (2026) Volumen 1, 15-27
https://uptlax.edu.mx/ciencia-conectada-2/



Actividad antioxidante del micelio y cuerpo fructífero de *Pleurotus djamor* crecido sobre diferentes sustratos

Cardona-Pérez, DM[1], Téllez-Téllez, M[2*], Acosta-Urdapilleta ML[2], Ortiz-Caltempa A[3], Miranda-Labra RU[4], Castro-Bustos D[2], Aguilar-Marcelino L[5]

[1]Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Maestría en Manejo de Recursos Naturales. Centro de Investigaciones Biológicas. Cuernavaca, Morelos, México, CP 62210.

[2]Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Centro de Investigaciones Biológicas. Av. Universidad 1001, Colonia Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México, CP 62210.

[3]Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Centro de Investigación en Biotecnología. Cuernavaca, Morelos, México, CP 62210.

[4]Universidad Autónoma Metropolitana. Departamento de Ciencias de la Salud, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Iztapalapa, Ciudad de México, México, CP 09340 .

[5]INIFAP. CENID-Salud Animal e Inocuidad, Jiutepec, Morelos, Mexico, CP 62550.

Correspondencia:
*Téllez-Téllez M.
maura.tellez@uaem.mx

Abstract

Free radicals are generated in the body due to various factors. Free radicals are generated in the body due to multiple factors related to the lifestyle of each individual. Free radicals are highly reactive and unstable molecules which induce oxidative stress at the cellular level. Additionally, they cause an imbalance in the organism that may lead to the development of chronic and degenerative diseases. Therefore, it is recommended that preventive strategies be implemented to mitigate their effects. In this context, the intake of exogenous antioxidants of natural origin, such as edible mushrooms (both wild and cultivated), represents a significant source of bioactive molecules, such as polyphenols, polysaccharides, vitamins, carotenoids, and minerals, which exhibit antioxidant properties. This study evaluated the antioxidant activity of aqueous extracts from the mycelium and fresh and dehydrated fruiting bodies of *Pleurotus djamor* cultivated on different substrates. In general, substrates in the potato dextrose agar medium promoted mycelial growth. All extracts demonstrated antioxidant activity and total phenolic content, with the highest total phenolic content found in the fresh fruiting bodies and the most significant antioxidant activity observed in the dehydrated fruiting bodies. These findings suggest that *P. djamor* could be a valuable alternative for extracting and using natural antioxidants.

Key words: ABTS radical, DPPH radical, edible mushrooms, polyphenols.



Resumen

En el organismo se generan radicales libres debido a diversos factores, los cuales están relacionados con el estilo de vida de cada individuo, los radicales libres son moléculas altamente reactivas e inestables, lo que provoca estrés oxidativo a nivel celular, además produce un desequilibrio en el organismo que puede dar lugar al desarrollo de enfermedades crónicas y degenerativas, por lo que, se recomienda implementar estrategias preventivas que ayuden a mitigar sus efectos. En este contexto, la ingesta de antioxidantes exógenos de origen natural, como los hongos comestibles, tanto, silvestres como cultivados, constituye una fuente relevante de moléculas bioactivas, tales como polifenoles, polisacáridos, vitaminas, carotenoides y minerales, los cuales presentan propiedades antioxidantes. El objetivo de este estudio fue evaluar la actividad antioxidante de extractos acuosos de micelio y cuerpos fructíferos frescos y deshidratados de *Pleurotus djamor* cultivados en diferentes sustratos. En general la presencia de los sustratos en el medio agar dextrosa papa favoreció el crecimiento micelial, todos los extractos presentaron actividad antioxidante y fenoles totales, siendo mayor el contenido de fenoles totales en los cuerpos fructíferos frescos y en los cuerpos fructíferos deshidratados hubo mayor actividad antioxidante. Estos hallazgos sugieren que *P. djamor* podría ser una alternativa valiosa para la obtención y utilización de antioxidantes naturales.

Palabras clave: hongos comestibles, polifenoles, radical ABTS, radical DPPH

Introducción

El estilo de vida moderno es uno de los principales factores asociados con el aumento de diversas enfermedades a nivel global (Kozarski *et al*., 2015). Un metabolismo desequilibrado puede inducir estrés oxidativo, la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y una serie de trastornos, lo que desempeña un papel crucial en el desarrollo de enfermedades como el cáncer, trastornos cardiovasculares, diabetes, aterosclerosis, enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y Parkinson (Podkowa *et al*., 2021). Una estrategia eficaz para prevenir los efectos del estrés oxidativo es la incorporación de una dieta rica en antioxidantes (Cardwell *et al*., 2018).

Se ha reportado que varios hongos comestibles llegan a presentar más de 100 actividades biológicas, que incluyen propiedades antioxidantes, antiparasitarias, antiinflamatorias, antibacterias, anticancerígenas, antiumorales, anticoagulantes, antidiabéticas y

hepatopotectoras (Ajith and Janardhanan, 2007; Hamza *et al*., 2024). Estas actividades son atribuibles a los compuestos bioactivos que los hongos producen, como polisacáridos, terpenos, péptidos, glicoproteínas, alcoholes, minerales, ácidos grasos insaturados, compuestos fenólicos, tocoferoles y ácido ascórbico, entre otros (Vega *et al*., 2022). Además, se ha documentado que los compuestos antioxidantes en los hongos se encuentran en el micelio, el caldo de cultivo y el cuerpo fructífero, cada uno de estos componentes varía según la especie de hongo (Khatua *et al*., 2013). Entre los hongos comestibles más cultivados a nivel mundial, se encuentra el género *Pleurotus* que ocupa el segundo lugar en términos de producción. Este género es ampliamente reconocido por su sabor, textura y los beneficios que aporta a la salud, siendo comúnmente denominado hongo ostra (Akyüz *et al*., 2023). Una de las especies que es valorada por su color es *P. djamor,* además por sus propiedades nutricionales, medicinales, debido a la presencia de moléculas que se le atribuido alguna actividad biológica (Acharya *et al*., 2017). Por lo que, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de diferentes sustratos lignocelulósicos en el contenido de antioxidantes y compuestos fenólicos en el micelio y el cuerpo fructífero de *P. djamor.*

Métodos

Material biológico

Se utilizó la cepa *Pleurotus djamor* con la clave HEMIM-137 que se encuentra depositada en el Herbario Micológico de Morelos del Laboratorio de Micología del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Caracterización del crecimiento micelial de *Pleurotus djamor*

Se utilizó medio de cultivo agar papa dextrosa (PDA) adicionado con sustratos al 1% (tamaño aproximado de 1 cm) (Tabla 1). El medio de cultivo se inoculó con una rodaja de 4 mm de diámetro del micelio de la cepa HEMIM-137, en el centro de la caja. Una vez sembradas, las cajas Petri se mantuvieron en incubación a 28 °C. Se registraron las características miceliales a los 10 días de crecimiento (Sobal et al. 2007). La velocidad de crecimiento micelial (Vc) se evaluó cada 24 h midiendo el radio de la colonia (mm/h) con un vernier digital (Acosta-Urdapilleta *et al*., 2016).

Obtención de cuerpos fructíferos

Se inoculó granos de trigo (con 50% de humedad y esterilizados) con micelio de *P. djamor*. Posteriormente, se inoculó sobre cada una de los sustratos (Tabla 1) estériles (1 kg a 75% de humedad) con 250 g de granos de trigo invadidos con micelio. Se incubó a 25 °C en oscuridad hasta la aparición de

primordios, posteriormente se mantuvieron bajo condiciones controladas: temperatura (24-26 °C), fotoperiodo (12 h luz/oscuridad), humedad relativa (80-0%) y ventilación forzada, hasta la obtención de los cuerpos fructíferos (Acosta-Urdapilleta *et al*., 2020).

Obtención de extractos

Los extractos acuosos se realizaron mediante maceración, se utilizó el micelio fresco (25 mg/mL) de *P. djamor* de 10 días de crecimiento de cada medio de cultivo y los cuerpos fructíferos frescos y deshidratados (25 mg/mL) cultivados en cada sustrato. Para las tres muestras se realizaron dos extractos acuosos, uno a temperatura ambiente y otro se puso a ebullición por 4 min. Posteriormente se centrifugaron (10,000 rpm/15 min), se separó el sobrenadante y se congeló (-20 ºC) hasta su uso (Acosta-Urdapilleta *et al*., 2020).

Tabla 1. Tratamientos evaluados de *P. djamor*

	Micelio	Abreviatura	Cuerpo fructífero	Abreviatura
1	PDA	PDA	Paja de avena 100%	PA
2	PDA/100% paja de avena	P/A	Paja de avena 50% y aserrín de encino 50%	PA/AE
3	PDA/ 50% paja de avena/ 50% aserrín de cedro	P/AC	Paja de avena 50% y aserrín de cedro 50%	PA/AC
4	PDA/ 50% paja de avena/ 50% aserrín de encino	P/AE	Paja de avena 50% y cascarilla de cacahuate 50%	PA/CC
5	PDA/ 50% paja de avena/ 50% cascarilla de cacahuate	P/ACC	Paja de avena 50% y olote de maíz 50%	PA/OM
6	PDA/ 50% paja de avena/ 50% olote de maíz	P/AO	Paja de avena 50% y hoja de maíz 50%	PA/HM
7	PDA/ 50% paja de avena/ 50% hoja de maíz	P/AH		



Cuantificación de polifenoles totales

El contenido total de polifenoles se analizó con el método Folin-Ciocalteu con algunas modificaciones (Angelova *et al*., 2022). La mezcla de reacción consistió en 1 mL del extracto, 0.5 mL de reactivo Folin-Ciocalteu y 0.4 mL de Na_2CO_3 (7.5%). La mezcla se agitó y se incubó por 1 h a temperatura ambiente. Se leyó la absorbancia a 765 nm con un espectrofotómetro (16s uv-vis spectrophotometer). Los resultados se expresaron en mg de equivalente de ácido gálico (AGE) por g de peso seco. Se calculó la concentración de polifenoles mediante la curva de calibración utilizando ácido gálico.

Actividad antioxidante

Inhibición del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH)

Se determinó la inhibición del radical de DPPH, según Brand-Willams *et al.* (1995) con algunas modificaciones. La mezcla de reacción consistió en 0.5 mL de muestra, 3 mL de metanol y 0.3 mL de DPPH (0.4 mM). Se incubó durante 45 min y se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro a 517 nm. La actividad antioxidante se expresó como porcentaje de inhibición (Moraes-de-Souza *et al*., 2008).

Inhibición del radical 2,2-azino-bis (ácido3-etilbenzotiazozolina-6-sulfónico (ABTS)

Se determinó la inhibición del radical ABTS de acuerdo con Re *et al*. (1999) con algunas modificaciones. El radical ABTS se generó por la reacción con persulfato de potasio (2.45 mM), se mantuvo a temperatura ambiente en la oscuridad (12-16 h). La solución ABTS se diluyó con agua hasta obtener una absorbancia de 0.70. La mezcla de reacción consistió 0.1 mL de muestra y 2.9 mL del radical ABTS. Se incubó durante 6 min y se leyó la absorbancia a 734 nm (González-Palma *et al*., 2016).

El porcentaje de inhibición de la actividad antioxidante se calculó con la siguiente ecuación, donde A es absorbancía:

$$\% \text{ inhibición} = [(A_{control}-A_{muestra})/A_{control}] \times 100 \quad (1)$$

Análisis estadístico

Todos los experimentos se realizaron por triplicado, se reportó el promedio y desviación estándar. Los resultados de velocidad de crecimiento se analizaron mediante ANOVA unidireccional y prueba de Tukey. Los valores de p inferiores a 0.05 se consideraron estadísticamente significativos.

Resultados

El micelio de *P. djamor* presentó mayor Vc en el medio con paja de avena (0.241 mm/h), que presentó diferencias estadísticas con los medios que contenían aserrín de encino (P/AE; 0.14 mm/h) y PDA (0.144 mm/h), además, no hubo diferencias en la apariencia del micelio, que en general fue de textura y

densidad abundante (Tabla 2), pero el micelio con olote y hoja de maíz presentaron coloración salmón-rosa (Figura 1).

Cuantificación de polifenoles totales

El contenido de compuestos fenólicos de los extractos del micelio de *P. djamor* a temperatura ambiente osciló entre el 6.02 mg AGE/g a 11.27 mg AGE/g, de cuerpos fructíferos frescos fue de 3.23 mg AGE/g a 14.04 mg AGE/g y de 7.02 mg AGE/g a 9.77 mg AGE/g en los cuerpos fructíferos secos (Figura 2a). Los extractos térmicos de micelio oscilaron de 3.38 mg AGE/g a 6.85 mg AGE/g, los extractos de cuerpos fructíferos frescos fue de 1.38 mg AGE/g a 11.97 mg AGE/g y el contenido de compuestos fenólicos para cuerpos fructíferos secos fue de 4.35 mg AGE/g a 10.63 mg AGE/g (Figura 2b). Los cuerpos fructíferos frescos crecidos sobre paja de avena con cascarilla de cacahuate (PA/CC) en ambos extractos presentaron mayor contenido de fenoles totales.

Tabla 2. Velocidad de crecimiento y características del micelio de *P. djamor*

Medio	Vc (mm/h)*	Color	Tipo de micelio	Textura	Densidad	Observaciones
PDA	0.144 mm/h^{b}	Blanco con tono salmón en la parte central	Aéreo	Algodonosa	Abundante	Borde irregular y zonas de crecimiento
P/A	0.241mm /h^{a}	Blanco	Aéreo	Algodonosa	Abundante	Borde irregular y zonas concéntricas de crecimiento
P/AC	0.240 mm/h^{a}	Blanco	Aéreo	Algodonosa	Abundante	Zonas concéntricas de crecimiento con borde regular
P/AE	0.14 mm/h^{b}	Blanco	Aéreo	Algodonosa	Abundante	Zonas concéntricas de crecimiento con borde irregular
P/ACC	0.211 mm/h^{b}	Blanco	Aéreo	Algodonosa/ ligeramente aterciopelada	Abundante	Borde irregular y zonas concéntricas de crecimiento
P/AO	0.228 mm/h^{b}	Rosa	Aéreo	Algodonosa	Abundante	Zonas concéntricas de crecimiento
P/AH	0.231 mm/h^{b}	Rosa	Aéreo	Algodonosa	Abundante	Zonas concéntricas de crecimiento

*Las medias con la misma letra no son diferentes significativamente. Los datos fueron evaluados mediante ANOVA y la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

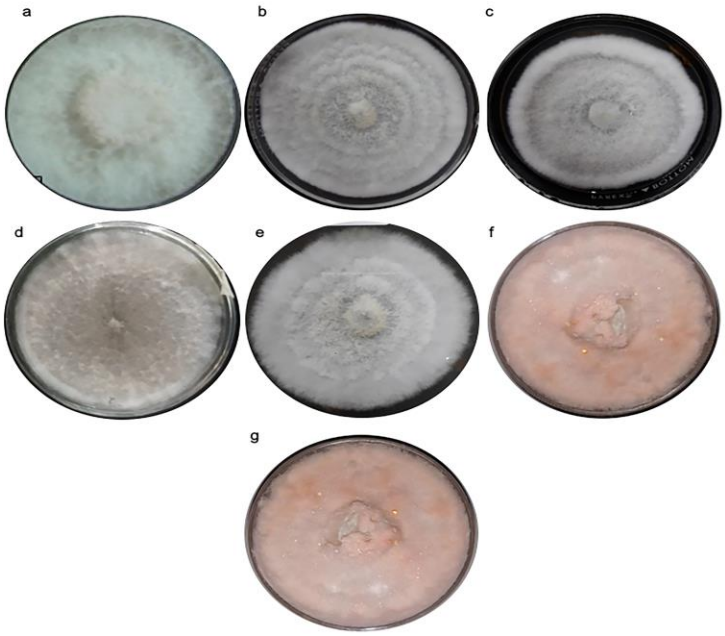


Figura 1. Apariencia del micelio crecido en los diferentes medios de cultivo. a) PDA, b) P/A, c) P/AC, d) P/AE, e) P/ACC, f) P/AO, g) P/AH

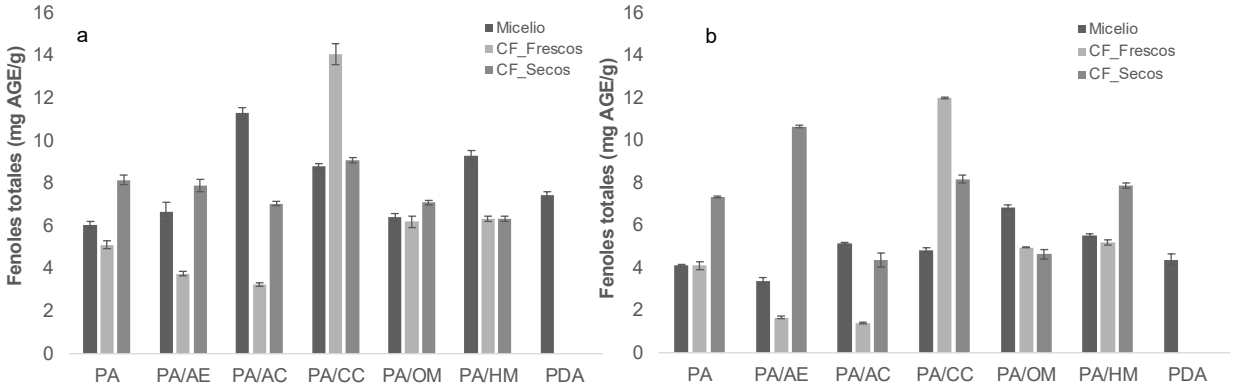


Figura 2. Contenido de fenoles totales de los diferentes extractos de *P. djamor*. a) extractos a temperatura ambiente y b) extractos térmicos.

Inhibición del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH)

El micelio presentó menor porcentaje de inhibición del radical DPPH (0.5±0.05%-3.06 ±0.04%), en comparación con los cuerpos fructíferos frescos (11.44 ±0.5%-23.15 ±0.5%) y cuerpos fructíferos secos (29.37±1.2%-44.53±1.7%). En los extractos térmicos fue también menor el porcentaje de inhibición del micelio (0.25±0.01% a 4.74±0.01%), seguido de los extractos de cuerpos fructíferos frescos de (8.24±0.4% a 21.79±2.0%) y por último los de cuerpos fructíferos secos que presentaron mayores porcentajes de inhibición entre 34.4±1.2% a 65.74±1.3% (Figura 3). En general en los extracto del cuerpo fructífero presentó mayor porcentaje de inhibición los cultivados sobre paja de avena con aserrín de encino (PA/AE), seguido de paja de avena con hoja de maíz (PA/HM) y finalmente paja de trigo con cascarilla de cacahuate (PA/CC).

Inhibición del radical 2,2 -azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazozolina-6-sulfónico (ABTS)

Los extractos de micelio presentaron porcentajes de inhibición de 5.37±0.1% a 43.44±0.4%, seguido de los extractos de cuerpos fructíferos frescos (32.61±4.2 a 66.88±0.3%) y por último los extractos de cuerpos fructíferos frescos de (74.34±0.4 a 98.43±0.2%) (Figura 4a). En el caso de los extractos térmicos el micelio inhibió entre 21.23±1.8% a 41±0.5%, seguido de los extractos de cuerpos fructíferos frescos con 22.02±1.4% a 44.55±3.0% y por último los extractos de cuerpos fructíferos secos de 58.62±0.7% a 93.95±1.8% (Figura 4b). De manera general, la inhibición del radical ABTS del extracto de cuerpos fructíferos secos fue mayor que los obtenidos por los cuerpos fructíferos frescos y el micelio (Figura 4).

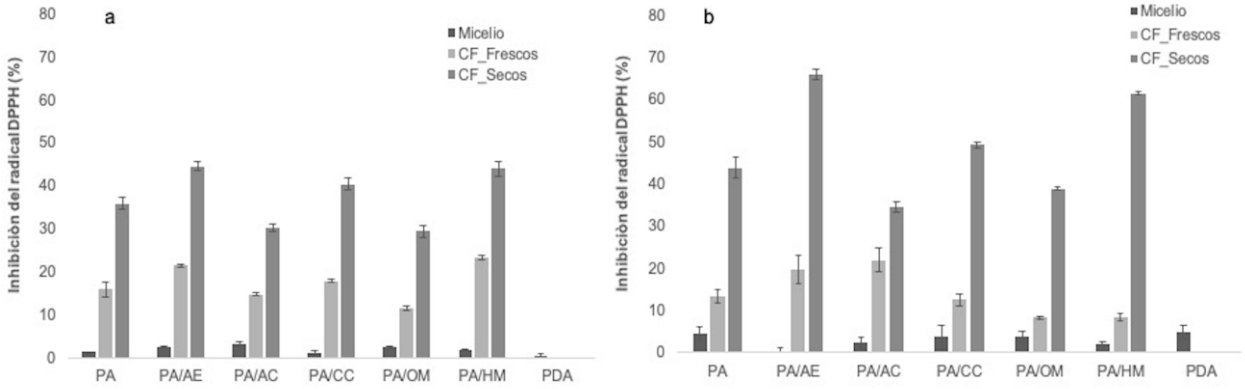


Figura 3. Porcentaje de inhibición del radical DPPH de los diferentes extractos de *P. djamor*. a) extracto a temperatura ambiente y b) extractos térmicos.

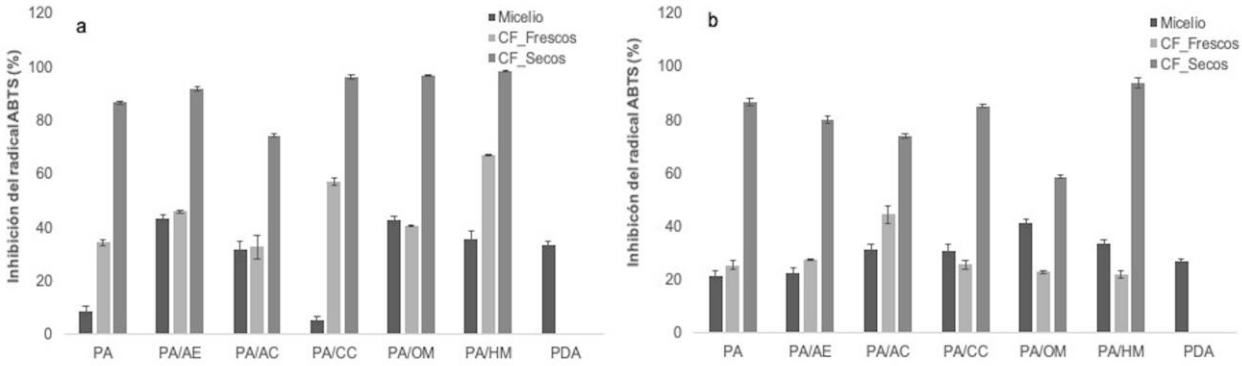


Figura 4. Porcentaje de inhibición del radical ABTS de los diferentes extractos de *P. djamor*. a) extracto a temperatura ambiente y b) extractos térmicos

Discusión

Actualmente a la actividad antioxidante de los productos naturales, se les ha atribuido diferentes actividades biológicas, por lo que se le ha encontrado aplicación en productos farmacéuticos y en medicina alternativa. El potencial antioxidante de los hongo es parte del mecanismo de defensa natural contra eventos nocivos que causan daño oxidativo (Mau *et al*., 2002). Jegadeesh *et al*. (2014) reportaron 2.2 mg AGE/g de fenoles totales en extractos metanólicos de cuerpos fructíferos de *P. djamor* var. *roseus*. Raman *et al.* (2014) indicaron que presentó mayor contenido de fenoles totales el extracto metanólico (2.25 mg AGE/g), 0.35 mg AGE/g el de hexano, 0.3 mg AGE/g de cloroformo y 0.225 mg AGE/g el de acetato de etilo del cuerpo fructífero de *P. djamor* var. *roseus*. Acosta-Urdapilleta *et al.* (2020) evaluaron el contenido de fenoles totales de cuerpos fructíferos deshidratados de *P. djamor* var. *roseus* en extractos acuosos (12 mg AGE/g), acuoso térmico (6 mg AGE/g) y extracto metanólico (2 mg AGE/g), el contenido de fenoles de este trabajo fue mayor, se obtuvó 14.04 mg EAG/g en el cuerpo fructífero fresco. Hubo diferencias dependiendo del proceso de elaboración del extracto y del sustrato utilizado para el cultivo, por lo que al someter a ebullición los extractos hubo disminución del contenido de compuestos fenólicos, esto indica la presencia de moléculas que son termosensibles, lo que es importante considerarlo en la preparación de alimentos enriquecidos con polvo de hongo. Con respecto a la actividad antioxidante, Puttaraju *et al.* (2006) análizaron 23 especies de hongos y obtuvieron un índice de actividad antioxidante, ubicaron a *P. djamor* como un hongo de actividad antioxidante moderada. Yim *et al*. (2010) reportaron 87.2% de inhibición con el radical



ABTS utilizando extractos acuosos de cuerpos fructíferos deshidratados de *P. ostreatus*, Kongkla & Poeaim (2016) evaluaron actividad antioxidante de cinco extractos metanólicos de cuerpos fructíferos secos de *P. ostreatus*, *P. sajor-caju*, *P. eryngii*, *P. cystidiosus* y *P. eous*; el extracto de *P. ostreatus* mostró el mayor porcentaje de inhibición del radical DPPH con 98%, seguido de *P. sajor-caju* (89%), *P. eous* (80%), *P. eryngii* (62%) y *P. cystidiosus* (61%). Comparando estos resultados con los de la presente investigación, los porcentajes de inhibición fueron similares en los cuerpos fructíferos secos obtenidos a temperatura ambiente. Por otra parte, Kongkla *et al*. (2016) evaluaron la actividad antioxidante por el método ABTS de cinco extractos metanólicos de cuerpos fructíferos secos de *P. eous* y *P. sajor-caju,* hubo mayor porcentaje de inhibición del radical ABTS con un 100%, seguido de *P. ostreatus* (93%), *P. cystidiosus* (65%) y *P. eryngii* (61%) comparando estos resultados con los obtenidos en el trabajo, presentaron mayor inhibición del radical ABTS (98.43%) los extractos de cuerpos fructíferos secos crecidos sobre paja de avena/hoja de maíz.

Por otro lado, Acosta-Urdapilleta *et al*. (2020) evaluaron la actividad antioxidante por el método ABTS de cuerpos fructíferos deshidratados de *P. djamor* var. *roseus*, el extracto acuoso presentó mayor porcentaje de inhibición del radical ABTS (75%), seguido del extracto metanólico con un 70% y el extracto acuoso térmico con 59%, los autores indicaron que la actividad antioxidante de los extractos, no sólo depende del contenido fenólico sino también de otros metabolitos secundarios.

Se ha reportado que los antioxidantes de *Pleurotus*, tienen efecto en la prevención del daño oxidativo del ADN y al incrementar las defensas antioxidantes en el sistema ayuda a prevenir o retardar la incidencia de enfermedades, por lo que, este género es un candidato para consumo y fuente de antioxidantes naturales.

Conclusión

El contenido de fenoles totales y actividad antioxidante fue mayor en cuerpos fructíferos y se incremento al crecerlos sobre cascarilla de cacahuate, por lo que, es una alternativa de uso para el desecho del cacahuate y obtener un alimento con moléculas que tienen actividad antioxidante y a pesar de ser expuestas a alta temperaturas mantienen la actividad.

Conflicto de intereses

Ningún conflicto de intereses.



Agradecimientos

A la Maestría en Manejo de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y al CONAHCyT por la beca otorgada para cursar los estudios de posgrado (No. 822346).

Bibliografía

Acharya, K., Khatua, S. y Ray, S. (2017). Quality assessment and antioxidant study of *Pleurotus djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 7, 105-110. https://doi.org/10.7324/JAPS.2017.70614

Acosta-Urdapilleta, ML., Villegas, E., Estrada-Torres, A., Téllez-Téllez, M. y Díaz-Godínez, G. (2020). Antioxidant activity and proximal chemical composition of fruiting bodies of mushroom, *Pleurotus* spp. produced on wheat straw. *Journal of Environmental Biology*, 41(5), 1075-1081. http://doi.org/10.22438/jeb/41/5/MRN-1307

Acosta Urdapilleta, MDL., Téllez Téllez, M., Villegas, E., Estrada, A. y Díaz Godínez, G. (2016). Caracterización de cinco especies de *Pleurotus* crecidas en cuatro medios de cultivo. *Mexican Journal of Biotechnology*, 1(1), 1-11

Ajith, TA. y Janardhanan, KK. (2007). Indian medicinal mushrooms as a source of antioxidant and antitumor agents. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 40(3), 157-162. https://doi.org/10.3164/jcbn.40.157

Akyüz, M. İnci, Ş. y Kırbağ, S. (2023). Evaluation of antimicrobial, antioxidant, cytotoxic and DNA protective effects of oyster mushroom: *Pleurotus pulmonarius* (Fr.) Quel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(6), 7273-7283. https://doi.org/10.1007/s13369-022-07418-9

Angelova, G., Brazkova, M., Mihaylova, D., Slavov, A., Petkova, N., Blazheva, D., Deseva, I., Gotova, I. Dimitrox, Z. y Krastanov, A. (2022). Bioactivity of biomass and crude exopolysaccharides obtained by controlled submerged cultivation of medicinal mushroom *Trametes versicolor*. *Journal of fungi*, 8(7), 738. https://doi.org/10.3390/jof8070738



Brand-Williams, W. Cuvelier, ME. y Berset, C. (1995). Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science and Technology*, 28 (1), 25-30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Cardwell, G., Bornman, JF., James, AP. y Black, LJ. (2018). A review of mushrooms as a potential source of dietary vitamin D. *Nutrients*, 10(10), 1498. https://doi.org/10.3390/nu10101498

González-Palma, I., Escalona-Buendía, HB., Ponce-Alquicira, E., Téllez-Téllez, M., Gupta, VK., Díaz-Godínez, G. y Soriano-Santos, J. (2016). Evaluation of the antioxidant activity of aqueous and methanol extracts of *Pleurotus ostreatus* in different growth stages. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1099. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01099

Hamza, A., Mylarapu, A., Krishna, KV. y Kumar, DS. (2024). An insight into the nutritional and medicinal value of edible mushrooms: A natural treasury for human health. *Journal of Biotechnology*, 381: 86-99. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.12.014

Jegadeesh R., Hariprasath L., Kumaresa K., Raaman N. (2014). *In vitro* antioxidant and antibacterial activities of fractionized extracts of edible mushroom *Pleurotus djamor* var. *roseus*. *Journal of Academia and Industrial Research,* (3) 202-2088-5213

Khatua, S., Paul, S. y Acharya, K. (2013). Mushroom as the potential source of new generation of antioxidant: a review. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 6(5), 496-505

Kongkla, K. y Poeaim, S. (2016). Total phenolic content and antioxidant activity of crude methanolic extract from five *Pleurotus* species. *International Journal of Agricultural Technology*, 12 (7), 1457-1464

Kozarski, M., Klaus, A., Jakovljevic, D., Todorovic, N., Vunduk, J., Petrović, P., Niksic, M., Vrvic, M. y Van Griensven, L. (2015). Antioxidants of edible mushrooms. *Molecules*, 20(10), 19489-19525. https://doi.org/10.3390/molecules201019489

Mau, JL., Lin, HC. y Chen, CC. (2002). Antioxidant properties of several medicinal mushrooms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6072-6077. https://doi.org/10.1021/jf0201273



Moraes-de-Souza, RA., Oldoni, TLC., Regitano-d'Arce, MAB. y Alencar, SM. (2008). Antioxidant activity and phenolic composition of herbal infusions consumed in Brazil. CYTA-*Journal of Food*, 6(1), 41-47. https://doi.org/10.1080/11358120809487626

Podkowa, A., Kryczyk-Poprawa, A., Opoka, W. y Muszyńska, B. (2021). Culinary-medicinal mushrooms: a review of organic compounds and bioelements with antioxidant activity. *European Food Research and Technology*, 247, 513-533. https://doi.org/10.1007/s00217-020-03646-1

Puttaraju, NG., Venkateshaiah, SU., Dharmesh, SM., Urs, SMN. y Somasundaram, R. (2006). Antioxidant activity of indigenous edible mushrooms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(26), 9764-9772. https://doi.org/10.1021/jf0615707

Raman, J., Lakshmanan, H., Kuppamuthu, K. y Nanjian R. (2014). *In vitro* antioxidant and antibacterial activities of fractionized extracts of edible mushroom *Pleurotus djamor var. roseus*. *Journal of Academia and Industrial Research*, 18(3), 189-200.

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. y Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10), 1231-1237.
https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3

Sobal M., Martinez-Carrera D., Morales P. y Roussos S. (2007). Classical characterization of mushrrom genetic resourses from temperate and tropical regions of Mexico. *Micología Aplicada Internacional*, 19(1): 15-23

Vega, A., De León JA., Miranda, S. y Reyes, SM. (2022). Agro-industrial waste improves the nutritional and antioxidant profile of *Pleurotus djamor*. *Cleaner Waste Systems*, 2, 100018. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100018

Yim, HS., Chye, FY., Tan, CT., Ng, YC. y Ho, CW. (2010). Antioxidant activities and total phenolic content of aqueous extract of *Pleurotus ostreatus* (cultivated oyster mushroom). *Malaysian Journal of Nutrition*, 16(2), 281-291

CIENCIA CONECTADA

Ciencia Conectada (2026) Volumen 1, 28-40
https://uptlax.edu.mx/ciencia-conectada-2/



Modeling and control of a pneumatic levitator, from the process to plant control

Castro-Ramírez J[1]*, Ramírez-Vasquez JF[1], González-Cortés HM[1]

[1]Universidad Politécnica de Tlaxcala, Department of Mechatronic Engineering, Tlaxcala, México, ZP 90180.

Correspondence:
*Casto-Ramírez J.
Joel.castro@uptlax.edu.mx

Abstract

This study addresses the modeling, simulation, and control of a pneumatic levitation system to improve its stability and accuracy in regulating the position of a suspended object. A mathematical model is developed based on the laws of fluid mechanics and particle dynamics, which is validated through MATLAB's System Identification tool, allowing the estimation of transfer functions from experimental data.

The system is controlled by implementing a PID controller designed using the root locus method. Various controller configurations were tested on different estimated plants, showing that the best response was achieved using plants identified with normalized data and a 12V step input. The results indicate that the PID controller, after fine-tuning, provides optimal performance in terms of maximum overshoot and settling time.

The study concludes that approximate model identification and the proper selection of controller parameters enable better system stability, facilitating its application in academic and research environments.

Key words: Automation, Control Systems, Modeling, Pneumatic Levitation



Resumen

El presente estudio aborda el modelado, simulación y control de un sistema de levitación neumática con el objetivo de mejorar su estabilidad y precisión en la regulación de la posición de un objeto suspendido, se desarrolla un modelo matemático basado en las leyes de la mecánica de fluidos y la dinámica de partículas, el cual es validado a través de la herramienta System Identification de MATLAB, permitiendo la estimación de funciones de transferencia a partir de datos experimentales. El control del sistema se realiza mediante la implementación de un controlador PID, diseñado con el método del lugar geométrico de las raíces comparando diferentes configuraciones del controlador utilizando con respecto a diferentes plantas estimadas, se observa que la mejor respuesta se obtiene al utilizar plantas identificadas con datos normalizados y una entrada escalón de 12V. Los resultados muestran que el controlador PID ajustado después del diseño proporciona un desempeño óptimo en términos de sobrepaso máximo y tiempo de asentamiento.

El estudio concluye la identificación aproximada del modelo y la correcta elección de los parámetros del controlador que permiten una mejor estabilidad del sistema, facilitando su aplicación en entornos académicos y de investigación.

Palabras clave: automatización, modelación, levitador neumático, sistemas de control.

Introduction

Pneumatic levitation is a physical phenomenon that allows the suspension of an object in the air through controlled airflow. This principle has been applied in various fields of engineering and automation due to its advantages in reducing mechanical friction and component wear (Mosquera *et al.*, 2012). In this context, the development of pneumatic levitators represents an innovative solution for experimentation in control systems, providing a safe and efficient environment for validating advanced control strategies (López & Cadenillas, 2021; Reyes-Orta *et al.*, 2023).

This study addresses the modeling, simulation, and control of a pneumatic levitator designed for the automation and robotics laboratory of a university institution. A fluid dynamics and control theory-based approach is employed to develop a mathematical model that describes the system's behavior. Additionally, a control strategy is implemented to optimize stability and precision in regulating the levitated object's position (González *et al.*, 2004).

Various approaches have been explored in the literature for controlling pneumatic levitation systems. For example, Martínez & Moreta (2025) conducted a comparative study between PID controllers and fuzzy controllers, demonstrating that systems based on fuzzy logic offer advantages in highly nonlinear environments. Additionally, Jernigan *et al.*,

(2008), implemented a remote laboratory based on aerodynamic levitation for teaching fluid dynamics, highlighting the system's applicability in academic and research environments.

Methods

General module description

The system consists of a square plastic base with vents that allow airflow toward a direct current motor (a centrifugal fan). This motor is connected to a plastic coupler, which directs the air into a 50 cm acetate tube. Inside the tube, a sphere moves due to the airflow generated by the fan. At the top of the tube, an ultrasonic sensor measures the sphere's position and generates a feedback signal to control its position, as illustrated in Figure 1.

The levitator incorporates an electronic board based on the ESP32 microprocessor (Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 with 600 DMIPS), responsible for data acquisition and control operations. Additionally, it includes an L298 H-Bridge module to regulate the fan speed. Finally, the position sensor, located at the top of the tube, is the key component that provides the necessary feedback signal to maintain precise control of the sphere's position. Figure 2 presents the constructed levitator.

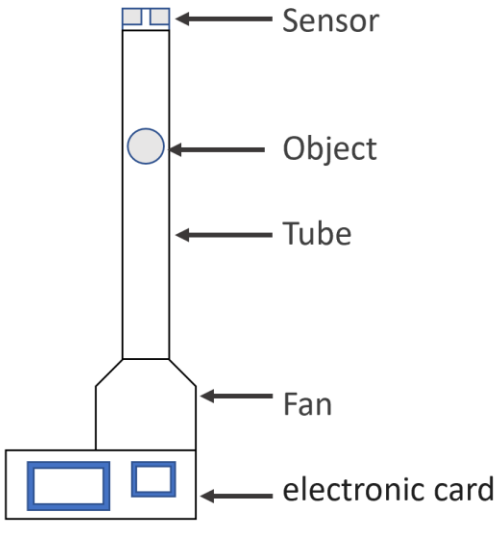


Figure 1. Pneumatic levitator diagram



Figure 2. Constructed pneumatic levitator



Obtaining the model of a pneumatic levitator

The mathematical model of the pneumatic levitator is derived from the application of fundamental laws of fluid mechanics and particle dynamics. Considering Newton's second law for the suspended sphere, Figure 3 illustrates the forces acting on the sphere inside the tube (Jernigan et al., 2008), and the equation of motion is given by:

$$m_b \frac{d^2y}{dt^2} = m_b \frac{dv_b}{dt} = -F_g + F_D \quad (1)$$

Where m_b is the mass of the sphere, F_g is the gravitational force, and F_D is the drag force due to the airflow. These forces are expressed as:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a A (v_a - v_b)^2 \quad (2)$$

Where C_D is the drag coefficient, ρ_a is the air density, A is the frontal area of the sphere, v_a is the air velocity in the tube, and v_b is the velocity of the sphere.

By combining the previous equations, the differential equation of the system is obtained:

$$m_b \frac{dv_b}{dt} = -m_b g + \frac{1}{2} C_D \rho_a A (v_a - v_b)^2 \quad (3)$$

Similarly, the airflow dynamics inside the tube are modeled by the equation:

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{g(f,y) - v_a}{\tau_a} \quad (4)$$

Where $g(f,y)$ represents the experimental relationship between the fan's operating frequency and the height of the levitated object, and τ_a is the system's time constant. Finally, by linearizing the model around an equilibrium point and representing it in the Laplace domain, the system's transfer function is obtained:

$$Gp(s) = \frac{K(s+Z)}{(s+P_1)(s+P_2)(s+P_3)} \quad (5)$$

Where K is the system gain, Z is a zero of the system, and P_1, P_2, P_3 are the characteristic poles of the system (Jaimes & Arroyave-Giraldo, 2015). Modeled using MATLAB's System Identification toolbox.



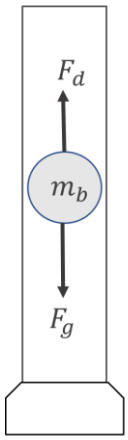


Figure 3. Forces on the sphere

Plant identification from experimental data

System identification using experimental data is a fundamental process for determining mathematical models that represent the behavior of a physical plant, especially when a predefined model is unavailable or when specific or complete data on the system components are lacking.

In this case, input and output measurements of the pneumatic levitator are collected to fit a dynamic model that describes its response. Based on the experimental data obtained under different operating conditions in response to a step input in open-loop, model-fitting and optimization techniques are used to determine the system's characteristic parameters. This approach allows for the validation of the previously developed theoretical model and enables a more precise adjustment of control strategies.

To analyze the system response, sampling times between 50 and 150 milliseconds were used, resulting in 15 similar data sets, each containing approximately 200 samples. These data were truncated at the settling point due to the presence of a physical limit in the system, to facilitate estimation.Figure 4 presents the plant response for some randomly selected samples.

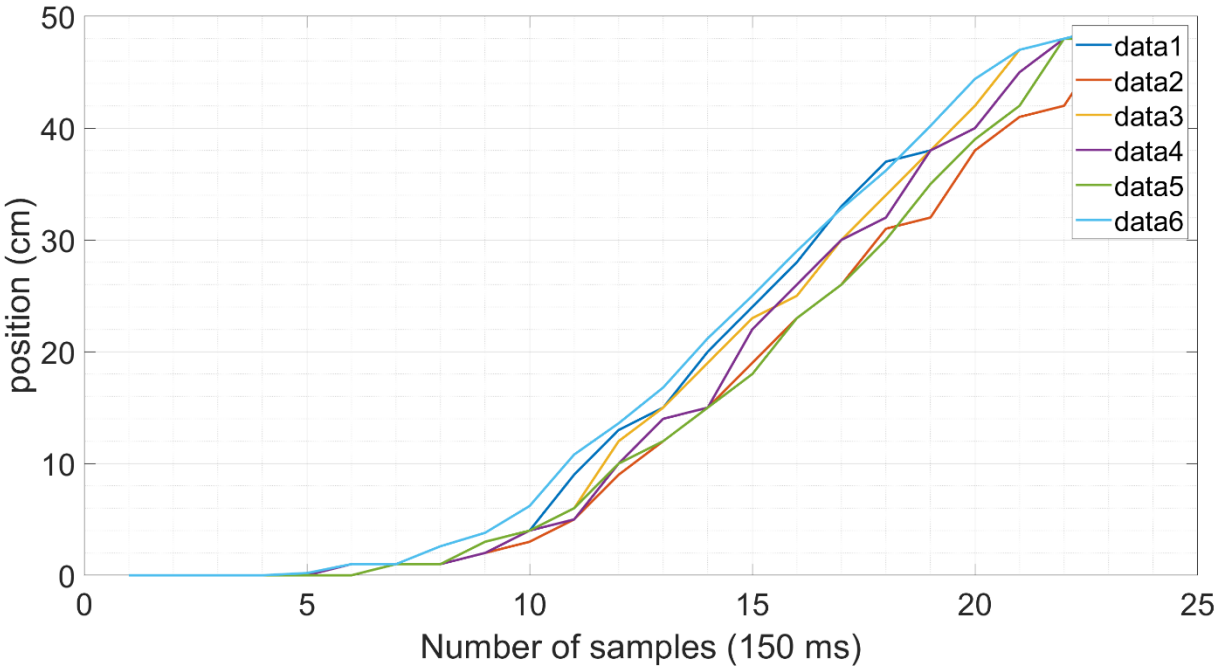


Figure 4. Data obtained from the plant response to a 12-volt step input.

For the plant estimation stage, MATLAB's System Identification toolbox is used, in this process, the input signal corresponds to a 12-volt step, while the output is the position of the spherical object inside the acetate tuve, the model estimation is performed by considering the system as a black box, where the internal parameters are unknown, and only the input and output values are available. Figure 5 illustrates the relationship between the experimentally obtained data and the model to be identified. The results obtained for the plant model estimation, considering a sampling time of 150 milliseconds, are shown in Figure 6.

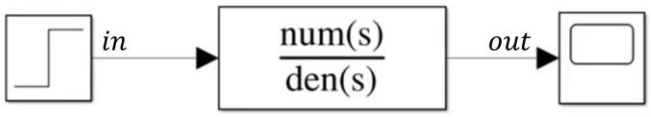


Figure. 5. Known system data for plant estimation.

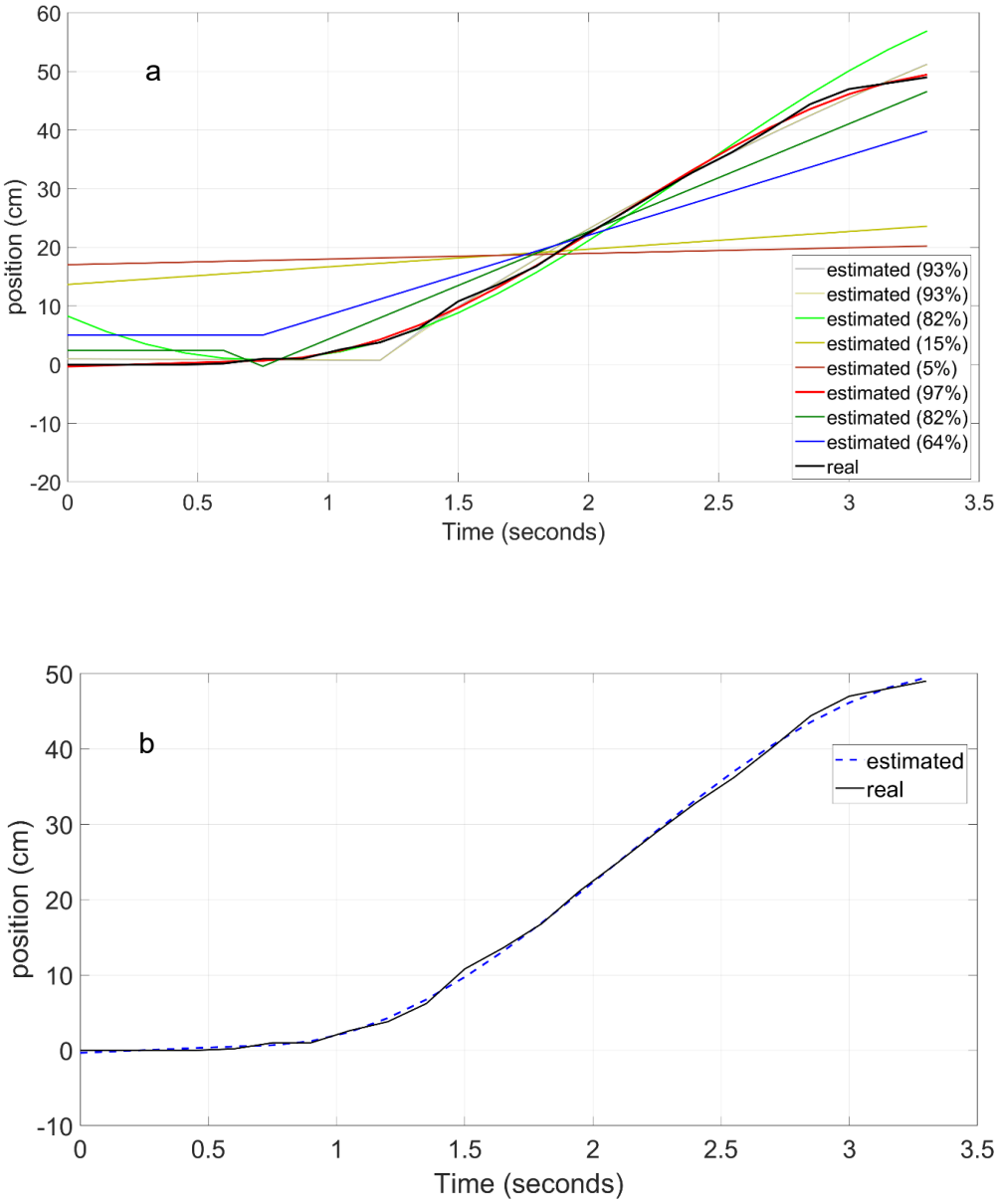


Figure 6. Plant model estimation. a) Responses obtained in the plant estimation. b) Selected responses in the plant estimation



In the plant identification process, tests were conducted using both the naturally obtained data from the measurements shown earlier and the normalized data, additionally, a delay of 5 sampling times, equivalent to 0.75 seconds, was introduced, yielding transfer functions and responses that were similar. The best results from each test were selected, and their parameters are shown in the following Table 1.

Table 1. Estimated transfer functions and their estimation parameters.

Estimated transfer functions	Fit estimate
Transfer function with natural sensor data and a step input from 0 to 255. $$G1 = \frac{3.798 * e^{-0.75s}}{s^2 + 1.156\,s + 0.5384}$$	Fit to estimation data: 97.96% (stability enforced) FPE: 0.1976 MSE: 0.127
Transfer function with natural sensor data and a step input from 0 to 12 volts. $$G2 = \frac{0.1758 * e^{-0.75s}}{s^2 + 1.114\,s + 0.5483}$$	Fit to estimation data: 97.94% (stability enforced) FPE: 0.2072 MSE: 0.1305
Transfer function with normalized data for both input and output. $$G3 = \frac{0.8788\,e^{-0.75s}}{s^2 + 1.114\,s + 0.5483}$$	Fit to estimation data: 97.94% (stability enforced) FPE: 7.967e-05 MSE: 5.017e-05

The model was estimated using MATLAB's TFEST (Transfer Function Estimation) function from time-domain data, where the last plant achieved the best metrics:

Fit to estimation data: 97.94%: This indicates that the model fits the estimation data with an accuracy of 97.94%. This is a very high value, suggesting that the model is quite accurate.

MSE: 5.017e-05: This is the Mean Squared Error (MSE), which measures the average squared difference between the observed values and the values predicted by the model. A low MSE value also indicates a good fit of the model to the data.

FPE: 7.967e-05: This is the Final Prediction Error (FPE) value. A low value like this suggests that the model is good in terms of balancing accuracy and complexity.

Transfer function approximation

A time delay in the context of process control systems can be defined as the time interval from the application of a control signal to any

observable change in the process variable (Wang *et al.*, 1998). Delays, also known as dead times, are inherent in many physical systems and can complicate the analysis and design of controllers, a system with a delay (e^{sT}, where T is the delay time) introduces additional complexity by being nonlinear in the Laplace domain and infinitely dimensional in the time domain, which complicates the use of classical control techniques, such as PID controller tuning and stability analysis.

To make the system more manageable mathematically, a finite-order approximation of the delay is often used. By representing the system with a rational transfer function, manipulation, analysis, and simulation become easier, additionally, techniques such as the root locus or Bode plot can be applied more effectively when the delay is approximated.

However, the delay approximation must consider key aspects such as accuracy in the frequency range of interest, system stability, and computational complexity in some cases, if the digital implementation allows, it may be preferable to work directly with the exact delay rather than an approximation. There are several ways to approximate a delay e^(-sT). In this work, the Padé approximation method is used, which approximates the delay as a rational function (quotient of polynomials in s).

$$e^{-sT} \approx \frac{1+\frac{sT}{2}}{1-\frac{sT}{2}} \tag{5}$$

Using the Padé function in MATLAB with a first-order approximation, the following transfer functions were obtained.

Table 2. Approximations of the transfer functions estimated with delay.

Transfer function with delay	Approximation
$G(s) = \frac{3.798 * e^{-0.75s}}{s^2 + 1.156\,s + 0.5384}$	$G(s) = \frac{-3.798\,s + 10.13}{s^3 + 3.823\,s^2 + 3.621\,s + 1.436}$
$G(s) = \frac{0.1758 \cdot e^{-0.75s}}{s^2 + 1.114s + 0.5483}$	$G(s) = \frac{-0.1758\,s + 0.4688}{s^3 + 3.781\,s^2 + 3.519\,s + 1.462}$
$G(s) = \frac{0.8788\,e^{-0.75s}}{s^2 + 1.114\,s + 0.5483}$	$G(s) = \frac{-0.8788\,s + 2.343}{s^3 + 3.781\,s^2 + 3.519\,s + 1.462}$

Results and discussion

PID controller design and application

Once the estimated and linearized transfer functions were obtained, tests were conducted to design and apply PID controllers. It was observed that the controllers designed with the plants using a 12-volt step input and normalized data provided better results compared to those designed for the plant with a step input of 255, this difference can be attributed to the more consistent linearity and scaling of the normalized signals, which improves the model's ability to capture the real system dynamics. All the designed PID controllers were obtained using the root locus method, considering the same requirements of a maximum overshoot $MP = 15\%$ and a settling time $t_s = 7$ In particular, the controller for the plant identified with normalized data not only met these specifications but also demonstrated greater robustness to setpoint variations and noise, thus validating its applicability in real experimental environments. Finally, the controller constants were determined as $K_p = 1.2748, K_i = 0.3613$, and $K_d = 1.1246$, demonstrating satisfactory performance in controlling the plant, as seen in Figure 7.

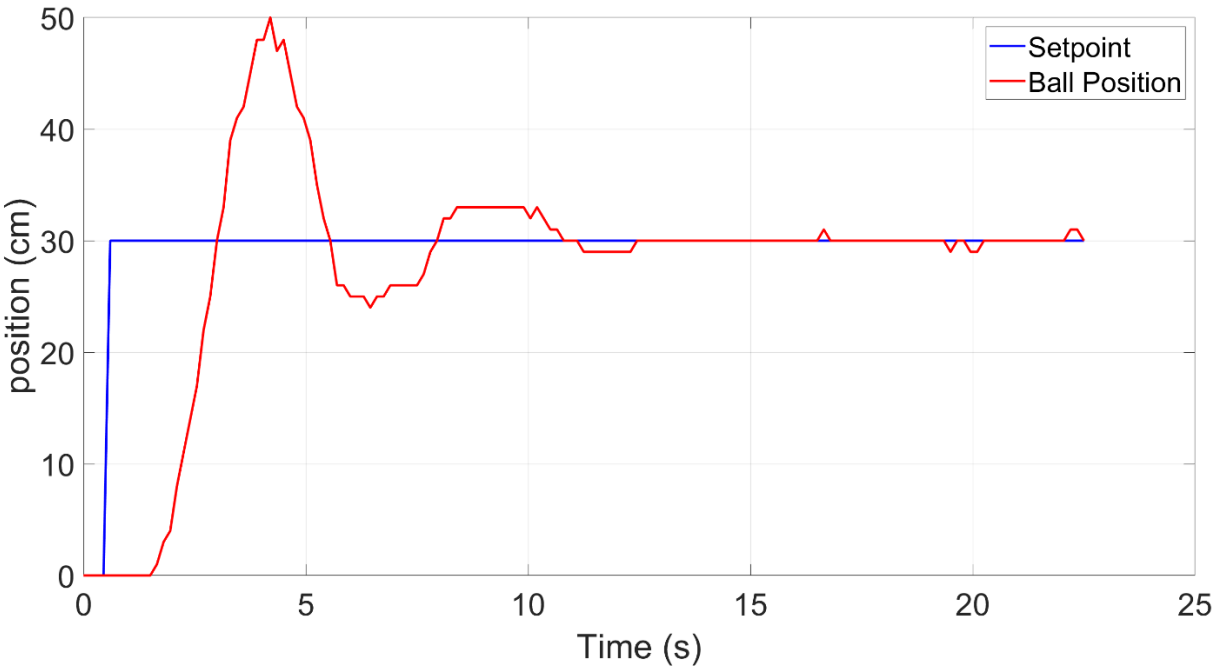


Figure 7. Response of the levitator with the applied PID controller.

However, by adjusting the constant values, the controller's performance applied to the physical plant was further improved. Figure 8 shows the controller's performance when assigning different reference values (setpoints) to assess its response under various operational scenarios.

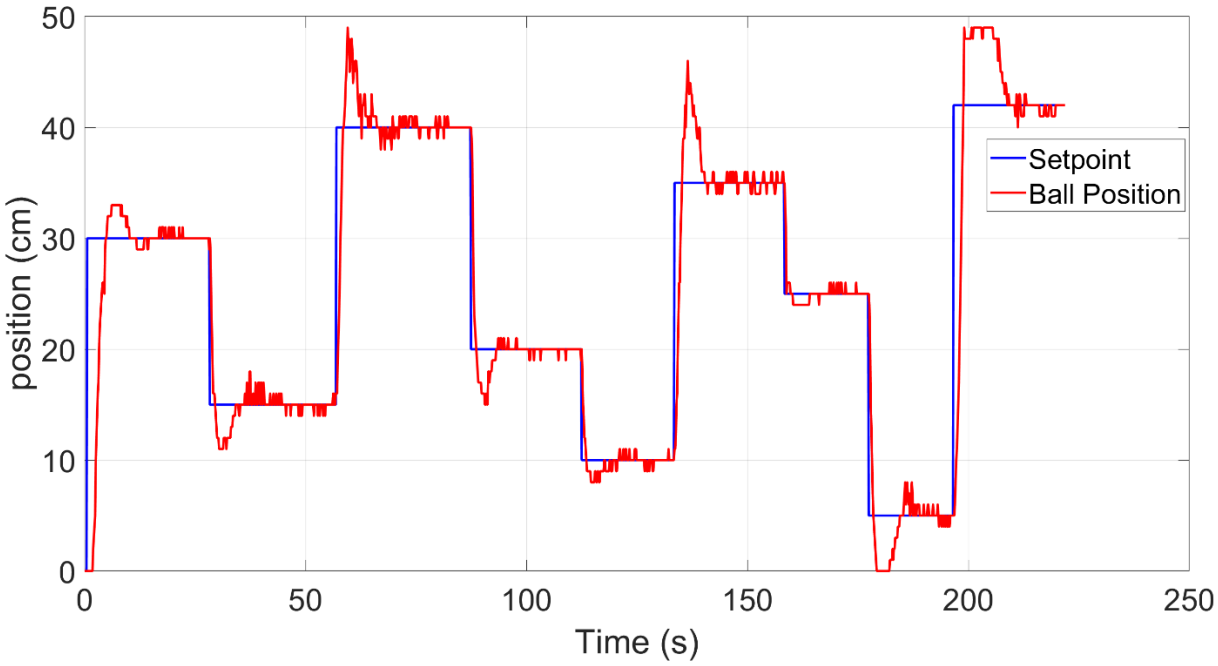


Figure 8. Controller performance when assigning different reference values (set points).

In comparison with other studies, such as that of Jaimes & Arroyave-Giraldo (2015), where a PID controller was also implemented on a pneumatic levitation system, similarities can be observed in the design approach, but there are significant differences in the accuracy of the identified model and the final performance of the controller. On the other hand, the work by Hernández Miguel *et al.*, (2015) presents an implementation based on low-cost technologies such as Arduino, in which additional techniques like Wavelet filtering were explored to mitigate noise and improve the robustness of the system, in contrast, the present study demonstrates that proper model identification and accurate PID controller tuning can achieve outstanding performance without the need for complex filters, simplifying its implementation and making it more accessible for academic and educational applications.

Conclusion

This study addressed the modeling, simulation, and control of a pneumatic levitator, successfully



identifying a mathematical model from experimental data. Using MATLAB's System Identification tool, transfer functions were obtained, which enabled the design of more efficient control strategies.

It was demonstrated that the use of normalized data in the identification process improves the stability and accuracy of the designed controllers. The PID controller designed using the root locus method showed optimal performance when applied to the actual plant with a 12V step input.

Tuning the PID constants further improved the system's response, achieving more precise control of the levitated object's position. This highlights the importance of proper tuning when implementing controllers in physical systems with inherent delays.

Finally, the study reaffirms that correct model identification and proper selection of control parameters are fundamental for designing efficient strategies in pneumatic levitation systems, with potential applications in education, research, and industrial automation.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests.

Acknowledgments

To the Universidad Politécnica de Tlaxcala

Bibliography

González, JME., Algarín-Muñoz, D., & Linares, MGO. (2004). Identificación y control de posición de un sistema de levitación neumática. In XXV Jornadas de Automática: JA Somolinos.

Jaimes, LEG. & Arroyave-Giraldo, M. (2015). Modelación, simulación y control de un levitador neumático. *Revista Politécnica*, *11*(20), 69-66.

Jernigan, SR., Fahmy, Y. & Buckner, GD. (2008). Implementing a remote laboratory experience into a joint engineering degree program: Aerodynamic levitation of a beach ball. *IEEE Transactions on Education*, *52*(2), 205-213.

López Baena, D., & Cadenillas Martínez, J. (2021). *Diseño, montaje y control de una plataforma educacional de levitación neumática, (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya)*. http://hdl.handle.net/2117/351233.



Martínez Añazco, MS. & Moreta Mite, FDLÁ. (2025). *Análisis comparativo de desempeño entre control PID y lógica difusa para un sistema de levitación neumática (Bachelor's thesis, Universidad Politécnica Salesiana)*. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30433.

Miguel, IUH., Monjaraz, EM., Mendoza, JP., Tolentino, JAC. & Silva, AJ. (2018). Diseño, construcción y control de un sistema de levitación neumática. *Pistas Educativas*, *36*(112).

Mosquera, V., Bacca, G., Quiñones, M. & Díaz, J. (2012). Control de posición de un sistema de levitación. *Revista Universitaria en Telecomunicaciones, Informática y Control*, *1*(2), 9-17.

Reyes-Orta, M., Pérez-López, B., Cuvas-Castillo, C. & Villafuerte-Segura, R. (2023). Prototipo de levitación neumática para enseñanza-aprendizaje de teoría de control. Pädi *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, *11*(Especial4), 231-243.

Wang, QG., Lee, TH. & Tan, KK. (1998). Finite-spectrum assignment for time-delay systems (Vol. 239): Springer Science & Business Media.

CIENCIA CONECTADA

Ciencia Conectada (2026) Volumen 1, 41-64
https://uptlax.edu.mx/ciencia-conectada-2/



Panorama general de las Micro y Pequeñas Empresas (Mypes) en la zona metropolita Tlaxcala-Apizaco

Delgado Serrano, VE[1]*, Arenas Muñoz, A[2], Suárez González, G[3]

[1, 2] El Colegio de Tlaxcala, A.C. Doctorado en Desarrollo Regional. Av. Melchor Ocampo No. 28, San Pablo Apetatitlán, Tlaxcala, México, C.P. 90600.

[3] El Colegio de Tlaxcala, Centro de Estudios en Desarrollo Regional y Análisis Económico (CEDRAE). Av. Melchor Ocampo No. 28, San Pablo Apetatitlán, Tlaxcala, México, C.P. 90600.

Correspondencia:

*Delgado Serrano VE
victoreds@coltlax.edu.mx

Abstract

The research analyzes the strategic role of micro and small businesses in the Tlaxcala-Apizaco Metropolitan Area, where they represent more than 99% of the economic units and are a key driver for employment, social cohesion and economic dynamism. These companies, mostly concentrated in the commerce and services sectors, stand out in municipalities such as Tlaxcala, Apizaco and Chiautempan, benefiting from their connectivity and infrastructure. In contrast, peripheral towns such as Atlangatepec and Muñoz de Domingo Arenas face challenges related to insufficient infrastructure, lower population density, and high dependence on the primary sector. The data were analyzed using a quantitative-descriptive approach. The study combines secondary data from INEGI with statistical and georeferencing tools to analyze the distribution and characteristics of Mypes in the region. The results evidence a homogeneous concentration of companies, influenced by factors such as connectivity and location advantages. Although agglomeration economies provide competitiveness and efficiency, they also generate challenges such as market saturation and unfair competition.

Key words: Agglomeration, Economy, Mypes, Inequality.



Resumen

La investigación analiza el papel estratégico de las micro y pequeñas empresas (Mypes) en la Zona Metropolitana de Tlaxcala-Apizaco (ZMTA), donde representan más del 99% de las unidades económicas y son un motor clave para el empleo, la cohesión social y el dinamismo económico. Estas empresas, mayoritariamente concentradas en los sectores de comercio y servicios, destacan en municipios como Tlaxcala, Apizaco y Chiautempan, beneficiados por su conectividad e infraestructura. Por otro lado, localidades periféricas como Atlangatepec y Muñoz de Domingo Arenas enfrentan desafíos relacionados con infraestructura insuficiente, menor densidad poblacional y una alta dependencia del sector primario. Los datos se analizaron mediante un enfoque cuantitativo-descriptivo, el estudio combina datos secundarios del INEGI con herramientas estadísticas y de georreferenciación para analizar la distribución y características de las Mypes en la región. Los resultados evidencian una concentración homogénea de empresas, influenciada por factores como la conectividad y las ventajas de localización. Si bien las economías de aglomeración aportan competitividad y eficiencia, también generan desafíos como saturación de mercados y competencia desleal.

Palabras clave: Aglomeración, Economía, Mypes, Desigualdad.

Introducción

Las micro y pequeñas empresas desempeñan un papel fundamental en el desarrollo económico local al aprovechar los recursos disponibles y las actividades productivas predominantes en cada región. Su capacidad para generar empleo, impulsar el crecimiento económico y responder a las necesidades de la población las convierte en actores estratégicos del tejido económico. A nivel global, representan más del 94% de las unidades económicas (Secretaría de Economía, 2024), lo que resalta su peso estructural en las economías nacionales y la necesidad de fortalecer su funcionamiento mediante políticas de apoyo y desarrollo productivo.

El papel de las Mypes en la economía mexicana constituye un pilar esencial de la economía nacional por su alta capacidad de generación de empleo y valor productivo. Esta dinámica se acentúa en la ZMTA, donde se consolidan como el eje estructural de la actividad económica regional. Su relevancia trasciende el ámbito laboral, ya que actúan como motores del dinamismo productivo y promotores de cohesión social en los territorios donde operan.

El entorno de la zona metropolitana favorece a la concentración de estas unidades económicas,

especialmente en los municipios de Apizaco, Tlaxcala y Chiautempan, donde la conectividad y los recursos locales han propiciado su expansión y creación de flujos dinámicos. Sin embargo, a pesar de su predominio las micro y pequeñas empresas enfrentan desafíos relacionados con la competitividad, el acceso a recursos y la falta de una infraestructura adecuada para sostener su crecimiento a largo plazo (Romero & Ayvar, 2023).

La ZMTA, conformada por 24 municipios y con una población estimada de 700 mil habitantes, se posiciona como el eje central de la dinámica económica del estado de Tlaxcala. En este contexto, las Mypes representan más del 99% del total de unidades productivas, desempeñando un papel estratégico en la estructura económica regional. Su presencia, especialmente en los sectores comercio, servicios y manufactura, ha sido determinante para la generación de empleo y el sostenimiento del tejido socioeconómico local. (Figura 1).

Las micro y pequeñas empresas

Las micro y pequeñas empresas conforman un sector altamente heterogéneo de unidades económicas, diferenciadas por su tamaño, sector de actividad, ubicación geográfica y tipo de bienes o servicios que ofrecen. En las últimas décadas, su relevancia ha aumentado significativamente en América Latina, consolidándose como pilares fundamentales de las economías regionales. En varios países, las Mypes representan más del 94% del total de unidades económicas, constituyéndose en la base estructural de las actividades productivas (Zevallos, 2003).

En los países en desarrollo, estas empresas desempeñan un papel crucial al contribuir sustancialmente al Producto Interno Bruto (PIB), generar empleo y reducir las desigualdades territoriales, factores esenciales para un desarrollo económico inclusivo y sostenible. Gracias a su capacidad de adaptación, su orientación hacia la innovación y su arraigo en los mercados locales, las Mypes se han consolidado como actores estratégicos en la transformación de las economías contemporáneas. En México, su importancia es evidente: representan más del 98% de las unidades económicas y contribuyen con aproximadamente el 52% del PIB nacional, lo que enfatiza la necesidad de analizarlas desde una perspectiva tanto territorial como sectorial (INEGI, 2023).

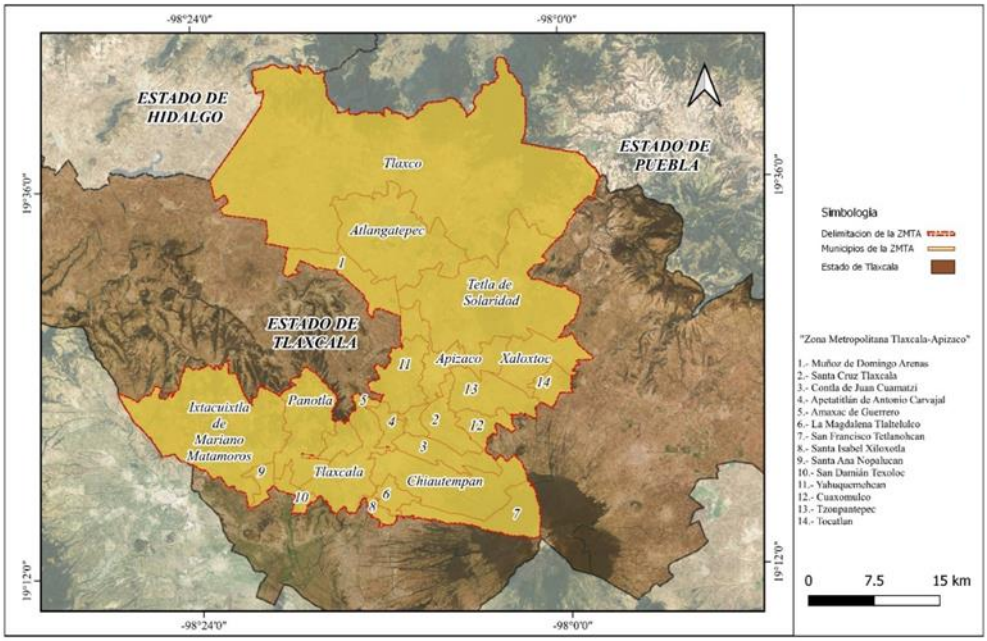


Figura 1. Delimitación de la zona metropolitana de Tlaxcala-Apizaco

Fuente: Elaboración propia con base en información de SEDATU (2023).

De acuerdo con la Ley para el Desarrollo de la Competitividad de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (2023), en México se consideran microempresas aquellas que cuentan con hasta 10 empleados y pequeñas empresas las que emplean hasta 50 personas. A pesar de su peso numérico en la estructura económica, enfrenta importantes desafíos estructurales, entre los que destacan el acceso limitado al financiamiento, la baja inversión en tecnologías de innovación y las elevadas tasas de mortalidad, particularmente durante sus primeros años de operación.

Según Núñez (2023), las Mypes constituyen una oportunidad estratégica para el desarrollo económico y social del país, al ser promovidas por emprendedores locales que impulsan la vocación empresarial en sus territorios. Estas unidades productivas generan impactos positivos al fomentar el empleo, promover la inclusión económica, mantener vínculos estrechos con las comunidades y adaptarse con flexibilidad a los cambios sociales, económicos y ambientales. Para que estas empresas puedan ejercer plenamente su rol como motores del desarrollo, este apoyo debe traducirse en mecanismos de financiamiento accesibles, programas de formación empresarial, infraestructura adecuada y marcos normativos que impulsen el emprendimiento y la innovación. En la ZMTA, donde las Mypes representan una proporción significativa del total de unidades económicas, estas medidas cobran particular relevancia. La región enfrenta desafíos



específicos como la escasez de recursos financieros y tecnológicos. así como brechas importantes en la capacitación empresarial.

Teoría de la localización

Las teorías de la localización ofrecen múltiples lineamientos fundamentales dentro de la visión económica, destacando la importancia de los factores espaciales en el desarrollo y la concentración de actividades económicas. Uno de los pioneros en esta área, Weber desarrolló la teoría de la localización industrial, proponiendo que las industrias tienden a establecerse donde los costos de transporte y laborales sean mínimos. Christaller por su parte, enfatizó la relevancia de la distancia hacia puntos de referencia clave como un factor esencial para el desarrollo de centros urbanos, destacando también la búsqueda de la reducción de costos de transporte (Bustos, 1997).

En el caso de la ZMTA, estas perspectivas resultan particularmente pertinentes, ya que las micro y pequeñas empresas tienden a concentrarse en municipios estratégicos como Apizaco y Tlaxcala. Estos municipios ofrecen ventajas competitivas en términos de conectividad, permitiendo a las empresas reducir costos de transporte y acceder con mayor facilidad a mercados regionales y locales. La teoría de los clústeres, desarrollada por Porter amplía esta visión al definirlos como “un grupo geográficamente denso de empresas e instituciones conectadas, pertenecientes a un campo concreto, unidas por rasgos comunes y complementarios entre sí.” Por lo que las empresas dentro de un clúster se benefician de la proximidad al acceder a recursos y conocimientos especializados compartidos. En su análisis, Bao & Blanco (2014) subrayaron que esta dinámica fomenta la competitividad y la interacción sinérgica entre los actores económicos locales. En la ZMTA, sectores como el comercio y servicios presentan una alta concentración de Mypes que conforman clústeres dinámicos, lo que refuerza su competitividad y promueve el desarrollo económico local. Krugman complementa estas ideas al explicar cómo las economías de aglomeración y la reducción de costos de transporte impulsan la concentración de actividades económicas en áreas bien conectadas (Esqueda, 2013). En la ZMTA, la concentración de Mypes en municipios clave como Apizaco, Tlaxcala y Chiautempan refleja este fenómeno. La proximidad geográfica entre las empresas facilita el intercambio de recursos, conocimientos y el acceso a mercados especializados, generando externalidades positivas que incrementan la competitividad empresarial.

Además, las economías de aglomeración no solo fortalecen la competitividad de las Mypes, sino que también promueven la innovación y el dinamismo económico. Sin embargo, estas concentraciones pueden generar desafíos, como la saturación del mercado y la competencia desleal, aspectos que deben

abordarse mediante políticas públicas integrales que fortalezcan la sostenibilidad de las empresas.

Estas teorías de la localización y aglomeración explican de manera clara los patrones de distribución y concentración de las Mypes en la ZMTA. Factores como la conectividad, el acceso a recursos y las ventajas de proximidad determinan su establecimiento y éxito, subrayando la importancia de crear entornos propicios para maximizar su impacto en el desarrollo económico regional.

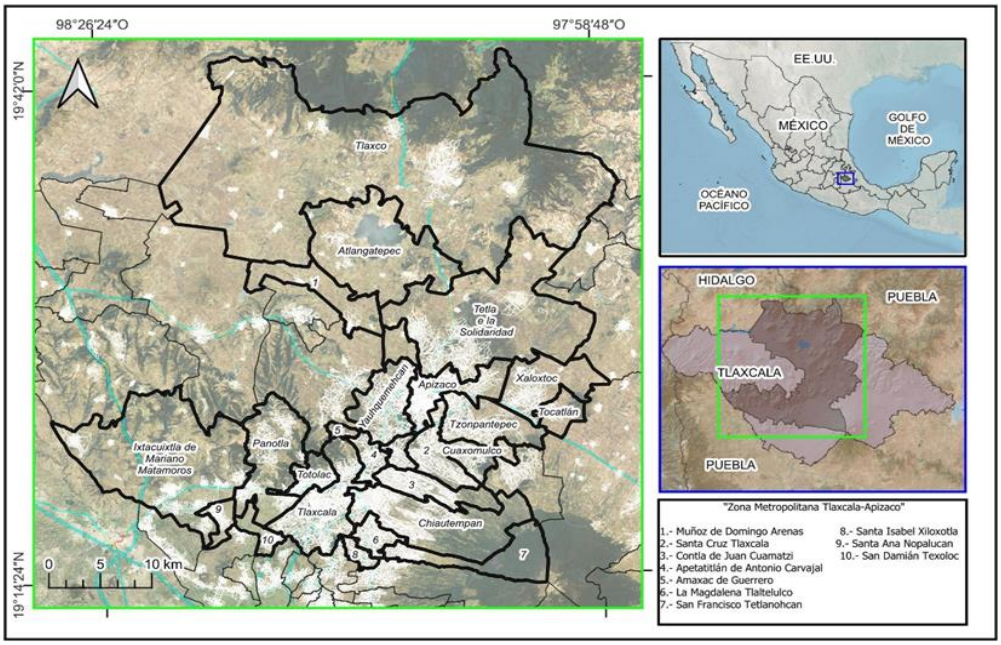


Figura 2. Zona metropolitana Tlaxcala-Apizaco

Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI (2020).

Desde la perspectiva del desarrollo regional, las Mypes son esenciales para la economía local debido a su capacidad para adaptarse a las condiciones específicas de cada territorio. En la ZMTA, estas empresas han desempeñado un papel crucial en la diversificación económica y la absorción de mano de obra, especialmente en sectores como comercio, servicios y manufactura ligera.

El impacto de las Mypes en las economías urbanas está vinculado a su capacidad para generar encadenamientos productivos locales, aumentar el consumo interno y reducir desigualdades económicas. Sin embargo, su

sostenibilidad y crecimiento dependen de factores como el acceso a mercados, la disponibilidad de infraestructura adecuada y la implementación de políticas públicas que fomenten la competitividad

Zona metropolitana Tlaxcala-Apizaco

La ZMTA, se ubica en la parte central del Estado de Tlaxcala (Figura 2). El Estado se sitúa en la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico Transversal y la subprovincia fisiográfica llamada "Lagos y volcanes de Anáhuac" ; cuenta con una altitud promedio de 2248 msnm.

En el año 2000, la ZMTA estaba conformada por dos áreas metropolitanas independientes. Por un lado, la Zona Metropolitana de Apizaco (ZMA) abarcaba ocho municipios, mientras que la Zona Metropolitana de Tlaxcala (ZMT) comprendía once municipios. Sin embargo, debido a la estrecha interrelación económica y sociodemográfica entre ambas regiones, en 2005 se consolidó oficialmente la ZMTA como una sola unidad metropolitana integrada por diecinueve municipios, según lo establecido en el Plan de Desarrollo de la Zona Metropolitana Tlaxcala-Apizaco (2013). La delimitación más reciente de la ZMTA, definida por el Sistema Nacional Urbano (SUN) de la SEDATU (2023), la clasifica como un espacio metropolitano integrado por 24 municipios que exhiben significativas interacciones físicas y funcionales (Tabla 1).

Tabla 1. Municipios de la zona metropolitana de Tlaxcala Apizaco.

Clave Municipal	Municipios	Población	Superficie [1] (km²)	% Superficie de la Zona Metropolitana
Zona metropolitana de Tlaxcala-Apizaco		674510	1598	100%
001	Amaxac de Guerrero	11403	11.2	0.70%
002	Apetatitlán de Antonio Carvajal	16003	11.6	0.73%
003	Atlangatepec	7087	108.2	6.77%
005	Apizaco	80725	43.6	2.73%
009	Cuaxomulco	5928	16.7	1.05%
010	Chiautempan	73215	77.2	4.83%

[1] El dato de superficie se obtuvo de las Áreas Geoestadísticas Municipales del Marco Geoestadístico 2020.

011	Muñoz de Domingo Arenas	4755	36.4	2.28%
015	Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	38970	161.5	10.11%
018	Contla de Juan Cuamatzi	38579	26.1	1.63%
024	Panotla	28357	61	3.82%
026	Santa Cruz Tlaxcala	24116	25.9	1.62%
031	Tetla de la Solidaridad	35284	169.8	10.63%
033	Tlaxcala	99896	52	3.25%
034	Tlaxco	45438	574.7	35.96%
035	Tocatlán	6294	14.3	0.89%
036	Totolac	22529	13.8	0.86%
038	Tzompantepec	18006	38.4	2.40%
039	Xaloztoc	25607	41.5	2.60%
043	Yauhquemehcan	42242	37.4	2.34%
048	La Magdalena Tlaltelulco	19036	11.8	0.74%
049	San Damián Texóloc	5884	10.2	0.64%
050	San Francisco Tetlanohcan	11761	39.5	2.47%
056	Santa Ana Nopalucan	7952	9.2	0.58%
060	Santa Isabel Xiloxoxtla	5443	6	0.38%

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI: Censo de Población y Vivienda (2020).

Como se observa en la tabla 1, el municipio con mayor extensión territorial dentro de la ZMTA es Tlaxco, que abarca el 35.96% de la superficie total de la región. Le siguen los municipios de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros y Tetla de la Solidaridad, que concentran más del 10% del área total cada uno. En contraste, los municipios con menor representación en términos de superficie son Santa Isabel Xiloxoxtla, con apenas el 0.38% y Santa Ana Nopalucan, que abarca el 0.58% de la superficie total (INEGI,2020).

Sin embargo, la distribución territorial no se correlaciona directamente con la población de cada municipio. En términos poblacionales, el municipio de Tlaxcala destaca como el más habitado, con 99896 habitantes, lo que representa el 15% del total de la población de la ZMTA. Le siguen Apizaco, con el 12%, y



Chiautempan, que concentra el 11% de la población total de la región. Por otro lado, los municipios menos poblados son Muñoz de Domingo Arenas, con apenas el 0.70% de la población y Santa Isabel Xiloxoxtla, con el 0.81% (INEGI, 2020). El objetivo central de este artículo fue analizar la distribución, la distribución sectorial y la concentración de las micro y pequeñas empresas en la ZMTA, con el fin de identificar su influencia en las dinámicas económicas regionales.

Métodos

La metodología de este estudio sigue un enfoque cuantitativo-descriptivo, orientado a identificar y analizar los patrones de distribución, especialización y concentración de las micro y pequeñas empresas en la ZMTA. A través del tratamiento de información secundaria y el uso de herramientas estadísticas y geoespaciales, se busca explicar cómo la localización influye en el comportamiento económico regional.

Los datos empleados se clasificaron en dos grandes categorías:

- Datos estructurales: Población ocupada, número de unidades económicas (Micro y pequeñas empresas), distribución sectorial (primario, secundario, comercio, servicios).
- Datos espaciales y territoriales: Delimitación de municipios, ubicación geográfica y densidad económica, extraídos de INEGI.

Se utilizaron bases de datos oficiales del INEGI, incluyendo el Censo de Población y Vivienda (2020), la Encuesta Intercensal (2015) y el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2023). Asimismo, se consultó literatura científica para contextualizar los modelos analíticos de localización y aglomeración económica.

1. Se realizó un proceso de normalización para estandarizar las variables y permitir la comparación entre municipios, considerando su población, superficie y número total de unidades económicas.
2. Se aplico análisis de dependencia e independencia estructural, para observar si ciertos municipios presentan especialización sectorial o diversificación económica.
3. Las herramientas estadísticas empleadas fueron Excel para análisis cuantitativo y QGIS para representación geoespacial mediante mapas temáticos.

La estrategia analítica se estructuró en tres fases:

- Diagnóstico estructural y sectorial: Se elaboró una tipología territorial de los municipios con base en su composición sectorial y tamaño económico.
- Análisis cartográfico y visualización geoespacial: Se emplearon SIG para representar espacialmente los



resultados, identificar clústeres territoriales, y evidenciar desigualdades en la concentración de Mypes por municipio.

- Cálculo de indicadores económicos espaciales: Por lo que se calcularon tres indicadores fundamentales para medir la distribución sectorial de las Mypes.

Coeficiente de Localización (*CL*)[2]

Este indicador sirvió para medir la concentración relativa de un sector económico en un territorio específico en comparación con la media regional. Un valor superior a uno indicó que el sector en cuestión está sobrerrepresentado en dicho territorio, lo que sugiere una especialización productiva en esa actividad.

$$CL = \frac{\frac{Eij}{Ei}}{\frac{Nj}{N}}$$

Donde:

E_{ij} = Población ocupada en rama *j* en región *i.*
E_i = Población total ocupada en la región *i.*
N_j = Población ocupada en rama *j* a nivel nacional.
N = Población ocupada a nivel nacional.

Coeficiente de Especialización (CE)

Se utilizó para evaluar el grado de homogeneidad o diversidad en la estructura productiva de un municipio. Cuanto mayor es el valor del coeficiente, mayor es la especialización sectorial del territorio, lo que indicó una menor diversificación económica.

$$C_jE = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{E_{ij}}{E_1} - \frac{N_j}{N}\right|$$

Coeficiente de participación sectorial y regional

Con este indicador buscó identificar el peso relativo de cada sector económico dentro del municipio, así como su contribución al conjunto regional. Su análisis permitió comprender el papel que desempeñan las distintas actividades productivas en la configuración territorial del trabajo y en los procesos de especialización económica.

$$C_fL = \frac{1}{2}\sum_{n-1}^{i}\left|\frac{E_{ij}}{E_1} - \frac{N_j}{N}\right|$$

Esta metodología permite establecer relaciones claras entre los indicadores económicos y las dinámicas territoriales. El uso combinado de los coeficientes y la cartografía estadística ofrece una visión integral del comportamiento espacial de las Mypes, permitiendo anticipar patrones como:

- Municipios especializados por sector (textil, comercio, manufactura)
- Concentración económica por sectores económicos.

[2] Formulas obtenidas de Aguilar Ibarra (2011).

Resultados

Distribución de las micro y pequeñas Empresas en la ZMTA

La ZMTA presenta una distribución heterogénea de las unidades económicas, influenciada principalmente por factores geográficos, económicos y sociodemográficos. En la Figura 3, se observa que hay concentraciones de las micro y pequeñas empresas del estado de Tlaxcala.

El municipio de Tlaxcala, además de ser el principal centro administrativo y político del estado, concentra un gran número de Mypes debido a su capacidad para atraer consumidores tanto locales como regionales. Por su parte, Apizaco, caracterizado por su conectividad ferroviaria e infraestructura comercial, se ha consolidado como un eje económico clave, especialmente en el sector comercio y servicios. Chiautempan, conocido por su tradición textil, alberga una alta concentración de unidades económicas relacionadas con esta actividad, formando un clúster relevante en la dinámica económica de la ZMTA. Por otro lado, los municipios como Atlangatepec y Muñoz de Domingo Arenas presentan la menor cantidad de Mypes. Para comprender el panorama general de las micro y pequeñas empresas en la ZMTA, es fundamental analizar su distribución por categoría en función de su contribución al tejido económico regional.

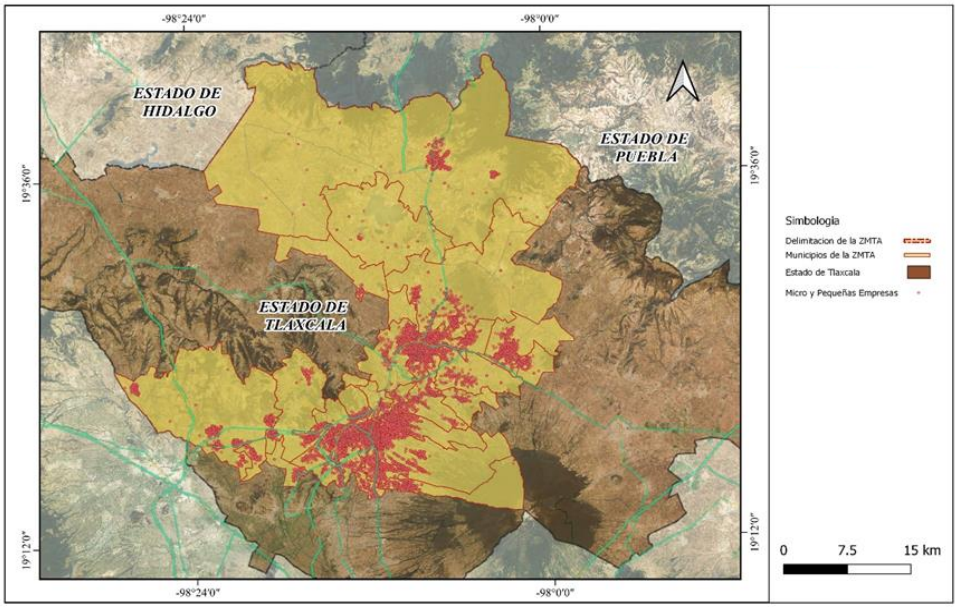


Figura 3. Micro y pequeñas empresas de la ZMTA.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI: DENUE (2023).



En la Tabla 2 se presenta la distribución de las Mypes en los municipios que conforman la ZMTA. Este análisis permite observar la cantidad total de unidades económicas por municipio, desglosadas en micro y pequeñas empresas. Destaca la notable concentración de actividades económicas en municipios como Tlaxcala, Apizaco y Chiautempan, que funcionan como ejes principales de la actividad comercial y de servicios en la región, en contraste con localidades de menor dinamismo económico. Este panorama refleja las disparidades en el desarrollo económico entre los municipios de la ZMTA.

Este panorama refleja la predominancia de negocios de menor escala, alineados con las características de una economía local enfocada en actividades comerciales, servicios y manufactura de baja intensidad.
Los municipios con mayor concentración de Mypes son Tlaxcala, Apizaco y Chiautempan. Tlaxcala, como capital del estado, cuenta con 8184 unidades económicas, destacándose por ser un importante núcleo de actividad comercial y administrativa. Le sigue Apizaco, con 8154 unidades económicas, cuya ubicación estratégica y conectividad vial lo posicionan como un eje comercial clave en la región. Por su parte, Chiautempan alberga 6941 unidades, con un fuerte enfoque en actividades textiles y comerciales.

Por otro lado, los municipios como Atlangatepec y Muñoz de Domingo Arenas presentan la menor cantidad de Mypes, con apenas 66 y 199 unidades económicas, respectivamente. Esto puede explicarse por su baja densidad poblacional, limitada conectividad y actividades económicas centradas principalmente en el sector agrícola.

Coeficiente de Localización

En la ZMTA, Atlangatepec destaca con un coeficiente de 1.70 en términos generales y 4.08 en el sector primario, lo que indica que la principal actividad económica del municipio es la agricultura, la ganadería, la pesca y el aprovechamiento forestal. Siguiendo el municipio de Muñoz de Domingo Arenas también tiene la misma especialización que Atlangatepec y cuenta con 4.11 puntos en el sector primario. Por lo tanto, estos municipios son los más descentralizados. Por otro lado, el municipio más homogéneo es Tzompantepec, que tiene el valor más bajo (0.06 puntos) y no se especializa en ningún sector. En relación con los municipios más poblados y que más empresas tiene, estos concentran sus sectores en Tlaxcala, donde predomina el de servicios, en Apizaco el sector comercio al igual que en Chiautempan (Tabla 3).

Tabla 2. Concentración de las micro y pequeñas empresas en cada municipio en la Zona Metropolitana Tlaxcala-Apizaco.

Clave Municipal	Municipios	Total	Micro	Pequeña
001	Amaxac de Guerrero	702	691	11
002	Apetatitlán de Antonio Carvajal	856	807	49
003	Atlangatepec	66	61	5
005	Apizaco	8154	7803	351
009	Cuaxomulco	207	200	7
010	Chiautempan	6941	6741	200
011	Muñoz de Domingo Arenas	199	196	3
015	Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	1936	1898	38
018	Contla de Juan Cuamatzi	2482	2426	56
024	Panotla	1083	1051	32
026	Santa Cruz Tlaxcala	974	946	28
031	Tetla de la Solidaridad	1513	1459	54
033	Tlaxcala	8184	7724	460
034	Tlaxco	1809	1746	63
035	Tocatlán	425	414	11
036	Totolac	961	937	24
038	Tzompantepec	825	797	28
039	Xaloztoc	1719	1670	49
043	Yauhquemehcan	1391	1321	70
048	La Magdalena Tlaltelulco	1261	1228	33
049	San Damián Texóloc	365	353	12
050	San Francisco Tetlanohcan	853	837	16
056	Santa Ana Nopalucan	469	459	10
060	Santa Isabel Xiloxoxtla	368	353	15

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI: DENUE (2023).



Tabla 3. Coeficiente de localización.

Sector/Municipio	Primario1	Secundario2	Comercio	Servicios3	Total
001 Amaxac de Guerrero	0.47	1.01	1.08	1.06	0.29
002 Apetatitlán de Antonio Carvajal	0.32	0.93	1.02	1.17	0.37
003 Atlangatepec	4.08	1.13	0.52	0.53	1.70
005 Apizaco	0.49	0.82	1.45	1.03	0.40
009 Cuaxomulco	2.32	0.92	0.94	0.83	0.71
010 Chiautempan	0.48	1.04	1.29	0.95	0.34
011 Muñoz de Domingo Arenas	4.11	0.87	0.72	0.63	1.69
015 Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	4.02	0.82	0.67	0.70	1.64
018 Contla de Juan Cuamatzi	0.74	1.59	0.92	0.67	0.42
024 Panotla	1.08	0.76	0.68	1.28	0.28
026 Santa Cruz Tlaxcala	0.77	1.23	0.95	0.90	0.19
031 Tetla de la Solidaridad	1.16	1.31	0.93	0.79	0.23
033 Tlaxcala	0.19	0.65	0.83	1.47	0.53
034 Tlaxco	3.61	1.24	0.67	0.48	1.45
035 Tocatlán	2.26	1.48	0.65	0.58	0.80
036 Totolac	0.18	0.79	0.77	1.39	0.49
038 Tzompantepec	1.07	1.04	1.05	0.94	0.06
039 Xaloztoc	1.49	1.54	0.78	0.63	0.47
043 Yauhquemehcan	0.52	0.96	1.21	1.03	0.29
048 La Magdalena Tlaltelulco	0.45	1.43	1.17	0.74	0.44
049 San Damián Texóloc	2.22	0.79	0.57	1.09	0.73
050 San Francisco Tetlanohcan	1.81	1.13	0.94	0.78	0.45
056 Santa Ana Nopalucan	2.08	0.70	0.63	1.15	0.67
060 Santa Isabel Xiloxoxtla	1.01	1.25	1.45	0.64	0.35
Total	1.29	0.27	0.27	0.27	0.51

Para visualizar con mayor detalle la concentración de las unidades económicas en la región, se presenta el siguiente mapa (Figura 4).

Con respecto al coeficiente de especialización en la ZMTA, tenemos que los municipios más homogéneos son: Tlaxcala con 3.13, Totolac con 3.14, Apetatitlán con 3.44, Amaxac con 3.62, Chiautempan con 3.76 y Apizaco con 3.80 puntos. Como se esperaba, los municipios más grandes se encuentran entre los municipios más homogéneos, por lo que se puede inferir que están distribuidos equitativamente en los todos los sectores. Los municipios más especializados son: Muñoz de Domingo Arenas con 6.32, Atlangatepec con 6.26, Ixtacuixtla con 6.20 y Tlaxco con 6.1 puntos. Todos estos municipios se especializan en el sector primario ya que cuentan con una gran extensión territorial, lo que provoca el aprovechamiento de las tierras de labor, por lo que la población aprovecha estos recursos (Tabla 4).

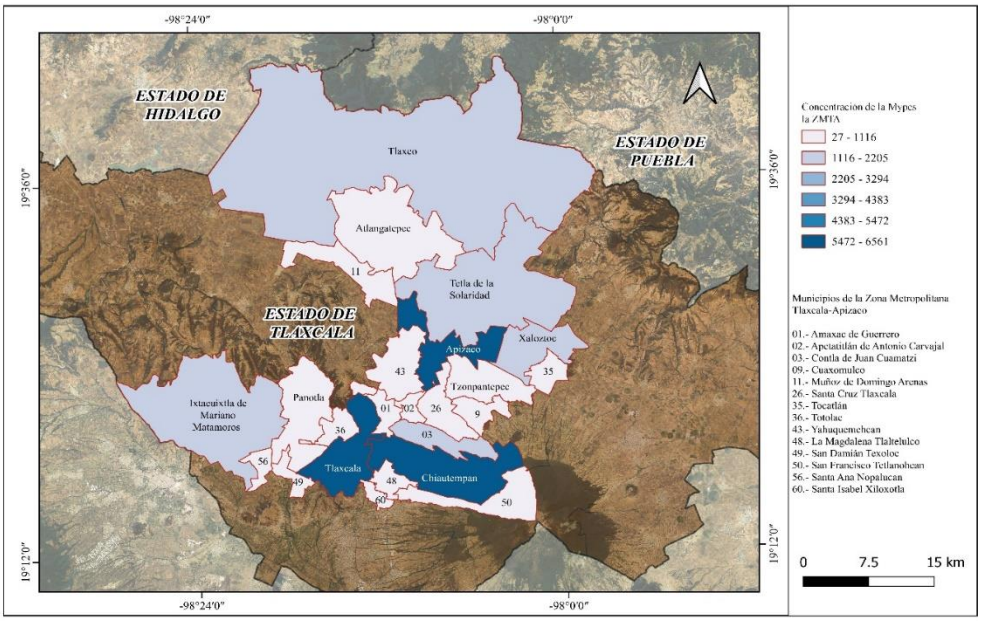


Figura 4. Concentración de Mypes en la zona metropolitana Tlaxcala-Apizaco.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI: DENUE (2023).



Tabla 4. Coeficiente de especialización.

Sector	Primario1	Secundario2	Comercio	Servicios3	Total
001 Amaxac de Guerrero	0.47	1.01	1.08	1.06	3.62
002 Apetatitlán de Antonio Carvajal	0.32	0.93	1.02	1.17	3.44
003 Atlangatepec	4.08	1.13	0.52	0.53	6.26
005 Apizaco	0.49	0.82	1.45	1.03	3.80
009 Cuaxomulco	2.32	0.92	0.94	0.83	5.01
010 Chiautempan	0.48	1.04	1.29	0.95	3.76
011 Muñoz de Domingo Arenas	4.11	0.87	0.72	0.63	6.32
015 Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	4.02	0.82	0.67	0.70	6.20
018 Contla de Juan Cuamatzi	0.74	1.59	0.92	0.67	3.92
024 Panotla	1.08	0.76	0.68	1.28	3.80
026 Santa Cruz Tlaxcala	0.77	1.23	0.95	0.90	3.86
031 Tetla de la Solidaridad	1.16	1.31	0.93	0.79	4.18
033 Tlaxcala	0.19	0.65	0.83	1.47	3.13
034 Tlaxco	3.61	1.24	0.67	0.48	6.01
035 Tocatlán	2.26	1.48	0.65	0.58	4.97
036 Totolac	0.18	0.79	0.77	1.39	3.14
038 Tzompantepec	1.07	1.04	1.05	0.94	4.11
039 Xaloztoc	1.49	1.54	0.78	0.63	4.43
043 Yauhquemehcan	0.52	0.96	1.21	1.03	3.72
048 La Magdalena Tlaltelulco	0.45	1.43	1.17	0.74	3.78
049 San Damián Texóloc	2.22	0.79	0.57	1.09	4.67
050 San Francisco Tetlanohcan	1.81	1.13	0.94	0.78	4.66
056 Santa Ana Nopalucan	2.08	0.70	0.63	1.15	4.57
060 Santa Isabel Xiloxoxtla	1.01	1.25	1.45	0.64	4.36



Participación sectorial y regional

os resultados muestran que, en la ZMTA, el sector Servicios predomina en la mayoría de los municipios. Destacan Tlaxcala y Totolac, donde más del 60% de la población se dedica a este sector. Por otro lado, el sector primario es el que menor participación tiene especialmente en los municipios de Totolac y Tlaxcala sin rebasar el 2% de la población dedicada a este sector en los municipios. En sector secundario, el municipio que tiene más representación de este sector es Xalostoc con el 46.7% de su población dedicada a esta actividad. En el sector comercio, el municipio con mayor participación es Santa Isabel Xiloxoxtla ya el 25.85% de la población total del municipio se dedica al comercio (Tabla 5).

Participación regional de cada sector

En los resultados obtenidos, se tiene que la población con más participación en el sector primario son los del municipio de Tlaxco, siguiendo el municipio de Ixtacuixtla y los que menos representación tienen en este sector son los municipios de Totolac y Santa Isabel Xiloxoxtla. Esto se puede deber también a que son municipios con poca población. En relación con el sector secundario, la población de los municipios de Chiautempan, Apizaco y Tlaxcala sobresale más al ocuparse en este sector, por otro lado, los municipios cuya población se ocupa menos en este sector son Muñoz de Domingo Arenas y Cuaxomulco. En el sector comercial, la población de los municipios que más se ocupa en este sector son Apizaco, Chiautempan y Tlaxcala. Y finalmente en el sector servicios, en Tlaxcala, Apizaco y Chiautempan su población se dedica a este sector en su mayoría (Tabla 6).

Participación del estado

Este análisis considero la importancia de determinar la participación de cada uno de los sectores en los municipios de la ZMTA. El municipio con más actividad de empleabilidad se centra en el municipio de Tlaxcala en el sector servicios, seguido de Apizaco y Chiautempan en el mismo sector, al igual que trascienden en los demás sectores, pero en menor medida. Los municipios que tienen menor representación son Amaxac y Apetatitlán en el sector agrícola, este es el sector que menos aporta a la ZMTA, por lo que en algunos municipios es casi nula su participación, a diferencia de lo que sucede en sector servicios y comercio (Tabla 7).



Tabla 5. Participación sectorial y municipal.

Sector	Primario1	Secundario2	Comercio	Servicios3
001 Amaxac de Guerrero	3.84	30.55	19.27	46.33
002 Apetatitlán de Antonio Carvajal	2.59	28.09	18.21	51.11
003 Atlangatepec	33.27	34.12	9.32	23.28
005 Apizaco	3.99	24.84	25.87	45.30
009 Cuaxomulco	18.89	28.00	16.67	36.44
010 Chiautempan	3.89	31.58	22.88	41.66
011 Muñoz de Domingo Arenas	33.49	26.21	12.74	27.56
015 Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	32.73	24.80	11.99	30.48
018 Contla de Juan Cuamatzi	6.03	48.12	16.32	29.52
024 Panotla	8.81	22.99	12.17	56.03
026 Santa Cruz Tlaxcala	6.29	37.25	16.91	39.55
031 Tetla de la Solidaridad	9.46	39.52	16.54	34.48
033 Tlaxcala	1.58	19.56	14.68	64.18
034 Tlaxco	29.46	37.62	11.90	21.03
035 Tocatlán	18.45	44.80	11.50	25.25
036 Totolac	1.51	23.88	13.74	60.87
038 Tzompantepec	8.76	31.51	18.72	41.00
039 Xaloztoc	12.15	46.57	13.86	27.42
043 Yauhquemehcan	4.24	28.94	21.58	45.24
048 La Magdalena Tlaltelulco	3.65	43.36	20.81	32.19
049 San Damián Texóloc	18.07	24.01	10.13	47.79
050 San Francisco Tetlanohcan	14.74	34.28	16.64	34.34
056 Santa Ana Nopalucan	16.94	21.30	11.26	50.50
060 Santa Isabel Xiloxoxtla	8.27	37.82	25.85	28.06



Tabla 6. Participación regional de cada sector.

Sector	Primario1	Secundario2	Comercio	Servicios3
001 Amaxac de Guerrero	0.87	1.86	2.00	1.95
002 Apetatitlán de Antonio Carvajal	0.83	2.42	2.68	3.05
003 Atlangatepec	3.85	1.06	0.49	0.50
005 Apizaco	6.47	10.84	19.23	13.67
009 Cuaxomulco	1.75	0.70	0.71	0.63
010 Chiautempan	5.57	12.19	15.04	11.12
011 Muñoz de Domingo Arenas	2.56	0.54	0.45	0.39
015 Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	12.66	2.58	2.13	2.20
018 Contla de Juan Cuamatzi	4.64	9.95	5.75	4.22
024 Panotla	4.58	3.22	2.90	5.42
026 Santa Cruz Tlaxcala	2.45	3.91	3.02	2.87
031 Tetla de la Solidaridad	5.95	6.69	4.77	4.04
033 Tlaxcala	3.27	10.92	13.95	24.77
034 Tlaxco	21.94	7.54	4.06	2.92
035 Tocatlán	1.82	1.19	0.52	0.46
036 Totolac	0.68	2.88	2.83	5.08
038 Tzompantepec	2.71	2.62	2.65	2.36
039 Xaloztoc	5.00	5.16	2.62	2.10
043 Yauhquemehcan	3.17	5.82	7.40	6.30
048 La Magdalena Tlaltelulco	1.13	3.62	2.96	1.86
049 San Damián Texóloc	1.96	0.70	0.50	0.96
050 San Francisco Tetlanohcan	2.85	1.78	1.48	1.24
056 Santa Ana Nopalucan	2.52	0.85	0.77	1.40
060 Santa Isabel Xiloxoxtla	0.77	0.95	1.11	0.49

Tabla 7. Participación del estado.

Sector	Primario1	Secundario2	Comercio	Servicios3
001 Amaxac de Guerrero	0.07	0.56	0.35	0.85
002 Apetatitlán de Antonio Carvajal	0.07	0.73	0.48	1.34
003 Atlangatepec	0.31	0.32	0.09	0.22
005 Apizaco	0.53	3.28	3.42	5.99
009 Cuaxomulco	0.14	0.21	0.13	0.28
010 Chiautempan	0.45	3.69	2.67	4.87
011 Muñoz de Domingo Arenas	0.21	0.16	0.08	0.17
015 Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	1.03	0.78	0.38	0.96
018 Contla de Juan Cuamatzi	0.38	3.01	1.02	1.85
024 Panotla	0.37	0.97	0.52	2.38
026 Santa Cruz Tlaxcala	0.20	1.18	0.54	1.26
031 Tetla de la Solidaridad	0.49	2.03	0.85	1.77
033 Tlaxcala	0.27	3.31	2.48	10.85
034 Tlaxco	1.79	2.28	0.72	1.28
035 Tocatlán	0.15	0.36	0.09	0.20
036 Totolac	0.06	0.87	0.50	2.22
038 Tzompantepec	0.22	0.79	0.47	1.03
039 Xaloztoc	0.41	1.56	0.47	0.92
043 Yauhquemehcan	0.26	1.76	1.32	2.76
048 La Magdalena Tlaltelulco	0.09	1.09	0.53	0.81
049 San Damián Texóloc	0.16	0.21	0.09	0.42
050 San Francisco Tetlanohcan	0.23	0.54	0.26	0.54
056 Santa Ana Nopalucan	0.21	0.26	0.14	0.61
060 Santa Isabel Xiloxoxtla	0.06	0.29	0.20	0.21
Total	8.15	30.29	17.78	43.79

Discusión

El análisis de la distribución y concentración de las micro y pequeñas empresas en la ZMTA coincide con estudios previos sobre economías urbanas y regionales. Por ejemplo, las economías de aglomeración fomentan la concentración de actividades económicas en áreas con ventajas competitivas, como la conectividad y el acceso a mercados. Esto se refleja en la ZMTA, donde municipios como



Tlaxcala, Apizaco y Chiautempan concentran la mayoría de las Mypes gracias a su infraestructura y ubicación estratégica.

A nivel sectorial, los clústeres económicos generan sinergias entre empresas al compartir recursos y conocimientos. En la ZMTA, la concentración de Mypes en sectores como comercio y servicios refuerza este modelo, promoviendo la competitividad regional. Sin embargo, los municipios con menor densidad de unidades economicas, como Atlangatepec y Muñoz de Domingo Arenas, evidencian lo señalado por Bao & Blanco (2014), quienes subrayaron que la falta de infraestructura y la baja diversificación económica limitan el desarrollo empresarial en regiones periféricas.

Por último, Zevallos (2003) enfatizó que las Mypes son clave para la inclusión económica en países en desarrollo, pero enfrentan barreras estructurales. Esto es evidente en la ZMTA, donde el limitado acceso a financiamiento y la falta de capacitación empresarial afectan su competitividad, alineándose con las conclusiones de Romero & Ayvar (2023).

En conjunto, este trabajo muestra cómo las Mypes son esenciales para el dinamismo económico regional, aunque con disparidades que limitan su integración plena en la economía metropolitana.

Conclusión

Las micro y pequeñas empresas representan un pilar fundamental en la estructura económica de la ZMTA, contribuyendo significativamente a las dinámicas económicas regionales. Su distribución y concentración evidencian patrones geográficos y sectoriales que responden tanto a las ventajas competitivas de los municipios como a los desafíos estructurales que enfrentan. Los municipios de Tlaxcala, Apizaco y Chiautempan se posicionan como los principales núcleos de actividad económica debido a su conectividad, densidad poblacional e infraestructura, lo que les permite atraer una mayor cantidad de Mypes. Esta concentración no solo genera empleo y dinamismo económico, sino que también fortalece las cadenas productivas y el tejido social regional.

No obstante, la desigualdad en la distribución de estas unidades económicas pone de manifiesto importantes disparidades territoriales dentro de la ZMTA. Municipios periféricos como Atlangatepec y Muñoz de Domingo Arenas, con menor densidad de empresas, enfrentan limitaciones en términos de infraestructura, conectividad y acceso a recursos, lo que restringe su capacidad para integrarse plenamente en las dinámicas económicas de la región. Este desequilibrio refleja la necesidad de políticas públicas que impulsen el desarrollo económico equilibrado, favoreciendo la inclusión de estos municipios



en el proceso de crecimiento regional.

Además, el análisis sectorial muestra una marcada especialización de las Mypes en los sectores comercio y servicios, especialmente en los municipios más desarrollados. Aunque esta orientación potencia la generación de empleo y el consumo interno, también expone a la región a riesgos derivados de la falta de diversificación económica, especialmente en los municipios que dependen en gran medida del sector primario. En este contexto, se destaca la importancia de fomentar la diversificación de actividades económicas, así como el fortalecimiento de los sectores estratégicos en municipios especializados.

El estudio también evidencia la relevancia de factores como la aglomeración y la proximidad geográfica en la competitividad de las Mypes. Mientras los municipios con una mayor concentración económica presentan dinámicas de crecimiento más aceleradas, también enfrentan desafíos relacionados con la saturación del mercado y la competencia desleal, lo que requiere estrategias integrales para garantizar la sostenibilidad y el equilibrio económico.

En suma, las Mypes son actores esenciales para el desarrollo económico de la ZMTA, no solo por su capacidad para generar empleo y dinamismo económico, sino también por su impacto en la cohesión social y la innovación regional. Sin embargo,

para maximizar su potencial, es necesario implementar políticas públicas que aborden las desigualdades territoriales, mejoren el acceso a financiamiento e infraestructura, y fomenten la capacitación empresarial y la diversificación económica. Solo mediante un enfoque estratégico que integre a todos los municipios en el desarrollo regional será posible alcanzar un crecimiento económico más equilibrado, competitivo y sostenible en la ZMTA.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses.

Agradecimientos

Un profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica de Tlaxcala por permitirnos participar, en este tipo de proyectos tan trascendentales.

Bibliografía

Aguilar Ibarra, A. (2011). Técnicas de análisis regional para el desarrollo y aplicaciones. *Problemas del Desarrollo*, 42(164), 41-46



Bao Cruz, S. & Blanco Silva, F. (2014). Modelos de formación de clústeres industriales: revisión de las ideas que los sustentan. *Revista Galega de Economía,* 23(2), 179-198.

Bustos Gisbert, M. L. (1997). Las teorías de localización industrial: una breve aproximación. *Estudios Regionales* (35), 51-76.

Esqueda Walle, R. (2013). Economías de aglomeración en el contexto de la nueva geografía económica. *Revista Contribuciones a la economía,* 14(01), 20-29.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2015). *Tabulados de la Encuesta Intercensal 2015.* https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/ (consultado septiembre 2024).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2020). *Panorama sociodemográfico de Tlaxcala. Censo de Población y Vivienda 2020. 2021.* https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198022.pdf (consultado julio de 2024).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2023). *DENUE: Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas.* *https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx* (consultado noviembre de 2023).

Ley para el desarrollo de la competitividad de la micro, pequeña y mediana empresa (2023). Última reforma DOF 20-10-2023. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDCMPME.pdf (consultado septiembre de 2024).

Núñez Avendaño, G. (2023). *Las Micros y Pequeñas empresas son el motor económico y social de nuestro país; apostemos por su fortalecimiento.* Confederación Patronal de la República Mexicana (COPARMEX). https://coparmex.org.mx/las-micros-y-pequenas-empresas-son-el-motor-economico-y-social-de-nuestro-pais-apostemos-por-su-fortalecimiento/ (consultado agosto 2024).

Plan de Desarrollo de la Zona Metropolitana Tlaxcala-Apizaco (2013). *Secretaria de Obras Públicas, Desarrollo Urbano y Vivienda*. https://sfp.tlaxcala.gob.mx/pdf/normateca/Plan%20de%20Desarrollo%20de%20la%20Zona%20Metropolitana%20Tlaxcala-Apizaco..pdf (consultado octubre de 2023).



Romero Burgos, C., & Ayvar Campos, F. J. (2023). Las MiPymes en el contexto económico mexicano y la necesidad de su relocalización espacial. En Nuevas territorialidades-economía sectorial y reconfiguración territorial. UNAM-AMECIDER, 73-90

Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (2023). *Metrópolis de México 2020*. https://www.gob.mx/sedatu/documentos/metropolis-de-mexico-2020?state=published (consultado noviembre 2024).

Secretaria de Economía (2024). *Mipymes mexicanas: motor de nuestra economía. Subsecretaría de Comercio Exterior Unidad de Inteligencia Económica Global Primera versión*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/923851/20240626_Dosier_MIPYMES_SALIDA_Interactivo_5_.pdf (consultado octubre 2024).

Zevallos V., E. (2003). Micro, pequeñas y medianas empresas en América Latina. *Revista de la CEPAL*, 79, 53-70.

CIENCIA CONECTADA

Ciencia Conectada (2026) Volumen 1, 65-84
https://uptlax.edu.mx/ciencia-conectada-2/



Expansión urbana y Vulnerabilidad social del municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala

Arenas Muñoz, A[1*], Delgado Serrano, VE[2]

[1, 2]El Colegio de Tlaxcala, A.C. Doctorado en Desarrollo Regional. Av. Melchor Ocampo No. 28, San Pablo Apetatitlán, Tlaxcala, México, C.P. 90600.

Correspondencia:

Autor de correspondencia:* ***alondraarenasmunoz@gmail.com*

Abstract

This study analyzes urban expansion and social vulnerability in Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, during the period 2010-2020. Using a quantitative and spatial approach, urban growth and access to basic services such as electricity, water, and sewage disposal were examined. A growing urban expansion of 5.2% was found, with an annual population growth rate of 1.75%. While most homes have electricity and sewage disposal, challenges in accessing piped water persist, especially in peri-urban areas. Social vulnerability was analyzed from a multidimensional perspective, highlighting the importance of regional development to reduce inequalities. The results show that, although the municipality has made progress in service coverage, areas such as Tepetitla and San Mateo Ayecac require priority attention due to their greater vulnerability. It is concluded that urban growth in Tepetitla de Lardizábal offers opportunities to implement public policies that improve equity and sustainability. By proposing combined actions with citizen participation mechanisms, they can transform current challenges into opportunities for more balanced development. The work underscores the importance of simultaneously addressing social, economic, and environmental dimensions to achieve sustainable and inclusive urban growth in Tepetitla de Lardizábal.

Key words: Regional development; Social inequality; Urban expansión; Tepetitla de Lardizábal.



Resumen

El estudio analiza la expansión urbana y la vulnerabilidad social en Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, durante 2010-2020. Desde un enfoque cuantitativo y espacial, se examinó el crecimiento urbano y el acceso a servicios básicos como electricidad, agua y drenaje. Por lo que, se encontró una expansión urbana creciente de un 5.2%, con una tasa de crecimiento poblacional anual del 1.75%. Si bien la mayoría de las viviendas cuentan con electricidad y drenaje, persisten desafíos en el acceso al agua entubada, especialmente en zonas periurbanas. La vulnerabilidad social se analizó desde un enfoque multidimensional, destacando la importancia del desarrollo regional para reducir desigualdades. Los resultados mostraron que, aunque el municipio presenta avances en cobertura de servicios, áreas como Tepetitla y San Mateo Ayecac requieren atención prioritaria debido a su mayor vulnerabilidad. Se concluyó que el crecimiento urbano en Tepetitla de Lardizábal ofrece oportunidades para implementar políticas públicas que mejoren la equidad y sostenibilidad. Al proponer acciones combinadas con mecanismos de participación ciudadana, pueden transformar los retos actuales en oportunidades para un desarrollo más equilibrado. El trabajo subrayó la importancia de abordar simultáneamente las dimensiones sociales, económicas y ambientales para lograr un crecimiento urbano sostenible e inclusivo en Tepetitla de Lardizábal.

Palabras clave: Desarrollo regional; Desigualdad social; Expansión urbana; Tepetitla de Lardizábal.

Introducción

El enfoque de vulnerabilidad social ofrece un marco analítico clave para comprender las desigualdades estructurales que afectan a poblaciones específicas (Ramos-Ojeda, 2019). En contextos urbanos, estas disparidades se manifiestan particularmente en el acceso diferenciado a servicios básicos y oportunidades económicas, configurando escenarios complejos que requieren aproximaciones multidimensionales.

La dinámica de expansión urbana no planificada representa un factor crítico que intensifica los niveles de vulnerabilidad. Este fenómeno genera una creciente presión sobre la infraestructura de servicios que, al no expandirse proporcionalmente, profundiza las brechas sociales existentes. En el municipio de Tepetitla de Lardizábal, esta problemática adquiere características particulares que ameritan un análisis detallado, especialmente en lo concerniente a la cobertura de servicios esenciales en las viviendas particulares y su relación con los patrones de crecimiento urbano.

Geográficamente, Tepetitla de Lardizábal se ubica en el sur de Tlaxcala, formando parte de la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala. El



municipio presenta una configuración territorial particular, limitando con cuatro municipios y contando con cuatro localidades principales donde se desarrollan actividades económicas tradicionales (agricultura) y modernas (industria maquiladora). Su proximidad al río Atoyac añade una variable ambiental relevante al análisis.

Conforme con el Programa Municipal de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (PMOTDU) de Tepetitla de Lardizábal (Ayuntamiento de Tepetitla de Lardizábal, 2022), se detectaron las siguientes problemáticas y necesidades de la población que se muestran en la Tabla 1.

En el aspecto del medio ambiente, el municipio de Tepetitla de Lardizábal colinda con el municipio de San Martin Texmelucan, Puebla; el cual posee una importante actividad industrial en diversos sectores. En la parte textil, específicamente en la de la mezclilla, incidió continuamente con la contaminación del río Atoyac, donde el municipio de Tepetitla funge como complemento con talleres caseros de lavado de mezclilla, en la comunidad de San Mateo Ayecac.

Tabla 1. Principales problemáticas y necesidades de la población de Tepetitla de Lardizábal.

Necesidad	Problemática
Seguridad	Asaltos, robos, corrupción, falta de control, inexistencia de resguardos.
Salud	Carencia de unidades de salud y de atención médica, mala atención, insuficiente oferta y alta demanda.
Vivienda	Suministro de servicios urbanos básicos, calidad en la prestación de servicios, agua contaminada, falta de mantenimiento y predios abandonados.
Educación	Falta de infraestructura educativa para diferentes niveles, lejanía de las escuelas.
Recreación	Inexistencia de parques, canchas de fútbol y de otros deportes, falta de mantenimiento al equipamiento recreativo.
Acceso y distribución de alimentos	Limitados o inexistentes centros de abasto de alimentos preparados, tianguis y centros comerciales.
Fuentes de empleo	Limitada o muy localizada capacidad de empleo por la escasa demanda existente.



Capacitación para el trabajo	Carencia de captación externa y reducida capacitación interna en los lugares de trabajo.
Equidad salarial entre diferentes personas en la misma actividad	Entre adultos y jóvenes, entre hombres y mujeres, y entre personas no discapacitadas y personas discapacitadas.
Comunicación	Carencias en el mantenimiento de carreteras y escasas carreteras.
Medios de transporte	Poca o inexistente movilidad, funcionamiento en horarios reducidos.
Medio ambiente y recursos naturales	Contaminación de aguas, suelo y aire, degradación de calles por escaso mantenimiento; canales degradados y mala imagen urbana.

Fuente: Ayuntamiento de Tepetitla de Lardizábal (2022).

Las aguas residuales son tiradas en el río Atoyac sin ningún tratamiento, provocando consecuencias importantes (Gutiérrez-Ortiz, 2022).

En cuanto a la situación de pobreza y de carencias sociales, Tepetitla en el 2020 tuvo un porcentaje del 60.8% de la población que se encontraba en situación de pobreza moderada y el 11.2% en pobreza extrema. La población vulnerable por carencias sociales llegó a un 13.1%, mientras que la población vulnerable por ingresos fue del 8.15%. Por tal razón, se dan a conocer que las principales carencias sociales que tiene el municipio son: el acceso a la seguridad social, a los servicios de salud y a la alimentación (Data México, 2020). Derivado de las problemáticas anteriores en materia del acceso a los servicios básicos por parte de la población, la desigualdad social y la pobreza, se pretende determinar la vulnerabilidad social y la expansión urbana del municipio de Tepetitla de Lardizábal para conocer el panorama general en el que se encuentra el municipio de estudio sobre este tema. Por lo que, la pregunta general del presente trabajo es ¿Cuál es el panorama general sobre el crecimiento urbano y la vulnerabilidad social en el municipio de Tepetitla de Lardizábal?

La vulnerabilidad social y el desarrollo regional

La vulnerabilidad social permite identificar las características y condiciones específicas de



una población que la hacen propensa a enfrentar diversas dificultades, ya sea por factores económicos, desastres naturales, problemas sociales o cuestiones de salud. Para comprender con mayor claridad este concepto, se retoma la definición de Ramos-Ojeda (2019), quien lo describió como:

> *Parte de un proceso donde activos y estructura de oportunidades configuran un entramado social con vistas al logro del bienestar. Es un enfoque complejo, multidimensional, asociado a condiciones de inseguridad, indefensión de individuos, hogares, comunidades, para enfrentar situaciones límites que obstaculizan su movilidad ascendente en contextos históricos y socioeconómicos concretos. (pág. 139)*

Por otra parte, Peña (2014) señaló que la vulnerabilidad social:

> *Se asocia a las condiciones de riesgo, de dificultad, que inhabilita de manera inmediata o en el futuro, a los grupos afectados, en la satisfacción de su bienestar en tanto subsistencia y calidad de vida en contextos sociohistóricos, territorial y culturalmente determinados. (pág. 116)*

Abordar la vulnerabilidad social en una región específica, permite identificar las condiciones que obstaculizan el bienestar de la población y diseñar estrategias eficaces para superar estas limitaciones. Por ello, resulta fundamental identificar a los sectores más vulnerables y enfocarse en la reducción de las desigualdades sociales. Este enfoque es uno de los principios esenciales del desarrollo regional, cuyo objetivo principal es disminuir las brechas sociales y económicas, promover el bienestar de las comunidades y fomentar un desarrollo pleno en los territorios donde las personas residen.

En el caso del desarrollo regional, se retoma la conceptualización de Delgadillo-Macías (2004) quien señaló que el desarrollo regional es un proceso orientado a la organización y transformación de los espacios y los territorios. Como concepto, el desarrollo regional tiene atribuciones que definen un campo de interacción en las dimensiones más importantes del desarrollo, en lo que concierne a cambios cualitativos en los planos económico, social, político, ambiental, tecnológico y territorial. En la práctica se asocia a la organización productiva y al progreso técnico con las tareas de gobernabilidad y gestión; la preservación del ambiente y la organización territorial de la sociedad que habita dentro de las mismas. El desarrollo regional incorpora principios de equidad y participación, es decir, se

reconocen las vertientes del desarrollo en un sentido integral.

Contexto municipal

El municipio de Tepetitla de Lardizábal se ubica entre los paralelos 19° 15' y 19° 19' de latitud norte; los meridianos 98° 20' y 98°25' de longitud oeste; con una altitud de 2300 m. En la Figura 1 se puede apreciar la ubicación de Tepetitla y los municipios con los que colinda, los cuales son: Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Santa Ana Nopalucan, Nativitas y San Martín Texmelucan, Puebla. Como se puede observar, el municipio tiene cuatro localidades: Villa Alta, San Mateo Ayecac, Guadalupe Victoria y Tepetitla (INEGI, 2020). El municipio tiene una superficie de 23.1 km^2 y representa el 0.6% del territorio estatal. Hay un total de 22274 habitantes (1.7% de la población estatal), de los cuales, el 52.0% son mujeres y el 48.0% hombres. Tiene una densidad poblacional de 963.9 hab./km^2 y un total de 5,694 viviendas particulares habitadas. Del total de habitantes, el 43% habita en la localidad de Tepetitla, el 35% en Villa Alta, el 20% en San Mateo Ayecac y el 2% en Guadalupe Victoria. El 60.1% de la población es económicamente activa (PEA[3]). De la PEA, el 60.0% son hombres y el 40.0% mujeres. De la población no económicamente activa, el 44% se dedica a los quehaceres del hogar, el 40% son estudiantes, el 10% corresponde a personas en otras actividades no económicas, el 4% son pensionadas (os) o jubiladas (os) y el 2% son personas con alguna limitación física o mental que les impide trabajar (INEGI, 2020) (Figura 2).

Este estudio se propone dos objetivos fundamentales: primero, caracterizar cuantitativamente el proceso de expansión urbana ocurrido entre 2010-2020; y segundo, evaluar los niveles de vulnerabilidad social asociados al déficit en tres servicios básicos fundamentales: electricidad, agua entubada y sistema de drenaje. La conjunción de estos análisis permitirá identificar patrones espaciales y proponer estrategias de intervención adecuadas al contexto municipal.

[3] La PEA corresponde a la población de 12 años y más que no asisten a la escuela o que no poseen alguna limitación para el trabajo (INEGI, 2020).

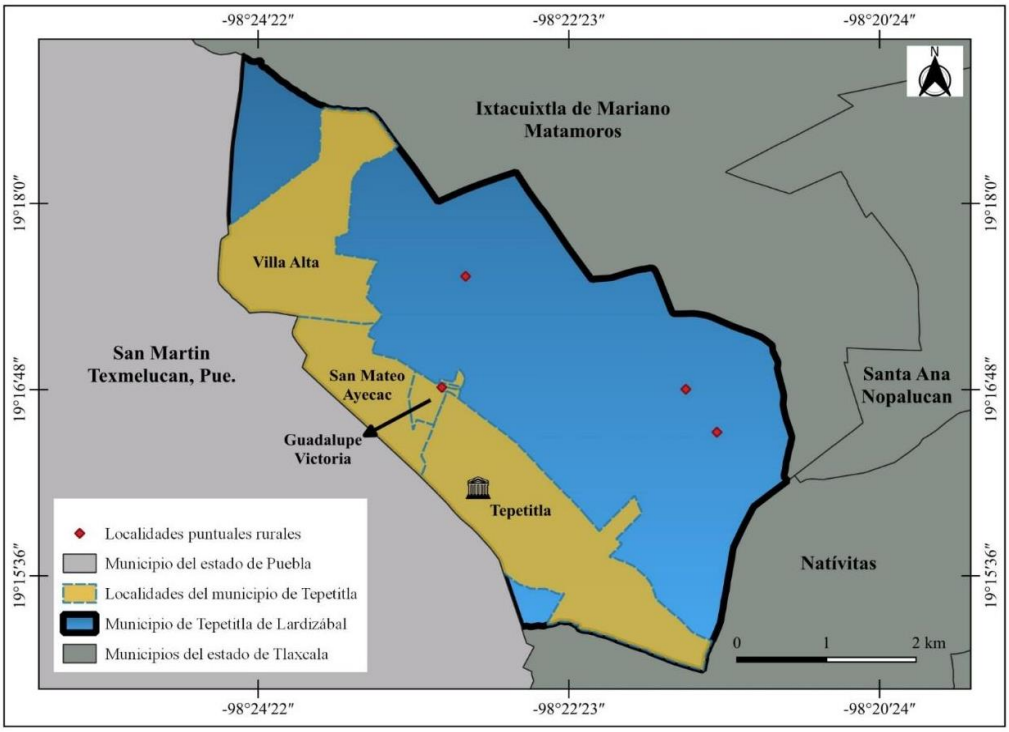


Figura 1. Municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Fuente: Elaboración propia (2024).

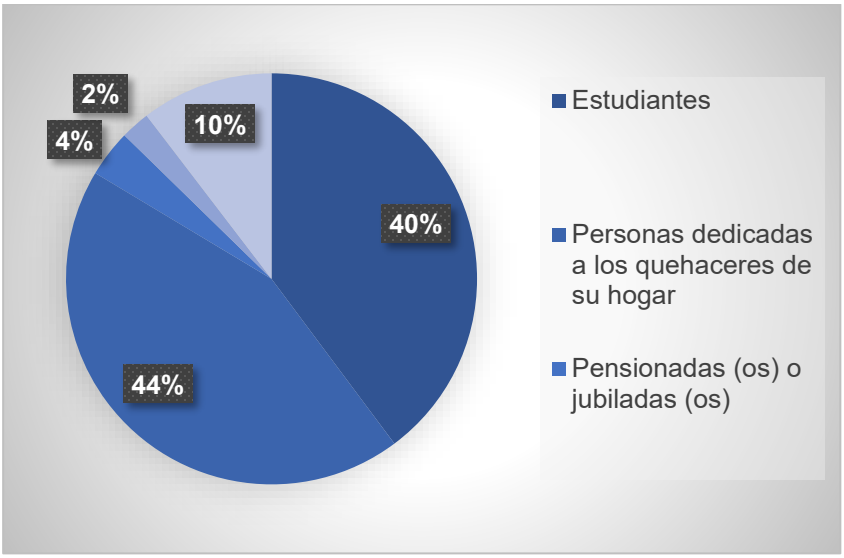


Figura 2. Población No Económicamente Activa (PNEA).

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).



Métodos

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, complementado con un análisis espacial y documental. Este enfoque permitió identificar y representar de manera precisa las dinámicas de crecimiento urbano y las condiciones de vulnerabilidad social en el municipio de Tepetitla de Lardizábal durante el periodo 2010-2020. La recolección de datos se basó en fuentes oficiales y herramientas tecnológicas. Entre ellas, se utilizó el Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI para obtener información demográfica y socioeconómica detallada a nivel de manzana, localidad y municipio. En paralelo, se empleó Google Earth Pro para delimitar y analizar el área urbana del municipio a partir de imágenes satelitales correspondientes a los años 2010 y 2020, seleccionando una altitud de 4.60 km sobre el terreno para garantizar una representación clara de la expansión urbana. Además, se revisaron documentos clave, como el Programa Municipal de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (PMOTDU) de Tepetitla de Lardizábal, así como investigaciones académicas relacionadas con la temática.

Para estructurar el análisis, se definieron indicadores clave que permitieron medir el crecimiento urbano y la vulnerabilidad social. En el caso del crecimiento urbano, se consideró el área urbana en metros cuadrados, el incremento porcentual del área durante el periodo de estudio, la tasa de crecimiento poblacional relativa y la densidad poblacional. Por otro lado, para evaluar la vulnerabilidad social, se calcularon proporciones de viviendas particulares habitadas sin acceso a electricidad, agua entubada y drenaje, empleando una fórmula que integra estas variables para determinar índices de vulnerabilidad social a nivel municipal y por localidad.

El procesamiento de los datos se llevó a cabo con herramientas específicas para garantizar la precisión en los cálculos y las representaciones. Se utilizó Excel para realizar operaciones matemáticas y estadísticas, como el cálculo de tasas y promedios, mientras que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) QGIS permitieron realizar análisis espaciales y generar mapas temáticos que representaron gráficamente la expansión urbana y los niveles de vulnerabilidad social en distintas áreas del municipio. Google Earth Pro fue empleado para trazar polígonos digitales y delimitar las áreas urbanas, facilitando el cálculo de las superficies de expansión y su comparación entre 2010 y 2020. Finalmente, el análisis de los resultados se organizó en dos dimensiones principales: la expansión urbana y la vulnerabilidad social. En el primer caso, se identificaron las áreas de crecimiento del municipio, señalando las zonas con mayor expansión y su relación con el uso del suelo. En el segundo caso, se analizaron las diferencias entre localidades y



manzanas, destacando los sectores más afectados por carencias en servicios básicos y contextualizando estas condiciones en el panorama socioeconómico del municipio.

Esta metodología integral proporciona un marco robusto para comprender las dinámicas territoriales y sociales de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala; sentando las bases para diseñar estrategias de desarrollo urbano y social más equitativas y sostenibles.

Vulnerabilidad social por acceso a servicios (Vs)

Se determinó la vulnerabilidad social a nivel de manzana en el municipio de Tepetitla, así como a nivel municipal y de sus localidades. Por lo que, se ocupó la información del censo de Población y Vivienda de INEGI al año 2020 a nivel de manzana. Para analizar la información se recurrió a EXCEL para recopilar datos del municipio y sus localidades, para así calcular la vulnerabilidad social, mediante la siguiente fórmula que se enfoca al acceso de servicios básicos (agua, energía eléctrica y drenaje):

*Vs = (((viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica + Viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda + Viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje) / Viviendas particulares habitadas) / 3) * 100) + ((Viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica, agua entubada, ni drenaje/ Viviendas particulares habitadas) * 100)).*

Expansión urbana y crecimiento poblacional

Se determinó la expansión urbana experimentada por el municipio de Tepetitla de Lardizábal durante el periodo comprendido entre 2010 y 2020. Para evaluar el crecimiento poblacional, se contrastaron los números de habitantes registrados en ambos años, calculando las respectivas tasas de crecimiento (Tabla 2). La recopilación de información sobre la extensión territorial del municipio se realizó utilizando la herramienta Google Earth, seleccionando imágenes satelitales correspondientes a los años 2010 y 2020 a una altitud de 4.60 km sobre el nivel del terreno. A partir de los datos obtenidos, se calculó la tasa de crecimiento absoluto empleando la fórmula que se detalla a continuación:

$$TCA = \frac{(DF - DI)}{DI} \times 100$$

Donde:

DF=Población total al año 2020

DI=Población total al año 2010

TCA=Tasa de crecimiento absoluto

La Tasa de Crecimiento Absoluto en términos de población, se entiende como el aumento que tuvo la cantidad de pobladores de un determinado lugar durante un periodo de tiempo específico.

Tabla 2. Población del municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Año	Población total
2010	18725
2020	22274

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020).

Para el cálculo de la tasa de cambio promedio relativa, se aplicó la siguiente fórmula:

$$TCR = ((\frac{DF}{DI})^{(\frac{1}{N})} - 1) \times 100$$

Donde:

N=Número de periodos comprendidos (de 2010 a 2020, son 10 periodos de manera anual)

Por último, se realizó el cálculo de la densidad de la población para los dos años anteriores, tomando en cuenta su población y la superficie del municipio, que es de 23.1 km^2, para así aplicar esta fórmula:

$$Densidad\ poblacional = \frac{Población}{Área\ municipal\ en\ Km}$$

Resultados

Expansión urbana y crecimiento poblacional

En la Tabla 3 se muestra el área urbana del municipio de Tepetitla de Lardizábal en metros cuadrados. En el año 2010, el área urbana era de 3447294.95 m^2 y para el año 2020 hubo un proceso de expansión de 189359.93 m^2, en total el municipio de Tepetitla de Lardizábal tuvo una zona urbana de 3636654.88 m^2. Por lo tanto, el incremento que se dio fue de 5.20% en el periodo 2010-2020.

La extensión urbana del municipio de Tepetitla de Lardizábal conforme con la información de Google Earth con respecto al año 2010 está sombreado de color verde en el mapa y el incremento que fue de 189359.93 m^2 para el 2020 está sombreado de color rojo. Es así como, la mancha urbana total del municipio es de 3636654.88 m^2, lo cual representa casi el 7% de la superficie total del municipio. Como se observa, la mayor parte de su superficie está dedicada las tierras de labor en colindancia con los municipios de Tlaxcala y la zona urbana se ubica a las orillas en la frontera con el municipio de San Martin Texmelucan, Puebla (Figura 3).

La tasa de crecimiento absoluta de la población en el periodo 2010 a 2020 en el municipio de Tepetitla de Lardizábal fue del 18.95%.

Se determinó que la tasa de cambio promedio relativa al crecimiento de la población fue del 1.75% anual, con los siguientes valores en los 10 periodos que van del 2010 al 2020 (Figura 4).

Tabla 3. Crecimiento urbano del municipio de Tepetitla de Lardizábal

Año	Área en m^2	Proceso
2010	3447294.95	Continuidad
2020	3636654.88	Total de la expansión urbana
2010-2020	189359.93	Incremento

Fuente: Elaboración propia con base en información de Google Earth (2010 y 2020).

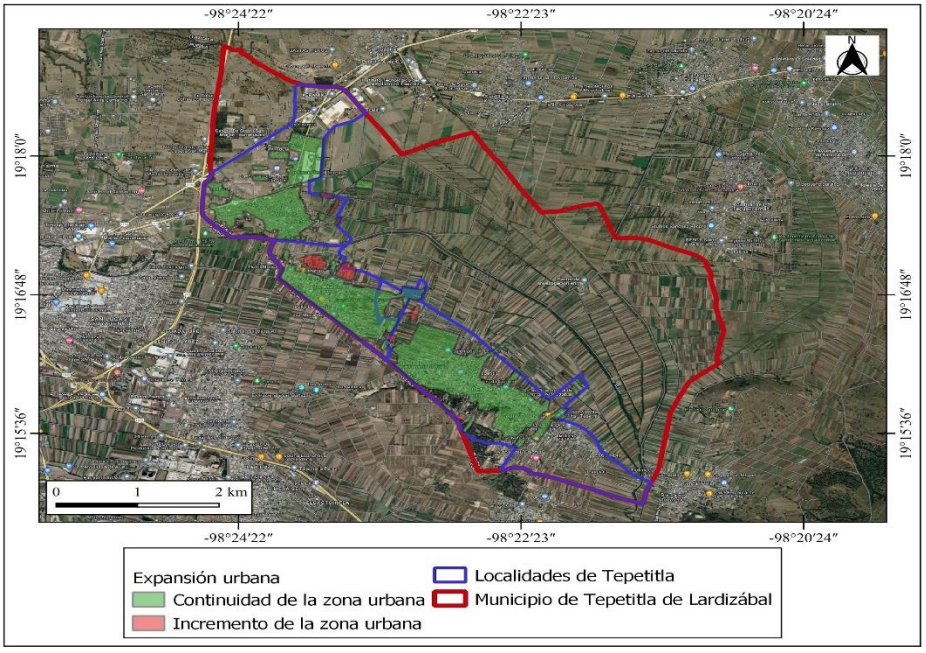


Figura 3. Expansión urbana del municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Fuente: elaboración propia con base en Información de Google Earth (2010 y 2020).

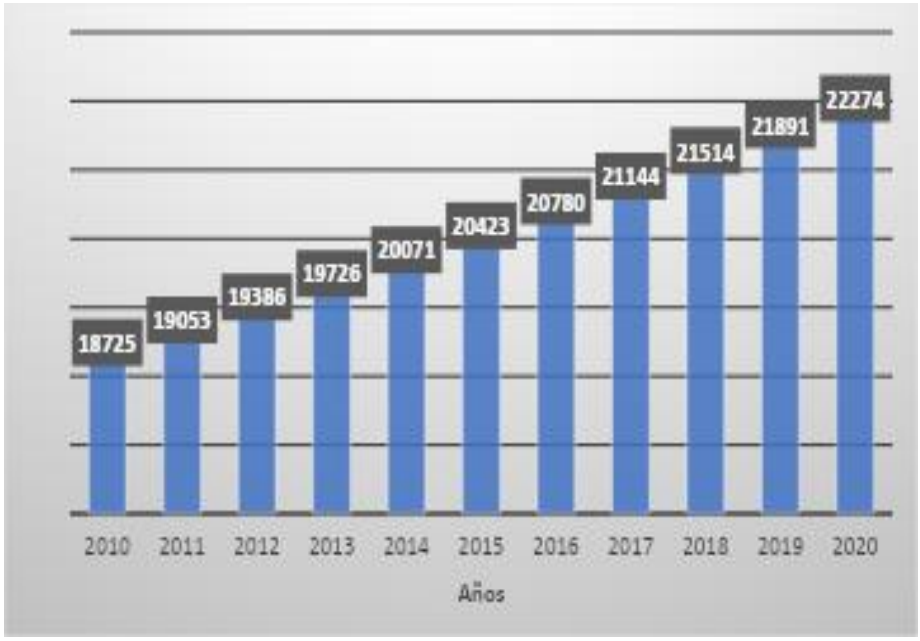


Figura 4. Crecimiento de la población del municipio de Tepetitla de Lardizábal del 2010 al 2020.

Finalmente, se determinó que la densidad de la población para el año 2010 fue de 810.6 (hab./km^2) y en el 2020 de 963.9 habitantes por kilómetro cuadrado.

Disponibilidad de servicios y equipamiento

En el caso del total de viviendas particulares habitadas, el 99.6% cuenta con energía eléctrica, el 99.4% tiene servicio sanitario, el 99.0% con drenaje, el 74.4% un tinaco, el 68.6% con agua entubada y el 12.9% una cisterna o un aljibe. Es un poco alarmante que todavía el 30% de las casas habitadas no tengan el servicio del agua entubada, es necesario ver la razón del porque no tienen el servicio (INEGI, 2020) (Figura 5).

De acuerdo con INEGI (2020), se da a conocer que del total de viviendas particulares habitadas (5,694), el 4.5% aún cuenta con piso de tierra. En el caso de los servicios y equipamiento en el hogar, el 31.4% no tiene agua entubada; el 1% drenaje; el 0.6% el servicio sanitario; el 0.4% la energía eléctrica; el 25.6% un tinaco y el 87.1% una cisterna o aljibe. En relación con la tasa de analfabetismo promedio de Tepetitla de Lardizábal al año 2020 fue de 1.82%. Del total de la población analfabeta, el 32.8% corresponde a hombres y el 67.2% a mujeres. Se consideró como población

analfabeta, a la población de 15 años y más que no saben leer ni escribir. En el tema de desigualdad, en el año 2020 Tepetitla tuvo un índice de GINI del 0.35. Este índice es una medida estadística que representa la distribución de los ingresos de los habitantes. Por lo que, valores cercanos a 0, da a entender que existe más equidad entre sus habitantes, mientras que valores cercanos a 1, señala una mayor inequidad entre la población de estudio. En el caso de este municipio, tiene una menor desigualdad social, en comparación con municipios como H uamantla (0.378), Panotla (0.372), San Francisco Tetlanohcan (0.369), Teolocholco (0.364) y Totolac (0.363) (Data México, 2020).

Conforme con las características educativas de la población de Tepetitla, en la Figura 6 se observa que el 52.0% tiene la educación básica, el 26.4% la media superior, el 19.8% la superior, el 1.8% no tiene escolaridad y el 0.1% esta no especificado. Aquí se tomó en cuenta a la población de 15 años y más (INEGI, 2020).

En la Figura 7 se presenta la situación conyugal de la población de 12 años y más, donde se da a conocer que el 33.5% es soltera, el 31.4% si está casada, el 23.2% en unión libre, el 6.9% separada, el 4.3% es viuda, el 0.8% es divorciada y el 0.0% es no especificado (INEGI, 2020).

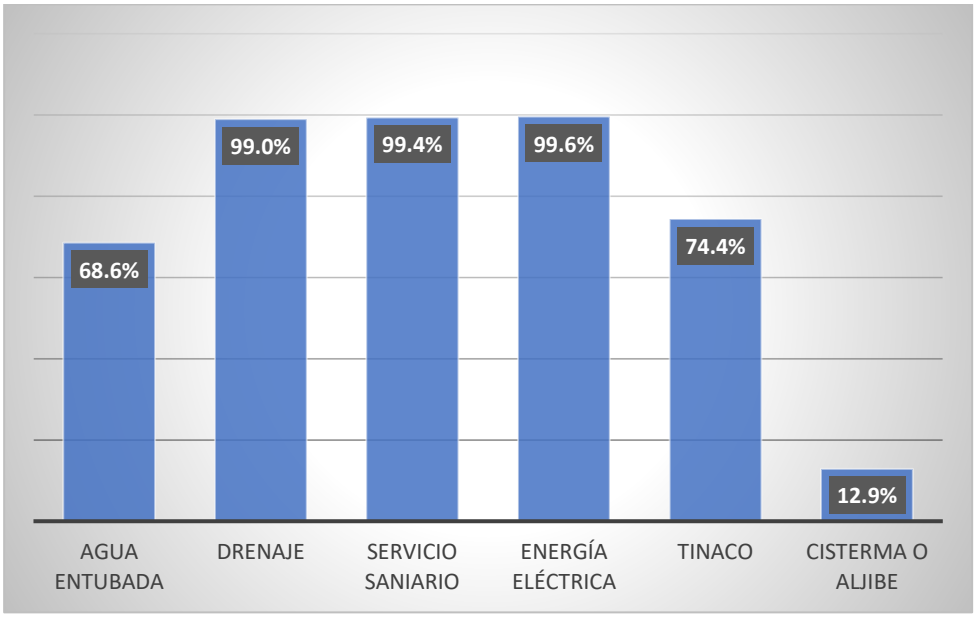


Figura 5. Disponibilidad de servicios y equipamiento.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

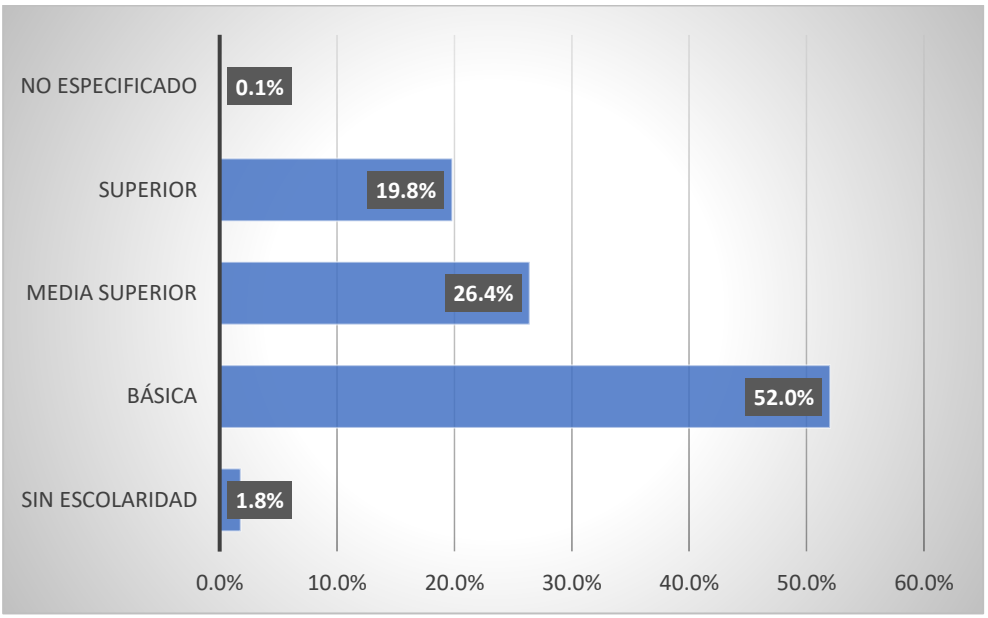


Figura 6. Población según nivel de escolaridad.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

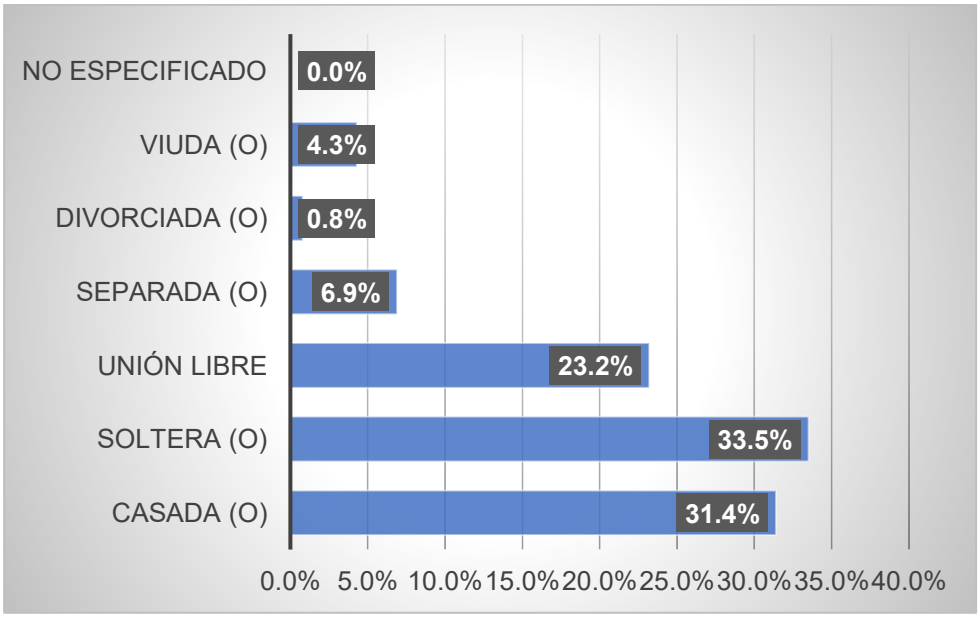


Figura 7. Población según situación conyugal.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).



En relación con la población afiliada a algún servicio de salud, está representa el 67.4% y se distribuye de la siguiente manera: el 58.2% tiene INSABI; el 25.7% IMSS; el 13.2% ISSSTE o ISSSTE estatal; el 1.4% una institución privada; el 1.0% Pemex, Defensa o Marina; el 0.9% otra institución y el 0.3% IMSS Bienestar (INEGI, 2020) (Figura 8). Conforme con la población de 3 años y más que habla alguna lengua indígena, corresponde al 0.65% y las lenguas indígenas más frecuentes son: Náhuatl (56.0%) y Totonaco (24.6%) (INEGI, 2020). Teniendo en cuenta el panorama general en el que se encuentra el municipio de Tepetitla de Lardizábal, se puede llevar a cabo el análisis sobre la vulnerabilidad social por el acceso a servicios básicos, la expansión urbana y el crecimiento poblacional.

Vulnerabilidad social por acceso a servicios (Vs)

En la Tabla 4 se muestra la vulnerabilidad social del municipio de Tepetitla de Lardizábal. De acuerdo con las localidades de Tepetitla, la más grande en cuestión de viviendas tiene una vulnerabilidad 3.75, en seguida se encuentra la localidad de San Mateo Ayecac con 3.68, siendo la tercera localidad con más viviendas; la tercera localidad con vulnerabilidad es Villa Alta con 0.90 ocupando el segundo lugar de la localidad con más viviendas y por último, la localidad más pequeña con 107 viviendas es Guadalupe Victoria, donde la totalidad de las viviendas cuentan con los servicios básicos.

En la Figura 9 se representa la vulnerabilidad del municipio de Tepetitla de Lardizábal a nivel de manzana, con respecto a las viviendas que no cuentan con electricidad, agua ni drenaje. De la representación del mapa, el municipio no tiene en gran medida una vulnerabilidad social, con excepción de la localidad de Tepetitla de Lardizábal en la frontera de esta comunidad y en colindancia con el municipio de Nativitas, se tienen cuatro manzanas que cuentan con un índice de vulnerabilidad mayor a 22.86%, debido a que tiene problemas con estos servicios; esto se puede deber a que estas manzanas se encuentran en el límite de ambos municipios.

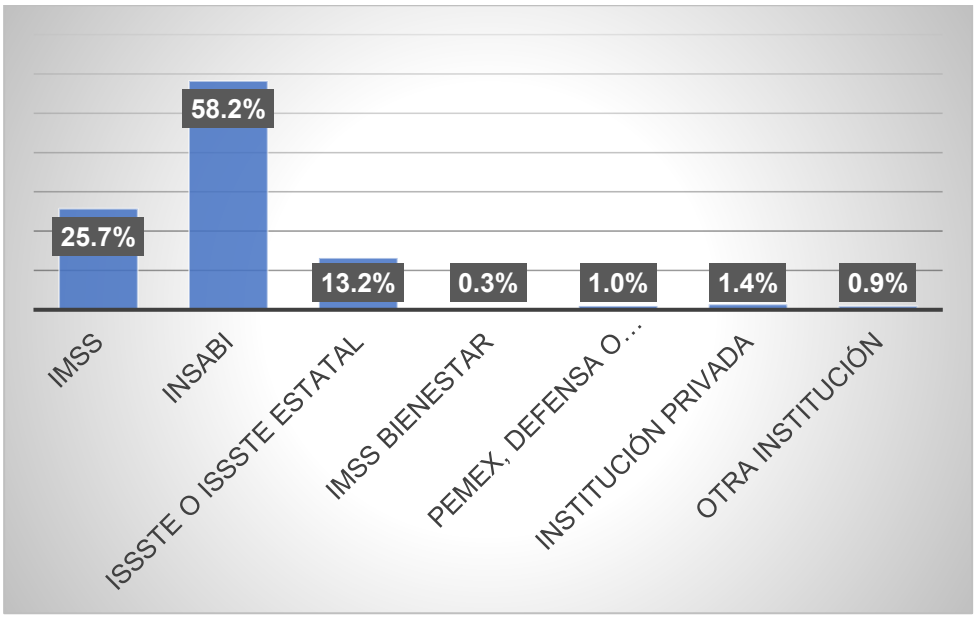


Figura 8. Población afiliada.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

Tabla 4. Vulnerabilidad social por localidad del municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Municipio y localidades	Viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas sin electricidad	Viviendas particulares habitadas sin agua	Viviendas particulares habitadas sin drenaje	Vulnerabilidad social
Total del Municipio	5,428	22	32	57	2.73
Tepetitla	2,344	14	22	30	3.75
Guadalupe Victoria	107	0	0	0	0.00
San Mateo Ayecac	1,050	4	6	19	3.68
Villa Alta	1,926	3	3	7	0.90

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

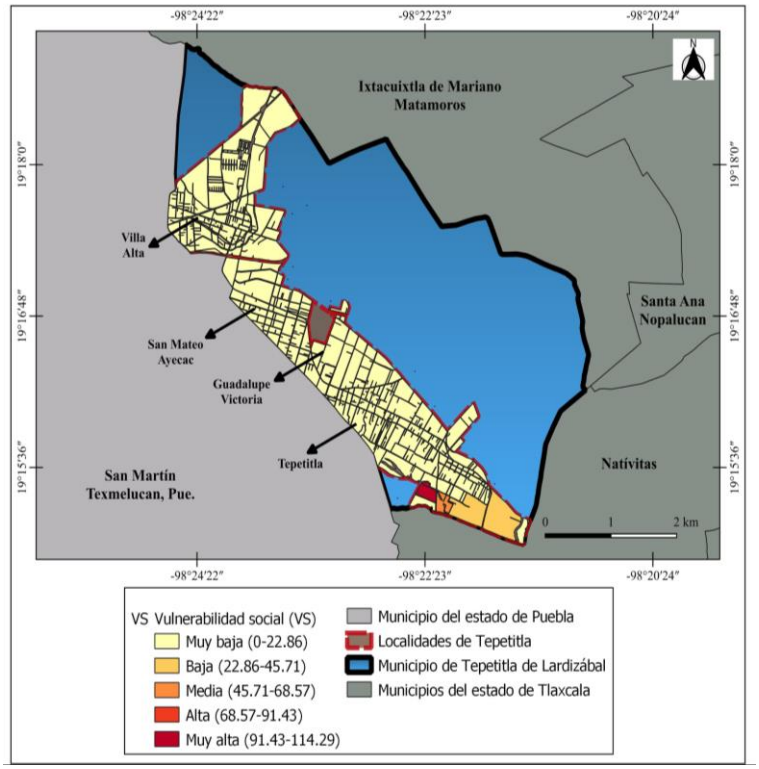


Figura 9. Vulnerabilidad a nivel de manzana del municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una relación significativa entre la expansión urbana del municipio de Tepetitla de Lardizábal y su vulnerabilidad social, reflejada principalmente en el acceso desigual a los servicios básicos. Tal como lo mencionó Ávila et al. (2019), la determinación de la vulnerabilidad social sobre un lugar en específico permite tener una mirada más integradora sobre el nivel de desventaja social y la falta de acceso a oportunidades por parte de la población, como lo son servicios básicos para la satisfacción de sus necesidades principales. Si bien se observó un incremento en la cobertura de servicios como la energía eléctrica y el drenaje, la disponibilidad de agua entubada sigue siendo un problema para una proporción significativa de viviendas, particularmente en localidades con mayor densidad poblacional. Esto coincide con estudios previos que destacan cómo las desigualdades en la provisión de infraestructura básica suelen ser más pronunciadas en áreas con expansión urbana acelerada (Delgadillo, 2004; Peña, 2014).

El crecimiento urbano del municipio, aunque moderado en términos porcentuales (5.2%



entre 2010 y 2020), parece haber seguido un patrón de expansión periurbana, con impactos diferenciados en las localidades. La mayor vulnerabilidad social detectada en la localidad de Tepetitla, sobre todo en manzanas cercanas al límite con el municipio de Nativitas, sugiere que las áreas de frontera administrativa tienden a presentar mayores carencias, posiblemente debido a la falta de coordinación intermunicipal para atender estas zonas. Esto refuerza la importancia de implementar políticas de ordenamiento territorial integradas, como se sugiere en el Programa Municipal de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano del municipio (Ayuntamiento de Tepetitla de Lardizábal, 2022).

La tasa de crecimiento poblacional relativa del 1.75% anual refleja una dinámica demográfica activa, lo cual podría aumentar la presión sobre los servicios públicos y la infraestructura urbana si no se gestionan adecuadamente. A nivel regional, el índice de GINI de 0.35 coloca a Tepetitla como uno de los municipios con menor equidad social en Tlaxcala, lo que subraya la necesidad de políticas redistributivas y de desarrollo regional que aborden las desigualdades estructurales.

Este análisis de vulnerabilidad social basado en servicios básicos permite no solo identificar los puntos críticos dentro del municipio, sino también priorizar las intervenciones necesarias para reducir las brechas de acceso. Tal como lo mencionó Czerny (2016), dadas las condiciones que forman parte de la expansión urbana, se generan desigualdades en las condiciones de vida de la población, ya que se genera un alto crecimiento poblacional, provocando una disminución en el acceso de servicios básicos, así como una condición económica más competitiva. Es necesario la creación de condiciones para satisfacer las necesidades de la población, es así como estas relaciones tienden a incrementar el nivel de la vulnerabilidad social.

Conclusión

Este análisis permitió identificar diversos aspectos que evidencian los retos actuales del municipio en materia de planificación territorial, provisión de servicios básicos y desarrollo social. En respuesta a la pregunta central del estudio (¿cuál es el panorama general del crecimiento urbano y la vulnerabilidad social en Tepetitla de Lardizábal?) se observa que, aunque la expansión urbana fue moderada (con un incremento del 5.2%), ha seguido un patrón de crecimiento que no ha sido acompañado por una mejora equitativa en la infraestructura ni en los servicios públicos, particularmente en las zonas periurbanas y en los límites con municipios vecinos como Nativitas.

Se puede concluir que Tepetitla de Lardizábal enfrenta retos ambientales y sociales que frenan su desarrollo sostenible, como la



contaminación del río Atoyac por descargas textiles en San Mateo Ayecac. Es necesario integrar criterios ambientales en la planificación territorial y promover alternativas económicas sostenibles.

Por lo que, se proponen políticas públicas que articulen el ordenamiento urbano con la equidad social, priorizando el acceso al agua potable, la gobernanza intermunicipal, la capacitación laboral y la participación ciudadana, con el fin de impulsar un desarrollo más justo y resiliente.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores brindan un profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica de Tlaxcala, a El Colegio de Tlaxcala, A.C. y a la SECIHTI.

Bibliografía

Ávila-Vera, M., Picazzo-Palencia, E. y Rangel-Blanco, L. (2019). La vulnerabilidad social en México en el marco del desarrollo sustentable. *Trayectorias, 21*(49), pág. 107-123. https://trayectorias.uanl.mx/public/anteriores/49/pdf/5.pdf

Ayuntamiento de Tepetitla de Lardizábal (2022). *Programa Municipal de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (PMOTDU) de Tepetitla de Lardizábal.* Pág. 1-375, documento realizado por El Colegio de Tlaxcala, A.C. Secretaria de Ordenamiento territorial y Vivivenda (SOTyV).

Czerny, M. (2016). Vulnerabilidad del territorio frente a los procesos de la expansión urbana. En M.V. Santana, G. Hoyos, G. Santana, N.B. Pineda y H. Campos (coords.), *Vulnerabilidad territorial ante la expansión urbana* (págs. 21-31). Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). https://core.ac.uk/download/55532489.pdf

Data México (2023). Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/tepetitla-de-lardizabal (consultado abril 2024).



Delgadillo-Macías, J. (Coord.). (2004). *Planeación territorial, política pública y desarrollo regional en México.* Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM). Págs. 1-196. http://www.economia.unam.mx/cedrus/pdf/Planeacion%20territorial%20politicas%20publicas.pdf

Google Earth (2010). https://earth.google.com/web/@60.66022811,130.22267088,1298.38158647a,6733440.1192832d,35y,2.40877444h,3.89123813t,0r (consultado agosto de 2024).

Google Earth (2020). https://earth.google.com/web/@60.66022811,130.22267088,1298.38158647a,6733440.1192832d,35y,2.40877444h,3.89123813t,0r (consultado agosto de 2024).

Gutiérrez-Ortiz, W. (2022). *Entre mezclilla y contaminación: Hacia la construcción de una política de restauración de las aguas del Río Atoyac en el municipio de Tepetitla de Lardizábal* [Tesis de doctorado, El Colegio de Tlaxcala, A.C.] Repositorio COLTLAX. Págs. 1-139. https://revistacoltlax.mx/omp/index.php/repositoriocoltlax/catalog/view/49/71/245

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2020). *Panorama sociodemográfico de Tlaxcala. Censo de Población y Vivienda 2020. 2021.* https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198022.pdf (consultado julio de 2024).

Peña, A. I. (2014). Vulnerabilidad ambiental y reproducción de la pobreza urbana. En Zabala, M. del C. (Comp.), *Algunas claves para pensar la pobreza en Cuba desde la mirada de jóvenes investigadores* (págs. 113-141). La Habana: Centro Félix Varela, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales. Programa Cuba.

Ramos-Ojeda, D. (2019). Entendiendo la vulnerabilidad social: una mirada desde sus principales teóricos. *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina, 7*(1), págs. 139-154. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=552364016005