



ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE DESARROLLO

ALDESER

SUSTENTABLE Y ENERGÍAS RENOVABLES

NÚMERO ESPECIAL

ARTÍCULOS DE
DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

TENDENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES Y SUSTENTABILIDAD

VOL. 4 NO. 1, JUNIO 2025

ISSN: 3061-7049

TERYS

Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad

Vol. 4 Núm. 1 (2025)

Publicado: 20 de marzo de 2025

Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad, Vol. 4, No. 1, Junio 2025, es una publicación anual, editada y publicada por la Asociación Latinoamericana de Desarrollo Sustentable y Energías Renovables A.C. (ALDESER), Sur 4 No. 270, Colonia Centro, C.P. 94300, Orizaba, Veracruz, Mexico, Tel. 2722372285, página web: www.cidser.org/revista, correo electrónico: secretariat@aldeser.org.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2025-070916283700-102, ISSN: 3061-7049, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR, Mexico). Responsable de la última actualización de este número: Andrea Alvarado Vallejo. Fecha de última modificación, 28 de octubre de 2025.

Los artículos publicados en la revista están sujetos a revisión por pares y su contenido es responsabilidad exclusiva del autor, sin que ello implique necesariamente que refleje el punto de vista de la Asociación o del editor.

Tabla de Contenido

Hongos filamentosos y su papel en la eliminación de compuestos farmacéuticos	1-6
Araceli Tomasini, Roman Rubio-Roque, Héctor Hugo León-Santiesteban	
Biopolímeros como empaques alternativos de alimentos. Una revisión	7-11
Leonardo G. Martínez-Estrada, Oscar Gomez-Guzman, Cynthia Graciela Flores-Hernandez, Ana L. Martínez-Hernández, Veronica Saucedo-Rivalcoba	
¿Cuál es el grado de participación de las científicas mexicanas en el campo de transición energética?	12-16
Hilda Elizabeth Reynel Ávila, Didilia Ileana Mendoza Castillo, Ma. del Rosario Moreno Virgen, Jaime Moreno Pérez, Adrián Bonilla-Petriciolet	
Alfabetización energética en estudiantes de Bachillerato en Veracruz, México: diferencia por género	17-21
Mario Hernández Vargas, Sergio Hernández Mejía	
Síntesis de zeolitas como vía de suprarreciclaje de residuos de la construcción y la demolición	22-27
Gleysi Estefanía Morales Martínez, Daniel Sánchez Bravo, Liliana Lizárraga Mendiola, Gabriela A. Vázquez-Rodríguez	
Estandarización del ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos mediante el diseño de un manual técnico: estudio de caso en una empresa de Veracruz	28-31
Adela Morales-Vásquez, Hilda Saucedo-Rivalcoba, Santa Pascual-De los Santos, Gregorio Hernandez-Salinas	
Estudio técnico de la producción de biodiesel a partir del aceite de piñón empleando Aspen Plus	32-37
Giovanni Meneses De Jesús, Eduardo Hernández Aguilar, Nayeli Gutiérrez Casiano, Luis Alberto Sánchez Bazán, Anselmo Osorio Mirón, Luis Antonio Velázquez-Herrera	
Evaluación preliminar del hongo ligninolítico Trametes versicolor inmovilizado en biomedica para el tratamiento de vinazas tequileras	38-44
Anderson A. Ramírez Ramírez, Allan Tejeda, Arturo Montoya, Florentina Zurita-Martínez	
Subproductos del café (<i>Coffea</i>): desafíos ambientales y oportunidades para la bioeconomía	45-49
Luis Antonio López-Escobar, Daniel Simón Olivo-Alanís, Noemi Nava-Valente	
Vehículos eléctricos: componentes y retos	50-54
Ángel Roberto Guerrero Domínguez, Mariel Abigail Cruz Nájera, Georgina Castillo Valdez, David Lerma Ledezma, Sergio Lerma Ledezma, Gladis Guadalupe Suárez-Velázquez	
Aplicación de Sistemas de Control con Inteligencia Artificial para Optimizar la Conversión de Energías Renovables	55-59
Hugo Beatriz-Cuellar, Jesús de la Cruz-Alejo, Isabel de la Luz Membrillo-Venegas	
Alternativas de Innovación Sostenible para Reducir el Calor Urbano en Tabasco	60-65
Manuel Adolfo Custodio Barragán, Iván Hernández Pérez, Isa Yadira Pérez Olán, Luis Enrique Angeles Montero	
Transición energética y apropiación de tecnologías sustentables en comunidades originarias de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México	66-71
José Yovany Galindo Díaz, José Núñez Gonzalez, Carlos Alberto García Bustamante, Anahi Arreaga Cancino	
Refrigeración magnética: enfriar sin contaminar	72-75
Ana María Bolarín-Miró, Cristhian Antonio Taboada-Moreno, Félix Sánchez-De Jesús	

Diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético	76-83
Alida Ramirez-Jimenez, José Rafael Dorrego-Portela, Quetzalcoatl Cruz Hernández-Escobedo	
Depuración sostenible de efluentes piloncilleros mediante un sistema híbrido innovador: digestión anaerobia + humedal construido	84-88
Norma Alejandra Vallejo-Cantú, Isis Giovanna Amador-Suárez, Andrea Alvarado-Vallejo, Erik Samuel Rosas-Mendoza, Alejandro Alvarado-Lassman	
Efecto del flujo de aire en la distribución de tiempos de residencia en un fotobiorreactor Applikon	89-93
Gerardo E. González-Landero, José Vicente Martínez, Nayeli Gutiérrez-Casiano, Luis Antonio Velázquez Herrera, Adolfo Castillo Morán, Eduardo Hernández-Aguilar	
Coletores solares para calentar aire. Energía renovable para las necesidades de hoy	94-97
Lilia Méndez-Lagunas, Juan Rodríguez-Ramírez, Vicencio Almaraz-Almaraz	
Revisión de las principales tecnologías de captura de CO₂ para los efluentes de sistemas de producción de energía	98-104
Daniel Enrique Hernández-Hernández, Esveidi Montserrat Valdovinos-García, Moisés Abraham Petriz-Prieto	
Aerogel nanoestructurado a base de sílice: aplicaciones en aislamiento térmico	105-110
Luis Alejandro García-López, Rogelio Núñez-Batres, Angel Daniel Ramírez-Herrera	
Anammox: un tratamiento sustentable para el agua residual de rastros	111-117
Sergio Reyes-Rosas, Alejandro Alvarado-Lassman, Óscar Marín-Peña, Ofelia Landeta-Escamilla, Erik Samuel Rosas-Mendoza, Juan Manuel Méndez-Contreras	
Quitosano: alternativa sostenible para el control fúngico	118-122
Edson Rayón-Díaz, Surelys Ramos-Bell, Estefanía Martínez-Batista, Juan Antonio Herrera-González, Porfirio Gutiérrez-Martínez	
¿Cómo elegir el lugar ideal para una planta de bioetanol? Guía para su localización óptima en México	123-129
Enrique Ávila-Soler, Brenda Aracely Ramírez-Barraza, Arturo Ernesto Mares-Gardea	
La leña: tradición energética, impactos ambientales y alternativas sostenibles	130-134
Jarinzí Corona-Terán, José Guadalupe Rutiaga-Quñones	
Codigestión anaerobia de lactosuero y purines vacunos para transitar hacia la circularidad	135-141
María Rebollo-Sampedro, Esther Acha, Estibaliz Sáez de Cámara, Erlantz Lizundia, Ion Agirre	
Diseño y construcción de un secador solar para agroresiduos con un enfoque en bioeconomía circular	142-145
María Mariana González-Urrieta, Cecilia Vázquez-González, José Miguel Téllez-Zepeda, Lorena Hernández-Velázquez, José Arturo Olguín-Rojas	
Más bioetanol, menos residuos: el papel de los soportes sólidos en la reutilización de levaduras	146-149
Daniela J. Cruz-Avilés, Pedro E. Lázaro-Mixteco, Agustín J. Castro-Montoya, Ana A. Vargas-Tah	
Energía y carbono sin misterios: indicadores clave para entender el impacto ambiental de transformar los bosques templados en madera en Durango, México	150-157
Pedro Meza-López, Juan Abel Nájera-Luna, Beatriz Díaz-Ramírez, Ricardo de la Cruz-Carrera, Edgar Enrique Amezcua, Aldo Alejandro Lujan-Espinoza	
Incidencia de <i>Phytophthora capsici</i> L. en frutos de chayote [<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sw.] en 7 localidades de Ixtaczoquitlán Ver.	158-166
Christian Andrés Ixmattlahua-Rodríguez, Jorge Alberto Alejandre-Rosas, Jorge Molina-Torres, Leticia López-Zamora	

Biodegradar para No Contaminar: El Futuro de los Plásticos	167-172
Zeltzin Danae Ruvalcaba-Aroche, Isabel de la Luz Membrillo-Venegas, Gastón Martínez-de Jesús, Hugo Beatriz-Cuellar	
De residuos a la innovación: revalorización de subproductos agroindustriales Mexicanos como estrategia de desarrollo sostenible	173-179
Gerardo Valles-Salas, Ana M. Avila-Galván, Orlando A. Manzanares-Meza, Berenice Garcia-Ríos, María Camila Carmona-Luna, Juliana Morales-Castro	
Evaluación económica de vehículos eléctricos para incentivar el cambio tecnológico	180-184
Juan A. Jimenez-García, Rigoberto Torres Tovar, Noé Gaspar Sanchez, Víctor M. Durán López, Hugo A. Hernández Hernández, Giselle López Mendoza	
Rumbo al Centenario de la Microscopía Electrónica de Transmisión	185-194
César Leyva-Porras, Luis E. Domínguez-Gutiérrez, Raúl García-Torresdey	
Reconversión Hospitalaria Sustentable: Cómo la Inteligencia Artificial y la Simulación Mejoran la Gestión de Suministros Médicos	195-198
Ramiro Meza Palacios, Alberto A. Aguilar Lasserre, Alina Evelyn Badillo Márquez, German Domínguez Carrillo	
Estado actual y futuro de las medidas para la mitigación del cambio climático	199-208
Juan Francisco Cedano Lezcano	
Producción de Hidrógeno por reformado de bio-etanol utilizando un catalizador de Ni-Co/Al₂O₃-SiO₂	209-216
Iván Ramos Martinez, José Luis Contreras L., Jennipher Pérez, Beatriz Zeifert, Ricardo López Medina, José Salmones	

Hongos filamentosos y su papel en la eliminación de compuestos farmacéuticos

Araceli Tomasini ^{1,*}, Román Rubio-Roque ², Héctor Hugo León-Santiesteban ³

¹ Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa, 09310, Col. Reyes de Reforma, Alcaldía Iztapalapa, CDMX, México.

² Licenciatura en Ingeniería Bioquímica Industrial del Departamento de Biotecnología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa.

³ Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. CP 02200, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX, México.

* Autor de correspondencia: atc@xanum.uam.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 14 de febrero de 2025

Aceptado: 10 de marzo de 2025

Publicado: 20 de marzo de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.393>

Resumen: Los microcontaminantes, también conocidos como contaminantes emergentes (CE), son compuestos de diverso origen y naturaleza cuya presencia en el ambiente había pasado inadvertida hasta hace aproximadamente dos décadas debido a las bajas concentraciones en las que se encuentran (nanogramos por litro). Los CE incluyen productos activos farmacéuticos (CAFs), productos de cuidado personal, agentes de diagnóstico, desinfectantes, drogas y pesticidas. Las plantas de tratamiento de aguas residuales no están diseñadas para su eliminación, por lo que son liberados en fuentes de aguas naturales; su acumulación causa toxicidad y afecta negativamente a los organismos acuáticos. Por lo tanto, es importante proponer procesos para la remoción de estos CE. Una alternativa económica es la remoción de estos compuestos empleando hongos filamentosos. Los hongos utilizan dos vías para su eliminación: sorción y degradación. La sorción implica remover los compuestos a través de una matriz donde quedan sorbidos, mientras que la degradación conlleva la transformación química del compuesto. La degradación puede ser directamente por los hongos, durante su metabolismo o bien o por la acción de enzimas fúngicas. Los hongos más estudiados para remover los CE son los basidiomicetos como *Trametes versicolor* y *Pelurotus ostratus*, aunque también ha sido estudiada la capacidad de otros hongos, como los ascomicetos y zigomicetos.

Palabras clave: microcontaminantes, compuestos farmacéuticos, hongos filamentosos, mecanismos de eliminación

Introducción

El agua es un recurso natural limitado, cada vez más deteriorado debido al aumento de la población, al desarrollo tecnológico y a la industrialización. La manufactura de productos químicos ha ido en aumento y con ello el número de compuestos considerados potencialmente peligrosos para el medio ambiente (Bolong *et al.*, 2009). La contaminación del agua es un tema que supone una preocupación de las autoridades científicas y gubernamentales a nivel mundial. Recientemente se ha demostrado que, en las fuentes de agua naturales, incluso en el agua potable, existen distintos tipos de microcontaminantes o contaminantes emergentes (CE) que se encuentran en concentraciones muy pequeñas, del orden de nanogramos a microgramos por litro. Estos incluyen compuestos activos farmacéuticos (CAFs), compuestos de contraste, productos del cuidado personal, drogas de recreación lícitas e ilícitas, productos de limpieza, desinfectantes y pesticidas.

El principio activo de un medicamento, llamado compuesto activo farmacéutico (CAF) es la molécula capaz de modificar la actividad celular o metabólica en el organismo y por lo tanto producir un efecto biológico con beneficio al organismo al que se administra (Urbano, 2011).

El uso de los CAFs en los humanos ha significado beneficios importantes, como el curar y/o controlar enfermedades y evitar dolor, mejorando así la calidad de vida y aumentando la edad promedio de esperanza de vida de las personas. Su uso en los animales se refleja en la economía de los países y la disponibilidad de alimentos para los humanos.

Los CAFs, después de ser ingeridos, dentro del organismo realizan su actividad farmacológica y estos compuestos y/o sus metabolitos son excretados a través de la orina y las heces fecales, de esta forma llegan al suelo y a las fuentes de aguas naturales convirtiéndose en un problema de contaminación. La concentración de CAFs vertidos en el ambiente es baja, pero su entrada continua al ecosistema es un riesgo para los organismos acuáticos no objetivos (Klavarioti *et al.*, 2009; Tomasini and Macías-Paredes, 2023; Calderón, *et al.*, 2019).

Estos compuestos causan daños a los organismos acuáticos, por ejemplo, afectan su reproducción, afectan las funciones y comportamientos sexuales, inhiben la biosíntesis de clorofila, tienen efectos teratogénicos, muchos de ellos son disruptores endócrinos. Los antibióticos causan que las bacterias desarrollen resistencia hacia dichos compuestos (Robitaille *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2025). Por eso es muy importante proponer métodos para eliminar los CAFs del ambiente.

Se han reportados métodos fisicoquímicos y biológicos para la eliminación de los CAFs. Los biológicos son más económicos y amigables al medio ambiente (Pandey *et al.*, 2025). Los métodos biológicos pueden ser por sorción y/o degradación por bacterias, algas y hongos (Kózka *et al.*, 2023).

Este trabajo tiene como objetivo explicar cómo los hongos filamentosos pueden contribuir a la eliminación de compuestos farmacéuticos en aguas residuales.

Desarrollo

Remoción de CAF

Los CAFs pueden ser removidos del agua por procesos fisicoquímicos y biológicos, ambos procesos incluyen dos mecanismos diferentes que son la sorción y la degradación. En los procesos fisicoquímicos por sorción se pueden usar sorbentes como carbón activado, alginato u otro material capaz de absorber los CAFs. Los procesos de degradación pueden ser por fotocatalisis y por sistemas de oxidación avanzado que pueden producir subproductos de cloro muy tóxicos (Bolong *et al.*, 2009).

Los procesos biológicos implican el uso de algas, bacterias y hongos. En general el costo es más bajo, en algunos casos lleva más tiempo que los procesos fisicoquímicos. Los procesos igualmente pueden ser por biosorción y biodegradación.

A continuación, se mencionará el uso de los hongos filamentosos en la remoción de CAFs. Se dará brevemente las características de los hongos filamentosos y se explicarán los mecanismos que usan para remover estos compuestos.

Hongos filamentosos

Los hongos filamentosos son organismos pluricelulares constituidos por estructuras llamadas hifas. Estas poseen capacidad de ramificación y al conjunto de hifas se denomina micelio. Morfológicamente, las células son alargadas, varían en longitud y poseen un diámetro de 3 a 15 μm . Se reproducen a través de esporas sexuales y/o asexuales y estas pueden sobrevivir en condiciones extremas. Su reproducción también puede ser vegetativa (a partir de micelio). Las esporas pueden ser pigmentadas y le dan el color al hongo. La apariencia de micelio es algodonosa y densa, el color del micelio es blanquecino, crema o gris claro, presentan crecimiento en 24 a 48 h, crecen en lugares húmedos y oscuros, condiciones de baja humedad no favorecen su crecimiento (Campbell *et al.*, 2001).

Los hongos filamentosos y la degradación de materia orgánica en la naturaleza

Los hongos son los principales degradadores de materia orgánica del suelo y liberan los nutrientes para los vegetales. Muchos de los productos de desechos secundarios son ácidos orgánicos; por ello, los hongos ayudan a incrementar la acumulación de materia orgánica rica en ácidos húmicos, resistentes a una degradación posterior, y mejoran la fertilidad de los suelos.

Los hongos que producen estructuras fructíferas (setas o champiñones) pertenecen a los basidiomicetos tienen un papel importante en la descomposición de la materia orgánica en la naturaleza. También las especies de hongos activas en el suelo, pero que no son visibles, realizan funciones importantes como descomponedores, como los zigomicetos y los ascomicetos. Los hongos son organismos aeróbicos y mueren cuando un suelo se convierte en anaeróbico, por ejemplo, en el caso de inundaciones o compactación del suelo. Los hongos se clasifican de acuerdo con el origen de sus fuentes de energía en: Descomponedores, que obtienen su energía de organismos muertos. Mutualistas que son hongos que viven en simbiosis con otros organismos y ambos obtiene su energía gracias a esta

relación, es decir, ambos organismos obtienen beneficio. Parásitos son los hongos que obtienen su energía de organismos vivos a los que parasitan y solamente los hongos obtienen beneficio (Tomasini and León-Santiesteban, 2019).

Los hongos al ser los descomponedores naturales se han usado para degradar compuestos xenobióticos que son originados por la actividad antropogénica de los humanos. Se ha estudiado la capacidad de estos microorganismos para degradar compuestos, como los derivados de hidrocarburos, los bifenilos policlorados, clorofenoles, colorantes tipo azo, plaguicidas entre otros (Dao *et al.*, 2019). Su capacidad para degradar dichos compuestos se debe a que estos hongos producen sistemas enzimáticos con capacidad óxido-reductora.

En las últimas décadas, también se ha estudiado la capacidad de los hongos para crecer en presencia de CAFs (León-Santiesteban *et al.*, 2024), y poder caracterizar su capacidad para remover los CAFs de las aguas residuales. Los hongos son capaces de remover los CAFs por biosorción y biodegradación (Figura 1).

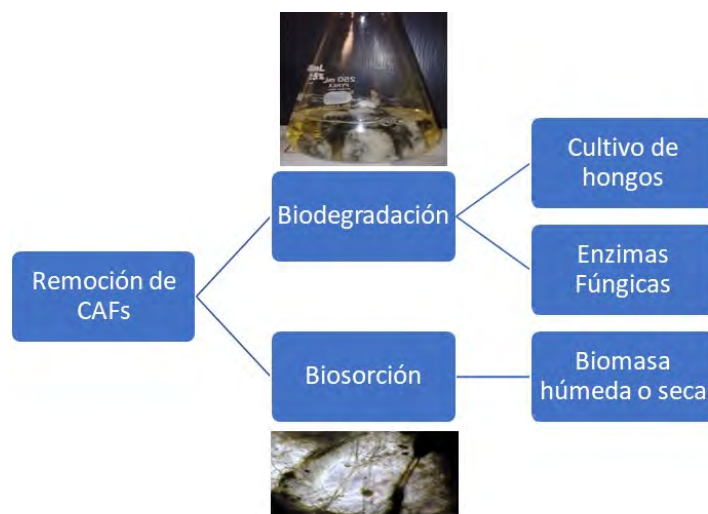


Figura 1. Muestra los procesos utilizados por los hongos filamentosos para remover compuestos tóxicos.

Biosorción de los CAFs

La biosorción de los CAFs es el proceso mediante el cual los compuestos son removidos de una fase acuosa, como las aguas residuales; implica la absorción de CAFs dentro de las células de los hongos, y la adsorción proceso en el cual los CAFs son retenidos en la pared celular de los hongos (Figura 2).

La biomasa fúngica, activa o muerta, ha sido empleada para sorber compuestos tóxicos y metales pesados, es decir removerlos del agua. Es un proceso económico y no produce subproductos tóxicos. De esta forma se remueven los compuestos tóxicos del agua y se concentran en la biomasa fúngica. Los compuestos tóxicos se pueden desorber de la biomasa o bien ser tratados junto con la biomasa para su degradación.



Figura 2. Esquema del proceso de biosorción de fármacos por biomasa húmeda de un hongo filamentosos.

La remoción de CAFs por sorción usando biomasa fúngica ha sido poco estudiada hasta el momento (Figura 2). Hongos basidiomicetos como *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium* y algunos ascomicetos como *Aspergillus*

niger y *Penicillium sp.*, y zigomicetos como *Rhizopus oryzae* han mostrado tener capacidad de sorber algunos CAFs, como sulfametoxazol, ibuprofeno, naproxeno, sulfamidas, carbamazepina entre otros. Se ha demostrado que la biomasa no viable y seca es más eficiente para sorber los CAFs que la biomasa húmeda. Melgoza *et al.*, (2020) estudiaron la remoción de naproxeno usando biomasa húmeda y seca de *R. oryzae*. Los autores demostraron que la biomasa de *R. oryzae* es capaz de remover 80% del naproxeno inicial usando biomasa seca a pH ácido (pH 4.7). Mientras que con biomasa húmeda se remueve 66% del naproxeno inicial en condiciones de pH básico (pH 9.0). La biosorción de sulfametoxazol por *Rhizopus oryzae* fue caracterizada y se demostró que la biomasa del hongo puede adsorber SMX por la diferencia de cargas y también puede absorber el antibiótico por la presencia de lípidos en su biomasa (León-Santiesteban *et al.*, 2025).

Degradación de los CAFs

La biodegradación de los CAFs se presenta tanto fuera como dentro de las células del hongo gracias a las enzimas peroxidasas y fenoloxidasas que producen. Este proceso involucra la modificación química de los CAFs mediante la oxidación o reducción de la molécula formando moléculas más o menos tóxicas (Figura 3). Es importante identificar los intermediarios producidos durante la degradación con el fin de confirmar que sean moléculas menos tóxicas.

Las enzimas pueden ser intracelulares, es decir están dentro de las células de los hongos y también las hay extracelulares, significa que son secretadas por los hongos a los medios de cultivo donde crecen. Se ha utilizado el hongo en cultivo sumergido, con el hongo libre e inmovilizado, para degradar los CAFs. Se ha reportado la degradación de ibuprofeno, ácido clofíbrico, carbamazepina, ácido salicílico, ketoprofeno, carbamazepina, iboprufo, naproxeno, ciprofloxacina, sulfametoxazol, diclofenaco, entre otros, utilizando hongos basidiomicetos como *T. versicolor*, *Trametes hirsuta*, *Irpex lacteus*, *Ganoderma lucidum* y *P. chrysosporium*, *Armillaria mellea* (Patel *et al.*, 2019; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2012; Kózkas *et al.*, 2023). Las principales reacciones de transformación de los CAFs son oxidación, formilación, hidroxilación, deshalogenación y desaminación (Cruz-Morató *et al.*, 2013). *T. versicolor* degradó 100% de sulfonamida a una concentración inicial de 10 mg/L, mientras que se degradó el 80% de ofloxacina a la misma concentración inicial (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2012).

También se ha reportado la degradación de los CAFs empleando las enzimas fúngicas ligninolíticas, como lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasas extracelulares (Gosh *et al.*, 2023). *Trametes* y *Pleurotus* son buenos productores de lacasa. Esta enzima ha sido ampliamente estudiada para degradar CAFs. La lacasa puede llevar a cabo dos tipos de reacciones para la transformación de los CAFs, reacciones de óxido-reducción y reacciones de polimerización produciendo polímeros, que al ser moléculas más grandes y menos reactivas pierden toxicidad como se muestra en la Figura 4 (Sahay, 2021). Se ha reportado que algunos CAFs no son degradados por la lacasa, es necesario adicionar mediadores que funcionan como agentes que incrementan el potencial óxido-reductor. La degradación de CAFs con enzimas fúngicas son procesos muy eficientes y limpios, y generan pocos desechos tóxicos. Se deben de analizar los productos de degradación de los CAFs, para asegurarse que sean menos tóxicos que los compuestos originales. Las enzimas se pueden usar libres, es decir disueltas en soluciones acuosas o inmovilizadas en algún soporte como alginato o poliuretano.



Figura 3. Ejemplo de la degradación de fármacos, carbamazepina, con cultivo de hongo y con el extracto enzimático libre de hongo. En ambos casos se presentan los dos mecanismos de degradación, (óxido-reducción y polimerización) en diferente proporción, de acuerdo con el hongo empleado, el tipo de fármaco, las condiciones de cultivo y las características del extracto enzimático obtenido del cultivo del hongo.

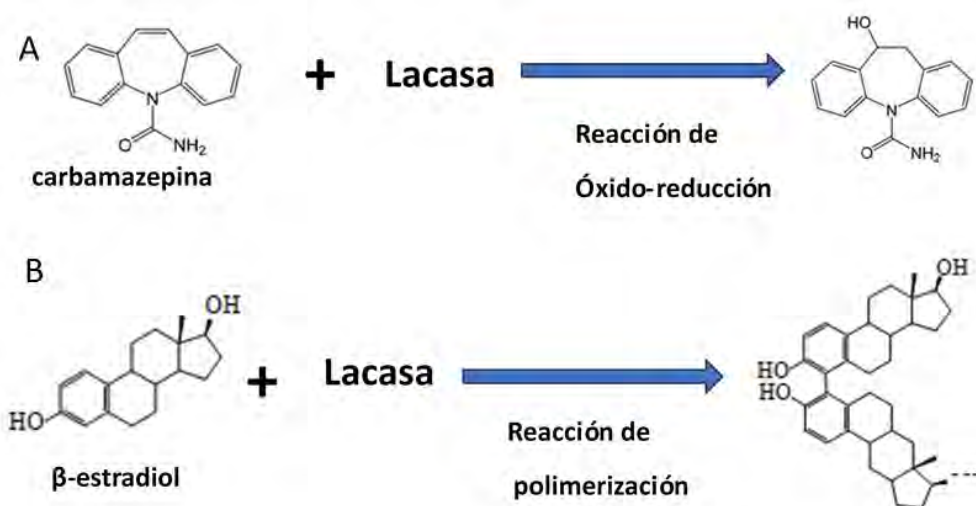


Figura 4. reacción de la degradación de la carbamazepina (A) y del β -estradiol (B) por la enzima fúngica lacasa (Sahay 2021).

Conclusiones

Los CAFs en el medio ambiente causan daño a los organismos acuáticos y resistencia de bacterias a los antibióticos. Por ello se han estudiado varios métodos para la eliminación de microcontaminantes. Los métodos biológicos tienen la ventaja de ser más económicos y amigables al ambiente, no se producen más desechos tóxicos.

Un método biológico para la eliminación de CAFs presentes en aguas residuales es usando hongos filamentosos. La remoción de los CAFs de soluciones acuosas, por los hongos, puede ser a través la biosorción y la biodegradación. La biosorción es un mecanismo que no genera otras sustancias, simplemente los CAFs quedan retenidos en la biomasa del hongo. La biodegradación puede llevarse a cabo usando cultivo de hongos o extractos enzimáticos. En ambos casos actúan las enzimas para transformar las moléculas de los CAFs, y se obtienen diversos productos de biodegradación; o bien polimerizan las moléculas de los CAFs obteniendo así moléculas inocuas.

Bibliografía

- Bolong, N., Ismail, A. F., Salim, M. R. & Matsuura, T. (2009). A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*, 239(1), 229-246, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>.
- Calderón, A., Meraz, M. and Tomasini, A. (2019). Pharmaceuticals Present in Urban and Hospital Wastewaters in Mexico City. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 41(2), 105-112. <https://doi.org/10.3103/S1063455X19020073>.
- Campbell, N. A., Lawrence, G. M. and Jane, B. R. (2001). *Biología: conceptos y relaciones*. In. México: Pearson.
- Cruz-Morató, C., Ferrando-Climent, L., Rodríguez-Mozaz, S., Barceló, D., Marco-Urrea, E., Vicent, T. and Sarrà, M. (2013). Degradation of pharmaceuticals in non-sterile urban wastewater by *Trametes versicolor* in a fluidized bed bioreactor. *Water Research*, 47(14), 5200-5210. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.007>.
- Dao, A. T. N., Vonck, J., Janssens, T. K. S., Dang, H. T. C., Brouwer, A. and de Boer, T. E. (2019). Screening white-rot fungi for bioremediation potential of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin. *Industrial Crops and Products*, 128, 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.059>.
- Ghosh, S., Rusyn, I., Dmytruk, O. V., Dmytruk, K. V., Onyeaka, H., Gryzenhout, M., & Gafforov, Y. (2023). Filamentous fungi for sustainable remediation of pharmaceutical compounds, heavy metal and oil hydrocarbons. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1106973. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1106973>.
- Klavarioti, M., Mantzavinos, D. & Kassinos, D. (2009). Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment International*, 35(2), 402-417, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.009>.
- Kózka, B., Sośnicka, A., Nałęcz-Jawecki, G., Drobnińska, A., Turło, J., & Giebułtowicz, J. (2023). Various species of Basidiomycota fungi reveal different abilities to degrade pharmaceuticals and also different pathways of degradation. *Chemosphere*, 338, 139481. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139481>.
- León-Santiesteban, H.H., Severo, E.P. & Tomasini, A. (2024). Modeling radial growth of *Amylomyces rouxii* and its tolerance to selected pharmaceutical active compounds. *Biotechnia*, 26, 416–424, <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v26.2292>.
- León-Santiestebán, H. H., Benítez-Cortez, J. J., Sánchez, K., & Tomasini, A. (2025). Characterization of sulfamethoxazole biosorption by *Rhizopus oryzae* biomass: Insights into sorption mechanism. *Separation Science and Technology*, 60(3-5), 389-402, <https://doi.org/10.1080/01496395.2024.2436465>.

- Liu, R., Long, Q., Liu, Y., & Wang, L. (2025). Screening of priority antibiotics in Fenhe River Basin based on the environmental exposure, ecological effects, and human health risk. *Chemosphere*, 370, 143953, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143953>.
- Melgoza, B., León-Santiesteban, H. H., López-Medina, R. & Tomasini, A. (2020). Naproxen Sorption by Non-viable *Rhizopus oryzae* Biomass. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(1), 30, <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4396-2>.
- Pandey B., Pandey, A.K., Bhardwaj, L. & Dubey, S.K. (2025). Biodegradation of acetaminophen: Current knowledge and future directions with mechanistic insights from omics. *Chemosphere*, 372, 144096, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144096>.
- Patel, M., Kumar, R., Kishor, K., Mlsna, T., Pittman, C. U., Jr. & Mohan, D. (2019). Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods. *Chemical Reviews*, 119(6), 3510-3673, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299>.
- Robitaille, J., Desrosiers, M., Veilleux, É., Métivier, M., & Langlois, V. S. (2025). An estrogenic municipal effluent decreased fathead minnow reproduction to a near stop. *Chemosphere*, 370, 143957, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143957>.
- Rodríguez-Rodríguez, C. E., Barón, E., Gago-Ferrero, P., Jelić, A., Llorca, M., Farré, M., Díaz-Cruz, M. S., Eljarrat, E., Petrović, M., Caminal, G., Barceló, D. & Vicent, T. (2012). Removal of pharmaceuticals, polybrominated flame retardants and UV-filters from sludge by the fungus *Trametes versicolor* in bioslurry reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 233-234, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.024>.
- Sahay, R. (2021). Synthetic applications of Laccase and its Catalytic Potentials. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 8(6), <https://journal-repository.com/index.php/ijaers/article/view/3720>.
- Tomasini, A. and León-Santiesteban, H. H. (2019). The role of the filamentous fungi in bioremediation. In *Fungal Bioremediation* (pp. 3-21). CRC Press.
- Tomasini, A., & Macías-Paredes, C. (2023). ¿ Por qué los fármacos son contaminantes del ambiente?. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (129), 48-55, <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/283>.
- Urbano, G. (2011). Principios básicos de farmacología: Farmacocinética. 1ª edición. Editorial Lito-Formas, San Cristóbal, Venezuela.

Biopolímeros como empaques alternativos de alimentos. Una revisión

Leonardo G. Martínez-Estrada ¹, Oscar Gómez-Guzmán ¹, Cynthia Graciela Flores-Hernández ^{1,*}, Ana L. Martínez-Hernández ¹, Veronica Saucedo-Rivalcoba ²

¹ Tecnológico Nacional de México / Campus Querétaro, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ingeniería, Querétaro, México.

² Tecnológico Nacional de México/ Campus Tierra Blanca, Maestría en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: cynthiagraciela84@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de febrero de 2025

Aceptado: 20 de marzo de 2025

Publicado: 28 de marzo de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.395>

Resumen: La contaminación ambiental por plásticos derivados de los desechos del envasado de alimentos y que terminan en vertederos y ecosistemas, alterando la cadena trófica, ha sido un tema muy preocupante ante una actual sociedad sin cultura de reciclaje, inmersa en el consumismo sin una economía circular. El empaque de alimentos es el principal generador de residuos plásticos a nivel mundial. Ante esta situación, los investigadores se han centrado en el desarrollo de empaques de alimentos a base de materiales de origen natural, que cumplan o inclusive superen las demandas de los plásticos convencionales derivados del petróleo. En este artículo, se hace una exploración de algunos biopolímeros sobresalientes utilizados en la síntesis de empaques alternativos de alimentos y propiedades de barrera de importancia. También se exploran compósitos desarrollados a partir de matrices biopoliméricas y que alimentos pueden ser protegidos por ellos.

Palabras clave: Biopolímeros, empaques de alimentos, materiales compuestos, pectina, vida de anaquel de los alimentos.

Introducción

En la actualidad es común encontrar materiales sintéticos en la fabricación de empaques de alimentos. Lo anterior representa un daño ambiental y a la salud por las condiciones últimas que puede tener el alimento o las partículas que ingresan al cuerpo humano después de su embalaje, disposición y consumo. Se estima que en EE. UU. se desperdician anualmente alrededor de 32 millones de toneladas de plástico, y solo el 3% de ellas puede reciclarse (Huang *et al.*, 2021). También Xie *et al.*, (2023) señalan que hasta la fecha se generan en todo el mundo alrededor de 7 mil millones de toneladas de residuos plásticos de un solo uso.

En una sociedad con poca cultura de economía circular, la población realiza compras desmedidas, generando gran cantidad de residuos. Por lo tanto, al no ser biodegradables, se acumulan en los ecosistemas, provocando la muerte de seres vivos o generando gases de efecto invernadero; desde su fabricación y hasta su eliminación. Esto representa un foco de alerta, debido a los cambios climáticos que estamos atravesando actualmente a nivel mundial; como, por ejemplo, las altas temperaturas en todo el país.

El mundo científico ha puesto interés en años recientes en desarrollar empaques de alimentos a partir de materiales biobasados, como los biopolímeros. Los cuales ofrecen propiedades mecánicas iguales o superiores y de barrera comparadas a las de materiales poliméricos sintéticos. En 2017, la producción de bioplásticos alcanzó los 2.06 millones de toneladas y se preveía que aumentaría a más de 7.5 millones de toneladas en 2026, es decir un incremento de 264 %. Por otro lado, algunos países (como se muestra en la Figura 1) como Estados Unidos, Japón, Italia, México y Corea del Sur han desarrollado bioplásticos comerciales para empaques de alimentos. Además, para promover aún más el desarrollo de los bioplásticos, estos países han lanzado programas para limitar el uso de plásticos convencionales de un solo uso (Siddiqui *et al.*, 2024).

Debido a la importancia de cuidar el medio ambiente y la preservación de alimentos, su repercusión económica y su relación con la ciencia e ingeniería de materiales, este artículo tiene como objetivo mostrar un panorama de las recientes investigaciones que se han realizado sobre los biopolímeros y biocompositos como posibles alternativas de los empaques convencionales de alimentos.

Desarrollo

Biopolímeros

En la revisión publicada por Kumar *et al.*, (2022b) se indica que los biopolímeros, también llamados compuestos bioderivados, se pueden obtener física o químicamente a partir de medios naturales y son biodegradables por actividad polimerasa, lo que los hace amigables con el medio ambiente.

Un polímero natural se considera biodegradable si se desintegra en seis meses sin componentes nocivos para el medio ambiente, esta degradación se debe a factores ambientales como pH, temperatura, presión y humedad presente (Kumar *et al.*, 2022b).

Bhaskar (2023) clasifica a los biopolímeros en tres categorías:

- Obtenidos del ambiente o la biomasa
 - Polisacáridos: almidón, celulosa, gomas, alginatos, pectinas, quitina, quitosano
 - Proteínas: proteínas de plantas (gluten, sojas), proteínas de origen animal (sueros, queratina)
 - Lípidos: aceites y ceras
- A partir de la síntesis de monómeros bioderivados
 - Ácido poliláctico y otros poliésteres
- Producidos directamente por microorganismos
 - Polihidroxialcanoato, polihidroxibutirato, poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato)

En los últimos años, los científicos se han interesado cada vez más en desarrollar compuestos de materiales renovables y biodegradables útiles en la fabricación de artículos sostenibles como en el caso de empaque de alimentos. Además, se han empleado en muchas aplicaciones medicinales, incluidos fármacos, andamios para la regeneración de tejidos, sistemas de administración de fármacos y agentes de formación de imágenes (Kumar *et al.*, 2022b).

Respecto al área de empaque de alimentos Kumar *et al.* (2022b) señala que los materiales biodegradables se han estudiado exhaustivamente para el empaque de alimentos en los últimos 20 años. Por lo tanto, se han desarrollado varios tipos de películas para envases utilizando polímeros biodegradables, como películas comestibles, empaques inteligentes y activos, empaques atmosféricos modificados, películas biodegradables, empaques antimicrobianos, etc. Las propiedades físicas como resistencia a la intemperie, permeabilidad del agua y las propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión son factores cruciales en estas películas. En la Tabla 1 se indican algunas propiedades mecánicas y de barrera de biopolímeros utilizados en empaques de alimentos.

Tabla 1. Propiedades mecánicas y de barrera de los biopolímeros más utilizados en películas para empaques de alimentos.

Biopolímero	Resistencia a la tensión (MPa)	Permeabilidad al vapor de agua	Resistencia a la radiación UV o intemperie	Referencia
Pectina	3.78-14.78*	Baja	----	Asfaw <i>et al.</i> 2023.
Quitosano	0.72	Alta	Buena	Hisham <i>et al.</i> 2024.
Celulosa	≈ 20 – 120	25%**	Buena	Romainor <i>et al.</i> 2014. Gao <i>et al.</i> 2018.
Almidón	49.8 ± 2.15%	Alta	----	Lara-Gómez <i>et al.</i> 2022.
Almidón de trigo	Frágil***	Alta	Buena	Kumar <i>et al.</i> 2022a.

*A medida que aumenta la cantidad de pectina

** Si las películas se dopan con nanopartículas de quitosano

*** Fuertemente afectadas por el pH y la concentración de gluten

Los biopolímeros más utilizados en empaques de alimentos son a base de proteínas y polisacáridos ya que no son tóxicos y algunos de ellos tienen propiedades antimicrobianas y antifúngicas. En esta sección, se describe a los polisacáridos y específicamente a la pectina como un ejemplo muy común reportado en las investigaciones para esta aplicación.

Empaques de alimentos

Según Kumar *et al.* (2022a) el envasado de alimentos es una de las operaciones después de la cosecha u obtención más críticas para la conservación de los alimentos y prolongar su vida útil. A lo largo de los años, los investigadores han trabajado en el desarrollo de diferentes tipos de láminas y cubiertas para evitar que los alimentos entren en proceso de descomposición. Hay una amplia variedad de materiales de empaque, como botellas y frascos de vidrio, que a menudo se usan para empaquetar líquidos como jugos, salsas y productos encurtidos, mientras que las latas y latas de metal se usan comúnmente para empaquetar productos como sopas, verduras y frutas (Bhaskar, 2023).

El plástico se ha utilizado para empaquetar una amplia gama de productos alimenticios, ya que es de bajo costo, mecánicamente resistente, fácil de moldear y ligero, pero son una espada de doble filo, ya que generan efectos adversos en el ambiente, porque pueden tardar cientos de años en degradarse y su eliminación por incineración genera gases tóxicos que representan un peligro para la flora y fauna de los ecosistemas.

La producción de plástico en el mundo ha alcanzado hasta 380 millones de toneladas y ha mostrado un fuerte aumento en las últimas décadas, donde el 40% del plástico producido se utiliza en aplicaciones de empaque (Kumar *et al.*, 2022a; Groh *et al.*, 2019).

Kumar *et al.* (2022a) afirman que en las últimas décadas los consumidores son más conscientes del impacto del plástico al ambiente. Por lo tanto, es crucial una demanda de materiales de empaque alternativos que garanticen una mayor vida útil con buena calidad y un menor impacto en el medio ambiente. Los empaques comestibles a partir de películas de polímeros de origen natural se han utilizado para mejorar la apariencia y conservación de los alimentos, y han llamado la atención de la industria alimentaria como una alternativa para sustituir los empaques tradicionales.

Tabla 2. Alimentos que pueden ser empaquetados con los principales biopolímeros utilizados para fabricar películas para empaques de alimentos.

Biopolímero	Tipo de alimento	Referencia
Quitano	Frutas, carnes y pescado	Kumar <i>et al.</i> 2020
Almidón	Secos (pastas y arroz)	Lara-Gómez <i>et al.</i> 2022
Celulosa	Confitería (caramelos mazapanes)	Kumar <i>et al.</i> 2022 ^a
Pectina	Películas y recubrimientos comestibles para frutas y verduras frescas	Singhal <i>et al.</i> 2022

Los biopolímeros se han convertido en nuevos candidatos para el empaque de alimentos, ya que son renovables y abundantes en la naturaleza. Los empaques sintetizados con este tipo de materiales ayudan a reducir la huella de carbono y crear una cultura de reciclaje. En la Tabla 2 se muestran los biopolímeros más utilizados y el tipo de alimento que puede ser empaquetado.

Materiales compuestos utilizados en empaques de alimentos

El futuro del empaque de alimentos, según los expertos, será la próxima generación de envases inteligentes. Como resultado, recientemente se han desarrollado materiales para envasado a base de óxidos metálicos y biopolímeros (Perera *et al.*, 2023). En la Tabla 3 muestra el tipo de refuerzo que se le incorpora a los biopolímeros para tener una determinada aplicación en los empaques de alimentos.

Nuevas tendencias

La industria de los empaques de alimentos se encuentra en constante evolución presionada a innovar y ofrecer soluciones más eficientes en los materiales de empaque. Debido a que al actuar como una barrera crucial contra los factores externos y la contaminación microbiana garantizan la entrega segura y confiable de los consumibles a los

consumidores. En consecuencia, la industria de alimentos procesados pone un énfasis significativo en el desarrollo de materiales de empaque con características deseables como: una estética atractiva, propiedades higiénicas, durabilidad y amigables al medio ambiente (Hussain *et al.*, 2024).

Tabla 3. Tipos de refuerzos adicionados a los biopolímeros más usados en empaques de alimentos y su aplicación en alimento.

Biopolímero	Tipo de refuerzo	Aplicación en alimento	Referencia
Quitosano	Óxido de titanio Gelatina	Uvas rojas y tomate Pimientos rojos	Kumar <i>et al.</i> 2020 Kumar <i>et al.</i> 2022a.
Almidón	Tapioca Almidón de camote	Calabaza Camarón	Kumar <i>et al.</i> 2022a.
Celulosa	Nanopartículas de quitosano	-----	Romainor <i>et al.</i> 2014.
Pectina	Óxido de Zinc Proteína de suero	----- Papas, zanahorias, manzanas	Asfaw <i>et al.</i> 2023. Kumar <i>et al.</i> 2022a.
	Nanopartículas de óxido de silicio	-----	Xie <i>et al.</i> 2023.

Los avances recientes no sólo se han centrado en empaques inteligentes para alimentos, sino también en el tratamiento de liberación de fármacos y la síntesis de apósitos para tratamiento de heridas (Dirpan *et al.*, 2023). La Figura 1 muestra un panorama de los últimos 25 años del interés científico sobre los biopolímeros destinados a la industria alimentaria. Además, Hussain *et al.* (2024) señala que las evaluaciones de sostenibilidad deben adoptar una perspectiva holística, teniendo en cuenta toda la cadena de suministro desde la producción hasta el consumo. Se debe garantizar que los factores ambientales, sociales y económicos se consideren de manera integral reconociendo el riesgo de lavado de imagen verde, debe haber un compromiso en la transparencia en nuestras evaluaciones, evitando la promoción de prácticas insostenibles bajo el disfraz de la sostenibilidad.

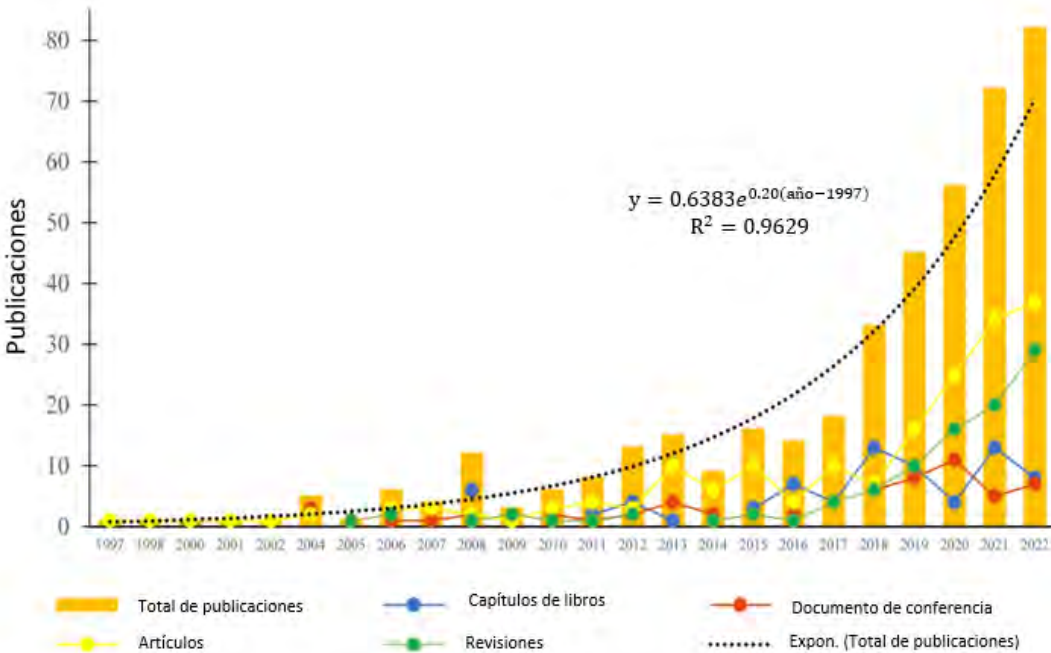


Figura 1. Número de citas, publicaciones e investigaciones en empaques biodegradables para alimentos.

Conclusiones

El empaque convencional de alimentos a base de materiales biobasados sigue siendo un desafío para el mundo científico, los retos consisten en llevarlo a una escala industrial o semiindustrial y buscar que tengan las mismas características o incluso superiores que demandan los empaques tradicionales a base de combustibles fósiles. Las nuevas tecnologías y las propiedades de los materiales naturales permiten a los investigadores ser cada vez más minuciosos para buscar eco-empaques que prolonguen la vida útil de los alimentos. El uso de biopolímeros tiene una tendencia cada vez más creciente para los últimos años, donde su uso ya no se enfoca únicamente en empaques de alimentos, sino que se extiende a la síntesis de apósitos para heridas, recubrimientos comestibles, liberación de fármacos y productos nutraceuticos. Por lo cual, la presente revisión es parte de las nuevas tendencias en las que se busca utilizar los biopolímeros como alternativa de economía circular sin alterar los ecosistemas y reducir la contaminación ambiental siendo una oportunidad de poder salvaguardar los recursos naturales para las futuras generaciones y reducir los gases de efecto invernadero.

Bibliografía

- Asfaw, W., Tafa, K., & Satheesh, N. (2023). Optimization of citron peel pectin and glycerol concentration in the production of edible film using response surface methodology. *Heliyon*, 9, e13724. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13724>
- Bhaskar, R. e. (2023). Recent development of protein-based biopolymers in food packaging applications: A review. *Polymer testing*, 124, 108097. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108097>
- Dirpan, A., Ainani, A. F., & Djalal, M. (2023). A Review on Biopolymer-Based Biodegradable Film for Food Packaging: Trends over the Last Decade and Future Research. *Polymers*, 15(13), 2781. <https://doi.org/10.3390/polym15132781>
- Gao, H., Rao, J., Guan, Y., Li, W. Q., Zhang, M. C., Shu, T., & Lv, Z. W. (2018). Investigation of the Thermo-Mechanical Properties of Blend Films Based on Hemicelluloses and Cellulose. *International Journal of Polymer Science*, 2018(1), 9620346. <https://doi.org/10.1155/2018/9620346>
- Groh, K. J., Backhaus, T., Carney-Almroth, B., Geueke, B., Inostroza, P. A., Lennquist, A., Leslie, H. A., Maffini, M., Slunge, D., Trasande, L., Warhurst, A. M., Muncke, J. (2019). Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Science of the total environment*, 651, 3253-3268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015>
- Gupta, R. K., Guha, P., & Srivastav, P. P. (2022). Natural polymers in bio-degradable/edible film: A review on environmental concerns, cold plasma technology and nanotechnology application on food packaging-A recent trends. *Food Chemistry Advances*, 1, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100135>
- Hisham, F., Akmal, M. M., Ahmad, F., Ahmad, K., & Samat, N. (2024). Biopolymer chitosan: Potential sources, extraction methods, and emerging applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102424. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102424>
- Huang, J., Hu, Z., Hu, L., Li, G., Yao, Q., & Hu, Y. (2021). Pectin-based active packaging: A critical review on preparation, physical properties and novel application in food preservation. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.026>
- Hussain, S., Akhter, R., & Maktedar, S. S. (2024). Advancements in sustainable food packaging: from eco-friendly materials to innovative technologies. *Sustainable Food Technology*, 2(5), 1297-1364. <https://doi.org/10.1039/d4fb00084f>
- Kumar, A., Hasan, M., Mangaraj, S., Verma, D. K., & Srivastav, P. P. (2022a). Trends in edible packaging films and its prospective future in food: a review. *Applied Food Research*, 2(1), 100118. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100118>
- Kumar, S., Mukherjee, A., & Dutta, J. (2020). Chitosan based nanocomposite films and coatings: Emerging antimicrobial food packaging alternatives. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.002>
- Lara-Gómez, A. B., Aguirre-Loredo, R. Y., Castro-Rosas, J., Rangel-Vargas, E., Hernández-Juárez, M., & Gómez-Aldapa, C. A. (2022). Películas de almidón de papa (*Solanum tuberosum* L.), empaques innovadores para alimentos: una revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(19), 11-22. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i19.8965>
- Perera, K. Y., Pradhan, D., Rafferty, A., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2023). A comprehensive review on metal oxide-nanocellulose composites in sustainable active and intelligent food packaging. *Food Chemistry Advances*, 3, 100436. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100436>
- Romainor, A. N. B., Chin, S. F., Pang, S. C., & Bilung, L. M. (2014). Preparation and characterization of chitosan nanoparticles-doped cellulose films with antimicrobial property. *Journal of Nanomaterials*, 2014(1), 710459. <https://doi.org/10.1155/2014/710459>
- Siddiqui, S. A., Yang, X., Deshmukh, R. K., Gaikwad, K. K., Bahmid, N. A., & Munoz, R. C. (2024). Recent advances in reinforced bioplastics for food packaging—A critical review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130399. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130399>
- Singhal, S., & Hulle, N. R. S. (2022). Citrus pectins: Structural properties, extraction methods, modifications and applications in food systems—A review. *Applied food research*, 2(2), 100215. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100215>
- Xie, J., Zhang, Y., Klomklao, S., & Simpson, B. K. (2023). Pectin from plantain peels: Green recovery for transformation into reinforced packaging films. *Waste Management*, 161, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.035>

¿Cuál es el grado de participación de las científicas mexicanas en el campo de transición energética?

Hilda Elizabeth Reynel-Ávila ¹, Didilia Ileana Mendoza-Castillo ¹, Ma. del Rosario Moreno-Virgen ², Jaime Moreno-Pérez ², Adrián Bonilla-Petriciolet ^{2,*}

¹ Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, México

² Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, Aguascalientes, México

* Autor de correspondencia: adrian.bp@aguascalientes.tecnm.mx; Tel.: +524499105002

Artículo de divulgación científica

Recibido: 16 de abril de 2025

Aceptado: 3 de mayo de 2025

Publicado: 7 de mayo de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.437>

Resumen: Se describe un breve análisis de estadísticas generadas de la base de datos pública del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México, acerca de las científicas mexicanas que se desempeñan en el campo de la transición energética. El objetivo del análisis es proporcionar un panorama preliminar de su participación y contribución en esta área disciplinaria.

Palabras clave: transición energética; igualdad de género; México

Introducción

La transición energética es un proceso crucial para alcanzar un desarrollo sostenible de la sociedad donde el principal objetivo es reducir la dependencia existente de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático (Abbasian Hamedani *et al.*, 2024; Meena and Patane, 2025). Esta evolución hacia un modelo energético limpio y eficiente enfrenta varios desafíos que se han documentado en diferentes estudios (Elasu *et al.*, 2023; Saleh *et al.*, 2024). Algunos de los principales retos de la transición energética que se han discutido ampliamente en la literatura son: a) la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles sin afectar el desarrollo y calidad de vida de la sociedad, b) la adopción e integración de fuentes de energía renovables en la matriz energética existente, c) la gestión del almacenamiento de energía y la mejora de la eficiencia energética en diferentes sectores, d) la necesidad de inversión para desarrollar y desplegar nuevas tecnologías, y e) la formación de capital humano en varios campos disciplinarios asociados con esta temática.

En este contexto, la participación de las científicas es fundamental para contribuir al desarrollo y gestión de conocimiento e impulsar innovaciones y soluciones tecnológicas que promuevan una transición energética justa y equitativa. A lo largo de la historia, las mujeres han enfrentado numerosos desafíos para acceder y destacar en campos científicos y tecnológicos; sin embargo, su contribución ha sido esencial para el avance de la ciencia y la tecnología (Sidelil *et al.*, 2023; Devi *et al.*, 2024). En Latinoamérica, se ha documentado que aún existen brechas de género para la participación e integración plena de las mujeres en la ciencia, la tecnología y la innovación (CTI) donde la medición de este fenómeno y la identificación de sus causas se complica por la carencia de indicadores apropiados a nivel nacional e internacional (López-Bassols *et al.*, 2018). No obstante, la pregunta que surge es: *¿cuál es el grado de participación de las científicas mexicanas en el campo de la transición energética en México?* Para ofrecer una respuesta parcial y preliminar a este cuestionamiento, el presente documento proporciona un breve análisis de estadísticas generadas de la base de datos pública del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de México, antes conocida como Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT), acerca de las científicas mexicanas que se desempeñan en el campo de la transición energética. El objetivo del análisis es proporcionar un panorama de su participación y contribución en esta área disciplinaria.

Desarrollo

Se realizó un análisis de la base de datos de los beneficiarios del programa “Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores – SNII” del Gobierno de México (SECIHTI, 2025a) para generar un diagnóstico y estadísticos preliminares del grado de participación y contribución de las científicas mexicanas en el área de energía y transición energética.

Como antecedente, el programa del SNII fue creado el 26 de Julio de 1984 con el objetivo de reconocer al personal académico que labora en México y realiza actividades de investigación y desarrollo tecnológico. El SNII otorga un reconocimiento mediante un nombramiento de “*Investigador Nacional*” y un estímulo económico dependiendo del nivel de la distinción asignada. Las distinciones otorgadas por el SNII son las siguientes: *Candidata a Investigadora o Candidato a Investigador Nacional, Investigadora o Investigador Nacional nivel 1, Investigadora o Investigador Nacional nivel 2, Investigadora o Investigador Nacional nivel 3, e Investigadora o Investigador Nacional Emérito*. Estas distinciones son asignadas a través de un proceso de evaluación por pares mediante convocatorias anuales donde se valora la contribución del candidato(a) a la generación de conocimiento y tecnología utilizando indicadores de producción científica/tecnológica, así como la formación de recursos humanos, el grado de consolidación de su trayectoria global, y su reconocimiento, independencia y liderazgo a nivel nacional e internacional en su principal campo disciplinario de incidencia.

La base de datos del SNII es actualizada en forma periódica y su contenido incluye el área y campo de conocimiento, disciplina, subdisciplina e institución de adscripción de sus integrantes. Esta información es proporcionada por los investigadores e investigadoras durante su participación en las convocatorias anuales del programa SNII. Por tanto, la base de datos del SNII es información oficial del gobierno de México y es una fuente confiable de acceso público que puede ser utilizada para generar información estadística asociada al personal científico mexicano que se desarrolla en el sector de ciencia y tecnología en diferentes campos del conocimiento.

La base de datos del SNII correspondiente al primer trimestre del 2024, y que estaba disponible en la página electrónica del CONAHCYT, ahora SECIHTI (SECIHTI, 2024), fue utilizada para analizar y generar indicadores preliminares del grado de participación y contribución de las científicas mexicanas en el área de energía y transición energética. A la fecha de consulta, 19 de Julio del 2024, esta base de datos incluía a 43,979 científicas y científicos mexicanos que ostentaban la distinción del SNII con la siguiente distribución: 11,125 Candidato (25.3%), 23,482 Nivel 1 (53.4%), 6,133 Nivel 2, (13.9%) 2,521 Nivel 3 (5.7%), y 718 Emérito (1.6%).

Se realizó una búsqueda en dicha base de datos para identificar al personal científico que ha declarado realizar actividades de investigación y desarrollo tecnológico en el área de energía y transición energética. El presente análisis se centró en ese subconjunto de beneficiarios y, por lo tanto, las estadísticas y discusión de los resultados son representativos de éste. Se debe indicar que en este análisis no se incluyeron a investigadoras e investigadores que hayan declarado una adscripción fuera de México. También, es conveniente mencionar que es factible que más beneficiarios del programa del SNII estén trabajando en el área de transición energética, pero que no pudieron ser identificados en la búsqueda y clasificación realizada con la información disponible y estrategia utilizada para el procesamiento de datos. A pesar de esta limitante, los indicadores que se reportan en este informe son un acercamiento inicial para dimensionar la participación de las científicas mexicanas en el campo de transición energética, ofrecen un panorama preliminar de su contribución y pueden ser utilizados como una base para estudios posteriores más detallados. Las palabras claves empleadas para realizar la búsqueda y la clasificación en la base de datos del SNII comprendieron: “Bioenergía y biocombustibles”, “Ahorro y uso eficiente de la energía”, “Ingeniería Energética”, “Energía Eólica”, “Energía Solar”, “Planeación Energética”, “Nuevas fuentes de energía”, “Tecnología del carbón y del petróleo”, “Tecnología energética”, “Energía”, “Fuentes no convencionales de energía”, “Generación de energía”, “Energía nuclear” e “Hidrógeno”.

Resultados

Los resultados del análisis de la base de datos del SNII (primer trimestre del 2024) muestran que 138 integrantes clasificaron sus actividades de investigación y desarrollo tecnológico, de forma directa e indirecta, en el área de energía y transición energética. De esta muestra, 27 son mujeres (19.6%) y 111 son hombres (80.4%) indicando una proporción de 4 científicos por cada científica mexicana que se desarrolla profesionalmente en esta área.

Se identificaron 54 adscripciones diferentes para este personal científico, las cuales comprenden a instituciones públicas y privadas, así como centros de investigación con diferentes grados de consolidación y reconocimiento. Las principales instituciones de educación superior de México, con las mejores posiciones en las clasificaciones internacionales (es decir, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Politécnico Nacional, Tecnológico de

Monterrey, Universidad Autónoma Metropolitana), así como Centros de Investigación con amplio reconocimiento nacional e internacional (por ejemplo, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Centro de Investigaciones en Óptica), son parte de los espacios laborales donde los científicos y científicas desarrollan sus agendas de investigación en el área de transición energética.

La Universidad Nacional Autónoma de México es la institución con mayor número de beneficiarios del SNII (15.3%) que ha declarado a la temática de energía y transición energética como su principal línea de investigación. Este resultado es consistente con el grado de consolidación de dicha universidad ya que cuenta con las mejores condiciones de infraestructura y presupuesto a nivel nacional para el desarrollo de investigación en México. Para esta institución, se identificó un registro prácticamente equitativo de científicas (47.6%) y científicos (52.4%) con líneas de investigación asociadas a transición energética. En contraste, se observó que no se tiene registro de participación de científicas en el área de transición energética en el 75.9% (41/54) de las instituciones y centros de investigación de adscripción identificadas en la muestra obtenida de la base de datos del SNII.

Con fines ilustrativos, la Figura 1 contiene la distribución de las distinciones del SNII por género para los casos que han declarado el área de transición energética como su principal línea de investigación. En general, se observa una relación de 1.7 – 2.3 científicos por cada científica con distinciones de Candidato, Nivel 2 y Nivel 3 del SNII, mientras que esta proporción es significativamente mayor para el caso de la distinción de Nivel 1, la cual corresponde a 6 científicos por cada científica. De la muestra analizada, 22% de las científicas se encuentra en la etapa inicial de su carrera académica (es decir con nivel Candidata a Investigadora), 51.9% está en proceso de consolidación (Nivel 1), 14.8% ha logrado una consolidación y reconocimiento a nivel nacional (Nivel 2) y 11.1% cuenta con un reconocimiento y liderazgo nacional e internacional por sus contribuciones (Nivel 3), de acuerdo con los criterios específicos de evaluación del SNII (SECIHTI, 2025b).

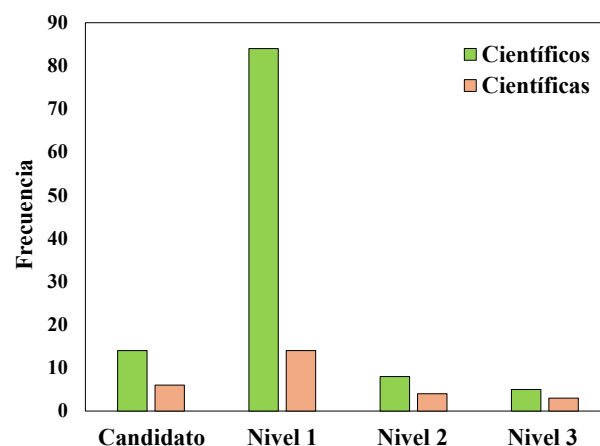


Figura 1. Distribución de distinciones de integrantes del SNII cuya línea de investigación está asociada a transición energética. Fuente: Base de datos de beneficiarios del SNII – Primer trimestre 2024 (SECIHTI, 2024).

En la Tabla 1 se reportan los principales indicadores de producción científica de los 138 casos de la muestra analizada del programa SNII. Estas métricas bibliográficas fueron obtenidas de la consulta de los perfiles de SCOPUS disponibles para cada caso. En forma particular, se reportan los valores mínimo, máximo y promedio de productos académicos publicados (artículos, memorias de congresos, capítulos de libro, libros), el número de citas recibidas a su obra global y el valor del índice H. Es pertinente indicar que estos estadísticos concentran la obra global del beneficiario/beneficiaria incluyendo aquellos productos académicos y citas que correspondan a temáticas de investigación distintas al área de energía y transición energética. En general, no se identificaron diferencias significativas, asociadas a una brecha de género, en la producción académica individual del conjunto analizado de integrantes del SNII, así como en las citas recibidas para su obra global.

Tabla 1. Valores mínimo, máximo y promedio para los principales indicadores de producción científica de los beneficiarios del SNII cuya línea de investigación está asociada a transición energética. Fuente: Base de datos SCOPUS.

Valor	Productos académicos		Citas a su obra		Índice H	
	Científico	Científica	Científico	Científica	Científico	Científica
Mínimo	2	3	0	5	0	1
Máximo	209	151	5406	3050	41	32
Promedio	28	30	442	591	9	10

Las principales disciplinas reportadas por este conjunto de integrantes del SNII, de acuerdo con la clasificación disponible en el programa y su género, se reportan en la Tabla 2. Las científicas mexicanas tienen mayor participación en las disciplinas de Bioenergía y Biocombustible (29.6%), Ingeniería Energética – Solar (25.9%), y Tecnología Energética – Fuentes no convencionales de Energía (18.5%), mientras que no se encontraron registros de participación en las disciplinas de Ingeniería Energética – Planeación Energética, Nuevas Fuentes de Energía y Tecnología Energética – Generación de Energía.

Tabla 2. Disciplinas reportadas por los integrantes del programa SNII cuya línea de investigación está asociada a transición energética. Fuente: Base de datos de beneficiarios del SNII – Primer trimestre 2024 (SECIHTI, 2024).

Disciplina del catálogo del SNII	% de científicos	% de científicas
Bioenergía y Biocombustible	9.9	29.6
Ingeniería Energética – Planeación Energética	4.5	0.0
Ingeniería Energética - Eólica	3.6	3.7
Ingeniería Energética - Solar	28.8	25.9
Ingeniería Energética - Otros	15.3	18.5
Nuevas Fuentes de Energía - Otras	1.8	0.0
Tecnología Energética – Fuentes no convencionales de energía	23.4	18.5
Tecnología Energética - Energía	8.1	3.7
Tecnología Energética – Generación de Energía	4.5	0.0

Conclusiones

Este análisis preliminar de las estadísticas oficiales del programa SNII sugiere la existencia de una brecha de género en la participación del personal científico de México que genera conocimiento y/o produce tecnología en el área de energía y transición energética. Este resultado es consistente con otros estudios que han abordado la participación de la mujer latinoamericana en el campo de la ciencia, la tecnología y la innovación. La transición hacia fuentes de energías limpias no es solo un desafío técnico y económico, sino también un proceso con implicaciones sociales profundas. A pesar de los avances, las mujeres y diversos grupos en condición de vulnerabilidad continúan estando subrepresentados en varios sectores incluyendo a la comunidad científica asociada a la energía. El garantizar su participación equitativa no solo es una cuestión de justicia social, sino una estrategia clave para impulsar soluciones más sostenibles e innovadoras. La perspectiva de género es importante para enriquecer las políticas públicas y promover una mayor igualdad y diversidad en el sector científico-tecnológico en México.

Agradecimientos: Financiado por la Unión Europea a través del Proyecto Energytran (<https://energytran.oei.int/>). Las opiniones y puntos de vista expresados solo comprometen a sus autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea. Ni la Unión Europea ni autoridad financiadora pueden ser considerados responsables de ellos.

Bibliografía

Abbasian, H. E., Alenabi, S. A., Talebi, S. (2024). Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles. *Energy Reports* 12, 3778-3794. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.030>

Devi, S., Thinakaran, R., Hanefar S. B. M., Nadzri N. R. N. (2024). Tracking academic contributions to Women’s empowerment in Malaysia: A bibliometric investigation. *Heliyon* 10, e37052. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37052>

Elasu, J., Ntayi, J. M., Adaramola, M. S., Buyinza, F. (2023). Drivers of household transition to clean energy fuels: A systematic review of evidence. *Renewable and Sustainable Energy Transition* 3, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2023.100047>

López-Bassols, V., Grazi, M., Guillard, C., Salazar, M. (2018). Las brechas de género en Ciencia, tecnología e innovación en América Latina y el Caribe: resultados de una recolección piloto y propuesta metodología para la medición. Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0001082>

Meena, P. K., Patane, P. M. (2025). Biohydrogen: Advancing a sustainable transition from fossil fuels to renewable energy. *International Journal of Hydrogen Energy* 100, 955-970. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.396>

Saleh, A. M., Istvan, V., Khan, M. A., Waseem, M., Ahmed A. N. A. (2024). Power system stability in the Era of energy Transition: Importance, Opportunities, Challenges, and future directions. *Energy Conversion and Management: X* 24, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100820>

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (2024). Padrón de Beneficiarios del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Consultado: 19 de Julio, 2024. <https://secihti.mx/sistema-nacional-de-investigadores/padron-de-beneficiarios/>

-
- Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (2025a). Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. <https://secihti.mx/sistema-nacional-de-investigadores/>
- Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (2025b). Marco Legal del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. <https://secihti.mx/sistema-nacional-de-investigadores/marco-legal/>
- Sidelil, L. T., Spark, C., Cuthbert, D. (2023). 'Being in science and at the same time being a woman is difficult': Academic women's experiences of gender inequalities in STEM academia in Ethiopia. Women's Studies International Forum 98, 102717. <https://doi.org/10.1016/j.wsif.2023.102717>

Alfabetización energética en estudiantes de Bachillerato en Veracruz, México: diferencia por género

Mario Hernández Vargas ¹ y Sergio Hernández-Mejía ^{2,*}

¹ Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Administración, Universidad Cristóbal Colón, Veracruz, Veracruz, México

² Universidad Cristóbal Colón, Veracruz, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: sergiohm@ucc.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 28 de marzo de 2025

Aceptado: 3 de mayo de 2025

Publicado: 14 de mayo de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.399>

Resumen: Esta investigación tiene por objetivo medir la alfabetización energética de estudiantes de bachillerato, y hacer un comparativo del desempeño en conocimientos, actitudes y comportamientos hacia temas de energía entre hombres y mujeres. En la investigación participan 295 estudiantes de nivel bachillerato, quienes estaban inscritos en su segundo y tercer año escolar, durante el periodo agosto-diciembre de 2023. La puntuación que obtuvieron los estudiantes en alfabetización energética es de 67.78 puntos, en una escala de cero a 100, considerado como un nivel moderado. A partir de comparativo se concluye que existe una diferencia significativa en la media del indicador de alfabetización energética entre hombres y mujeres. Mediante una prueba de igualdad de medias se determina que no existe diferencia entre hombres y mujeres respecto a conocimientos y comportamientos en temas de energía, pero sí se identifica que las mujeres tienen una puntuación mayor en el indicador de actitud hacia temas de energía cuya diferencia es significativa. Los resultados de la investigación evidencian la necesidad de formación en conocimientos en temas de energía, por parte de los estudiantes de bachillerato, tal que les permita tener una comprensión, así como las implicaciones del uso de recursos energéticos.

Palabras clave: alfabetización energética; género; estudiantes; recursos energéticos

Introducción

Durante las últimas décadas, ha cobrado relevancia científica el concepto alfabetización energética, del término en inglés *energy literacy* (Setyowati *et al.*, 2019; Chodkowska-Miszczuk *et al.*, 2021). De acuerdo a los autores pioneros en esta temática, la alfabetización energética es la comprensión que tiene un ciudadano respecto a temas de energía, que involucra aspectos cognitivos, afectivos y de comportamiento (DeWaters y Powers, 2012a).

Para los autores Lee *et al.*, (2015), la alfabetización energética puede capacitar a las personas para la toma de decisiones bien pensadas y emprender acciones responsables, ya que, la escasez de energía se ha convertido en un problema sustancial en el mundo. Akitsu *et al.*, (2017) definen la alfabetización energética, como la habilidad común que se fomenta mediante la educación energética para superar los desafíos energéticos en el mundo.

No existe un consenso respecto a su definición y sobre la escala de medición de la alfabetización energética. El departamento de Energía de Estados Unidos define la alfabetización energética como “la comprensión de la naturaleza y el papel que desempeña la energía en el universo y en nuestras vidas. La alfabetización energética también es la habilidad para aplicar este conocimiento para responder preguntas y resolver problemas” (U.S. Department of Energy, 2017). La definición anterior implica la comprensión por parte de los ciudadanos, del concepto de energía, el conocimiento de los tipos de energía, su uso, cómo es producida, así como el estar conscientes respecto a cómo la producción y consumo de energía afectan el medio ambiente, entre otros temas.

Al respecto, Dewaters y Powers (2012b) definen la alfabetización energética en términos de tres componentes: conocimientos, actitudes y comportamientos hacia temas de energía. La Figura 1 ilustra los tres componentes de la alfabetización energética. Las características actitudinales y de comportamiento generalmente describen a una persona quien reconoce la existencia de problemas sobre la energía en el mundo, y muestra voluntad de participar en su solución, así mismo, es una persona que toma decisiones informadas sobre el uso de la energía, con base en la comprensión de los impactos y las consecuencias. Las características cognitivas incluyen habilidades cognitivas como el análisis crítico, la resolución de problemas y la clarificación de valores, así como conocimiento de contenidos técnicos, formales o informales, por ejemplo, conoce el proceso de conversión de energía y cuánta energía utilizan los electrodomésticos.

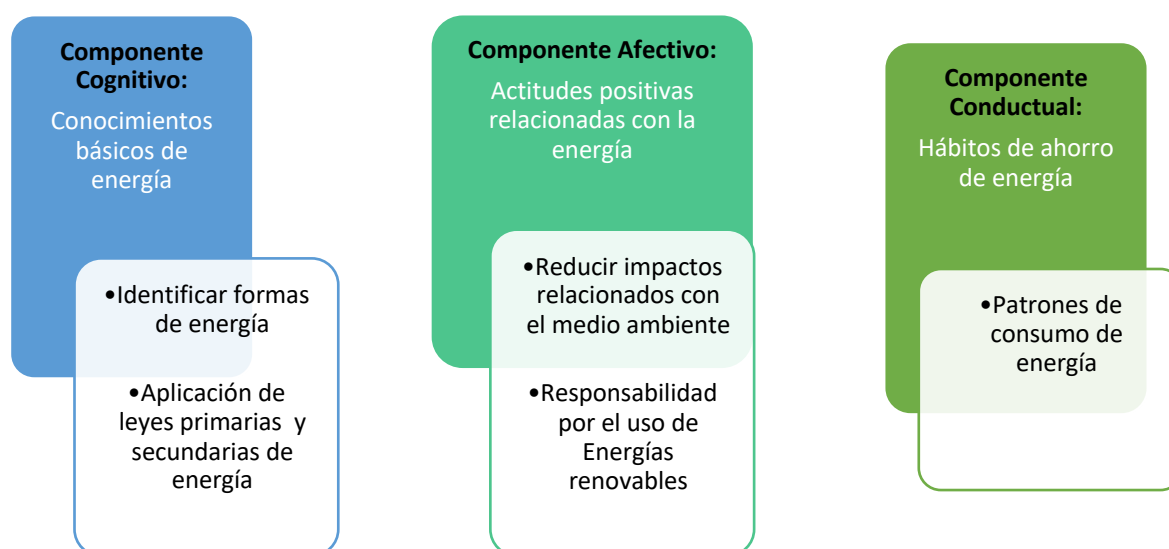


Figura 1. Componentes de la alfabetización energética.

Los resultados de diferentes investigaciones en estudiantes de nivel medio superior y licenciatura reportan niveles bajos de alfabetización energética (Dewaters *et al.*, 2012b; Lee *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2020; Białynicki-Birula *et al.*, 2022). Así mismo, se identifican diferencias entre hombres y mujeres respecto a los conocimientos, actitudes y comportamientos hacia temas de energía. Cotton *et al.*, (2015) identificaron diferencias significativas por género en el componente de conocimientos en temas de energía. Lee *et al.*, (2015), identificaron que los estudiantes sexo masculino, obtuvieron un mayor porcentaje de respuestas correctas en conocimientos (65.0 %), por el contrario, las mujeres obtuvieron el 62.3 %, y en el indicador de conciencia, preocupación y medio ambiente, las alumnas tienen una conciencia significativamente mayor sobre los problemas energéticos (media 4.44, hombres 4.32) y tienen una visión más positiva hacia el medio ambiente (media 4.20, hombres 4.04). De acuerdo a Ilham *et al.*, (2022) los estudiantes tienen un nivel aceptable respecto a actitudes positivas y prácticas hacia la conservación de la energía. Akitsu *et al.*, (2019), identificaron diferencias significativas en los conocimientos energéticos básicos por género, donde los hombres obtuvieron un puntaje de 42 % y las mujeres 51 %; en las atribuciones de responsabilidad, los hombres obtuvieron un puntaje de 75 % y las mujeres 77 %, y en el comportamiento de ahorro de energía, los hombres obtuvieron un puntaje de 68 % y las mujeres 66 %. Kumar (2019) identifica que las mujeres, aún con título universitario, tienen menor alfabetización energética que los hombres.

Con base en lo anterior, esta investigación tiene por objetivo medir el nivel de alfabetización energética en estudiantes de nivel medio superior, pertenecientes al municipio de Veracruz, México, así como analizar si existen diferencias entre hombres y mujeres respecto a la alfabetización energética.

Desarrollo

Metodología

Esta investigación es del tipo descriptivo y de corte transversal. Para la medición de la alfabetización energética se utiliza la definición de DeWaters *et al.*, (2012b), determinado por tres componentes: conocimientos sobre temas de energía, actitudes y comportamiento hacia el uso de la energía en la vida diaria. La población bajo estudio son estudiantes de nivel bachillerato, con edad de 15 hasta 19 años, donde la mayor población es representada por alumnos del sexo femenino, con el 63 % y el resto para sexo masculino, ubicados en la Ciudad y Puerto de Veracruz, localizada al centro-este de México, sobre las costas del Golfo de México. La muestra, determinada por autodeterminación, está conformada por un grupo de 295 estudiantes de nivel medio superior, de un bachillerato público, quienes estaban inscritos en su segundo y tercer año escolar, durante el periodo agosto-diciembre de 2023.

Para evaluar el nivel de alfabetización energética de los estudiantes se utiliza un cuestionario propuesto por Martins *et al.*, (2020) conformado por 31 preguntas de respuesta cerrada que miden los conocimientos relacionados con la energía, donde se asigna un punto por cada respuesta correcta y cero puntos para cada respuesta incorrecta; 19 preguntas tipo Likert con valores de 1 a 5 que evalúan las actitudes hacia temas de energía (19 preguntas) y el comportamiento hacia el uso de la energía (11 preguntas).

Resultados

En la Figura 2 se presenta una selección de preguntas sobre conocimientos en temas de energía. De los resultados de la encuesta, menos del 65 % de los estudiantes responden correctamente las preguntas sobre esa temática. En la distinción entre hombres y mujeres, en todas las preguntas, sobre conocimiento de hechos científicos básicos, es mayor el porcentaje de estudiantes hombres, que responden correctamente las preguntas, comparado con el porcentaje de mujeres.

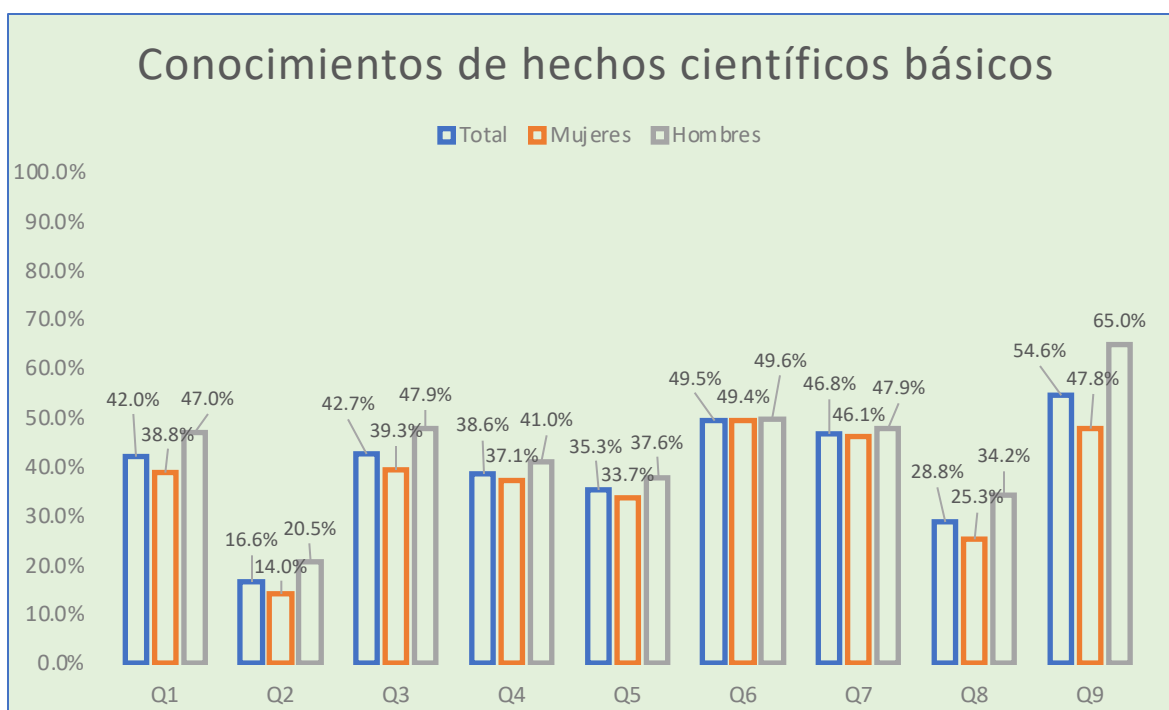


Figura 2. Resultados de la encuesta sobre conocimientos sobre temas de energía.

En la pregunta Q1: ¿Cuál de los siguientes enunciados define mejor el concepto de "Energía?", menos del 50% de los estudiantes proporciona la respuesta correcta, mientras que en la pregunta Q2: ¿La cantidad de Energía Eléctrica (Electricidad) que se consume, se mide en unidades llamadas...?, el porcentaje de hombres y de mujeres que responden correctamente, es menor al 21 %. Los resultados de la pregunta Q3: sobre la cantidad de Energía consumida por un electrodoméstico y Q4: los elementos que determinan la cantidad de energía eléctrica (electricidad) que un electrodoméstico consumirá, evidencian el desconocimiento por parte de los estudiantes de las cantidades que energía que consumen los electrodomésticos. En la pregunta Q6: sobre energía potencial almacenada, Q7: sobre formas de energía, Q8: conversión de energía y Q9: sobre energía luz y calor, excepto para la pregunta Q5: sobre conversión de energía en luz, hombres y mujeres responden correctamente las preguntas sobre el tema de conocimiento de hechos científicos básicos.

En la Tabla 1 se muestran los resultados respecto al componente de actitudes hacia temas de energía. En la última y penúltima columna se presentan los resultados de la prueba de diferencia de medias, respecto del porcentaje de estudiantes, que responde correctamente las preguntas (Prueba F y valor de la Significancia). En todas las preguntas, sobre conciencia/preocupación con respecto a los problemas energéticos globales, el puntaje promedio que obtienen las estudiantes mujeres, es mayor comparado con el obtenido por los estudiantes hombres. Esto significa que tanto

hombres como mujeres muestran una postura favorable hacia los temas de energía. En todas las preguntas, excepto en la pregunta 4, hay diferencia significativa de la actitud entre hombres y mujeres respecto a esta temática.

Tabla 1. Resultados de la encuesta sobre actitudes hacia temas de energía.

Pregunta		Media	Desv. estándar	F	Sig.
1. Los temas energéticos deberán ser una parte importante de la educación escolar.	Mujer	4.1517	1.01097	7.75	0.006
	Hombre	3.7778	1.28728		
	Total	4.0034	1.14136		
2. Haría más para ahorrar energía si supiera cómo hacerlo.	Mujer	4.3652	0.94858	10.89	0.001
	Hombre	3.9573	1.16259		
	Total	4.2034	1.05591		
3. El ahorro de energía es importante.	Mujer	4.6966	0.7577	12.549	<.001
	Hombre	4.2906	1.21101		
	Total	4.5356	0.98177		
4. No tenemos que preocuparnos por cuidar la energía porque se desarrollarán nuevas tecnologías para resolver problemas de energía para las futuras generaciones.	Mujer	4.0337	1.20216	1.288	0.257
	Hombre	3.8718	1.19293		
	Total	3.9695	1.1991		

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la encuesta sobre comportamientos hacia temas de energía. En las preguntas 1, 3 y 5, se identifica que las mujeres obtienen una calificación promedio mayor que los hombres, lo cual indica en estar muy de acuerdo en la importancia de cuidar en ahorrar el agua y tomar medidas para ahorrar energía, por ejemplo, apagar las luces cuando sale de una habitación y apagar el aire acondicionado. En la pregunta 2, el puntaje promedio que obtienen los hombres es mayor al de las mujeres, cuya diferencia es significativa ($F_{4.94}$, $\text{sig}=0.027$) lo cual indica que los hombres son más propensos a seleccionar formas de movilidad sostenible para recorrer distancias cortas.

Tabla 2. Resultados de la encuesta sobre comportamientos hacia temas de energía.

Pregunta		Media	Desv. estándar	F	Sig.
1. Trato de ahorrar agua.	Mujer	4.1573	0.87526	6.886	0.009
	Hombre	3.8462	1.1568		
	Total	4.0339	1.00621		
2. Camino o voy en bicicleta para recorrer distancias cortas en lugar de ir en automóvil.	Mujer	3.1292	1.46142	4.947	0.027
	Hombre	3.5128	1.43007		
	Total	3.2814	1.45878		
3. Cuando salgo de una habitación, apago las luces.	Mujer	4.2247	1.03337	0.493	0.483
	Hombre	4.1368	1.08203		
	Total	4.1898	1.052		
4. Muchas de mis decisiones diarias son afectadas por mis ideas sobre el uso de la energía.	Mujer	2.6404	1.21894	1.046	0.307
	Hombre	2.7863	1.16581		
	Total	2.6983	1.19828		
5. Mi familia o yo apagamos el aire acondicionado para ahorrar energía.	Mujer	3.8034	1.20291	0.407	0.524
	Hombre	3.7094	1.28694		
	Total	3.7661	1.23561		

Conclusiones

A partir de la revisión de la literatura se enfatiza en la importancia de la alfabetización energética y los tres componentes que la conforman: conocimientos sobre temas de energía, comportamientos y actitudes hacia los temas de energía. Respecto a las diferencias que pudieran existir respecto a los niveles de alfabetización energética entre estudiantes de nivel medio superior, se concluye que no existe diferencia en los conocimientos en temas de energía asociadas, a hombres y mujeres. Los resultados indican una diferencia de medias del indicador de actitud hacia temas de energía asociadas a favor de las mujeres. No se evidencia diferencia de medias del indicador de comportamiento hacia el uso de la energía, asociadas a hombres y mujeres. Los resultados de la investigación evidencian la necesidad de formación en conocimientos en temas de energía, por parte de los estudiantes de la muestra, tal que les permita tener una comprensión, así como las implicaciones del uso de recursos energéticos.

Bibliografía

- Akitsu, Y., Ishihara, K.N., Okumura, H. & Yamasu, E. (2017). Investigating energy literacy and its structural model for lower secondary students in Japan. *International Journal of Environmental and Science Education*, 12(5), 1067-1095. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1145592.pdf>
- Białynicki-Birula, P.; Makiela, K.; Mamica, Ł. (2022) Energy Literacy and Its Determinants among Students within the Context of Public Intervention in Poland. *Energies*, 15, 5368. <https://doi.org/10.3390/en15155368>
- Cotton, D. R., Miller, W., Winter, J., Bailey, I., & Sterling, S. (2015). Developing students' energy literacy in higher education. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 16(4), 456-473. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-12-2013-0166>
- Chodkowska-Miszczuk, J., Kola-Bezka, M., Lewandowska, A., & Martinát, S. (2021). Local communities' energy literacy as a way to rural resilience—an insight from inner peripheries. *Energies*, 14(9), 2575. <https://doi.org/10.3390/en14092575>
- DeWaters, J., & Powers, S. (2013). Establishing measurement criteria for an energy literacy questionnaire. *The Journal of Environmental Education*, 44(1), 38-55. <https://doi.org/10.1080/00958964.2012.711378>
- DeWaters, J., Qaqish, B., Graham, M., & Powers, S. (2013). Designing an energy literacy questionnaire for middle and high school youth. *The Journal of Environmental Education*, 44(1), 56-78. <https://doi.org/10.1080/00958964.2012.682615>
- Ilham, Z., Zulkifli, N. E. I., Ismail, N. F., Danik, A. S., Abdul Halim-Lim, S., Wan-Mohtar, W. A. A. Q. I., & Jamaludin, A. A. (2022). Energy conservation: awareness analysis among secondary school students. *Environmental Education Research*, 28(6), 925-947. <https://doi.org/10.1080/13504622.2022.2031902>
- Kumar, N. (2019). *A model-based clustering approach for analyzing energy-related financial literacy and its determinants*(No. 19/312). Economics Working Paper Series. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3328468>
- Lee, L. S., Lee, Y. F., Altschuld, J. W., & Pan, Y. J. (2015). Energy literacy: Evaluating knowledge, affect, and behavior of students in Taiwan. *Energy Policy*, 76, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.012>
- Martins, A., Madaleno, M., & Ferreira Dias, M. (2020). Financial knowledge's role in portuguese energy literacy. *Energies*, 13(13), 3412. <https://doi.org/10.3390/en13133412>
- Setyowati, D. L., Hardati, P., Astuti, T. M. P., & Amin, M. (2019). Energy consumption, emission absorption and carbon emission reduction on Semarang state university campus. *Int. J. Energy Environ. Eng*, 13(7), 505-509. <https://pdfs.semanticscholar.org/c0d5/a0085b3185d209cdf03bd82b25fde67a577c.pdf>
- U.S. Department of energy (2017). Energy Literacy: Essential Principles and Fundamental Concepts for Energy Education. Recuperado de: https://www1.eere.energy.gov/education/pdfs/energy_literacy_1_0_high_res.pdf

Síntesis de zeolitas como vía de suprarreciclaje de residuos de la construcción y la demolición

Gleysi Estefanía Morales Martínez ¹, Daniel Sánchez Bravo ¹, Liliana Lizárraga Mendiola ², Gabriela A. Vázquez Rodríguez ^{1,*}

¹ Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Km. 4.5 Carr. Pachuca-Tulancingo, 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

² Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

* Autora de correspondencia: gvazquez@uaeh.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 10 de abril de 2025 Aceptado: 4 de junio de 2025 Publicado: 19 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.420>

Resumen: El presente artículo explora una alternativa sustentable para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) mediante su suprarreciclaje en zeolitas sintéticas. Estos residuos, usualmente considerados inertes, pueden transformarse en materiales con alto valor agregado, gracias a sus contenidos de sílice y alúmina, precursores clave en la síntesis zeolítica. Se describen los principales métodos de obtención de zeolitas, con énfasis en la síntesis hidrotérmica, que permite cristalizar fases zeolíticas a partir de soluciones alcalinas bajo condiciones controladas de temperatura y presión. Se presentan casos de éxito reportados en la literatura en los que los RCD han sido utilizados para sintetizar analcima y otras zeolitas, capaces de adsorber metales pesados como el plomo o uranio, así como contaminantes orgánicos, entre otras aplicaciones. Esta línea de investigación se enmarca en los principios de la economía circular, al reducir la disposición en vertederos y promover la reutilización de materiales. Las zeolitas obtenidas tienen aplicaciones en catálisis, tratamiento de aguas y captura de gases, lo que refuerza su valor ambiental e industrial. Así, se propone un modelo innovador y sostenible para valorizar residuos comunes y abundantes.

Palabras clave: RCD; zeolitas; síntesis hidrotérmica; economía circular, producción de biodiésel.

Introducción

Los residuos de la construcción y la demolición (RCD) son los residuos generados principalmente en entornos urbanos como resultado de actividades relacionadas con la edificación, ya sea con la construcción de nuevas estructuras, la demolición o la rehabilitación de las existentes (Romero, 2006). A diferencia de los residuos sólidos urbanos convencionales, los RCD se componen en su mayoría de materiales inorgánicos como concreto, ladrillos, metales, azulejos, cerámica, yeso, y vidrio, aunque también pueden incluir mezclas asfálticas, madera y plásticos, entre otros. Los mayores generadores de RCD son China, Estados Unidos y la Unión Europea (Soto-Paz *et al.*, 2023). En México, se ha estimado que la vivienda social implica un consumo de materiales de construcción de 1.24 toneladas/m², de las cuales aproximadamente 0.083 toneladas/m² corresponden a RCD (Ramos-Rodríguez *et al.*, 2023).

Por su origen eminentemente pétreo, los RCD suelen considerarse inertes; sin embargo, pueden contener materiales peligrosos, tales como metales pesados, hexabromociclododecano y éteres de difenilo polibromados usados en aislantes térmicos, así como combustibles y disolventes (Papamichael *et al.*, 2023). Estos materiales generan impactos ambientales negativos en los ecosistemas, pero también pueden provocar complicaciones a la salud, como cáncer, daño hepático y renal, daño fetal, trastornos neurológicos, entre otros padecimientos (Molla *et al.*, 2021; Tafesse *et al.*, 2022).

Aunque la tasa de recuperación de RCD varía según el país, se estima que el 35% de los RCD del mundo se disponen en vertederos, a pesar de que el 75% tiene un valor añadido (Soto-Paz *et al.*, 2023). Para el caso de México, se ha calculado que el 78% de los RCD termina en vertederos, y que solo el 22% se canaliza a algún tipo de reciclaje (Ramos-Rodríguez *et al.*, 2023). Para disminuir la disposición de RCD en vertederos, la directiva 2018/850 del Parlamento Europeo estableció metas claras para reducir esta práctica de cara al año 2035, lo que evidencia la urgencia de implementar estrategias más eficaces para la gestión de los RCD, como el fomento de su reúso o reciclaje en procesos con beneficios ambientales (Papamichael *et al.*, 2023).

El reciclaje, el reúso y el suprarreciclaje (en inglés, *upcycling*) son estrategias fundamentales para la gestión sustentable de los residuos, ya que promueven la reducción del impacto ambiental y la conservación de los recursos pétreos vírgenes. El reciclaje implica la transformación de los residuos en nuevos productos, por lo general en procesos que

demandan nuevas entradas de materiales y de energía. El reúso extiende la vida útil de los residuos mediante su utilización repetida sin que sufran transformaciones significativas. Por su parte, el suprarreciclaje consiste en la revalorización creativa de residuos para producir bienes de mayor valor o calidad que el original. Estas prácticas contribuyen a la economía circular, al fomentar un modelo productivo más eficiente y menos contaminante (Boise State University, 2023).

La transformación de los RCD en zeolitas, que podría reducir la proporción de estos residuos enviada a vertederos al suprarreciclarlos en un producto valioso, se alinea con los principios de la economía circular. Por ello, el objetivo de este artículo es presentar las zeolitas como un material de interés a través de la exposición de sus aplicaciones y beneficios ambientales, así como los métodos de síntesis de zeolitas más comunes. Asimismo, se expondrán algunos ejemplos del empleo de los RCD como precursores de la síntesis, y se esbozarán tendencias futuras de esta práctica.

Desarrollo

Una zeolita es un material que tiene una estructura cristalina, compuesta por tetraedros – formas parecidas a una pirámide con cuatro caras triangulares– de silicatos y aluminio. Estos tetraedros están unidos por átomos de oxígeno, formando una red que crea cavidades interconectadas, similares a canales y jaulas (Figura 1a). Estas cavidades son lo suficientemente amplias como para permitir el paso de moléculas externas, y generalmente están ocupadas por agua y cationes extraestructurales (es decir, que se encuentran fuera de la estructura propia de la zeolita ya mencionada), los cuales suelen ser intercambiables (Gregg, 2023). Esta conformación especial le otorga propiedades muy valoradas, como la ya mencionada capacidad de intercambio iónico, actividad catalítica en varias reacciones químicas y la capacidad para adsorber otras moléculas. Por lo anterior, se les considera materiales útiles en una amplia gama de aplicaciones industriales.

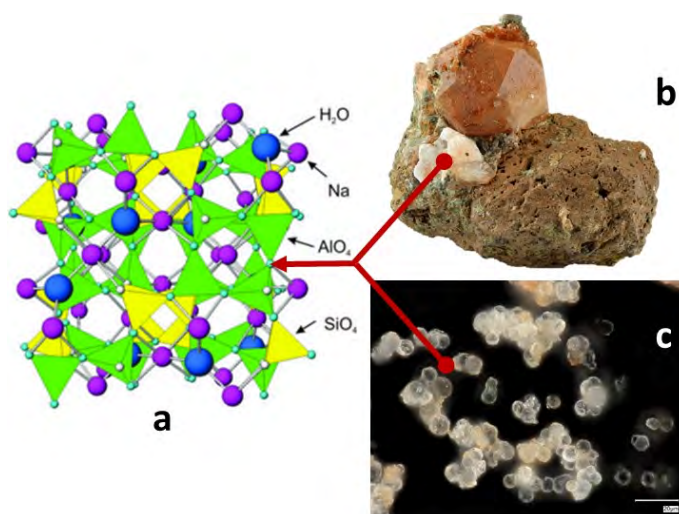


Figura 1. a) Arreglo atómico de la analcima, $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$; b) analcima natural de Semnan, Irán; analcima sintética. Créditos de las imágenes: a) Dexter Perkins, licencia CC BY-NC-SA 4.0, tomada de <https://geo.libretexts.org/>; b) Ivar Leidus, licencia CC BY-SA 4.0, tomada de <https://commons.wikimedia.org/>; c) elaboración propia.

Zeolitas naturales y sintéticas

Las zeolitas se encuentran profusamente en la naturaleza, en donde existen más de 40 tipos diferentes. Entre las más comunes se encuentran la analcima (Fig 1b), cabazita, heulandita, natrolita, phillipsita y la estilbita. Sin embargo, las zeolitas sintéticas (Figura 1c) presentan varias ventajas; debido a que son diseñadas en un laboratorio, las condiciones en las que se generan son más estables, lo que permite que adquieran porosidades uniformes, buenas capacidades de intercambio iónico, estabilidad térmica o química. A su vez, al contar con un tamaño de poros uniforme, las zeolitas sintéticas se pueden enfocar a aplicaciones definidas, como la adsorción de contaminantes, la catálisis química o el tamizado molecular (Gallo-González y Vázquez-Rodríguez, 2021).

Richard Barrer y Robert Milton fueron pioneros en la síntesis de zeolitas a finales de los años 1940. Barrer, investigador del Imperial College de Londres, basó sus primeros estudios en la transformación de fases minerales conocidas bajo la acción de soluciones de sales fuertes, como el cloruro y bromuro de bario (BaCl_2 y BaBr_2 , respectivamente) a altas temperaturas ($170 - 270^\circ\text{C}$) (Bustillos-Yaguana y Suin-Arévalo, 2014). Union Carbide Co. inició la comercialización de zeolitas sintéticas en 1954, que se usaron primero en el secado de refrigerantes y gas natural; posteriormente, se les empleó en procesos de craqueo catalítico y como intercambiadores de iones en detergentes (Vaughan, 2014). Para su formación son necesarias condiciones estrictas de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión

parcial de agua; asimismo, estos factores son determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas (Curi *et al.*, 2006).

Métodos de síntesis

Según Khaleque *et al.* (2020), existen diversas formas en las que se pueden obtener zeolitas, las cuales se presentan a continuación:

- **Método solvotérmico.** Si bien el agua es el disolvente universal y el más empleado para la síntesis de zeolitas, es posible obtener materiales zeolíticos a partir de alcoholes (tales como metanol, etanol, pentanol), etilenglicol, hidrocarburos e incluso piridina. La síntesis depende de la temperatura y la presión aplicadas, así como de factores tales como los materiales de partida, su composición, la proporción de la sílice, la alcalinidad, la agitación o la falta de ella, y el tiempo de síntesis, entre otros. Este método, a su vez, se subdivide en sus variantes hidrotermal e ionotérmica.
 - **Método hidrotermal.** Se considera la ruta primaria de la síntesis de zeolitas; utiliza agua como solvente y una base fuerte como mineralizador a diferentes temperaturas y presiones. Requiere de un recipiente sellado y una autoclave que permita la transferencia homogénea de calor (Figura 2); por ello, es de los métodos más empleados, al ser muy sencillo y económico en comparación con otros.
 - **Método ionotérmico.** Requiere líquidos iónicos (sales en estado líquido a bajas temperaturas), los cuales actúan tanto como disolvente y como “plantilla” o agente que dirige la formación de sólidos hacia una estructura potencial. Esta técnica se considera sostenible porque los líquidos iónicos pueden reutilizarse y tienen una baja presión de vapor, lo que reduce riesgos ambientales y de seguridad.
- **Método de fusión alcalina y de lixiviación alcalina.** Por un lado, el método de fusión alcalina busca descomponer el material rico en sílice o alúmina en presencia de un álcali (una base disuelta en agua) que actúa como activador para la formación de sales solubles de aluminato y silicato. Por otro lado, en la lixiviación alcalina se extraen componentes solubles (como el silicio y el aluminio) de un material sólido utilizando una solución básica, generalmente hidróxido de sodio (NaOH).
- **Método sol-gel.** Este proceso implica la formación de una sustancia coloidal inorgánica y la gelificación de la suspensión, que a su vez forma una estructura de red tridimensional. Este proceso abarca la transición de un sistema de solución de un “sol” líquido a una fase de “gel” sólida, lo que permite un mejor control de la técnica; es decir, proporciona una mayor porosidad y un tamaño de partícula definido.
- **Síntesis con microondas.** La materia prima se introduce en un microondas, en donde las mismas ondas actúan como campos eléctricos de alta frecuencia que eventualmente producen calor para llevar a cabo la reacción. Esta síntesis suele trabajarse en combinación con otros métodos, como el hidrotermal, el solvotermal o el ionotérmico.
- **Método de energía ultrasónica.** Consiste en la aplicación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia, como lo indica su nombre, a una mezcla de reacción, para producir un fenómeno conocido como cavitación. Este se refiere a la formación de una cámara de gas o vapor (una clase de microburbujas) en un líquido, que al colapsar de forma violenta logra reducir la presión a una temperatura constante del líquido (Mao *et al.*, 2019). Esto mejora la disolución, dispersión y reactividad de los materiales.

Los residuos de la construcción y la demolición como precursores de zeolitas

El uso de las zeolitas producidas a partir de RCD es un campo relativamente nuevo. Por ejemplo, se ha reportado la síntesis de zeolitas a partir de agregados de concreto aireado esterilizados en autoclave (Hartmann *et al.*, 2012). En este trabajo, se encontraron y analizaron diferentes rutas de síntesis, las cuales involucraban tratamientos alcalinos y ácidos de los residuos antes de su cristalización final mediante adición de aluminato de sodio. Más recientemente, se han explorado las múltiples aplicaciones de las zeolitas obtenidas en la descontaminación ambiental. Así, científicos de la Universidad del Sur de China trabajaron con zeolitas magnéticas derivadas de residuos de ladrillos sin cocer, y encontraron que las zeolitas podían eliminar iones de uranio (Ai *et al.*, 2022). En Japón, se sintetizó analcima a partir

de polvo de concreto calizo residual, previamente tratado con HCl para eliminar compuestos de calcio. La formación del mineral se corroboró por medio de difracción de rayos X, y el producto obtenido se empleó más tarde en ensayos de adsorción de azul de metileno (Kanda y Harada, 2021). En el 2024 se utilizó una analcima, producida a través de una síntesis hidrotermal a partir de desechos de ladrillos, para adsorber iones contaminantes, específicamente Pb^{2+} (Zhou *et al.*, 2024). Un resumen de estos y otros ejemplos de obtención de zeolitas tomando RCD como materiales precursores se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de ejemplos de obtención de zeolitas a partir de residuos de la construcción y la demolición.

Residuo	Método de síntesis	Zeolita producida	Aplicación	Referencia
Suelo excavado en actividades de construcción	Hidrotermal con una mezcla de suelo, Na_2SiO_3 y NaOH	Zeolita GIS	Remediación de suelos contaminados con cadmio mediante intercambio catiónico	Cai <i>et al.</i> (2025)
Residuos de vidrio y chatarra de aluminio	Hidrotermal con aluminato de sodio	Zeolita tipo faujasita y Na-P1	Reducción catalítica selectiva de NO a NH_3	Sayehi <i>et al.</i> (2022)
Agregados de concreto aireado	Hidrotermal con un tratamiento de lixiviación ácida con ácido cítrico	Zeolita A o LTA	Capacidad de adsorción de agua y estabilidad hidrotermal	Hartmann <i>et al.</i> (2012)
Residuos de ladrillos sin cocer	Hidrotermal combinada con una fusión a alta temperatura con nanopartículas magnéticas (Fe_3O_4) y una funcionalización con grupos sulfhidrido (-SH)	Zeolita magnética funcionalizada con grupos sulfhidrido	Adsorción eficiente de iones de uranio (VI) en aguas residuales nucleares	Ai <i>et al.</i> (2022)
Polvo de concreto calizo residual	Tratamiento con HCl del polvo de concreto seguido de síntesis hidrotermal	Analcima	Adsorción (medida mediante una prueba con azul de metileno)	Kanda y Harada (2021)
Residuos de ladrillos	Hidrotermal con postratamiento de HCl	Analcima	Adsorción de iones de plomo (Pb^{2+}) en aguas residuales simuladas	Zhou <i>et al.</i> (2024)

En los estudios mencionados arriba se utilizó el mismo método de síntesis; es decir, se empleó la síntesis hidrotermal, que disuelve mejor los componentes del sistema reaccionante, y así permite la reacción de sustancias que en condiciones normales son muy insolubles (Zanella, 2012). El método de síntesis hidrotermal a partir de estos residuos implica tres etapas (Czarna-Juszkiewicz *et al.*, 2020), que se representan en la Figura 2. Primero, se dispersa el material de partida (rico en sílice, SiO_2 , y alúmina, Al_2O_3) en una solución alcalina fuerte que provea cationes, típicamente NaOH, y se le somete a un tratamiento térmico a temperaturas entre 100 y 200 °C durante 6 a 24 horas. En la segunda fase, gracias a la temperatura, la fase amorfa inicial se transforma gradualmente en una fase cristalina. Finalmente, ya que el material amorfo se trasformó en cristales, estos pueden separarse, enjuagarse y secarse.



Figura 2. Síntesis de zeolitas a partir de residuos de la construcción y la demolición mediante el método hidrotermal. Elaboración propia a partir de Czarna-Juszkiewicz *et al.* (2020).

Las ventajas de este método incluyen su bajo consumo energético, la posibilidad de utilizar residuos industriales muy comunes, como los RCD, las cenizas volantes o las latas de aluminio (Guerrero-Marín *et al.*, 2024). A pesar de que se trata de una tecnología relativamente simple para obtener zeolitas, su proceso de producción no se ha optimizado, ya que el mecanismo de síntesis de las zeolitas no se conoce en su totalidad. La pureza de las zeolitas obtenidas depende de la concentración de álcalis, la temperatura, la relación sólido/líquido y la relación Si/Al (Czarna-Juszkiewicz *et al.*, 2020).

Ventajas de la producción de las zeolitas

Como se mencionó con anterioridad, los residuos de construcción y demolición (RCD) pueden gestionarse desde una perspectiva de economía circular, un modelo innovador de producción y consumo que busca compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes tantas veces como sea posible. De este modo, se reduce al mínimo los residuos que terminan en vertederos y se añade un valor adicional a los materiales (Parlamento Europeo, 2023). A diferencia del modelo lineal tradicional (basado en extraer, fabricar, usar y desechar) la economía circular propone cerrar el ciclo de los materiales, promoviendo la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos generados en el sector de la construcción. Si, como proponemos, los RCD se utilizan para sintetizar zeolitas, que son productos de alto valor agregado, se trata de suprarreciclaje, también previsto en esquemas de economía circular.

Las zeolitas tienen diversas aplicaciones, tales como en el campo de la catálisis heterogénea, en donde destacan por su porosidad, acidez ajustable y estabilidad térmica. Por ejemplo, las zeolitas representan una alternativa prometedora para la producción de biodiésel por transesterificación y esterificación de diversas materias primas, incluso de aceites de baja calidad con alto contenido de ácidos grasos libres (Yang y Yu, 2023). Por otra parte, además de su conocida capacidad de adsorción de metales pesados y diversos contaminantes orgánicos, que subraya el interés por incorporarlas a sistemas de potabilización del agua y a tratamientos de efluentes y aguas de escorrentía urbanas (Corona-Lugo y Vázquez-Rodríguez, 2024), las zeolitas pueden absorber compuestos orgánicos volátiles, gases de efecto invernadero, como el CO₂, e incluso almacenar eficientemente H₂ (Czarna-Juszkiewicz *et al.*, 2020). Otra propiedad importante es su elevada capacidad de intercambio catiónico, debida a que los cationes extraestructurales de las zeolitas pueden intercambiarse con otros de forma controlada, lo cual tiene numerosas aplicaciones en materia agrícola.

Tendencias en la síntesis de zeolitas

Yan *et al.* (2024) han perfilado tendencias clave que, consideran, transformarán la manera en que se sintetizan las zeolitas. En primer lugar, enfatizan la obtención de nuevos materiales zeolíticos mediante métodos innovadores, tales como la condensación topotáctica de cadenas silicatadas, que permite obtener estructuras con poros extragrandes y altamente interconectados. Asimismo, han destacado técnicas avanzadas de caracterización a nivel atómico, que facilitarán la comprensión de los mecanismos de cristalización y catálisis. Paralelamente, han destacado los aportes que vendrán de la mano de la inteligencia artificial, que promete optimizar los procesos de síntesis al descubrir patrones ocultos entre estructura, funcionalidad y condiciones experimentales. Finalmente, estos autores se han referido a las aplicaciones emergentes de las zeolitas, como la conversión de gases de efecto invernadero y la cosecha de agua atmosférica, que consolidarán su rol en la consecución de los objetivos del desarrollo sustentable.

Conclusiones

El aumento desmesurado de los residuos de la construcción y demolición es un desafío ambiental significativo. Sin embargo, en la búsqueda para evitar su disposición final en vertederos, pueden suprarreciclarse en recursos con un valor agregado. La producción de zeolitas a partir de RCD es una alternativa innovadora, que no únicamente permite la valorización de este tipo de residuos, sino que también permite su aplicación a diversas áreas, como industriales y ambientales. Estos materiales zeolíticos obtenidos de materiales que se consideran erróneamente inertes, no solo reducen el volumen de desechos, sino que se les confieren propiedades excepcionales como capacidad de adsorción, intercambio iónico y acción catalítica.

Al adoptar este tipo de acciones se busca que la sostenibilidad y la innovación trabajen en conjunto para producir modelos más amigables con el medio ambiente. Iniciativas como ésta contribuyen a mitigar el impacto ambiental de

los RCD, además de fomentar la promoción de una cultura de aprovechamiento eficiente de los recursos, alineada con los objetivos globales del desarrollo sustentable y la economía circular.

Bibliografía

- Ai, Y., Yin, N., Ouyang, Y., Xu, Y., & Yang, P. (2022). Waste non-burn-free brick derived sulfhydryl functioned magnetic zeolites and their efficient removal of uranium (VI) ions. *Applied Surface Science*, 571, 151241. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151241>.
- Boise State University (2023). Reusing, Recycling, and Upcycling: A Primer. <https://www.boisestate.edu/cobe/blog/2023/10/reusing-recycling-and-upcycling-a-primer/>.
- Bustillos-Yaguana, A. E., & Suin-Arévalo, M. A. (2014). *Diseño y Construcción de un Reactor Químico para la Obtención de Zeolitas Sintéticas*. Universidad de Cuenca.
- Cai, L., Zheng, Q., Wang, Z., Tian, Z., Yang, D., Wei, Z., & Hou, J. (2025). Converting Building Waste Soil into GIS Zeolite to Remediate Cd-Polluted Soil. SSRN, <https://doi.org/10.2139/ssrn.5218194>.
- Corona-Lugo, S. V., & Vázquez-Rodríguez, G. A. (2024). Urban Runoff Treatment by Natural and Magnetite-Modified Zeolites in Packed-Bed Columns. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00326-z>.
- Curi, A., Granda, W. J. V., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las zeolitas y su aplicación en la descontaminación de efluentes mineros. *Información Tecnológica*, 17(6). <https://doi.org/10.4067/s0718-07642006000600017>.
- Czarna-Juszkiewicz, D., Cader, J., & Wdowin, M. (2020). From coal ashes to solid sorbents for hydrogen storage. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122355>.
- Gallo-González, A. K., & Vázquez-Rodríguez, G. A. (2021). Uso de zeolitas para el control de fuentes no puntuales de contaminación del agua: revisión. *Ingeniería del Agua*, 25(4), 241-255. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15897>.
- Gregg, L. (2023). *Zeolite Group. A group of related mineral species*. Hudson Institute of Mineralogy, Mindat.org. <https://www.mindat.org/min-4395.html>.
- Guerrero-Marín, S., Legorreta-García, F., Betanzos-Cabrera, G., Atitlán-Gil, A., Juárez-Tapia, J. C., & Rosario-Olguín, Y. (2024). Síntesis de zeolita clinoptilolita a partir de silicoaluminato natural y latas de aluminio. *South Florida Journal of Development*, 5(11), e4699. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n11-046>.
- Hartmann, A., Buhl, J., & Lutz, W. (2012). Synthesis and Properties of Zeolites from Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Waste. *Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie*, 638(9), 1297-1306. <https://doi.org/10.1002/zaac.201200175>.
- Kanda, Y., & Harada, S. (2021). Synthesis of zeolites from calcareous waste concrete powder. *Results In Materials*, 13, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100250>.
- Khaleque, A., Alam, M. M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. B., Xu, B., Johir, M., Karmakar, A. K., Zhou, J., Ahmed, M. B., & Moni, M. A. (2020). Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review. *Environmental Advances*, 2, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100019>.
- Mao, Y., Xia, W., Peng, Y., & Xie, G. (2019). Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. *Fuel Processing Technology*, 195, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106150>.
- Molla, A. S., Tang, P., Sher, W., & Bekele, D. N. (2021). Chemicals of concern in construction and demolition waste fine residues: A systematic literature review. *Journal of Environmental Management*, 299, 113654. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113654>.
- Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2023). Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management & Research*, 41(12), 1728-1740. <https://doi.org/10.1177/0734242x231190804>.
- Parlamento Europeo (2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. Temas | Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>.
- Ramos-Rodríguez, G. G., Sandoval-García, E., & Correa Torres, A. (2023, 14 marzo). Midiendo la economía circular en México. *INEGI-Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*. <https://rde.inegi.org.mx/index.php/2023/01/04/midiendo-la-economia-circular-en-mexico/>.
- Romero, E. (2006). Residuos de Construcción y Demolición. *Universidad de Huelva*.
- Sayehi, M., Delahay, G., Tounsi, H. (2022). Synthesis and characterization of ecofriendly materials zeolite from waste glass and aluminum scraps using the hydrothermal technique. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108561. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108561>.
- Soto-Paz, J., Arroyo, O., Torres-Guevara, L. E., Parra-Orobio, B. A., & Casallas-Ojeda, M. (2023). The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. *Journal of Building Engineering*, 78, 107724. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107724>.
- Tafesse, S., Girma, Y. E., & Dessalegn, E. (2022). Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices. *Heliyon*, 8(3), e09169. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09169>.
- Vaughan, O. (2014). Porous by design. *Nature*, 511(7509), 19-19. <https://doi.org/10.1038/nature13371>.
- Yan, W., Li, Y., Xiao, F. S., Liu, Z., & Yu, J. (2024). The Future of Zeolites. *Chemistry of Materials*, 36(15), 7103-7105. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c01675>.
- Yang, G., & Yu, J. (2023). Advancements in basic zeolites for biodiesel production via transesterification. *Chemistry*, 5(1), 438-451. <https://doi.org/10.3390/chemistry5010032>.
- Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 5(1). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2012.1.45167>.
- Zhou, J., Zhang, S., Shi, H., Qiang, J., Dong, H., & Liu, H. (2024). Hydrothermal Synthesis of Analcime from Construction Waste Bricks and Its Adsorption Mechanism for Pb²⁺. *Water, Air and Soil Pollution*, 235(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06995-9>.

Estandarización del ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos mediante el diseño de un manual técnico: estudio de caso en una empresa de Veracruz

Adela Morales-Vásquez ¹, Hilda Saucedo-Rivalcoba ¹, Santa Pascual-De los Santos ², Gregorio Hernández-Salinas ^{1,*}

¹ Docente-Investigador del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Km 4 Carretera a la Compañía S/N, Tepetitlanapa, Zongolica 95005, Veracruz, México.

² Estudiante de la Ingeniería en Gestión Empresarial del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zongolica.

* Autor de correspondencia: gregorio_hs@zongolica.tecnm.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 16 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 19 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.438>

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo la estandarización del proceso de ensamblaje de paneles solares fotovoltaicos mediante el diseño de un manual técnico en una empresa manufacturera ubicada en Río Blanco, Veracruz, México. El estudio tiene un enfoque cuantitativo, alcance descriptivo y diseño transversal. Se seleccionaron a cinco participantes involucrados directamente con el ensamble. Se empleó el cursograma analítico y las ayudas visuales, permitiendo documentar las actividades desarrolladas en las seis áreas clave del proceso productivo de la empresa, siendo: soldadura, pre-laminado, laminado, enmarcado, limpieza y prueba y empaque. La recopilación y sistematización de esta información permitió identificar 76 actividades ejecutadas en 152 minutos y 47 segundos, sirviendo como base para estandarización de los procesos y el diseño del manual técnico. Este manual busca fortalecer la capacitación del personal y la mejora continua en los procesos y eficiencia operativa en manufactura de la empresa de paneles solares fotovoltaicos.

Palabras clave: Cursograma analítico; energías renovables; sustentabilidad ambiental; manual de procedimientos.

Introducción

La generación de electricidad a partir de fuentes convencionales es uno de los principales responsables de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo significativamente al cambio climático (Vaca y Kido, 2020). En este contexto, las energías alternativas, como la solar mediante sistemas fotovoltaicos (Figura 1), representan una opción ecológicamente viable y sostenible, al generar bajas emisiones de CO₂ durante su operación. No obstante, la energía solar aún enfrenta el reto de satisfacer la demanda energética creciente (Arencibia-Carballo, 2016).

Además, la energía solar es la tercera fuente renovable más utilizada a nivel mundial y se espera que sea la principal antes de finales del siglo XXI (López-Flores *et al.*, 2024).

A pesar de los avances importantes en torno a los sistemas fotovoltaicos solares, las empresas tienen que mejorar su producto en cada proceso de la cadena de suministro para lo cual es elemental el uso de herramientas y/o diagramas como el cursograma sinóptico, cursograma analítico, diagrama bimanual y el Ishikawa “Diagrama de Espina de Pescado”, entre otros, para la identificación de áreas de oportunidad en cada actividad (Franco-Austria *et al.*, 2023). El cursograma sinóptico describe las principales operaciones e inspecciones de un proceso sin tomar en cuenta la ubicación ni quién las ejecuta. El cursograma analítico muestra el desarrollo de

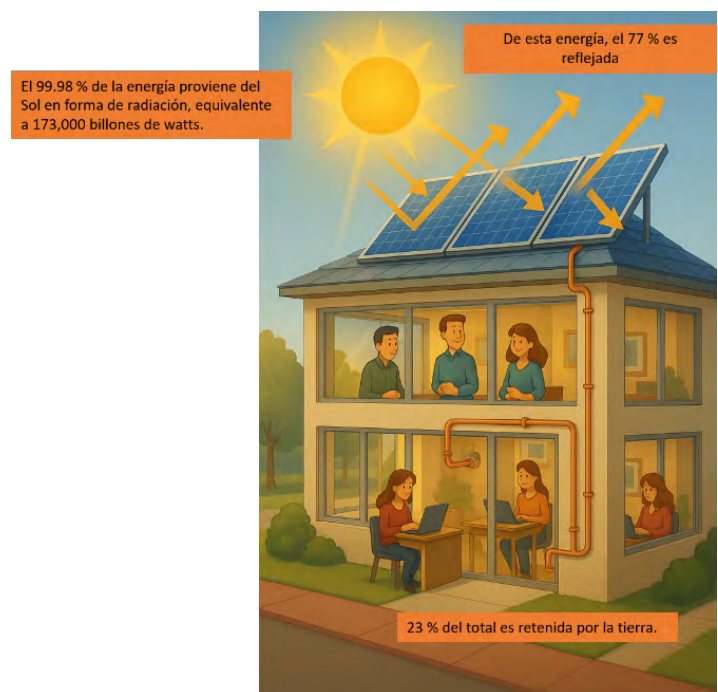


Figura 1. Representación del funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico que ilustra la captación, reflexión y conversión en electricidad en un edificio. Elaboración con datos de Arencibia-Carballo (2016).

un proceso o producto que mediante un símbolo expresa todos los hechos sujetos a escrutinio; se considera una herramienta para perfeccionar las técnicas. El diagrama bianual es un gráfico que muestra el movimiento de algunas partes del cuerpo de un empleado y cómo el movimiento se asocia con la culminación de una actividad (Quispe, 2019). El Ishikawa también conocido como de causa-efecto se elabora con el método de las 6 M (material, método, maquinaria, mano de obra, medición y medio ambiente) (Franco-Austria *et al.*, 2023).

En ese tenor, en el presente estudio se usó el cursograma analítico para la elaboración del manual técnico que se presenta como una herramienta fundamental para garantizar la replicabilidad y mejora continua de los procedimientos operativos. El objetivo fue analizar el proceso de ensamblaje de los paneles solares, para el diseño de un manual técnico que sirva como herramienta de capacitación, estandarización de actividades y fortalecimiento de la productividad en seis áreas clave del proceso: soldadura, pre-laminado, laminado, enmarcado, limpieza y prueba y empaque.

Desarrollo

El presente estudio tiene un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo y transversal; se realizó en una empresa manufacturera en el municipio de Río Blanco, Veracruz, México. El proyecto se desarrolló específicamente en el área de ensamble, donde participaron cinco operarios, quienes son los responsables en las operaciones clave y que constituyen la totalidad del personal del departamento. Con base en ello, se utilizó la técnica de muestreo por censo al tratarse de una población finita y accesible. La población estuvo compuesta por tres mujeres y dos hombres, con edades promedio de 38.5 y 28.7 años, respectivamente.

El estudio comprendió dos momentos: en el primero se utilizó la técnica de observación y se aplicó la herramienta de cursograma analítico para determinar las actividades y tiempo (Tabla 1).

Tabla 1. Simbología del cursograma analítico.

Símbolo	Significado	Descripción
	Operación	Indica las principales etapas del procedimiento.
	Inspección	Señala la verificación de la calidad o la cantidad del producto.
	Transporte	Indica los movimientos de los empleados, material y herramientas de trabajo.
	Demora	Es el tiempo que se desarrolla los procedimientos.
	Almacenamiento	Es el depósito de documentos o información en un archivo, así como de un objeto en un almacén.

Se evaluaron las seis áreas en la empresa manufacturera: soldadura, pre-laminado, laminado, enmarcado, limpieza, prueba y empaque (Figura 2).

En el segundo momento, se emplearon las ayudas visuales en cada etapa del área respectiva que permitió la validación para la estandarización en el ensamble de la elaboración de paneles solares fotovoltaicos, tomando como referencia las NOM-019-STPS-2011 (DOF, 2011) y NMX-CC-9001-IMNC-2015 (DOF, 2016).

Con la información recabada del cursograma analítico, se generó el número de actividades realizadas en el departamento de ensamble para cada área: soldadura (seis), pre-laminado (19), laminado (16), enmarcado (27), limpieza (cuatro), prueba y empaque (cuatro) con un tiempo estándar en el proceso de 9.31 minutos, 14.0 minutos, 50.12 minutos, 29.3 minutos, 10 minutos y 40 minutos, respectivamente. Las ayudas visuales a través de fotografías e

instrucciones de cada fase del ensamblaje permitieron la ubicación de componentes, el uso de herramientas y las acciones a realizar en cada paso de las seis áreas del departamento (Figura 3).

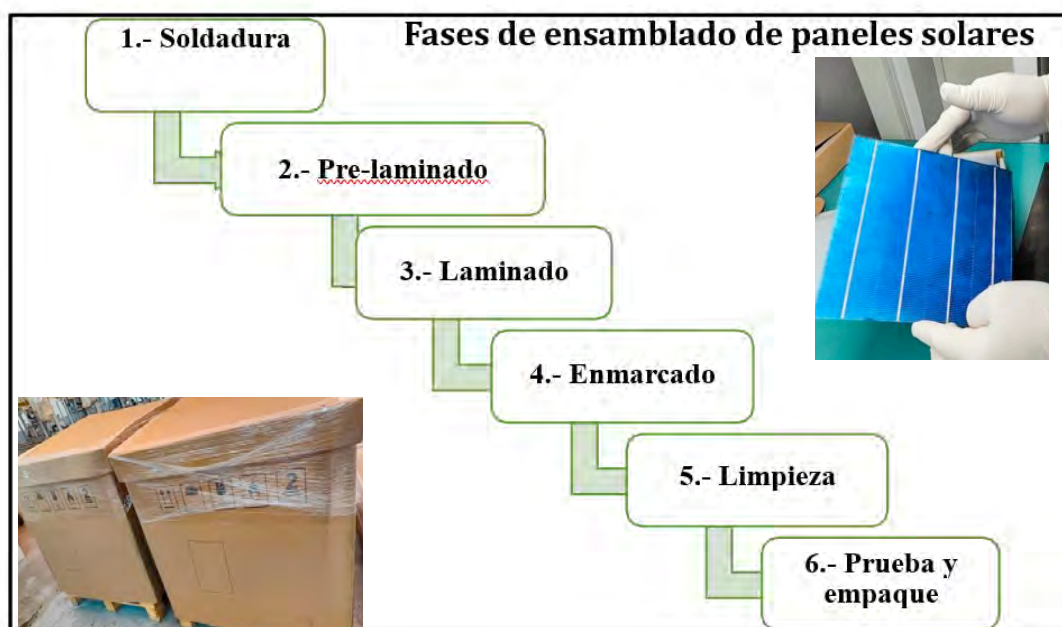


Figura 2. Esquema representativo desde la soldadura hasta el empaque de los paneles solares fotovoltaicos.

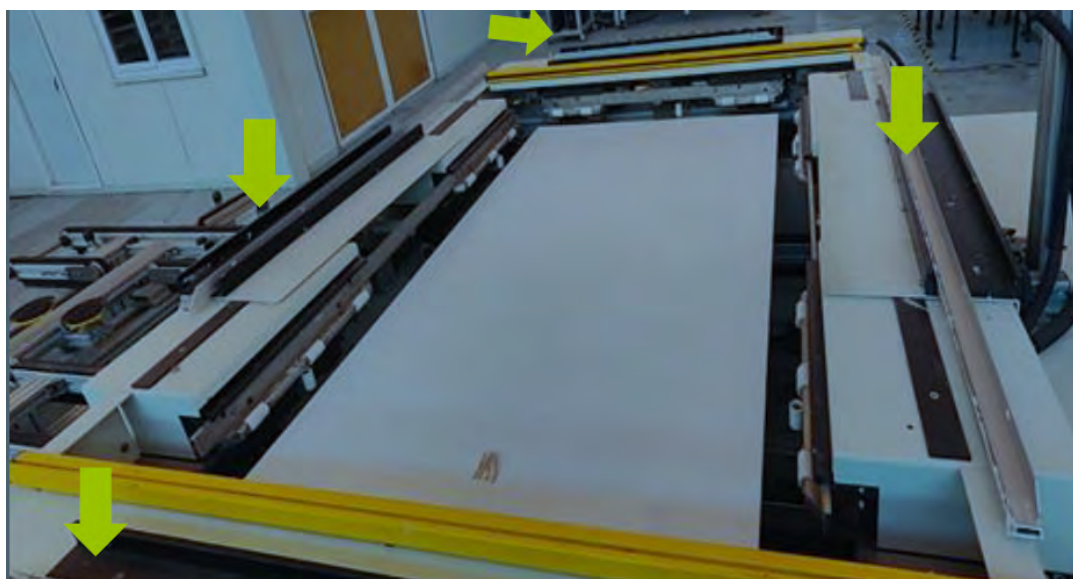


Figura 3. Imagen representativa de las ayudas visuales para los operarios.

Las tendencias actuales en el área de gestión de procesos productivos destacan el uso continuo y renovado de herramientas como el cursograma sinóptico, el cursograma analítico, el diagrama bimanual y los diagramas de sucesión, las cuales siguen siendo ampliamente utilizadas en sectores como imprentas y forestal, entre otros. Diversos estudios reportan que su implementación ha contribuido a la optimización de tiempos, la mejora en la calidad de productos y el fortalecimiento de la eficiencia en la cadena de suministro (Franco-Austria *et al.*, 2023; Guzmán *et al.*, 2020).

En paralelo, una línea de tendencia emergente está relacionada con la gestión de los residuos generados por los paneles solares, los cuales, al llegar al final de su vida útil, pueden clasificarse como residuos peligrosos por los materiales que los componen. Esto ha generado un creciente interés en el diseño de políticas de reciclaje y normativas de disposición adecuada (López-Flores *et al.*, 2024). Asimismo, se enfatiza la urgente necesidad de establecer regulaciones nacionales

y sistemas de medición que promuevan el desarrollo sustentable de tecnologías limpias en México, considerando su impacto tanto ambiental como social (Ramos *et al.*, 2021).

Conclusiones

El cursograma analítico y las ayudas visuales permitieron diseñar el manual técnico para la estandarización de los procesos en el ensamble de paneles solares fotovoltaicos, reportando 76 actividades ejecutadas en un tiempo estándar de 152 minutos y 47 segundos. El enfoque metodológico adoptado en el presente estudio puede ser replicado en otras empresas del sector con procesos similares.

Bibliografía

- Arencibia-Carballo, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 17(9), 1-4. <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n090916/091602.pdf>
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-019-STPS-2011, Constitución, integración, organización y funcionamiento de las comisiones de seguridad e higiene. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/680129/NOM-019-STPS-2011.pdf>
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2016). Norma Mexicana NMX-CC-9001-IMNC-2015, Sistemas de Gestión de Calidad-Requisitos. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5435775&fecha=03/05/2016#gsc.tab=0
- Franco-Austria, E., Benítez-Barrón, E., Jiménez-Del-Angel, S., & González-Santos, M. M. (2023). Herramientas de ingeniería industrial para mejorar la eficiencia del área de corte de una imprenta. *Revista Digital*, 25, 303-311. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10413037>
- Guzmán, A. R. C., Jiménez García, J. A., Figueroa Fernández, V., & Hernández González, S. (2020). Aplicación de la herramienta CONWIP para mejorar el proceso en la empresa Productos Forestales Floviesa. *Pistas Educativas*, 42(136), 438-452. <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/383>
- López-Flores, F. J., Ramírez-Márquez, C., Rubio-Castro, E., & Ponce-Ortega, J. M. (2024). Solar photovoltaic panel production in Mexico: A novel machine learning approach. *Environmental Research*, 246, 118047. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118047>
- Quispe, L. J. A. (2019). Plan de mejora para aumentar la productividad en la compañía COFACE. Tesis para obtener el título de Licenciado en Administración de Empresas. *Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Villa El Salvador*.
- Ramos, S. J. R., Chávez Rivera, R., & Alcaraz Vera, J. V. (2021). La sostenibilidad energética con paneles solares y su relación económico-social en la incertidumbre para el desarrollo regional de México. *Inquietud Empresarial*, 21(2), 97-110. <https://doi.org/10.19053/01211048.12182>
- Vaca, S. J. M. E., & Kido C. A. (2021). Estrategia de eficiencia en el consumo de energía eléctrica y mitigación en la estructura productiva de México. *Contaduría y Administración*, 66(2), 1-22. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2021.2487>

Estudio técnico de la producción de biodiesel a partir del aceite de piñón empleando Aspen Plus

Giovanni Meneses-De Jesús, Eduardo Hernández Aguilar, Nayeli Gutiérrez-Casiano, Luis Alberto Sánchez Bazán, Anselmo Osorio Mirón y Luis Antonio Velázquez Herrera *

Laboratorio 112, UVER-CA-226, Universidad Veracruzana, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: luisvelazquez@uv.mx; Tel.: (+52 1 272 282 9722).

Artículo de divulgación científica

Recibido: 17 de abril de 2025 Aceptado: 4 de junio de 2025 Publicado: 20 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.439>

Resumen: A fin de mitigar el cambio climático en el mundo, los biocombustibles, particularmente el biodiésel, emergen como una propuesta alternativa sustentable con el medio ambiente. El biodiesel ha presentado un resurgimiento en la investigación debido a la amplia variedad de materias primas que pueden ser utilizadas para su producción en masa con el fin de descarbonizar el transporte y el sector industrial. Una de las materias primas viables es el aceite de piñón debido a que está compuesto por ácidos grasos que pueden transesterificarse y generar un alto rendimiento de biodiesel. Por tal motivo, en la presente investigación se llevó a cabo una simulación del proceso de obtención de biodiesel a partir del aceite de piñón empleando el simulador de procesos Aspen Plus y los modelos termodinámicos UNIQUAC y NRTL para simular los componentes que intervienen en el proceso. Los resultados obtenidos al incluir una estequiometría de mayor complejidad fueron un incremento de la concentración de biodiesel en un 3.48% y reduciendo el consumo de metanol en un 48.8%.

Palabras clave: Biocombustible; biodiésel; sostenibilidad; simulación de procesos.

Introducción

Los biocombustibles desempeñan un papel crucial en la descarbonización del transporte y el sector industrial en la actualidad, al ofrecer una solución baja en carbono y amigable con el medio ambiente. Hoy en día existen tecnologías que pueden disminuir las emisiones de CO₂ en los vehículos ligeros a corto plazo y los camiones pesados, barcos y aviones con opciones limitadas a largo plazo, reduciendo en un 86% las emisiones de efecto invernadero (Xu *et al.*, 2022; OECD, 2023). Estas nuevas fuentes de energía proveniente de biomasa agroindustrial benefician la disminución de gases de efecto invernadero producido a partir de los combustibles fósiles.

Los biocombustibles se clasifican en cuatro generaciones: la primera, derivada de cultivos alimentarios como maíz o caña de azúcar; la segunda, a partir de residuos agrícolas o cultivos no alimentarios; la tercera, producida con algas o microorganismos; la cuarta, emplea tecnologías avanzadas para capturar carbono, resultando potencialmente en emisiones negativas de carbono. (Lombana Coy y Vega Jurado, 2016) El aceite de piñón emerge como segunda generación, este presenta en su índice de ácidos grasos alto, los cuales son componentes cruciales en la producción de biodiesel. En México, la planta crece de manera silvestre en diversas entidades federativas, tales como Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Sinaloa, Sonora, Puebla, Hidalgo y Morelos. Sin embargo, su uso tradicional está limitado principalmente a las comunidades de la región de Papantla en Veracruz, la Huasteca Hidalguense y la Sierra de piñón, produciendo alrededor de 182.57 toneladas en el año 2024 y las 255.75 toneladas para 2030 (Góngora *et al.*, 2018; Soto, *et al.*, 2014). En la Figura 1 se muestra la planta de piñón con su respectiva semilla de donde se extraen los aceites para la producción de biodiesel.



Figura 1. Planta de piñón

El uso de herramientas de simulación como Aspen Plus representa una estrategia eficaz para el análisis y diseño de procesos en la industria de los biocombustibles. En particular, la simulación del proceso de producción de biodiésel a partir del piñón permite modelar rigurosamente cada una de las etapas involucradas, incluyendo la extracción del aceite, la reacción de transesterificación y las operaciones de separación y purificación. Aspen Plus proporciona un entorno robusto para la integración de datos termodinámicos y cinéticos, facilitando la evaluación de parámetros operativos, el balance de materia y energía, así como la optimización del rendimiento del proceso. Esta herramienta resulta especialmente valiosa en el desarrollo de procesos sostenibles, al permitir la identificación de condiciones óptimas que minimicen el impacto ambiental y maximicen la eficiencia energética (Okullo y Tibasiima, 2017).

La presente simulación del proceso de producción de biodiésel se fundamenta en el uso del aceite derivado del piñón *curcas* como materia prima, con el propósito de predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas. Mediante el empleo del simulador Aspen Plus, se modelaron las principales etapas del proceso, lo que permitió estimar la producción de biodiésel y realizar un análisis económico preliminar a partir de las herramientas integradas en el software. Uno de los objetivos principales fue la optimización del consumo de metanol, buscando minimizar su uso sin comprometer la eficiencia del proceso. Para representar con mayor precisión la reacción de transesterificación, se amplió la estequiometría del modelo, incorporando un mayor número de especies químicas relevantes, tales como triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos, metanol, glicerol y ésteres metílicos de ácidos grasos. Esta ampliación permitió una descripción más detallada de las interacciones químicas involucradas, mejorando la fidelidad del modelo y proporcionando una base más robusta para la evaluación de la viabilidad técnica y económica del proceso a escala industrial.

Desarrollo

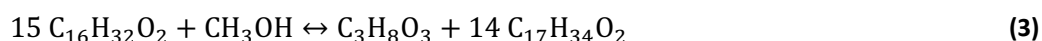
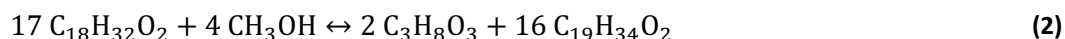
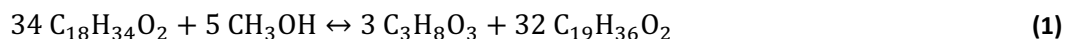
La base del presente estudio se fundamenta en la caracterización del perfil de ácidos grasos presentes en el aceite extraído de las semillas de piñón. Esta caracterización es esencial para definir la composición química del sistema a simular, ya que los ácidos grasos determinan las propiedades del aceite y su comportamiento durante la reacción de transesterificación. En la Tabla 1 se presenta la distribución de los principales ácidos grasos identificados, entre los cuales destacan el ácido oleico, linoleico y palmítico, debido a su alta concentración y relevancia en la conversión a ésteres metílicos (Serouti *et al.*, 2021). Estos compuestos fueron considerados como base para la definición de las corrientes de alimentación en el simulador Aspen Plus, permitiendo una representación más precisa del sistema real.

Tabla 1. Compuestos de la semilla de Piñón (Hamidou *et al.*, 2016).

Ácidos grasos	Formula química	Composición (%)
Ácido mirístico	$C_{14}H_{28}O_2$	0.11±0.01
Ácido pentadecanoico	$C_{15}H_{30}O_2$	0.03±0.01
Ácido palmitoleico	$C_{16}H_{30}O_2$	1.62±0.22
Ácido palmítico	$C_{16}H_{32}O_2$	15.80±0.36
Ácido hexadecenoico	$C_{17}H_{32}O_2$	0.14±0.04
Ácido heptadecanoico	$C_{17}H_{34}O_2$	0.22±0.04
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2$	39.58±4.07
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2$	30.41±4.54
Ácido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2$	10.79±0.21
Ácido eicosenoico	$C_{20}H_{38}O_2$	0.19±0.06
Ácido araquídico	$C_{20}H_{40}O_2$	0.5±0.11
Ácido behénico	$C_{22}H_{44}O_2$	0.07±0.02
Ácido lignocérico	$C_{24}H_{48}O_2$	0.07±0.03
Ácido pentacosanoico	$C_{25}H_{50}O_2$	0.02±0.01

Los ácidos grasos oleico, linoleico y palmítico constituyen los principales componentes del perfil lipídico del aceite de piñón, y son determinantes en la eficiencia del proceso de transesterificación. Estos ácidos se encuentran esterificados en forma de triglicéridos, los cuales reaccionan con un alcohol de cadena corta, comúnmente metanol,

en presencia de un catalizador homogéneo (hidróxido de sodio o potasio) o heterogéneo, dando lugar a la formación de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAMES) y glicerol como subproducto. Este proceso, conocido como transesterificación, se describe mediante una serie de reacciones consecutivas y reversibles que involucran la conversión de triglicéridos a diglicéridos, monoglicéridos y finalmente a FAMES. La cinética y termodinámica de estas reacciones dependen de múltiples factores, incluyendo la relación molar alcohol/aceite, la temperatura, el tipo y concentración del catalizador, y el tiempo de residencia. En este estudio, dichas reacciones fueron modeladas en Aspen Plus mediante la definición de reacciones estequiométricas, considerando explícitamente los principales ácidos grasos mencionados, con el fin de representar de manera precisa el comportamiento del sistema y evaluar su desempeño bajo condiciones industriales simuladas. Las ecuaciones 1-3 muestra la estequiometría del proceso.



Las condiciones de operación utilizadas en esta investigación fueron determinadas a partir de los parámetros reportados por Zhang *et al.*, (2003) quienes evaluaron el proceso de transesterificación alcalina para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales. En este estudio, se adoptaron las condiciones operativas del reactor, dado que es la unidad principal donde ocurre la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos. Las condiciones seleccionadas para la simulación en Aspen Plus fueron una temperatura de 60 °C, una presión de 400 kPa y una fracción de conversión del 95 %. Estos valores fueron implementados en el bloque de reacción bajo un esquema estequiométrico, con el objetivo de replicar condiciones industriales representativas. Los rangos de operación de las corrientes asociadas al reactor se presentan en la Tabla 2, lo que permitió validar la coherencia del modelo con respecto a los parámetros de diseño y operación establecidos.

Tabla 2. Rangos de operación de las corrientes 102, 105B y 106 que ingresan al reactor.

Corrientes de entrada	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Flujo de masa	Componentes (kg/h)
102	29.35	4	159.319	Agua – 9.65 Metanol – 148.66 Hidróxido de sodio – 1
105B	60.57	4	1105.26	Ácido palmítico – 142.74 Ácido linoleico – 468.35 Ácido oleico – 494.18
Corrientes de salida	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Flujo de masa	Componentes
106	60	4	1264.58	Ácido palmítico – 7.14 Ácido linoleico – 23.42 Ácido oleico – 24.71 Agua – 9.65 Metanol – 127.74 Glicerol – 33.94 Hidróxido sodio – 1 Metil palmítico – 439.70 Metil linoleico – 463.79 Metil oleico – 133.49

Con el fin de asegurar la viabilidad técnica de la reacción de transesterificación y minimizar la ocurrencia de reacciones secundarias, como la saponificación derivada de la presencia de ácidos grasos libres o humedad, se asumió en la

simulación que la materia prima fue sometida a un pretratamiento adecuado. Este pretratamiento incluye etapas de desgomado, neutralización y secado, las cuales permiten reducir la acidez y eliminar compuestos que podrían interferir con la actividad catalítica. La configuración del modelo de la simulación (SC) fue validada mediante una comparación con el caso base (SA) reportado por Zhang *et al.* (2003), lo que permitió ajustar los parámetros operativos y confirmar la viabilidad del diseño simulado con respecto a condiciones industriales previamente estudiadas. Posteriormente, se desarrolló el diagrama de flujo del proceso completo, el cual se presenta en la Figura 2, como representación esquemática de las operaciones unitarias involucradas en la producción de biodiésel a partir de piñón.

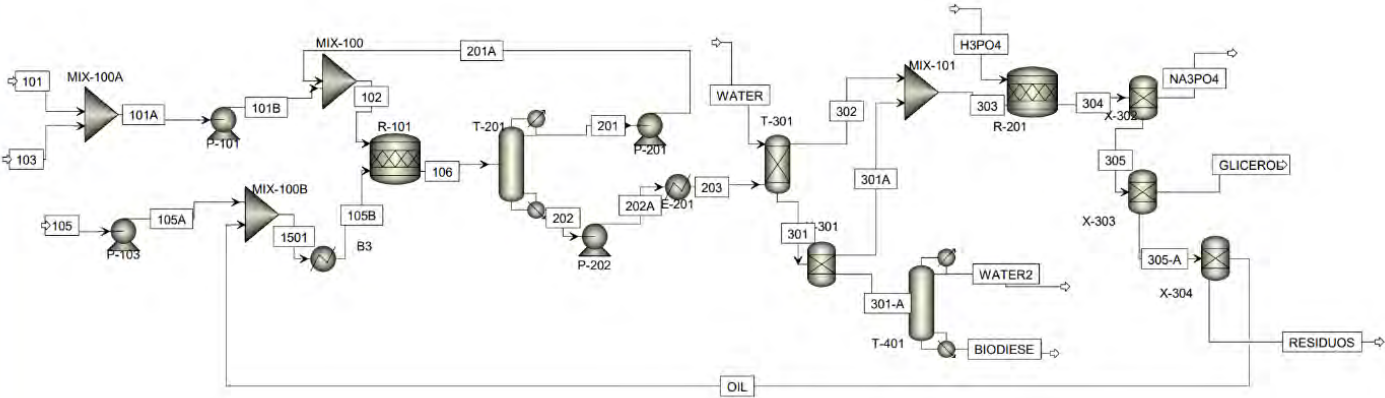


Figura 2. Diagrama del proceso de producción de biodiésel a partir de piñón.

La selección del modelo termodinámico constituye un elemento crítico en la simulación rigurosa de procesos multifásicos no ideales, como la producción de biodiésel. En este estudio, se evaluaron y aplicaron los modelos NRTL (Non-Random Two-Liquid) y UNIQUAC (UNiVersal QUASiChemical) dentro del entorno de simulación Aspen Plus, con base en su capacidad para representar con precisión el equilibrio de fases en sistemas líquidos multicomponente. El modelo NRTL fue seleccionado para las etapas de separación líquido-líquido, particularmente en la decantación de glicerol y ésteres metílicos, debido a su formulación basada en parámetros de interacción binaria no aleatoria, que permite capturar desviaciones significativas del comportamiento ideal en mezclas polares. Por su parte, el modelo UNIQUAC fue considerado para la etapa de reacción, dada su robustez en la predicción del comportamiento termodinámico en sistemas con diferencias estructurales y volumétricas entre especies, al incorporar términos combinatorios y residuales que representan tanto la entropía configuracional como las interacciones energéticas. La elección de ambos modelos se fundamentó en criterios de convergencia numérica, estabilidad del sistema y validación frente a datos experimentales reportados en la literatura, particularmente en el estudio de Baek *et al.* (2024), donde se demuestra su aplicabilidad en procesos de transesterificación catalítica. La implementación de estos modelos permitió una representación termodinámica más realista del sistema, mejorando la precisión en la predicción de composiciones de equilibrio y propiedades de transporte en cada etapa del proceso.

Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la simulación muestran una mejora significativa en la eficiencia del proceso de producción de biodiésel al comparar el caso base (SA) con el caso de investigación propuesto (SC), como se detalla en la Tabla 3. Esta mejora se atribuye a una serie de modificaciones implementadas durante el desarrollo del modelo, entre las que destacan: la redefinición de la estequiometría de la reacción, la incorporación de un sistema de recirculación de ácidos grasos no convertidos y la sustitución de una única torre de destilación por un tren de torres de separación. Estas modificaciones permitieron optimizar el consumo de

Tabla 3. Comparación entre el caso base y la simulación realizada.

Parámetros	SA	SC
Metanol	117.2 kg/h	60 kg/h
Ácidos grasos	1050 kg/h	1050 kg/h
Biodiesel	1002.04 kg/h	1036.97 kg/h
Recirculación de metanol	81.26 kg/h	88.66 kg/h

metanol, reduciéndolo de 117.2 kg/h en el caso base a 60 kg/h en el caso optimizado, lo que representa una disminución del 48.81 % en el consumo de este reactivo, sin comprometer la alimentación de ácidos grasos (1050 kg/h en ambos casos). Como resultado, la producción de biodiésel se incrementó de 1002.04 kg/h a 1036.97 kg/h, lo que representa un aumento del 3.49 % en la producción. Asimismo, se observó un aumento en la eficiencia del sistema de recuperación de metanol, con una recirculación de 88.66 kg/h en el caso SC frente a 81.26 kg/h en el caso SA. Estos resultados evidencian la viabilidad técnica de las modificaciones propuestas y su impacto positivo en el rendimiento global del proceso.

Las modificaciones implementadas en el proceso no solo mejoraron el rendimiento técnico, sino que también generaron un impacto positivo en las proyecciones de producción anual, alcanzando un volumen estimado de 9,174,232.62 litros de biodiésel, lo que representa un incremento del 3.48 % respecto al caso base. Esta mejora se atribuye a la optimización de la estequiometría, la incorporación de un sistema de recirculación de ácidos grasos y la sustitución de una torre de destilación por un tren de torres de separación. No obstante, el análisis económico del caso de simulación (SC), resumido en la Tabla 4, revela que, a pesar del aumento en la eficiencia operativa y la reducción en el consumo de materias primas, la viabilidad económica del proceso continúa siendo limitada. Aunque se obtuvo una utilidad operativa positiva de \$1,399,417.50 MXN anuales, la tasa de retorno estimada se sitúa en 20 años, lo cual está por debajo del umbral objetivo del 20 % de retorno sobre la inversión. Esto indica que, si bien el proceso es técnicamente factible y marginalmente rentable, opera con un margen económico reducido, lo que representa un desafío para su implementación a escala industrial sin incentivos adicionales o mejoras en la estructura de costos.

Tabla 4. Análisis económico de la simulación SC

Costos	(Pesos/Años)
Costo de capital total	81,039,035.00
Operación del costo	247,573,950.00
Costo del material	192,511,020.00
Ventas del producto	257,499,400.00
Utilidades	1,399,417.50
Costo del equipo	7,158,450.00
Costo de instalación	37,652,550.00
Retorno	20 años

Conclusiones

La simulación del proceso de producción de biodiésel a partir de piñón permitió evaluar el impacto de diversas modificaciones operativas sobre el rendimiento técnico y económico del sistema. La implementación de mejoras como la redefinición de la estequiometría de reacción, la recirculación de ácidos grasos no convertidos y la sustitución de una torre de destilación por un tren de torres de separación resultó en una reducción significativa del consumo de metanol (48.81 %) y un incremento en la producción de biodiésel del 3.49 %. Estas mejoras se tradujeron en una producción anual estimada de 9,174,232.62 litros, lo que evidencia la viabilidad técnica del modelo propuesto. Sin embargo, el análisis económico reveló que, a pesar de obtener una utilidad operativa positiva, la tasa de retorno del capital invertido se mantiene en 20 años, por debajo del umbral deseado para proyectos industriales de este tipo. Por tanto, aunque el proceso es técnicamente factible y marginalmente rentable, su implementación a escala industrial requeriría optimizaciones adicionales en la estructura de costos o el apoyo de incentivos económicos para mejorar su competitividad.

Bibliografía

- Baek, S. H., Seo, W. W., Kim, T. H., & Kang, J. W. (2024). Binary Isobaric Vapor–Liquid Equilibrium for Methyl Benzoate with Benzyl Alcohol and Benzaldehyde. *Revista International Journal of Thermophysics*, 45(10), 1-12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10765-024-03441-0>
- Góngora, C. C., Martínez, S. G., Várguez, A., López, G. (2018). El cultivo de *Jatropha curcas* L. en el Sureste de México. https://www.researchgate.net/publication/328381285_El_cultivo_de_Jatropha_curcas_Len_el_Sureste_de_Mexico
- Lombana Coy, J. & Vega Jurado, J. (2016). *Análisis del sector biodiesel en Colombia y su cadena de suministro*. Universidad del Norte. <https://elibro.net/es/lc/biblioteca/titulos/69975>
- Nuttaya. (2018). *Jatropha is a plant that provides seed oil and is currently extracted*. iStock. <https://www.istockphoto.com/es/foto/jatropha-curcas-gm914078536-251600490>
- Okullo A., Tibasiima N., (2017). Process simulation of biodiesel production from Jatrofa Curcas seed oil. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(4), 56-63. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170504.12>

- OECD. (2023). *Hacia la Resiliencia y Neutralidad Climática en América Latina y el Caribe Prioridades políticas clave: Prioridades políticas clave*. OECD Publishing.
https://books.google.com.mx/books?id=89_eEAAQBAJ&newbks=1&newbks_redir=0&dq=biocombustibles&hl=es&source=gbns_navlinks
- Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. D. R., & Gallardo-Rivas, N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-888X2022000100311&script=sci_arttext
- SAGARPA. (2017). *BIOENERGETICOS HIGUERILLA, JATROPHA CURCAS, SORGO DULCE MEXICANOS*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257070/Potencial-Bioenerg_ticos.pdf
- Serouti A., Korichi M, Mya O. B. (2021) Characterization and fatty acid profile analysis of jatropha curcas L. oil cultivated in the Algerian desert. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2023), 12205-12212. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02013-8>
- Soto, I., Mathijs, E., Solano, D., & Muys, B. Capítulo 4: El cultivo de Jatropha curcas para la producción de bioenergía en comunidades rurales de México y Mali. *Investigación agraria para un desarrollo sostenible: análisis*, 93.
- Xu, H., Ou, L., Li, Y., Hawkins, T. R., & Wang, M. (2022). Life cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel production in the United States. *Environmental Science & Technology*, 56(12), 7512-7521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00289>

Evaluación preliminar del hongo ligninolítico *Trametes versicolor* inmovilizado en biomedio para el tratamiento de vinazas tequileras

Anderson A. Ramírez-Ramírez, Allan Tejeda, Arturo Montoya, Florentina Zurita *

Centro de Investigación en Calidad Ambiental. Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara. Ocotlán, Jalisco, México

* Autor de correspondencia: florentina.zurita@academicos.udg.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 21 de abril de 2025 Aceptado: 4 de junio de 2025 Publicado: 21 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.443>

Resumen: Durante la producción de tequila se generan grandes cantidades de residuos líquidos denominados vinazas, cuyos volúmenes son cada vez mayores debido a la tendencia de crecimiento de la industria tequilera. Este estudio plantea el tratamiento de tales residuos mediante el uso del hongo ligninolítico *Trametes versicolor* inoculado en biomedio. Se hizo un experimento a escala laboratorio que consistió en inocular el hongo en la biomedio en matraces de 2 L, además de incluir controles biológicos (matraces con vinazas y biomedio sin hongos). Los tratamientos se hicieron por triplicado y el volumen de vinazas a tratar fue de 1 L. Se analizaron parámetros como la DQO, la DBO₅, el color verdadero y aparente entre otros, para determinar si el hongo era capaz de eliminar parte de la carga contaminante. Se encontró que el hongo fue capaz de eliminar los parámetros considerados como contaminantes, debido a que probablemente uso su maquinaria enzimática. Sin embargo, los porcentajes de remoción fueron considerablemente bajos, lo que da la pauta para seguir investigando y probando nuevos procesos que pudieran mejorar tales remociones.

Palabras clave: materia orgánica; enzimas oxidativas; color verdadero, color aparente

Introducción

El agua es un recurso limitado cuyos usos consuntivos son el doméstico, industrial y agrícola. Como resultado de tales usos se generan las aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales y escorrentías agrícolas. Las primeras se generan en los núcleos poblacionales, mientras que las industriales, proceden de cualquier actividad comercial o industrial y con frecuencia contienen sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, ya sea por su naturaleza química o por sus concentraciones elevadas (Rodríguez-Fernández-Alba *et al.*, 2017). En México, específicamente, en el estado de Jalisco, existe una gran generación de aguas residuales durante la elaboración del tequila, conocidas como vinazas. Las vinazas son el residuo líquido que queda en los alambiques después de la destilación del jugo de agave fermentado. De acuerdo con diferentes estudios, por cada litro de tequila producido se generan entre 10 y 15 L de vinazas (Valencia-Botín *et al.*, 2024). Las vinazas poseen características fisicoquímicas muy particulares como un alto contenido de materia orgánica, de sólidos tanto suspendidos como disueltos, un color marrón muy intenso producto de compuestos denominados melanoidinas, así como un pH ácido de aproximadamente 3.4 a 4.5 unidades (Tejeda *et al.*, 2023). Debido a la complejidad y diversidad de los contaminantes presentes en las vinazas y sus concentraciones, muchas veces no se les da tratamiento antes de disponerlas en el ambiente. Se sabe de manera general que sólo las grandes y medianas empresas tienen sistemas de tratamiento bien definidos, que si bien son relativamente efectivos, también son costosos tanto en mantenimiento como en operación. De esta manera, las pequeñas y microtequileras solo tienen como opción el acondicionamiento de las vinazas, que consiste en neutralizar el pH y permitir su enfriamiento pues se generan con una temperatura de aproximadamente 90 °C (Zurita *et al.*, 2022).

Ante este panorama, las tecnologías basadas en la naturaleza surgen como una opción a los sistemas convencionales de tratamiento, en especial para las micro y pequeñas empresas ya que suelen ser de un menor costo de operación, así como tener una interacción más amigable con el ambiente. Como ejemplo de estas tecnologías, se tiene a la micorremediación, que tiene como finalidad la remoción de contaminantes mediante el uso de algún tipo de hongo. De acuerdo con lo anterior, este artículo describe una evaluación preliminar de eliminación de la carga contaminante de las vinazas tequileras mediante la actividad enzimática del hongo ligninolítico *Trametes versicolor*, inoculado en biomedio con el propósito de robustecer su resistencia a las vinazas.

Desarrollo

Planteamiento experimental

La investigación se realizó a nivel laboratorio en el Centro de Investigación en Calidad Ambiental del Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara. El estudio consistió en el tratamiento de 1 L de vinazas en matraces Erlenmeyer de 2 L que contenían biomedias o bioportadores inoculados con el hongo ligninolítico *Trametes versicolor*; además, se incluyeron controles biológicos (matraces con vinazas y biomedias sin hongos) (Figura 1). Primeramente, se realizó la inoculación y producción del hongo. Para ello, en condiciones de esterilidad, se sembró el hongo en medio GMY (glucosa-malta y extracto de levadura) y con los bioportadores. Posteriormente, los matraces se sometieron a agitación orbital a 120 RPM durante 8 días; periodo durante el cual, el hongo se desarrolló tanto dentro como fuera de la biomedias (Figura 1 (a)). Cabe destacar que la biomedias posee un área superficial de $420 \text{ m}^2/\text{m}^3$, lo que la hace ideal para que el hongo pueda colonizarla.

Las vinazas que se utilizaron en la investigación, se sometieron a un proceso de sedimentación previo con el propósito de disminuir la carga de sólidos. La vinaza utilizada se diluyó con agua destilada (V/V), iniciando con un 30% (30/70) hasta llegar al 100% de vinaza, con el propósito de permitir la adaptación del hongo a las mismas. Además, para cada tratamiento, el pH de las vinazas se ajustó con NaOH grado reactivo de valores promedio de 3.74 a 4.52 unidades, para que la vinaza estuviera en valores óptimos para los hongos ligninolíticos. Con el mismo propósito de que los hongos se adaptaran a las vinazas, se inició con un tiempo de retención de 10 días para la concentración del 30%. Posteriormente, el tiempo de retención fue de 5 días para las distintas concentraciones. Cabe mencionar que los experimentos se hicieron en batch, drenando cuidadosamente la vinaza después de la exposición de los hongos a cada concentración de vinaza y conservando los hongos para la siguiente concentración de vinaza. Los contaminantes que se evaluaron para cada vinaza diluida, antes y después de cada tiempo de retención, fueron la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), pH, así como el color verdadero y el color aparente. Además, para confirmar la viabilidad de los hongos durante la experimentación, al final de la misma, se hizo una prueba de fluorescencia con FDA (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2024); el FDA se hidroliza intracelularmente cuando las células están activas, produciendo fluorescencia (Figura 1 (d)). Como análisis estadístico se hicieron análisis de varianza para determinar si existía alguna diferencia entre tratamientos. Para esto se utilizó el software Statgraphics Centurion 19 con un nivel de significancia de 0.05 ($\alpha=0.05$).

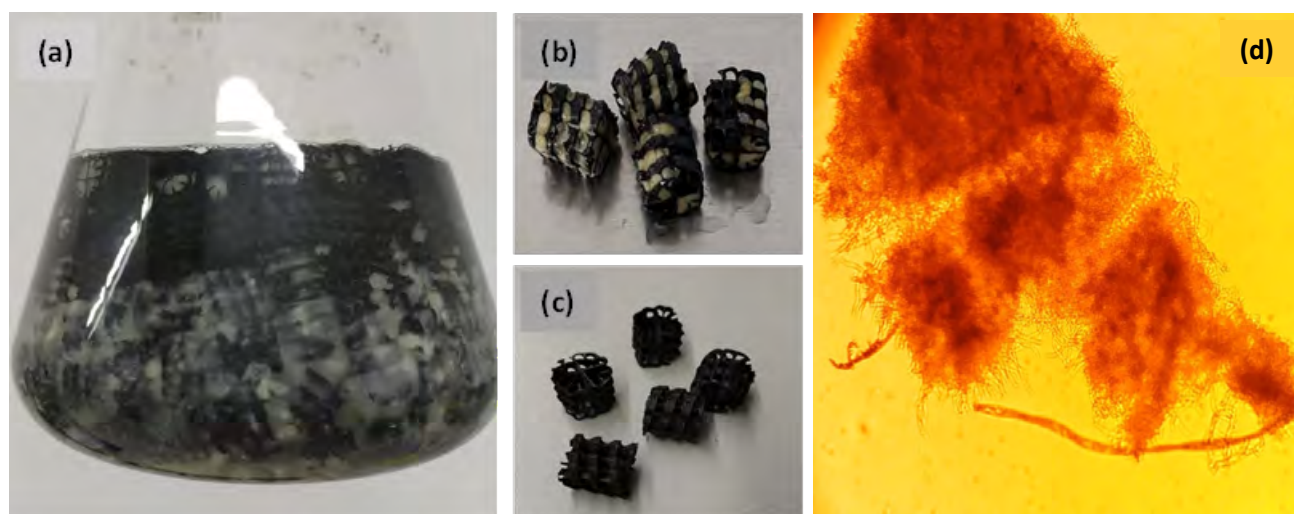


Figura 1. Inmovilización del hongo ligninolítico *Trametes versicolor* y prueba de fluorescencia. (a) Patrón de crecimiento, tanto dentro como fuera de la biomedias, (b) inmovilización del hongo, (c) Biomedias sin hongo inoculado, (d) fluorescencia con FDA

Resultados

En lo referente al pH, este fue el único parámetro que estadísticamente presentó diferencias significativas ($p<0.05$), aunque solamente para las diluciones del 30 y 50%. En cuanto a su comportamiento, se observa en la Figura 2 que

siempre presentó valores típicos de las vinazas tequileras, variando aproximadamente entre 3.7 y 4.8 unidades. También se observa que los valores en el control biológico siempre fueron mayores a los del hongo y que mantuvieron cierta homogeneidad a lo largo de la experimentación. En lo que respecta a los valores con el hongo, aunque también hay cierta homogeneidad, se observa una ligera tendencia de incremento entre las concentraciones del 50 y el 70%. Los mayores valores de pH en el control indican que este parámetro se incrementó durante la experimentación, lo cual permite pensar que la biomedio tuvo un efecto en este incremento; probablemente, los bioportadores constituyeron un medio que pudieron colonizar los microorganismos presentes en las vinazas. Sobre esto último, se ha demostrado en estudios como el de Cassman *et al.* (2018), la presencia de una gran diversidad de microorganismos presentes en las vinazas, principalmente bacterias. Por otro lado es sabido que la rugosidad constituye una de las características que afectan la colonización por parte de los microorganismos, siendo aquellas superficies más rugosas las más aptas para ser colonizadas por su mayor área superficial, tal como sucede con la biomedio (Behbahani *et al.*, 2022). Además de esto, la hidrofobicidad superficial también es importante en el aspecto de la colonización. Algunos estudios han demostrado que los microorganismos se adhieren más rápido a superficies hidrofóbicas no polares, tales como los plásticos o el teflón, que a superficies hidrofílicas como los metales o el vidrio (Behbahani *et al.*, 2022; Donlan, 2002; Nurioglu *et al.*, 2015). Adicionalmente, el incremento de pH en el control biológico probablemente se debió a un proceso de reducción de sulfatos, el cual a grandes rasgos se lleva a cabo en presencia de materia orgánica, abundante en las vinazas, liberando alcalinidad por bicarbonatos. Al respecto, y tomando en cuenta la diversidad de bacterias que pueden estar presentes en las vinazas, se han encontrado en ellas bacterias capaces de reducir sulfatos, tales como el género *Prevotella* (Cassman *et al.*, 2018). Además, existen estudios como el de Elliott *et al.* (1998) quienes refuerzan esta posibilidad al haber encontrado que bacterias sulfato reductoras fueron capaces de reducir el sulfato y producir alcalinidad con valores de pH tan bajos como 3.25 unidades e incrementándolo hasta 5.82. Si bien este último estudio se hizo con drenaje ácido de minas, las vinazas y dichos residuos comparten similitudes como un pH bastante ácido y abundante presencia de sulfatos, además de que han sido utilizados en estudios de manera conjunta y complementaria (Watanabe-Nogueira *et al.*, 2021).

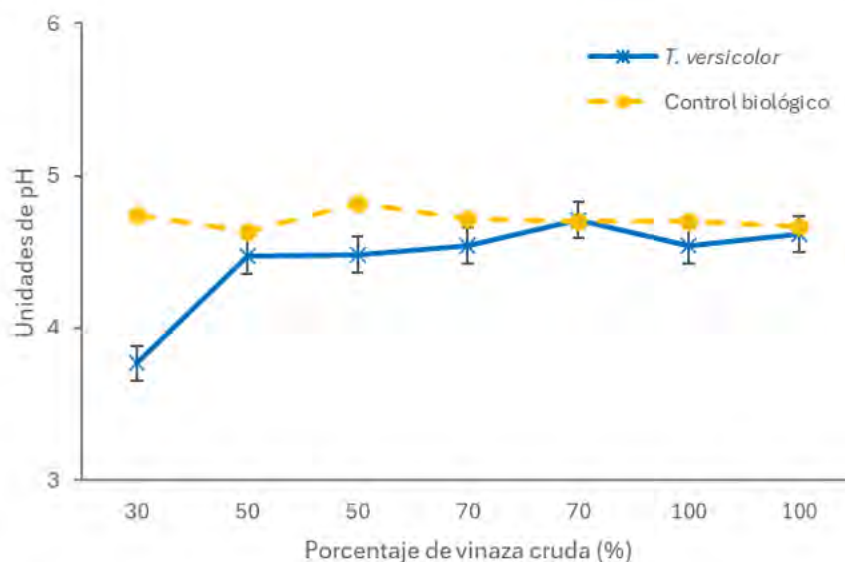


Figura 2. Comportamiento del pH a lo largo del tratamiento de las vinazas tequileras con el hongo *Trametes versicolor*

En cuanto a la materia orgánica representada por la DQO y la DBO₅, estadísticamente no hubo diferencia significativa entre los tratamientos ($p > 0.05$). Respecto a los resultados, en la Figura 3 se observan que con el 30% ambos parámetros registraron valores mayores en el tratamiento con hongo, mientras que a partir del 50%, siempre se observó una reducción de la materia orgánica con respecto al control. Probablemente, el incremento observado en el 30% se debió a un deslave del hongo en su proceso de adaptación a la vinaza y en cuanto al segundo se puede explicar por la actividad biológica del hongo, el cual para poder sobrevivir es probable que haya hecho uso de su maquinaria enzimática para con ello degradar los compuestos orgánicos y poderse alimentar. Esto último es un hecho bien definido, pues diversas investigaciones (Arora & Sharma, 2009; Civzele *et al.*, 2023; Novotny *et al.*, 2004; Solarska *et al.*, 2009) han evidenciado

que los hongos ligninolíticos con capaces de degradar la materia orgánica mediante enzimas oxidativas no específicas como la lacasa, manganoso peroxidasa, lignino peroxidasa, etc. En esta investigación para demostrar tal proceso enzimático, se utilizó el control biológico en el cual no se realizó la inoculación de hongos, para así evidenciar que cualquier modificación de los parámetros analizados se debía a la actividad biológica de estos organismos. Por otro lado, uno de los aspectos más importantes de esta investigación, es la evidente intención de eliminar la carga contaminante que poseen las vinazas tequileras, misma que es representada por los parámetros aquí analizados. Respecto a la materia orgánica, los problemas de contaminación que esta genera están bien documentados. Por ejemplo, en caso de que estos residuos sean descargados en un cuerpo de agua, esta genera la proliferación de microorganismos los cuales disminuyen la concentración de oxígeno disuelto en el agua, y afectando con ello a la flora y fauna. Por otro lado, en caso de su vertimiento en los suelos, se sabe que la materia orgánica puede descomponerse y con ello alterar los ciclos del nitrógeno y el carbono, emitiendo gases de efecto invernadero como el óxido nitroso o el metano, ello en condiciones de alta humedad (Moran-Salazar *et al.*, 2016; Ramírez-Ramírez *et al.*, 2024). Con base en lo anterior, se hace evidente la tendencia que tuvo el hongo inoculado en la biomedida, al ser capaz de eliminar la materia orgánica (aunque no alcanzó a ser significativa con respecto al control), no obstante, también debe mencionarse que los porcentajes promedio de remoción fueron muy bajos siendo estos del 13.4% y 9.34% para la DQO y DBO₅, respectivamente.

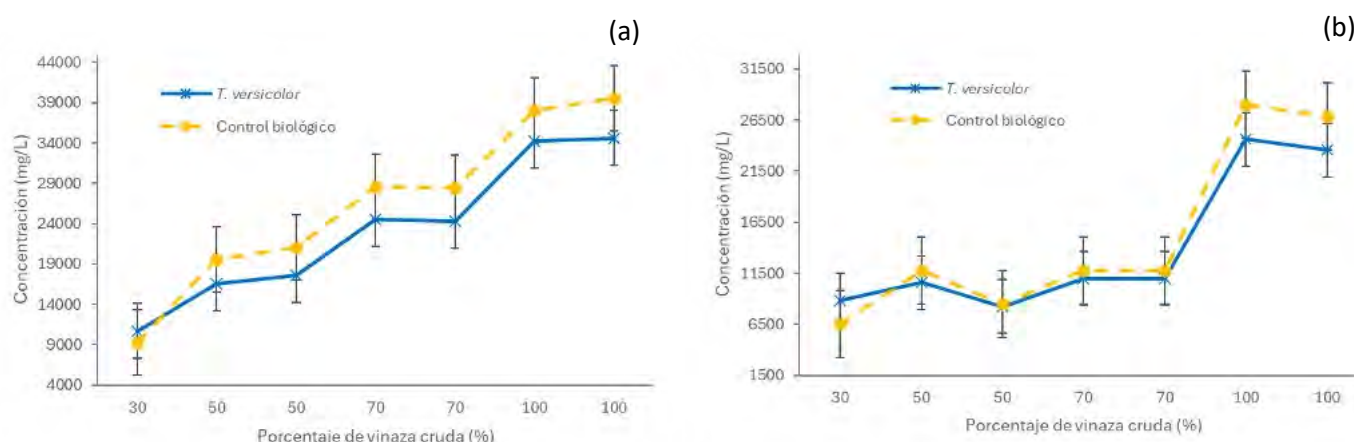


Figura 3. Comportamiento de la (a) DQO y la (b) DBO₅ a lo largo del tratamiento de las vinazas tequileras con el hongo *Trametes versicolor*

Respecto a los SDT y la CE, el comportamiento puede apreciarse en la Figura 4. Como era esperado, en ambas figuras se observa la clara tendencia de incremento conforme se aumentó la concentración de las vinazas, pasando de valores de 5,000 hasta casi 30,000 mg/L para el caso de los SDT y de aproximadamente 1,200 hasta los poco más de 7,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad. Además, se aprecia claramente que el tratamiento con el hongo siempre permitió que ambos parámetros disminuyeran en comparación con el control biológico, además de que los porcentajes de remoción fueron muy homogéneos independientemente de la concentración de la vinaza, lo que a su vez le confiere al hongo la propiedad de mantener un cierto nivel de remoción de estos parámetros. Por otro lado, estadísticamente no existió diferencia significativa entre tratamientos ($p > 0.05$) y nuevamente se observa una clara tendencia de remoción en los tratamientos con el hongo. En promedio, los porcentajes de remoción que se obtuvieron fueron de 19.81% y de 14.33%, para los SDT y la CE, respectivamente. Otros estudios sobre tratamiento de vinazas con hongos ligninolíticos han obtenido porcentajes de remoción muy similares. Por ejemplo, Kumar *et al.* (2008) en su estudio sobre biorremediación y decoloración de melazas con diferentes consorcios bacterianos y hongos, obtuvieron una remoción de SDT de 19.27% y 14% con las dos especies de hongos (ambos del género *Aspergillus*). Además, es importante hacer notar que las pruebas de biorremediación y decoloración se hicieron con melazas enriquecidas o suplementadas con compuestos benéficos para los hongos, como la glucosa o el fosfato monopotásico, lo que sin duda debió ayudar en la obtención de los porcentajes de remoción logrados. En el caso de nuestro estudio, como ya se comentó, sólo se ajustó el pH inicial de valores promedio de 3.74 a 4.52 unidades, lo que refuerza la importancia de este estudio al hacer uso de las vinazas totalmente crudas. En lo que respecta a la conductividad, Romanholo-Ferreira *et al.* (2011) hicieron un estudio en el que utilizaron hongos del género *Pleurotus* para biodegradar y decolorar vinazas. Encontraron que la CE disminuyó en un 18.07%, lo cual es similar al porcentaje logrado en este estudio.

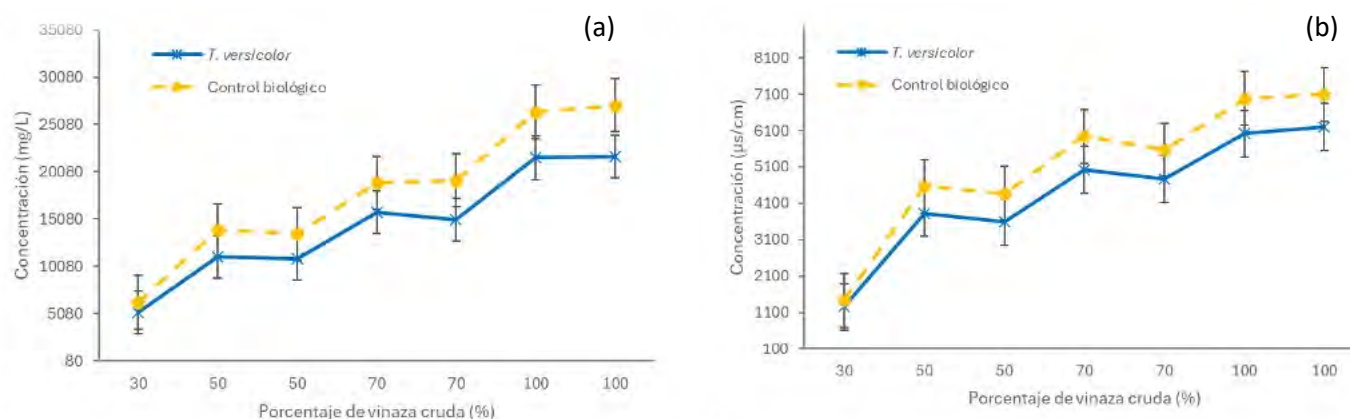


Figura 4. Comportamiento de los (a) SDT y la (b) CE a lo largo del tratamiento de las vinazas tequileras con el hongo *Trametes versicolor*

Finalmente, la reducción en el color aparente y verdadero tampoco fue significativa ($p>0.05$). En la Figura 5 se observa básicamente el mismo comportamiento que en los demás parámetros, es decir, un incremento en los dos parámetros conforme se incrementó la concentración de la vinaza. De igual manera se aprecia que en los tratamientos con el hongo siempre se registró una menor concentración del color aparente y verdadero. Esto era esperado considerando que el color está directamente relacionado con los sólidos disueltos y con la materia orgánica, por lo que al disminuir ambos lo mismo ocurre con el color. El color en las vinazas se debe a la presencia de melanoidinas (Ferreira, 2009; Romanholo-Ferreira *et al.*, 2011; Wadt, 2008) que son polímeros de alto peso molecular formados en la reacción de Maillard y compuestos fenólicos. Además, estas sustancias comúnmente son tóxicas para los microorganismos usados en procesos de tratamiento, tienen propiedades antioxidantes y son altamente recalcitrantes (Chandra *et al.*, 2008; Migo *et al.*, 1993; Mohana *et al.*, 2009; Naik *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2006; Romanholo-Ferreira *et al.*, 2011). En cuanto al impacto que el color tiene en el ambiente, las vinazas puede bloquear la penetración de la luz del sol en los cuerpos de agua, reduciendo así la fotosíntesis y con ello mermando la concentración de oxígeno disuelto, lo que afectaría a los organismos acuáticos (Kumar *et al.*, 2008). De ahí la importancia de que estos parámetros disminuyeran, lo cual ocurrió en un 22.46% para el aparente y en un 24.13% para el verdadero. Probablemente, la remoción de color en los tratamientos con el hongo se debió a procesos como la adsorción en el micelio (Ziaei-Rad *et al.*, 2020) así como a la actividad enzimática señalada en el apartado de la materia orgánica (Díaz *et al.*, 2022). Por último, cabe mencionar que el hongo permaneció viable durante la experimentación, pues la prueba de viabilidad con FDA resultó positiva al presentar la coloración verde característica de esta prueba (Fig. 1d).

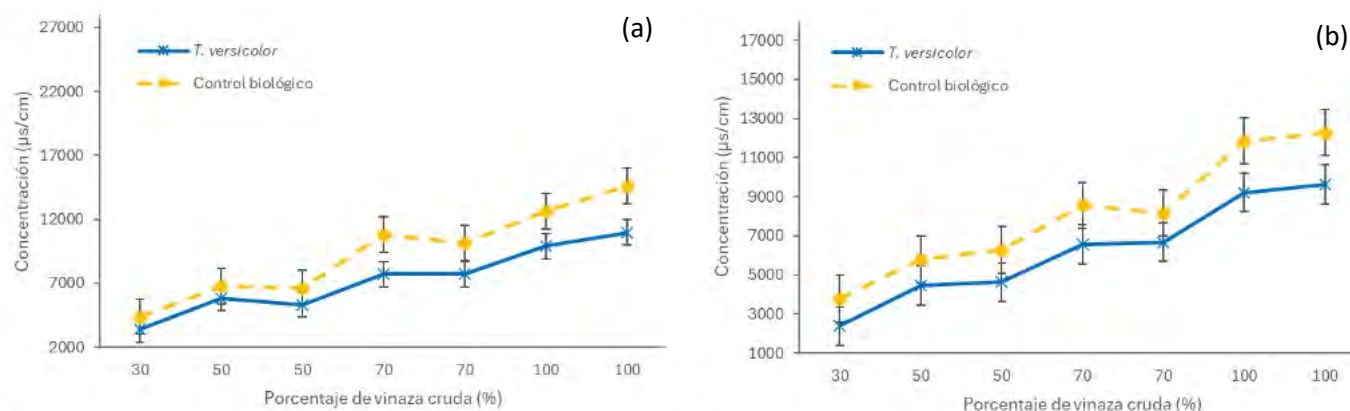


Figura 5. Comportamiento del (a) color aparente y (b) verdadero a lo largo del tratamiento de las vinazas tequileras con el hongo *Trametes versicolor*

Conclusiones

En esta evaluación preliminar cuyo objetivo fue evaluar si el hongo ligninolítico *Trametes versicolor* podría sobrevivir y reducir la carga contaminante de vinazas tequileras crudas, se evidenció la ya probada capacidad de estos microorganismos para tratar aguas industriales de difícil manejo como las vinazas tequileras. Una de las aportaciones más importantes del estudio, fue exponer al hongo a vinazas tequileras sin más acondicionamiento que el ajuste de pH y observar la tendencia de reducción de los contaminantes. Esto exhibe una de las ventajas de la micorremediación (a diferencia de sistemas con otro tipo de microorganismos); sin embargo, es claro que se requieren mayores estudios para continuar avanzando en esta línea de investigación, con la meta final de generar una tecnología alternativa para el tratamiento de las vinazas tequileras. Dichos estudios pueden incluir el aumento de los tiempos de retención y observar si con ello se logran mejores remociones de los parámetros.

Tendencias en el uso de los hongos ligninolíticos para el tratamiento de vinazas

En general, los procesos de biorremediación han tomado relevancia en las últimas décadas debido a sus ventajas como una mayor amigabilidad con el medio ambiente o su menor costo de operación. En el caso de los hongos ligninolíticos, cada vez se realizan más estudios en los que se demuestra su capacidad para tratar diferentes tipos de residuos generalmente complejos. Este estudio preliminar demuestra que los hongos ligninolíticos son capaces de resistir y reducir los contaminantes presentes en las vinazas tequileras, pero aún se requieren más estudios mediante los cuales se logre incrementar la remoción de los contaminantes. Entre los factores que pueden incrementar la remoción de los contaminantes se encuentran los tiempos de retención más largos y la aireación de los sistemas, entre otros.

Bibliografía

- Arora, D. S., & Sharma, K. R. (2009). Enhancement in in vitro digestibility of wheat straw obtained from different geographical regions during solid state fermentation by white rot fungi. *BioResources*, 4(3), 909-920.
- Behbahani, S. B., Kiridena, S. D., Wijayarathna, U. N., Taylor, C., Anker, J. N., & Tzeng, T. R. J. (2022). pH variation in medical implant biofilms: Causes, measurements, and its implications for antibiotic resistance. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1028560>
- Cassman, A. N., Lourenco, K. S., do Carmo, J. B., Cantarella, H., & Kuramae, E. E. (2018). Genome-resolved metagenomics of sugarcane vinasse bacteria. *Biotechnology for Biofuels*, 11(48), 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s13068-018-1036-9>
- Chandra, R., Bharagava, R. N., & Rai, V. (2008). Melanoidins as major colourant in sugarcane molasses based distillery effluent and its degradation. *Bioresour. Technol.*, 99, 4648-4660.
- Civzele, A., Stipniece-Jekimova, A. A., & Mezule, L. (2023). Fungal ligninolytic enzymes and their application in biomass lignin pretreatment. *Journal of Fungi*, 9(7), 780. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jof9070780>
- Díaz, A. I., Laca, A., & Díaz, M. (2022). Approach to a fungal treatment of a biologically treated landfill leachate. *Journal of Environmental Management*, 322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116085>
- Donlan, R. M. (2002). Biofilms: microbial life on surfaces. *Emerg. Infect. Dis.*, 8, 881-890. <https://doi.org/https://doi.org/10.3201/eid0809.020063>
- Elliott, P., Ragusa, S., & Catcheside, D. (1998). Growth of sulfate-reducing bacteria under acidic conditions in an upflow anaerobic bioreactor as a treatment system for acid mine drainage. *Wat. Res.*, 32(12), 3724-3730.
- Ferreira, L. F. R. (2009). *Fungi biodegradation of vinasse from industrial sugarcane processing* University of Sao Paulo-ESALQ].
- Kumar, M. A., Abdullah, S. S., Kumar, P. S., Dheeba, B., & Mathumitha, C. (2008). Comparative study on potentiality of bacteria and fungi in bioremediation and decolorization of molasses spent wash. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2(2), 393-400.
- Migo, V. P., Matsumura, M., Del Rosario, E. J., & Kataoka, H. (1993). Decolourization of molasses waste water using an inorganic flocculent. *J. Ferment. Bioeng.*, 75, 438-442.
- Mohana, S., Acharya, B. K., & Madamwar, D. (2009). Distillery spent wash: treatment technologies and potential applications. *Journal of Hazardous Materials*, 163(1), 12-25.
- Moran-Salazar, R. G., Sánchez-Lizárraga, A. L., Rodríguez-Campos, J., Dávila-Vázquez, G., Marino-Marmolejo, E. N., Dendooven, L., & Contreras-Ramos, S. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. *Springer Plus*, 5(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3>
- Naik, N. M., Jagadeesh, K. S., & Alagawadi, A. R. (2008). Microbial decolorization of spentwash: a review. *Indian J. Microbiol.*, 48, 41-48.
- Novotny, C., Svobodova, K., Erbanova, P., Cajthaml, T., Kasinath, A., Lang, E., & Sasek, V. (2004). Ligninolytic fungi in bioremediation: extracellular enzyme production and degradation rate. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 1545-1551.
- Nurioglu, A. G., Catarina, A., & Esteves, C. (2015). Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications. *J. Mater. Chem.*, 3, 6547-6570. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C5TB00232J>
- Pérez, S. R., Savón, R. C., Díaz, M. S., & Kourouma, A. (2006). Selección de cepas de *Pleurotus ostreatus* para la decoloración de efluentes industriales. *Rev. Mex. Micol.*, 23, 9-15.
- Ramírez-Ramírez, A. A., Lozano-Álvarez, J. A., Gutiérrez-Lomelí, M., & Zurita, F. (2024). Tequila vinasse treatment in two types of vertical downflow treatment wetlands (with emergent vegetation and ligninolytic fungi). *Water*, 16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w16131778>
- Rodríguez-Fernández-Alba, A., Letón-García, P., Rosal-García, R., Dorado-Valiño, M., Villar-Fernández, S., & Sanz-García, J. M. (2017). Tratamiento Avanzados de aguas residuales industriales. In U. d. A. d. C. d. I. e. T. M. y. E. (CITME) (Ed.), (pp. 136). Madrid.

- Romanholo-Ferreira, L. F., Aguiar, M. M., Messias, T. G., Pompeu, G. B., Queijeiro-López, A. M., Silva, D. P., & Monteiro, R. T. (2011). Evaluation of sugar-cane vinasse treated with *Pleurotus sajor-caju* utilizing aquatic organisms as toxicological indicators. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74, 132-137. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.042>
- Solarska, S., May, T., Roddick, F. A., & Lawrie, A. C. (2009). Isolation and screening of natural organic matter-degrading fungi. *Chemosphere*, 75(6), 751-758. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.030>
- Tejeda, A., Montoya, A., Sulbarán-Rangel, B., & Zurita, F. (2023). Possible Pollution of surface water bodies with tequila vinasses. *Water*, 15(21), 3773. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15213773>
- Valencia-Botín, A. J., Chávez-Díaz, I. F., Zurita-Martínez, F., Tejeda-Ortega, A., & Zelaya-Molina, L. X. (2024). Plant growth-promoting and tequila vinasse-resistant bacterial strains. *Microbiology Research*, 15(3), 1144-1162. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/microbiolres15030077>
- Wadt, L. C. (2008). *Cultivo de Pleurotus spp. Em vinhaca visando a producao de biomassa e exopolissacarideos* University of Sao Paulo- CENA].
- Watanabe-Nogueira, E., Gouvea de Godoi, L. A., Marques-Yabuki, L. N., Brucha, G., & Zamariolli-Damianovic, M.-H. R. (2021). Sulfate and metal removal from acid mine drainage using sugarcane vinasse as electron donor: Performance and microbial community of the down.flow structured-bed bioreactor. *Bioresource Technology*, 330, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124968>
- Ziaei-Rad, Z., Nickpour, M., Adl, M., & Pazouki, M. (2020). Bioadsorption and enzymatic biodecolorization of effluents from ethanol production plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101555>
- Zurita, F., Tejeda, A., Montoya, A., Carrillo, I., Sulbarán-Rangel, B., & Carreón-Álvarez, A. (2022). Generation of Tequila Vinasses, characterization, current disposal practices and study cases of disposal methods. *Water Air and Soil Pollution*, 14(1395), 1-16.

Subproductos del café (*Coffea*): desafíos ambientales y oportunidades para la bioeconomía

Luis Antonio López-Escobar ¹, Daniel Simón Olivo-Alanís ² y Noemi Nava-Valente ^{2,*}

¹ Laboratorio de Investigación Aplicada en Bioprocesos Sustentables, Universidad Politécnica de Huatusco, Huatusco, Veracruz, México.

² Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., Unidad Noreste, Apodaca, Nuevo León, México.

* Autor de correspondencia: nnava@ciatej.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 11 de abril de 2025 Aceptado: 4 de junio de 2025 Publicado: 23 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.422>

Resumen: El café es una de las bebidas más consumidas en el mundo, con gran relevancia económica y social para países productores como México. Sin embargo, su producción genera grandes cantidades de residuos, especialmente durante el beneficio húmedo, como la pulpa, cáscara, mucílago y aguas residuales. Estos subproductos (residuos aprovechables), al no ser manejados adecuadamente, representan una fuente significativa de contaminación para suelos y cuerpos de agua. Este análisis aborda la necesidad de incorporar el enfoque de economía circular en la caficultura mediante la valorización de estos residuos. Gracias a su composición química, pueden ser transformados en productos de alto valor agregado como bioenergéticos, bioplásticos y biofertilizantes a través de tecnologías biotecnológicas. Se destacan experiencias exitosas y la importancia de implementar políticas públicas que impulsen el aprovechamiento sostenible de estos subproductos, contribuyendo así a la mitigación ambiental y al fortalecimiento de una bioeconomía local.

Palabras clave: café, subproductos agroindustriales, economía circular, valorización de residuos.

Introducción

El café (*Coffea*) es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial, con más de dos mil millones de tazas ingeridas diariamente (SADER, 2025). Su consumo se ha asociado con diversos beneficios para la salud, como la reducción del riesgo de diabetes tipo 2, enfermedades hepáticas y neurodegenerativas (Kolb *et al.*, 2020). Además de sus propiedades estimulantes que ayudan a contrarrestar la somnolencia, mejorar el estado de ánimo e incluso aumentar la productividad, la amplia variedad de presentaciones y sabores ha consolidado su lugar en la preferencia de los consumidores. Este impacto en la salud y su atractivo sensorial han contribuido a que el café adquiera el estatus de una de las bebidas más populares en el mundo. Sin embargo, su popularidad lleva a una interrogante clave: ¿cuánto café se necesita producir para satisfacer esta demanda global? De acuerdo con el reporte Coffee: World Markets and Trade del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en el ciclo 2022/2023 la producción mundial alcanzó aproximadamente 170 millones de sacos de 60 kilogramos (Barrera *et al.*, 2023).

México es uno de los principales productores de café en el mundo con aproximadamente 710,361 hectáreas sembradas, concentrándose principalmente en los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero e Hidalgo, favorecido por su topografía, clima y suelos propicios. La caficultura nacional representa el 0.66 % del PIB agrícola y el 1.34 % de la producción agroindustrial, empleando a más de 500 mil productores en 15 estados y 480 municipios (SADER, 2025). Esta magnitud de producción conlleva también un impacto



Figura 1. Cosecha tradicional de café en zonas de producción mexicana.

ambiental significativo, particularmente en lo que respecta a los subproductos generados durante su procesamiento, en términos de descarga de aguas mieles a cuerpos receptores de agua o lixiviados de pulpa de café, que dañan los suelos, por citar algunos ejemplos. Ante estos desafíos, el aprovechamiento de los subproductos emerge como una estrategia clave para mejorar la sostenibilidad de la industria y agregar valor a la cadena productiva.

El presente artículo destaca la necesidad de integrar el modelo de la economía en las cadenas de valor de la caficultura mundial, pero sobre todo en México, a través de la transformación de subproductos del café en bioproductos como los bioplásticos, biocombustibles y biofertilizantes mediante procesos biotecnológicos, aunado a la necesidad de diseñar e implementar políticas públicas que garanticen la competitividad de este sector, no solo fomentando el desarrollo económico, sino el ambiental y el social.

Desarrollo

Generación de subproductos y retos ambientales en el beneficiado del café

El procesamiento del café (beneficiado), consiste en separar el grano de las otras cuatro capas del fruto (Figura 2). Este proceso puede realizarse por tres métodos: seco, semi seco y húmedo, su principal diferencia radica en el número de etapas involucradas y la calidad del producto final. Dependiendo del método de beneficiado la cáscara, pulpa, mucílago y grandes volúmenes de aguas residuales forman parte de los subproductos resultantes. En muchos casos, estos residuos son descartados sin un tratamiento adecuado, lo que puede llevar a la contaminación de suelos y cuerpos de agua y proliferación de especies invasoras (Campos *et al.*, 2021).



Figura 2. Estructura del fruto del café: muestra las capas que lo componen hasta llegar al grano.

Las características físicas y químicas de los residuos sólidos, como la pulpa de café seca o fresca, pueden llegar a contaminar embalses cercanos, ya que provocan un aumento de la demanda bioquímica de oxígeno, disminución del pH y la presencia de sólidos en suspensión que limitan la penetración de la luz solar y afectan la calidad del agua. En el suelo, los fenoles y polifenoles constituyentes de la pulpa representan sustancias tóxicas para muchas especies de artrópodos y microorganismos, además de afectar las poblaciones de la microflora edáfica.

Por otra parte, los volúmenes de aguas residuales generadas durante el beneficiado húmedo presentan una alta carga orgánica y contienen taninos, alcaloides (cafeína), polifenoles, pectina, proteínas y azúcares, con un pH ácido (alrededor de 3.5). Cuando estas aguas son liberadas en cuerpos de agua receptivos, generan zonas anóxicas debido a su estabilización anaerobia, lo que da lugar a la producción de metano, fenoles y ácido sulfhídrico, compuestos que emiten olores desagradables. Además, el enriquecimiento nutricional de estas aguas puede propiciar el desarrollo de especies invasoras como eneas, jacintos de agua, agua salada y diversas algas, lo que representa una amenaza para la biodiversidad local (Campos *et al.*, 2021).

Si bien los impactos más evidentes por la inadecuada gestión de estos residuos se observan en cuerpos de agua y suelos, también pueden ocasionar atracción de vectores, malos olores y afectar el paisajismo propio de las zonas cafetaleras. En adición, el cambio climático está afectando la producción de café con sequías, lluvias intensas y temperaturas extremas, lo que reduce la calidad del grano y eleva los costos de producción (Jaramillo-Villanueva *et al.*, 2022).

Aprovechamiento y valorización de subproductos

Bajo estas circunstancias, la valorización de los subproductos del café se presenta como una alternativa clave para mejorar la sostenibilidad de la industria.

Cáscara de café (pulpa de café seca)

Es el principal subproducto del método seco y está formada por capas de piel seca, pulpa, mucílago y pergamino, se genera cuando la cereza de café se seca entre 12%-18%. La cáscara de café es rica en taninos, cafeína, pectina, polifenoles y carbohidratos. Sus usos y aprovechamiento han sido exitosos como fertilizante, composta, precursores de compuestos poliméricos, producción de materiales cerámicos, carbón activado, empaques de comida, aditivos y formulación de alimentos, así como combustible sólido.

Pulpa de café

Representa el 35% del fruto del café y, se genera en el beneficio húmedo durante el proceso de descascarillado, produciendo aproximadamente 0.5 toneladas por tonelada de café fresco (Figura 3). Este subproducto exhibe un contenido significativo de compuestos químicos, como ácidos fenólicos, con aplicaciones en industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas (Nava-Valente *et al.*, 2021). Aunque se ha estudiado extensamente la extracción de estos compuestos, la pulpa también contiene carbohidratos, minerales y proteínas, explorándose su potencial como alimento animal y su utilidad en la germinación de semillas y el crecimiento de plantas, sin embargo, la presencia de compuestos como cafeína, ácido clorogénico y taninos limita su aplicación en estos campos (Corrêa *et al.*, 2021). Además, la pulpa de café se ha empleado como sustrato para el cultivo de hongos y como recurso biomásicos para la producción (compuestos bioactivos) y biogás (Iriondo-DeHond *et al.*, 2020).



Figura 3. Pulpa generada tras el despulpado del café.

Mucílago

El mucílago de café se genera en el beneficiado húmedo de café, el cual es una capa interna, pegajosa y fuertemente adherida al grano y que es retirado en el proceso de fermentación para obtener un grano verde más limpio antes del proceso de descascarado. El mucílago contiene concentraciones significativas de celulosa, pectina y polisacáridos, características que lo hacen un subproducto potencial para la fabricación de bioplásticos y mejorar las características de los envases de alimentos. Debido al rico contenido en azúcares que pueden transformarse en alcohol o energía mediante procesos biológicos, el contenido de azúcares fermentables en el mucílago de café, este ha sido empleado como materia prima para la producción de etanol (Hernández-Varela *et al.*, 2023).

Aguas residuales

Durante diversas etapas de la producción postcosecha del café por el método húmedo, se utiliza un gran volumen de agua y, se estima que se producen entre 40-45 L de aguas residuales por kilogramos de café verde durante el despulpado y lavado. Las principales características químicas de las aguas generadas es el elevado contenido de material orgánico, destacando taninos, alcaloides (cafeína), polifenoles, pectina, proteínas y azúcares. Actualmente una de las principales barreras para la valorización de este tipo de aguas radica en el/los tipo(s) de tratamiento necesarios para reducir la concentración de materia orgánica, resultando muchas veces de elevado costo y poco eficientes dado las elevadas cargas orgánicas presentes en las aguas. Es por esto por lo que los efluentes provenientes del beneficiado húmedo de café son efluentes potenciales para la generación de bioenergía y extracción de compuestos secundarios presentes en ellas (Alemayehu *et al.*, 2020).

Políticas públicas

Las políticas públicas representan un eje central para la revalorización de los residuos generados durante el beneficiado húmedo de café, a través del aprovechamiento bajo un enfoque de economía circular, es decir, se fomenta el reúso de

estos subproductos. Como ejemplos de políticas públicas, surgen propuestas que establezcan marcos normativos que establezcan incentivos para investigación y desarrollo de tecnologías que transformen los residuos en biofertilizantes, biocombustibles o materiales biodegradables, además, es clave, promover la generación de capital humano especializado, así como de capacitación de productores en términos de prácticas sostenibles que fortalezcan la infraestructura y recursos naturales presentes en la zonas cafetaleras, coadyuvando apago por servicios ambientales, como abastecimiento de agua, leña, entre otros. La colaboración entre los sectores público, privado y académicos garantizaría una transición efectiva hacia un modelo más sostenible, que, a su vez, promoverá la participación activa de la ciudadanía, a través de iniciativas de ciencia ciudadana y educación ambiental, fortaleciendo la vigilancia del entorno, fomentando el uso responsable de los recursos y promoviendo el consumo informado. Una caficultura circular no solo es posible, sino necesaria, y su construcción es una tarea compartida.

Perspectivas y tendencias

El futuro de la caficultura no depende únicamente de mejorar la productividad del grano, sino de transformar la manera en que entendemos y manejamos sus residuos. Los subproductos del café, tradicionalmente considerados desechos, son en realidad recursos con un enorme potencial para generar valor económico, social y ambiental. Desde el papel del consumidor —optando por productos elaborados con insumos reciclados o biobasados— hasta el del emprendedor o investigador que busca nuevas aplicaciones para estos residuos, todos podemos contribuir a una caficultura más sustentable. La valorización de estos materiales no solo ofrece soluciones ecológicas, sino que también puede abrir nuevas cadenas productivas, generar empleo local e impulsar la innovación tecnológica en comunidades rurales.

Desafíos ambientales

Los desafíos ambientales a los que se enfrenta la gestión integral de los residuos del beneficiado húmedo del café, a través de la transformación para su aprovechamiento y revalorización, están orientados al tratamiento de los efluentes con elevadas cargas orgánicas que destruyen toda clase de vida acuática en cuerpos de agua y los lixiviados de pulpa de café que permean los suelos y transforman su composición química y con ello su fertilidad, además crear conciencia junto con la educación de los productores son necesarios para una exhibición detentada que incluye la economía circular que minimice la intervención ambiental en la caficultura.

Conclusiones

La producción de café, aunque de gran relevancia económica y social, implica también importantes desafíos ambientales debido a la generación masiva de subproductos como la cáscara, pulpa, mucílago y aguas residuales. Estos residuos, al ser desechados sin tratamiento adecuado, afectan negativamente a cuerpos de agua, suelos y biodiversidad local. Sin embargo, su revalorización mediante procesos biotecnológicos ofrece una vía efectiva para transformar un problema ambiental en una oportunidad productiva.

El aprovechamiento de estos subproductos para la obtención de biofertilizantes, bioplásticos, bioenergía y compuestos de valor añadido no solo contribuye a reducir la contaminación, sino que también abre nuevas posibilidades económicas y de innovación tecnológica para las comunidades cafetaleras. En este contexto, integrar modelos de economía circular resulta clave para aumentar la resiliencia del sector frente al cambio climático y la presión sobre los recursos naturales.

Asimismo, la promoción de políticas públicas orientadas al financiamiento, regulación y acompañamiento técnico de proyectos sustentables puede acelerar esta transición. Del mismo modo, fortalecer la participación social mediante ciencia ciudadana y educación ambiental resulta esencial para construir una caficultura más sostenible, participativa y equitativa.

Bibliografía

Alemayehu, Y.A., Asfaw, S. L., Tirfie, T.A. (2020). Management options for coffee processing wastewater. A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 454-469. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00953-y>

- Barrea, L., Pugliese, G., Frias-Toral, E., El Ghoch, M., Castellucci, B., Chapela, S. P., Muscogiuri, G. (2023). Coffee consumption, health benefits and side effects: a narrative review and update for dietitians and nutritionists. *Critical reviews in food science and nutrition*, 63(9), 1238-1261. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1963207>
- Campos, R. C., Pinto, V. R. A., Melo, L. F., da Rocha, S. J. S. S., Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. *Future Foods*, 4, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- Corrêa, C.L.O., Penha, E.M., Freitas-Silva, O., Luna, A. S., Gottschalk, L. M. F. (2021). Enzymatic Technology Application on Coffee Co-products: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 3521–3540. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01208-w>
- Hernández-Varela, J.D., Medina, D.I. (2023). Revalorization of coffee residues: advances in the development of eco-friendly biobased potential food packaging. *Polymers*, 15(13), 2823. <https://doi.org/10.3390/polym15132823>
- Iriondo-DeHond, A., Iriondo-DeHond, M., Del Castillo, M.D. (2020). Applications of compounds from coffee processing by-products. *Biomolecules*, 10(9), 1219. <https://doi.org/10.3390/biom10091219>
- Jaramillo-Villanueva, J. L., Guerrero-Carrera, J., Vargas-López, S., & Bustamante-González, Á. (2022). Perception and adaptation of coffee producers to climate change in Puebla and Oaxaca, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3170>
- Kolb, H., Kempf, K., Martin, S. (2020). Health effects of coffee: Mechanism Unraveled?. *Nutrients*, 12(6), 1842. <https://doi.org/10.3390/nu12061842>
- Lee, Y.G., Cho, E.J., Maskey, S., Nguyen, D.T., Bae, H.J. (2023). Value-Added Products from Coffee Waste: A Review. *Molecules*, 28(8), 3562. <https://doi.org/10.3390/molecules28083562>
- Nava-Valente, N., Del Ángel-Coronel, O. A., Atenodoro-Alonso, J., & López-Escobar, L. A. (2023). Effect of thermal and acid pre-treatment on increasing organic loading rate of anaerobic digestion of coffee pulp for biogas production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(6), 4817-4830. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01529-3>
- SADER. (2021). *Café, la bebida que despierta a México*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cafe-la-bebida-que-despierta-a-mexico>
- Said, N.S.M., Abdullah, S.R.S., Ismail, N.I., Hasan, H.A., Othman, A. R. (2023). Integrating treatment processes of coffee processing mill effluent for reclamation of secondary resources. *Journal of Cleaner Production*, 386, 135837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135837>

Vehículos eléctricos: componentes y retos

Ángel Roberto Guerrero Rodríguez ¹, Mariel Abigail Cruz Nájera ², Georgina Castillo-Valdez ², David Lerma Ledezma ², Sergio Lerma Ledezma ³ y Gladis Guadalupe Suárez-Velázquez ^{2,*}

¹ Departamento de Ingeniería en energía y desarrollo sustentable, Universidad Politécnica de Altamira, Altamira, Tamaulipas, México.

² Universidad Politécnica de Altamira, Altamira, Tamaulipas, México.

³ Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 105, Altamira, Tamaulipas, México.

* Autor de correspondencia: gladis.suarez@upalt.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 17 de abril de 2025 Aceptado: 4 de junio de 2025 Publicado: 24 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.436>

Resumen: Los gases de efecto invernadero atrapan el calor irradiado del sol en la atmósfera, provocando un aumento en la temperatura del planeta que puede traer consecuencias devastadoras para el ser humano. Diversos países han acordado estrategias que contribuyan a reducir las emisiones de este tipo de gases para el año 2030. Entre las soluciones propuestas destaca la reducción de emisiones de CO₂ derivadas del transporte. Razón por la cual, los vehículos eléctricos (EV) alimentados con celdas de hidrógeno o baterías resultan una opción viable y sostenible. Este artículo proporciona una descripción y clasificación de los vehículos eléctricos alimentados por baterías. Sus ventajas, desventajas, los principios de operación y la posible incorporación de supercapacitores. Los cuales son dispositivos de almacenamiento de energía que al ser incorporados permiten entregar energía en cortos periodos de tiempo. Su integración reduce los ciclos de carga descarga del sistema de baterías contribuyendo a prolongar su vida útil y con el tiempo, disminuir costos.

Palabras clave: Baterías; Combustión; Supercapacitor; Vehículos eléctricos.

Introducción

El cambio climático y la concentración de contaminantes en la atmósfera se ha convertido en un problema global. De acuerdo con la ONU, el sector transportista es el responsable del 20.4% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero. De los cuales el 16.2% corresponde a los vehículos de combustión interna individuales (ONU-HABITAT, 2025). Por lo cual, es imprescindible tomar acciones en materia de este sector que contribuyan a mejorar el cambio climático.

Como una respuesta a la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, se ha tomado como alternativa la producción y el uso de autos eléctricos parcial o totalmente independientes de combustibles fósiles. Debido a esto, diversas empresas automotrices realizan esfuerzos cada año por innovar e ingresar al mercado vehículos eléctricos (EV) con diseños novedosos y tecnología de punta (Ramírez, 2024).

Es importante destacar que los autos eléctricos no han sido desarrollados solamente en las últimas décadas. De acuerdo con Ramírez (2024), los vehículos eléctricos aparecieron en los años 1800, en países europeos, pero dejaron de ser utilizados y comercializados debido a sus problemas constantes en cuanto a la recarga de la batería y su poca ligereza. Con el paso de los años, la tecnología comenzó a tener un avance significativo en el desarrollo de baterías que permitió la disipación de estos problemas mejorando el funcionamiento de los EV y alcanzando velocidades hasta de 36 Kilómetros por hora (Trujillo, 2020).

En la actualidad, los avances en el diseño de EV modernos en comparación con primeros diseños resaltan el incremento en la velocidad alcanzada y la ligereza en peso (Ramey & García, 2023). Cabe resaltar que se han implementado modificaciones en comparación a los vehículos comunes de combustión interna, con el propósito de hacerlos más asequibles, de mayor eficiencia energética y más sostenibles (Gracia et. al., 2024).

Con base a lo previamente mencionado, en este artículo se presenta una investigación documental (Haro et al., 2024) en la cual se describe un análisis sobre los tipos y componentes en los vehículos eléctricos actuales, así como las ventajas, desventajas y retos. Así como la inclusión de supercapacitores con la finalidad de reducir costos.

Desarrollo

Tipos de vehículos eléctricos

El uso de vehículos eléctricos ha brindado ventajas a sus usuarios, entre las cuales se destaca la eficiencia energética de los motores eléctricos, la cual es de un 90-95% destinada al movimiento de las ruedas del vehículo, en el caso de los motores de combustión interna su eficiencia es de un 20-25%, incluso en aquellos vehículos de modelos recientes (Iberdrola, 2022), lo cual indica que los coches de combustión usan poco porcentaje de su energía para mover sus ruedas y el resto lo desaprovechan (Energía y Sociedad, 2025). Otras ventajas destacables de los vehículos eléctricos son su uso silencioso y suave junto a una aceleración fuerte y su mantenimiento relativamente bajo en comparación a un coche convencional de motor de combustión interna (Renault S.A.S, 2019).

En la actualidad la adquisición de vehículos eléctricos se ha popularizado y esto se debe a que cuentan con gran avance tecnológico, lo que ha permitido que, comparado con los primeros modelos, estos tengan un alcance de 200 millas por carga, permitiendo ser útiles para manejarlos en carretera. En el caso de México, ya se cuenta con estaciones y redes de carga en puntos estratégicos. Sin embargo, es recomendable que el conductor planifique su viaje antes de salir a carretera, guiándose con algunas aplicaciones que muestran puntos donde se encuentran estaciones eléctricas (TrueCar Blog, 2023).

Con el aumento de circulación de vehículos eléctricos ha surgido la necesidad de personal capacitado para brindar mantenimiento preventivo y correctivo, el cual es enfocado principalmente en sus baterías. Sin embargo, por falta de mecánicos con conocimientos en la tecnología de estos vehículos México no se cuenta con suficientes naves de mantenimiento (Belloda, 2023). Al analizar la inversión inicial de un vehículo eléctrico, ésta tiende a ser de un 30% y 100% mayor que la de un vehículo de combustión (Ramírez, 2023). Por ejemplo, un vehículo eléctrico cuesta en México aproximadamente \$730, 000.00, comparado con un vehículo de combustión interna de su mismo tipo que cuesta \$370,000.00 (BBVA, 2024). Este incremento en los precios se debe a los costos de fabricación de los vehículos eléctricos. No obstante, es importante destacar que estos costos iniciales se ven compensados en el futuro al tener un menor costo operativo y de mantenimiento a diferencia de los vehículos con motor diésel (Cercalux, 2025).

Los coches eléctricos al igual que los de combustión tienen sus propias variaciones. Por ejemplo, puede dividirse en vehículos híbridos o autónomos y pueden estar alimentados con celdas de combustible o baterías. Algunos vehículos como los de pila combustible (VPC) o híbridos de pila combustible (VHPC) tienen la capacidad de almacenar la energía química en forma de hidrógeno (utilizando celdas de hidrógeno) para más tarde convertirla en energía eléctrica. Para su sistema de almacenamiento de energía, se utilizan sistemas alta tensión o acumuladores, las cuales comúnmente son baterías de iones de litio como celda base que se interconectan a los módulos (General Motors LLC., 2019). En el caso de los vehículos a baterías, a continuación, se explicará a detalle su clasificación y componentes principales.

Baterías para vehículos eléctricos

Como anteriormente se menciona, el problema principal de los primeros vehículos eléctricos era su almacenamiento de energía. Actualmente para remediar este inconveniente se utilizan arreglos de baterías con mayor rendimiento como las de ion-litio, debido a que ofrecen ventajas significativas como mayor eficiencia y menor costo de mantenimiento junto con un peso ligero (Zavala *et al.*, 2024). En la Figura 1 se observa un ejemplo del interior de una batería de litio. La cual es constituida por 2 electrodos: el positivo de óxido de Litio Cobalto LiCoO_2 y el negativo compuesto por grafito, ambos electrodos inmersos en un electrolito orgánico en donde los iones de Litio disueltos pasan de un electrodo a otro durante los procesos de carga y descarga de energía.

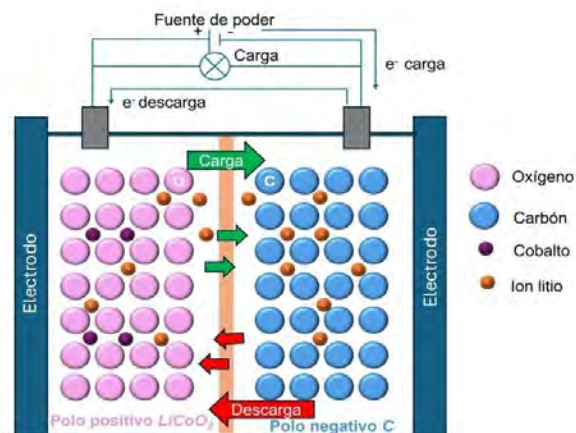


Figura 1. Batería de ion-litio.

Las baterías son el corazón de los vehículos eléctricos, es lo que determina su eficiencia, es por eso que utilizar baterías de Litio es acertado, no solo por las características anteriormente mencionadas, sino también porque es poco reactivo, lo cual favorece a un mejor desempeño del electrodo positivo (cátodo) (Lopez *et al.*, 2019).

Características de vehículos eléctricos que utilizan baterías

Entre los autos eléctricos se encuentran: el híbrido y el autónomo, tal como lo muestra el diagrama de la Figura 2. En el híbrido se utilizan dos tecnologías diferentes para poder funcionar: una tecnología es la fuente principal y la otra apoyo. Los cuales utilizan por lo general, un motor de combustión convencional de diésel o gasolina junto a un motor eléctrico alimentado de baterías, pero también puede ser que se utilice cada una de las fuentes de alimentación de forma independiente según la situación. Mientras el autónomo solo utiliza un tipo de tecnología (baterías) para funcionar.

Los EV autónomos tienen la desventaja de recorrer menos de 500 Km sin requerir carga de baterías contra 1000 Km que pueden entregar los vehículos híbridos. Sin embargo, los híbridos tienen la desventaja de producir entre 100 y 140 g/Km de CO₂ con respecto a los autónomos que son cero emisiones.

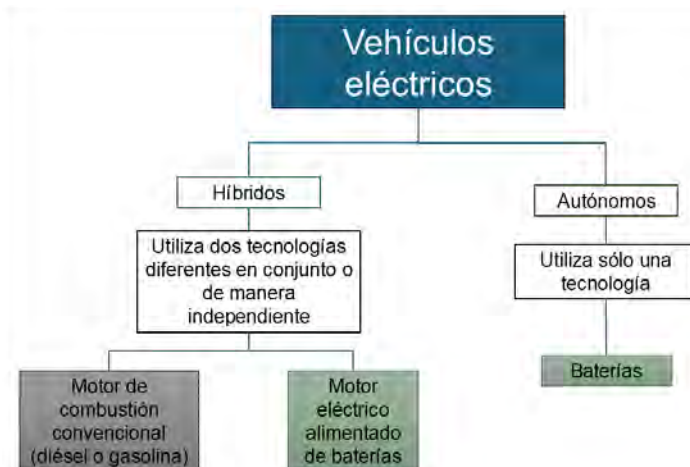


Figura 2. Clasificación de vehículos eléctricos.

La Figura 3, muestra la disposición de arreglos de baterías en diferentes tipos de vehículos eléctricos. En el HEV, su impulso es a base de baterías y alternativamente un motor de combustión interna que mueve un generador. El motor térmico también puede mover las ruedas del vehículo de manera directa, utilizan frenado regenerativo (al frenar actúan como un generador de energía) y no tienen carga externa a la red. Los PHEV son los vehículos eléctricos híbridos recargables, los cuales son conectados a la red para la recarga de baterías y pueden funcionar tanto con motor de combustión como con baterías. Mientras los EV utilizan electricidad almacenada en baterías recargables para moverse, eliminando o reduciendo la necesidad de combustibles fósiles como la gasolina o el diésel.

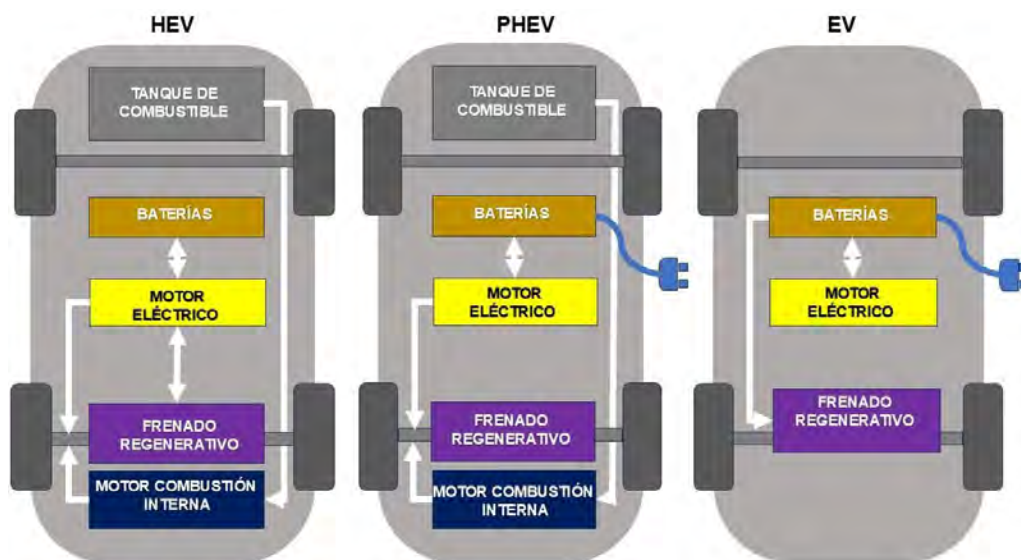


Figura 3. Componentes de: a) Vehículos eléctricos híbridos (HEV), b) Vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) y c) Vehículos eléctricos (EV).

Vehículos eléctricos híbridos con apoyo de supercapacitores

Los supercapacitores o también llamados ultra capacitores, son dispositivos donde se almacena la energía que destaca por su alta densidad de potencia y rápida capacidad para cargar y para descargarse. En los EV e híbridos, pueden desempeñar un papel crucial al servir de apoyo a las baterías tradicionales del ion Litio, (Ahsan *et al.*, 2022) y así prolongar su vida útil. Su principal ventaja radica en la capacidad de almacenar y liberar energía instantáneamente, lo que los hace ideales para absorber la energía que fue generada durante su frenado regenerativo y liberarla rápidamente para aumentar la aceleración o cubrir los picos de demanda energética.

Además, al implementar SC en vehículos híbridos se mejora y optimiza el consumo de combustible, en la fase de aceleración proporcionan energía adicional reduciendo la carga sobre el motor de combustión interna. En el caso de los EV suministran potencia para maniobras exigentes y para adelantamientos o arranques en pendientes, sin recurrir a la batería principal, soportando múltiples ciclos de carga y descarga sin que se degrada considerablemente (Akhtar & Majumder, 2020).

Conclusiones

En los últimos años, los EV han evolucionado significativamente para incrementar su eficiencia energética y autonomía. La disposición de sus componentes principales permite una mejor estabilidad y centro de gravedad. Esto aumenta su espacio interior y optimiza su flujo energético. La incorporación de SC junto a la topología de los EV ofrece una mejor gestión energética y reducción de pérdidas por calor. Lo cual, posiciona a los EV como una alternativa de transporte más viable, eficiente y sostenible para el futuro.

Retos

A pesar de todas las bondades de los vehículos eléctricos, aún existen muchos desafíos. En cuanto a duración, las baterías tienen un tiempo promedio de entre 8-15 años (Mercedes Benz, 2024) y su sustitución puede ser tan alta como el valor de un auto de combustión de gama económica. Si bien se reducen o eliminan las emisiones de gases de efecto invernadero, el manejo de las baterías al término de su vida útil deben ser revisados, ya que contienen elementos tóxicos. La implementación de estos vehículos en el uso cotidiano traerá mayor demanda de energía eléctrica por lo cual se debe contar con capacidad suficiente y cargadores públicos. Además, se requerirán técnicos especializados en el mantenimiento y reparación de estos autos.

Bibliografía

- Ahsan, M. B. F., Mekhilef, S., Soon, T. K., Mubin, M. B., Shrivastava, P., & Seyedmahmoudian, M. (2022). Lithium-ion battery and supercapacitor-based hybrid energy storage system for electric vehicle applications: a review. *International Journal of Energy Research*, 46(14), 19826-19854. <https://doi.org/10.1002/er.8439>
- Akhtar, M., & Majumder, S. B. (2020). Hybrid supercapacitor-battery energy storage. *Handbook of Advanced Ceramics and Composites: Defense, Security, Aerospace and Energy Applications*, 1259-1296. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16347-1_43
- BBVA (2024). 2da Cumbre de sostenibilidad bbva 2024.
- Belloda A., (2023).El futuro nos alcanzó. Reparación de híbridos y eléctricos, Alianza Automotriz Revista digital especializada. <https://alianzaautomotriz.com/el-futuro-nos-alcanzo-reparacion-de-hibridos-y-electricos/>
- Castillo-Rodriguez, J., (2024). La producción y uso de autos eléctricos en la ciudad de México, para la disminución de la contaminación. *Revista Universitaria digital de ciencias sociales*, 15(28). <https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2024.15.28.1>
- Cercalux, (2025). ¿Realmente ahorras con un auto eléctrico? Comparación con gasolina.
- Energía y Sociedad, (2025). 4.2. La eficiencia energética del vehículo eléctrico. <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/>
- General Motors LLC. (2019). Sistema de gestión térmica para vehículo eléctrico. Patente ES2933823T3. <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/3c/c4/82a60eb20893da/ES2933823T3.pdf>
- Gracia Santos, M. I., Paz Antolín, M. J., & Rísquez Ramos, M. (2024). La transición hacia el vehículo eléctrico: cambios y dimensiones clave. *Revista de Economía Mundial*, 67, 331-349. <http://dx.doi.org/10.33776/rem.vi67.7849>
- Haro, A., Chisag, E., Ruiz, J., & Caicedo, J. (2024). Tipos y clasificación de las investigaciones. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(2), 956-966. <https://dialnet.unirioja.es/metricas/documentos/ARTREV/9541046>
- Hunday (2024). Coche Eléctrico vs. Coche híbrido. ¿Qué es mejor para ti? <https://www.hyundai.com/es/es/zonaeco/eco-drive/conduccion/elegir-coche-electrico-o-hibrido>
- Iberdrola, (2022). Ventajas del coche eléctrico ¿Por qué debería comprar un coche eléctrico?. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/ventajas-coche-electrico>

- López, A., Obaya, M., Pascuini, P., & Ramos, A. (2019). *Litio en la Argentina: Oportunidades y desafíos para el desarrollo de la cadena de valor* (Vol. 698). Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0001553>
- Mercedes Benz(2024). ¿Cuánto dura la batería de un auto eléctrico? <https://www.mercedes-benz.com.pe/novedades/durabilidad-bateria-autos-electricos>
- Naciones Unidas ONU, (2024). Acción por el clima. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>
- NCYT Amazings Noticias de la Ciencia y la Tecnología Divulgando la Ciencia por Internet desde 1997. (2022). Las Nuevas Baterías de Níquel. <https://noticiasdelaciencia.com/art/44468/las-nuevas-baterias-de-niquel>
- ONU-HABITAT, (2025) Contaminación, automóviles y calidad del aire. <https://onu-habitat.org/index.php/contaminacion-automoviles-y-calidad-del-aire>
- Ramey, R., & García, D. (2023). Mejorar la autonomía de los coches eléctricos. Obtenido de Car and driver: <https://www.caranddriver.com/es/movilidad/sostenibilidad-ecologia/a44610957/nuevos-materiales-autonomia-coches-electricos/>
- Ramírez Chaves, E. (2024). Movilización vehicular y medio ambiente, ¿son los autos eléctricos la ruta hacia una solución definitiva?: el caso costarricense. *Revista Arjé*, 7(1). <https://repositorio.utn.ac.cr/items/7b24b4a0-fa4e-44f6-869c-861ddf3c2f97>
- Ramírez D., (2023). Autos eléctricos vs gasolina ¿Cuál es más económico?. <https://blog.enerlink.com/carro-de-gasolina-y-electrico-cual-es-mas-economico>
- Renault S.A.S. (2019). Sistema de almacenamiento de energía para vehículo eléctrico. Patente ES2932408T3. <https://patentimages.storage.googleapis.com/11/75/5c/886ccbba5d10d7/ES2932408T3.pdf>
- TrueCar Blog, (2023). Viajes por carretera con vehículos Eléctricos: Los Mejores Consejos y Perspectivas.
- Trujillo, E. (2020). Motorpasión. Obtenido de Industria: <https://www.motorpasion.com.mx/industria/electricos-sus-primeros-fracasos>
- Zavala-Tubay, A., Pico-Mera, H., & Pico-Mera, G. (2024). ELECTRIC EVHICLES AND THEIR IMPACT ON THE ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEM: A CASE STUDY OF THE URBAN FEEDER IN PORTOVIEJO. *Ingenius*, (32), 27-35. <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.03>

Aplicación de Sistemas de Control con Inteligencia Artificial para Optimizar la Conversión de Energías Renovables

Hugo Beatriz-Cuellar *, Jesús de la Cruz-Alejo, Isabel de la Luz Membrillo-Venegas

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: 202322187@tese.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 20 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 26 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.442>

Resumen: Este artículo presenta una revisión de la literatura de las características de diferentes sistemas de control basados en inteligencia artificial, orientados a mejorar la eficiencia y fomentar el uso de sistemas de energías renovables. Se describen las características fundamentales de las energías renovables, así como sus principales desventajas. Los sistemas de control propuestos incluyen la lógica difusa, las redes neuronales artificiales, el control neurodifuso y algunos algoritmos de optimización inspirados en la naturaleza, cuyas características y requerimientos para su aplicación en sistemas de energías renovables son detalladamente descritos. En este sentido, se expone el proceso de modelado de un sistema, así como los requerimientos para el diseño e implementación en software o hardware de dichos sistemas de control. Además, se presentan las principales ventajas y beneficios del uso de sistemas de control basados en inteligencia artificial. Finalmente, este artículo proporciona información valiosa para incrementar la producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables y para promover la aplicación de estos sistemas con el fin de reducir los niveles de contaminación ambiental.

Palabras clave: energías renovables; inteligencia artificial; sistema de control; eficiencia.

Introducción

Actualmente, existen diversos problemas asociados a los altos niveles de contaminación ambiental, tales como afecciones a la salud, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la degradación de los recursos naturales, entre otros. En este contexto, las principales causas de la contaminación incluyen las emisiones de gases industriales, el uso excesivo de plásticos, la deforestación, el empleo de productos químicos, el vertido de aguas residuales, la generación de energía mediante combustibles fósiles y las actividades agrícolas intensivas (Dechezleprêtre *et al.*, 2025; Parmesan *et al.*, 2022) (Clarke *et al.*, 2022; Malhi *et al.*, 2021). Por lo tanto, es necesario buscar, analizar y proponer alternativas de solución que mitiguen o eliminen al máximo los problemas derivados de la contaminación, así como los procesos que la generan. En este sentido, las energías renovables representan una alternativa viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica, ya que no producen emisiones contaminantes, son consideradas recursos inagotables, se adaptan a las condiciones locales y no contaminan ni el aire ni el agua. No obstante, una de sus principales desventajas es su dependencia de factores climáticos y de la ubicación geográfica (Ang *et al.*, 2022; Farghali *et al.*, 2023; Maradin, 2021). Por ejemplo, la energía solar solo está disponible durante el día, la energía eólica depende de la velocidad y dirección del viento, y la energía mareomotriz y undimotriz solo pueden aprovecharse en regiones costeras.

Ante este panorama, el presente artículo describe las características de diversos sistemas de control basados en inteligencia artificial que pueden implementarse para regular el funcionamiento de los sistemas de energías renovables. Esto contribuiría a aumentar la producción de energía eléctrica, mitigar los problemas asociados a la variabilidad de estas fuentes y facilitar el análisis y modelado de dichos sistemas. Lo anterior se debe a que los sistemas de inteligencia artificial tienen la capacidad de tomar decisiones, aprender de experiencias previas y resolver problemas de forma eficiente (Ahmed *et al.*, 2023). Entre los principales ejemplos de sistemas de control basados en inteligencia artificial se encuentran el control de lógica difusa, las redes neuronales artificiales y el control neurodifuso. Además, estos sistemas pueden optimizarse mediante la combinación con algoritmos inspirados en la naturaleza o la biología, tales como los algoritmos genéticos, la evolución diferencial, la optimización por enjambre de partículas, el algoritmo de colonia de abejas, el algoritmo de optimización de ballenas, entre otros.

Desarrollo

Las energías renovables más utilizadas son la energía solar, eólica, hidroeléctrica, la biomasa, la geotérmica, la mareomotriz y la undimotriz (Yolcan, 2023). No obstante, las energías solar, eólica y undimotriz se consideran más versátiles, ya que permiten la implementación de sistemas a pequeña, mediana y gran escala. La Tabla 1 presenta las principales características de estos tipos de energía. Al momento de utilizar alguna fuente de energía renovable, es fundamental considerar diversos factores, como la disponibilidad de los recursos, los costos iniciales y de instalación, el almacenamiento de energía, el impacto ambiental y ecológico, la eficiencia y el rendimiento, las regulaciones y políticas gubernamentales, la aceptación social, entre otros (Deshmukh *et al.*, 2023; Sayed *et al.*, 2023). En este sentido, mejorar la eficiencia y el rendimiento permite maximizar el aprovechamiento de los recursos, reducir los costos y la necesidad de equipos adicionales para generar la misma cantidad de energía, obtener un suministro constante y estable, generar más energía con menos recursos naturales, e incrementar la competitividad frente a las fuentes no renovables (Strielkowski *et al.*, 2021). Por esta razón, el diseño e implementación de sistemas que aumenten la eficiencia y mejoren el rendimiento de las energías renovables resulta esencial. Esto puede lograrse mediante la utilización de sistemas de control, como los que se describen en las siguientes secciones.

Tabla 1. Características de los tipos de energías renovables.

Tipo de energía renovable	Recurso utilizado	Tecnología principal
Energía solar	Sol	Paneles solares
Energía eólica	Aire	Aerogeneradores
Energía undimotriz	Olas del mar	Convertidores de energía de las olas

Control de lógica difusa

El control de lógica difusa es un sistema que transforma variables numéricas reales en variables difusas, cuyos valores son lingüísticos y describen el estado de dichas variables. Por ejemplo, la temperatura puede definirse como una variable difusa y representarse mediante valores lingüísticos como *baja*, *media* o *alta*. Posteriormente, se utiliza un conjunto de reglas que determina la toma de decisiones o la acción de control en función de las variables de entrada. Estas reglas pueden establecerse a partir de la experiencia o conocimiento del proceso, los resultados de pruebas experimentales, o mediante simulaciones por software. Los controladores de lógica difusa tipo de Mamdani y de Takagi-Sugeno se encuentran entre los más utilizados en la industria para diversas aplicaciones. La Figura 1, por ejemplo, muestra la estructura general de un controlador de lógica difusa tipo de Mamdani. Entre las principales ventajas del control de lógica difusa se destacan que no requiere un modelo matemático preciso, puede aplicarse tanto en sistemas lineales como no lineales, y no necesita ecuaciones matemáticas complejas ni estructuras de programación complicadas para su implementación en software o hardware (Buckley & Eslami, 2002; Trillas & Eciolaza, 2015). Para su aplicación en sistemas de energía renovable, es necesario definir las variables de entrada (variables independientes) y las variables de salida (variables dependientes) del proceso. Por ejemplo, el voltaje y la corriente de un panel fotovoltaico pueden considerarse como variables de entrada, mientras que la señal de control (por ejemplo, el ciclo de trabajo de una señal cuadrada) de un convertidor DC-DC podría definirse como la variable de salida. Para el análisis y diseño del controlador, se puede emplear el software MATLAB (utilizando un script o toolbox), mientras que para su implementación física se pueden utilizar plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

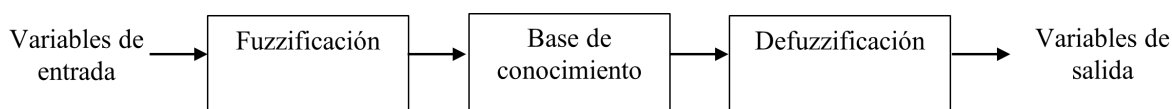


Figura 1. Diagrama de bloques de un control de lógica difusa.

Redes neuronales artificiales

Una red neuronal artificial es un sistema inspirado en el funcionamiento del cerebro humano; es decir, está compuesta por neuronas artificiales interconectadas que forman capas para procesar información, como se muestra en la Figura 2. Para modelar o controlar un sistema, se requiere un conjunto de muestras de las variables de entrada (variables independientes) y sus respectivas respuestas deseadas (variables dependientes) del proceso (Montesinos López *et al.*, 2022). Por ejemplo, se podrían utilizar datos de velocidad y dirección del viento como variables de entrada, mientras que el

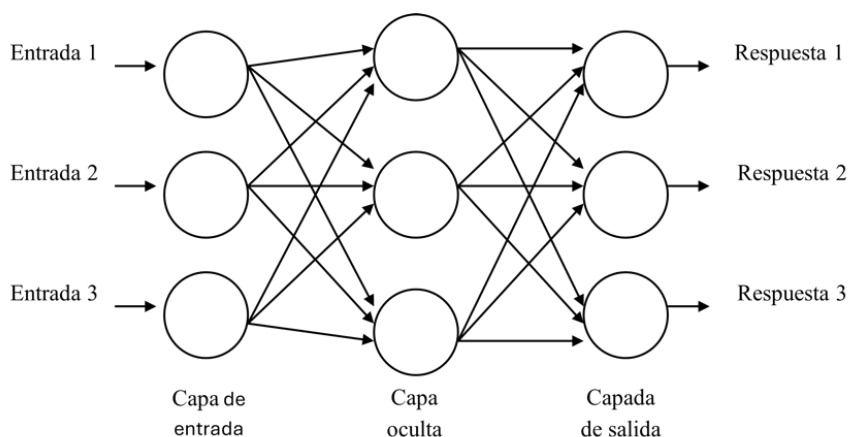


Figura 2. Estructura de una red neuronal artificial.

ángulo de las paletas o la posición del rotor podrían emplearse como variables de salida para modelar o controlar el funcionamiento de un aerogenerador. Adicionalmente, se necesita un algoritmo de entrenamiento que, mediante la aplicación del conjunto de muestras, ajuste los parámetros de la red (pesos sinápticos). Entre las principales ventajas de las redes neuronales artificiales se encuentran: no requieren un modelo matemático del sistema, pueden aplicarse a sistemas con múltiples entradas y salidas, no necesitan ecuaciones complejas para su implementación en software o hardware, y pueden utilizarse tanto en sistemas lineales como no lineales, entre otras (da Silva *et al.*, 2017; Rosa *et al.*, 2020). En el contexto de las energías renovables, una red neuronal artificial puede emplearse para estimar la producción o demanda de energía eléctrica en una ubicación o periodo determinado, así como para modelar, controlar y optimizar el funcionamiento del sistema. Existen diversos tipos de redes neuronales artificiales y estrategias de control que pueden utilizarse en sistemas de energía renovable. Por ejemplo, se pueden implementar redes del tipo perceptrón multicapa, redes de base radial, redes recurrentes, entre otras. Asimismo, se pueden aplicar diferentes estrategias de control, como el control adaptativo directo, el control adaptativo indirecto, media móvil autorregresivo no lineal, entre otras. Para el análisis y diseño de una red neuronal artificial, se puede emplear el software MATLAB, mientras que para su implementación física se pueden utilizar plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

Control neurodifuso

El control neurodifuso es la combinación de un sistema de lógica difusa con redes neuronales artificiales. Esta integración permite obtener un control más robusto, aprovechando las fortalezas de ambos enfoques y compensando sus respectivas limitaciones. En otras palabras, se reducen o eliminan las desventajas de la lógica difusa mediante las propiedades de las redes neuronales artificiales, y viceversa. Existen dos formas principales de combinar estos sistemas. La primera consiste en ajustar los parámetros de un controlador de lógica difusa utilizando algoritmos de entrenamiento propios de las redes neuronales artificiales. La segunda forma implica definir ciertas características de una red neuronal artificial empleando estructuras basadas en lógica difusa (Boutalis *et al.*, 2014). Al tratarse de la fusión de dos enfoques, el control neurodifuso hereda las principales ventajas tanto del control de lógica difusa como de las redes neuronales artificiales. Para el análisis y diseño de este tipo de controlador, se puede utilizar el software MATLAB, mientras que su implementación física puede realizarse en plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

Algoritmos de optimización basados en la naturaleza

Existen diversas técnicas de optimización y búsqueda inspiradas en fenómenos naturales, como el algoritmo genético, basado en los principios de la genética y la selección natural; la optimización por enjambre de partículas, inspirada en el comportamiento social y colectivo de organismos dentro de una colonia; el algoritmo de colonia de abejas, que replica la forma en que las abejas buscan alimento y se comunican entre sí; y el algoritmo de optimización de ballenas,

que simula el comportamiento de caza cooperativa de las ballenas jorobadas, entre otros. Las principales ventajas de estos algoritmos de optimización son que no requieren ecuaciones matemáticas complejas para su implementación en software o hardware, emplean reglas simples y estructuras básicas de datos, pueden aplicarse a sistemas con múltiples objetivos, y son útiles en diversas áreas como la ingeniería, la economía y el aprendizaje automático (Chakraborty *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2023; Gad, 2022; Katoch *et al.*, 2021). Además, estos algoritmos pueden utilizarse para optimizar procesos, diseñar estructuras, resolver funciones matemáticas, planificar recursos, entre otras aplicaciones. También pueden emplearse para determinar la configuración óptima de modelos de aprendizaje automático, como los mencionados en secciones anteriores, lo que permite reducir el tiempo de convergencia, evitar problemas de sobreajuste y disminuir el riesgo de quedar atrapados en mínimos locales. Asimismo, pueden combinarse con redes neuronales artificiales, el control de lógica difusa y el control neurodifuso para desarrollar sistemas capaces de modelar un proceso y determinar sus parámetros óptimos, lo que mejora la eficiencia y reduce los costos operativos (Abdolrasol *et al.*, 2021; Brodzicki *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2021). Para el diseño de estos algoritmos se puede utilizar el software MATLAB, mientras que su implementación puede realizarse en plataformas como Arduino, FPGA, Raspberry Pi, procesadores digitales de señales, entre otras.

Perspectivas futuras

Los sistemas de control basados en inteligencia artificial tienen un gran potencial para mejorar el diseño, control, optimización y pronóstico de los componentes y etapas de los sistemas de energías renovables. Gracias a su capacidad de adaptación y aprendizaje, es importante seguir desarrollando nuevos métodos que permitan una implementación más eficiente de estos sistemas. Además, se debe explorar otras técnicas de control distintas a las abordadas en este trabajo, ampliando así las herramientas disponibles para enfrentar los retos del sector energético. Una mayor incorporación de estos sistemas podría facilitar la integración de las energías renovables en la red eléctrica, así como su aplicación en regiones en desarrollo o en zonas con acceso limitado a la electricidad. No obstante, persisten desafíos importantes, como la intermitencia de las fuentes renovables y la dificultad para almacenar la energía generada. En este sentido, la inteligencia artificial puede desempeñar un papel clave para mitigar estos problemas, mejorando la previsión de la generación y optimizando el uso de los recursos energéticos disponibles. Finalmente, el uso de fuentes de energía limpias contribuye no solo a reducir las emisiones contaminantes, sino también a mitigar el cambio climático. Esto tiene un impacto directo en la salud humana, la conservación del medio ambiente y el bienestar de las futuras generaciones.

Conclusiones

Este artículo presenta una revisión de la literatura sobre la integración y características más relevantes para la implementación de sistemas de control basados en inteligencia artificial, aplicados a sistemas que emplean energías renovables para la generación de electricidad. El uso de este tipo de control permite mejorar el análisis, el modelado, la eficiencia y aumentar la producción de energía eléctrica. Optimizar el rendimiento de cualquier sistema fomenta su adopción y uso a mayor escala. En este contexto, la implementación de sistemas de control basados en inteligencia artificial puede facilitar el aprovechamiento de las energías renovables y, a largo plazo, contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles para la generación eléctrica. Esto es especialmente importante, considerando que, si no se toman medidas inmediatas para proteger el medio ambiente, las consecuencias podrían ser irreversibles. En última instancia, la investigación científica debe continuar avanzando en la búsqueda de soluciones efectivas para preservar el entorno natural, ya que las decisiones que se tomen hoy tendrán un impacto significativo en el futuro de la humanidad.

Agradecimientos y financiamiento: Hugo Beatriz Cuellar (CVU: 1007017) agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada.

Bibliografía

- Abdolrasol, M. G. M., Hussain, S. M. S., Ustun, T. S., Sarker, M. R., Hannan, M. A., Mohamed, R., Ali, J. A., Mekhilef, S., & Milad, A. (2021). Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review. *Electronics*, 10(21), 2689. <https://doi.org/10.3390/electronics10212689>
- Ahmed, S. F., Alam, Md. S. Bin, Hassan, M., Rozbu, M. R., Ishtiaq, T., Rafa, N., Mofijur, M., Shawkat Ali, A. B. M., & Gandomi, A. H. (2023). Deep learning modelling techniques: current progress, applications, advantages, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 56(11), 13521–13617. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10466-8>

- Ang, T.-Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Boutalis, Y., Theodoridis, D., Kottas, T., & Christodoulou, M. A. (2014). *System Identification and Adaptive Control*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06364-5>
- Brodzicki, A., Piekarski, M., & Jaworek-Korjakowska, J. (2021). The Whale Optimization Algorithm Approach for Deep Neural Networks. *Sensors*, 21(23), 8003. <https://doi.org/10.3390/s21238003>
- Buckley, J. J., & Eslami, E. (2002). An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets. In *An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*. Physica-Verlag HD. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1799-7>
- Chakraborty, S., Kumar Saha, A., Sharma, S., Mirjalili, S., & Chakraborty, R. (2021). A novel enhanced whale optimization algorithm for global optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107086. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107086>
- Clarke, B., Otto, F., Stuart-Smith, R., & Harrington, L. (2022). Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d>
- da Silva, I. N., Hernane Spatti, D., Andrade Flauzino, R., Liboni, L. H. B., & dos Reis Alves, S. F. (2017). Artificial Neural Networks. In *Artificial Neural Networks: A Practical Course*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43162-8>
- Dechezleprêtre, A., Fabre, A., Kruse, T., Planterose, B., Sanchez Chico, A., & Stantcheva, S. (2025). Fighting Climate Change: International Attitudes toward Climate Policies. *American Economic Review*, 115(4), 1258–1300. <https://doi.org/10.1257/aer.20230501>
- Deshmukh, M. K. G., Sameeroddin, M., Abdul, D., & Abdul Sattar, M. (2023). Renewable energy in the 21st century: A review. *Materials Today: Proceedings*, 80, 1756–1759. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.501>
- Fang, J., Liu, W., Chen, L., Lauria, S., Miron, A., & Liu, X. (2023). A Survey of Algorithms, Applications and Trends for Particle Swarm Optimization. *International Journal of Network Dynamics and Intelligence*, 24–50. <https://doi.org/10.53941/ijndi0201002>
- Farghali, M., Osman, A. I., Chen, Z., Abdelhaleem, A., Ihara, I., Mohamed, I. M. A., Yap, P.-S., & Rooney, D. W. (2023). Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1381–1418. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01587-1>
- Gad, A. G. (2022). Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(5), 2531–2561. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>
- Han, J.-X., Ma, M.-Y., & Wang, K. (2021). RETRACTED ARTICLE: Product modeling design based on genetic algorithm and BP neural network. *Neural Computing and Applications*, 33(9), 4111–4117. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05604-0>
- Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*, 13(3), 1318. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Maradin, D. (2021). Advantages And Disadvantages Of Renewable Energy Sources Utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11027>
- Montesinos López, O. A., Montesinos López, A., & Crossa, J. (2022). Fundamentals of Artificial Neural Networks and Deep Learning. In *Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic Prediction* (pp. 379–425). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89010-0_10
- Parmesan, C., Morecroft, M. D., Trisurat, Y., & Mezzi, D. (2022). *Climate Change 2022:Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://doi.org/https://doi.org/10.34894/VQ1DJA>
- Rosa, J. P. S., Guerra, D. J. D., Horta, N. C. G., Martins, R. M. F., & Lourenço, N. C. C. (2020). *Using Artificial Neural Networks for Analog Integrated Circuit Design Automation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35743-6>
- Sayed, E., Olabi, A., Alami, A., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. (2023). Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energies*, 16(3), 1415. <https://doi.org/10.3390/en16031415>
- Strielkowski, W., Cívín, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., & Petrenko, Y. (2021). Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review. *Energies*, 14(24), 8240. <https://doi.org/10.3390/en14248240>
- Trillas, E., & Eciolaza, L. (2015). *Fuzzy Logic* (Vol. 320). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14203-6>
- Yolcan, O. O. (2023). World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation. *Innovation and Green Development*, 2(4), 100070. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100070>

Alternativas de Innovación Sostenible para Reducir el Calor Urbano en Tabasco

Manuel Adolfo Custodio Barragán ¹, Iván Hernández Pérez ^{2,*}, Isa Yadira Pérez Olán ³, Luis Enrique Angeles Montero ⁴

¹ Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

² Profesor-Investigador de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

³ Profesora-Investigadora en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

⁴ Técnico Académico del Laboratorio de Mecatrónica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

* Autor de correspondencia: ivan.hernandezp@ujat.mx; Tel.: (+52) 9931184015.

Artículo de divulgación científica

Recibido: 17 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 26 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.440>

Resumen: El calor urbano es causado por diversos factores, entre los que se destacan la escasez de áreas verdes, actividades antropogénicas y el uso de materiales que absorben la radiación solar. Por consecuencia, el aire en las ciudades alcanza temperaturas mayores que los espacios naturales creando el efecto isla de calor urbana (ICU). Las temperaturas de las zonas urbanas de Tabasco, exacerbadas por la ICU, representan riesgos de salud y limitan actividades al aire libre. La ICU también contribuye a los apagones, que afectan negativamente la economía, la salud y la vida diaria. Este trabajo promueve dos estrategias para reducir la ICU. La primera consiste en incrementar la vegetación en zonas urbanas, dicha medida ofrece sombra y enfriamiento por evaporación. La segunda es utilizar materiales reflectivos en techos y avenidas. Los techos reflectivos y pavimentos fríos reflejan los rayos solares evitando considerablemente su conversión en calor alcanzando temperaturas menores que los materiales tradicionales.

Palabras clave: Isla de calor urbana, calor urbano, vegetación, apagones, superficies reflectivas.

Introducción

En Tabasco, al igual que en el resto del territorio mexicano, el año 2024 se ha caracterizado por ser uno de los más calurosos de los últimos tiempos, prueba de ello se presenta en el estudio realizado por la Comisión Nacional del Agua el cual menciona que el municipio de Villahermosa mismo que alberga a la capital del estado, en mayo del año pasado se obtuvo un récord histórico de temperatura ambiental de 48 °C superando dos veces el registro de la temperatura ambiental máxima alcanzada de 44 °C en 1986 (Ravelo, 2024). Lo anterior genera el riesgo que, por realizar actividades al aire libre en condiciones de temperatura muy alta se afronten consecuencias negativas por la exposición a dicho ambiente, convirtiendo esto en una limitante social para realizar actividades deportivas, de recreación, laborales y demás.

La exposición prolongada a una sensación térmica por encima de los 40 °C genera en el cuerpo humano deshidratación y disminución de la capacidad para sudar (Rincón Martínez *et al.*, 2023). A medida que aumenta la temperatura del cuerpo, las proteínas y las membranas que rodean las células, especialmente en el cerebro, comienzan a fallar. Los órganos funcionan mal y los músculos del corazón comienzan a descomponerse, esto puede estresar al cuerpo hasta provocar enfermedades o incluso la muerte (Piñeiro Sande *et al.*, 2004). Cuando la temperatura ambiente aumenta dramáticamente a un nivel extremo, el proceso normal de termorregulación del cuerpo podría verse interrumpido y entonces aumentar la carga sobre el sistema cardiovascular.

Las altas temperaturas pueden aumentar los riesgos de mortalidad y morbilidad, especialmente en los grupos vulnerables como los niños, ancianos, mujeres embarazadas y personas con enfermedades crónicas (Moon, 2021). Factores como la edad y la salud en general, pueden desempeñar un papel importante en cómo el cuerpo reacciona ante una ola de calor, es decir, el nivel de afectación por altas temperaturas puede impactar en diferente medida a unos y a otros. Si bien el calentamiento global es el elemento subyacente que explica por qué lugares como Tabasco continúan calentándose, algo conocido como la isla de calor urbana (ICU) está calentando a las ciudades a un ritmo mucho más rápido que el promedio mundial, este fenómeno se hace presente en los asentamientos donde la presencia de condiciones y materiales son susceptibles a generar altas temperaturas.

Desarrollo

Factores principales que causan una isla de calor urbana (ICU)

Son tres los factores principales que causan la existencia de una ICU. El primer factor es los equipos de aire acondicionado (AC) que se usan para para acondicionar la temperatura en casas, oficinas, supermercados, plazas comerciales y otros recintos. Estos equipos remueven el calor desde el interior de estos espacios y lo expulsan hacia el exterior. El calor es absorbido por el aire en el ambiente, y en lugares urbanizados donde muchas edificaciones cuentan con equipos de AC estos contribuyen al incremento de temperatura del aire en las ciudades.

El segundo factor es la presencia de pavimento, asfalto o concreto usados en las diferentes construcciones y avenidas. Estos tienen propiedades diferentes a las de un paisaje natural porque absorben considerablemente la energía solar, se calientan, almacenan y emiten energía en forma de calor de una forma diferente que los materiales naturales.

El tercer factor se presenta debido a la geometría de los edificios y su configuración dentro de una ciudad, estos atrapan y almacenan el calor y lo emiten lentamente hacia al medio ambiente. En la Figura 1 se muestra un ejemplo comparativo entre las zonas urbanas y las zonas rurales de la Ciudad de México donde se observa que existen diferencias de temperatura de hasta 4°C entre una zona y otra en determinada hora del día (CEPAL, 2013).

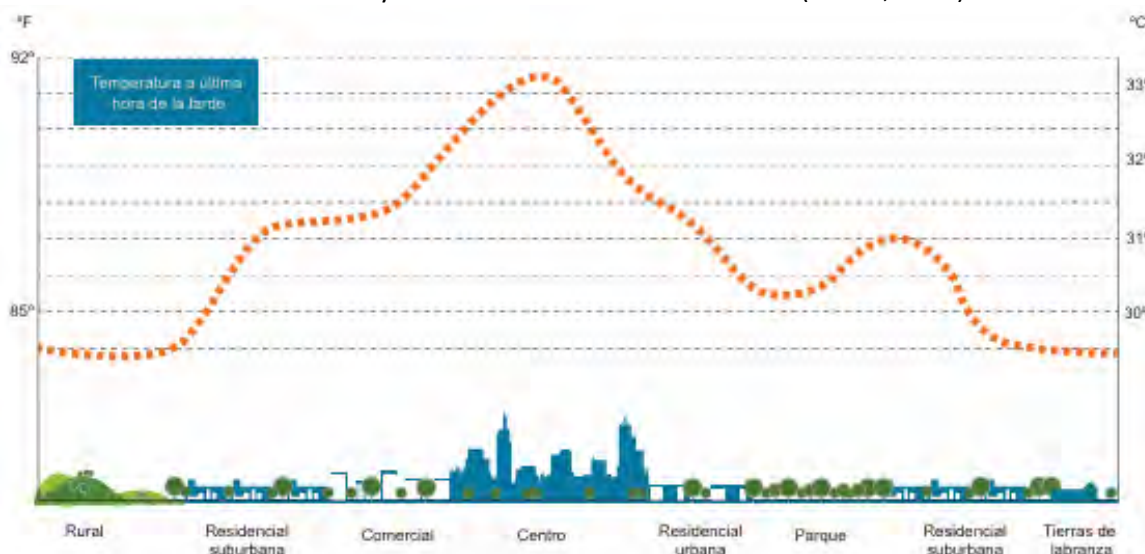


Figura 1. Temperaturas de las diferentes zonas a última hora de la tarde (CEPAL, 2013).

Apagones

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) institución pública encargada de la administración de la energía eléctrica en México, informó que en Tabasco se presentaron un total de 7,292 apagones en la primera mitad de 2023 (Bautista Villegas, 2023). Entendemos como apagones a la suspensión súbita del servicio de provisión de energía eléctrica, y si bien, algunos de ellos son ocasionados por razones como averías a las líneas de distribución por accidentes automovilísticos, caída de árboles y ramas, o por situaciones similares, los apagones también se han presentado en la temporada cuando la temperatura ambiente es más elevada.

Al incrementarse la temperatura del medio ambiente, las personas disminuyen la temperatura de su equipo de aire acondicionado; entonces, si una cantidad importante de usuarios realiza esta acción, se ejercerá más presión sobre la red eléctrica y esto la hace susceptible a fallas en la infraestructura. En ese contexto, mientras mayor sea la población de una ciudad, mayor será la frecuencia de los apagones.

Haciendo referencia al periodo antes citado, en el municipio de Villahermosa (683,607 habitantes) se presentaron más de 2400 apagones, en Cárdenas (243,229 habitantes) 1000, en Comalcalco (214,877 habitantes) 625, mientras que en los municipios como Jalapa (37,749 habitantes) y Jonuta (30,798 habitantes) (INEGI, 2020) sólo se presentaron 76 y 62,

respectivamente (Bautista Villegas, 2023). Los apagones pueden traer consecuencias negativas como, fallas en aparatos electrodomésticos, pánico o estrés en las personas al cuestionarse sobre la duración de cada apagón, pérdidas económicas debido a la exposición de un cambio de temperatura en productos dentro del hogar o comercios, paro de actividades laborales, escolares o económicas por falta de energía eléctrica, situación de riesgos en la salud por depender la calidad de ella a la provisión de este servicio, entre otras consecuencias. Incluso en Tabasco, debido a apagones que han durado días o semanas, los ciudadanos han tomado medidas como realizar bloqueos a avenidas o carreteras como llamada de atención para las autoridades, afectando a terceros y generando así otro problema.

Estrategias para reducir la ICU

Ante la problemática que es generalizada y apremiante de atender, existen diferentes acciones que ayudan a reducir el efecto ICU y algunas son relativamente simples de realizar, como incrementar la vegetación o áreas verdes y reducir el uso de materiales que absorben en exceso la radiación solar.

Vegetación

Los árboles y la vegetación son componentes esenciales para conservar a una ciudad en buenas condiciones. Ambos proporcionan numerosos beneficios que incluyen la reducción de la contaminación del aire, la disminución de la escorrentía de aguas pluviales e incluso producen ciertos beneficios psicológicos a las personas. Se ha demostrado que la exposición a la naturaleza proporciona beneficios significativos para la salud mental (Keijzer, 2020). Además de esos beneficios, los árboles y la vegetación son una medida importante para mitigar el calor urbano (Figura 2), esto debido al efecto de sombra que se obtiene de ellos y a su vez proporcionan un efecto de enfriamiento por evaporación. La vegetación puede estar en la calle y presentarse en forma de arbustos o árboles, generando así un dosel arboleo que ofrece sombra a quienes transiten por ella. Los resultados presentados por Wang *et al.* (2018) muestran que, en promedio, la temperatura media del aire cerca de la superficie en las áreas urbanas disminuye 3°C con el efecto de sombreado. La vegetación también puede adherirse a las fachadas de los edificios, sistema conocido como fachadas vegetales e incluso se puede instalar en un techo si se diseña adecuadamente un edificio para generar una azotea verde o techo vegetativo. Estos sistemas pueden proporcionar un hábitat para la biodiversidad local, promover la polinización y hasta una oportunidad para la agricultura urbana. Si se implementa de manera masiva, la vegetación no solo ayudaría a reducir la temperatura del aire en una ciudad, también favorecería al ahorro de energía eléctrica, ya que está comprobado que un edificio con una fachada o techo vegetal puede consumir hasta 11% menos energía eléctrica que un edificio que no los tiene (Ascione *et al.*, 2013).

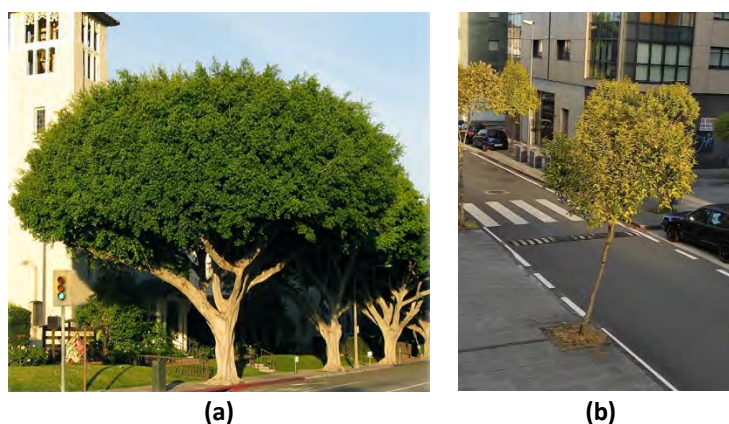


Figura 2. Árboles y vegetación en zonas urbanas:
(a) El *ficus elástica* sirve como fuente de sombra en zonas urbanas y
(b) *Ligustrum lucidum*, el cual ayuda a enfriar el aire en una ciudad por su capacidad transpiratoria. (Barradas, 2013)

Techos reflectivos

Los techos reflectivos o techos fríos son superficies altamente reflejantes que, como su nombre lo indica, reflejan o rechazan los rayos solares, de esta manera se evita que el techo los absorba y que se conviertan en calor (Figura 3). Transformar un techo convencional en reflectivo es relativamente simple, se puede realizar aplicando un revestimiento o impermeabilizante reflectivo blanco sobre la superficie exterior del techo. La reflectancia solar y emisividad térmica son propiedades que determinan la efectividad de un techo frío, ya que, con estas se puede medir su capacidad para reflejar la energía solar y para emitir radiación térmica.

Si se desea contribuir al enfriamiento de los edificios y las ciudades, los techos fríos son mucho más efectivos en lugares con climas cálidos que los techos convencionales de tonos oscuros. Es decir, los techos reflectivos mantienen temperaturas superficiales menores que los techos convencionales bajo las mismas condiciones medioambientales. (Hernández-Pérez, 2021) analizó el comportamiento térmico de techos de concreto con diferentes tipos de revestimientos en la ciudad de Villahermosa, Tabasco. En ese trabajo se demuestra que un techo con un revestimiento blanco reflectivo alcanzó una temperatura exterior máxima de 36°C en verano mientras que un techo gris y un techo terracota convencionales alcanzaron temperaturas de 50°C y 52°C, respectivamente.



Figura 3. Techo reflectivo. Fuente propia.

Si se mantiene la superficie de un techo con una temperatura menor usando un revestimiento blanco, la transferencia de calor hacia el interior de una edificación se reduce brindando beneficios como ahorros de energía eléctrica y mejoras en el confort térmico. Además, si los revestimientos se instalan en todos los techos de los edificios de una ciudad ayudarían a moderar el efecto ICU. Simulaciones hechas para varias ciudades de Estados Unidos de América han mostrado que la instalación de revestimientos reflectivos en los techos de toda una ciudad, junto con la plantación de árboles, podrían en promedio reducir la temperatura del aire ambiente de 2°C a 4°C durante los meses de verano (Akbari *et al.*, 2001). Otro beneficio de la utilización masiva de los techos reflectivos se presenta en la investigación desarrollada por Heaviside & Macintyre (2019) donde se concluyó que los techos fríos podrían reducir la mortalidad relacionada con el calor asociada con el efecto ICU en un 25 % durante una ola de calor. Entonces, los techos reflectivos pueden ser importantes incluso para salvar vidas.

Pavimentos fríos

En el proceso de encontrar alternativas y soluciones para reducir el calentamiento de las avenidas en las ciudades, un equipo de científicos del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) realizaron investigaciones y llegaron a la conclusión de que alrededor del 40% de las zonas urbanas estadounidenses están ocupadas por avenidas, por lo que se centraron en el tema de “pavimentos fríos” (Figura 4), estos se componen de materiales que pueden ayudar a reducir la emisión de calor, ya que reflejan y emiten más energía que los pavimentos tradicionales. Dicha tecnología propone disminuir el calor que es transferido por las avenidas y reflejar la radiación solar, de tal manera que, la temperatura del aire cercano a las avenidas sea menor que los casos donde se utilicen pavimentos convencionales (Zimbrón, 2021). Según los resultados del MIT, el uso de pavimentos fríos reduce la temperatura del aire entre 2.1°C y 1.7°C de acuerdo con las pruebas realizadas en Boston y Phoenix (Fernández, 2021).



Figura 4. Los pavimentos fríos pueden reducir el calor de las ciudades. Beachy Avenue fue pintada, como parte de un proyecto piloto para probar un pavimento frío (Ayuntamiento de Los Angeles).

En Tabasco, la aplicación de pavimentos fríos, techos reflectivos y vegetación podría mejorar las condiciones en las áreas urbanas de la entidad (Figura 5) ya que beneficiaría a la reducción de la ICU. Esto se lograría aplicándolos principalmente en los lugares donde las temperaturas del aire urbano rebasan a las temperaturas más altas registradas.

De acuerdo con los medios de información, el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad registró que en la ciudad de Villahermosa existen por lo menos cinco islas de calor urbanas (Ciudad Industrial, Altabrisa, Parque Tabasco, Plaza Cristal y Europlaza).



Figura 5. Área urbana de la ciudad de Villahermosa. Fuente: Javier Chávez. El heraldo de Tabasco.

Conclusiones

Ante la realidad del calentamiento global como una condición generalizada en el planeta y las islas urbanas de calor que se presentan en lugares específicos, es imperativo que las acciones para revertir sus efectos o disminuir sus causas sean inmediatas. Las acciones pueden ser iniciativas particulares o colectivas, primarias o integrales, pero todas ellas encaminadas a disminuir las altas temperaturas que se han tornado peligrosas para la subsistencia de los seres vivos. Si bien, existen iniciativas que abarcan grandes proyectos, es importante considerar que la suma de pequeños esfuerzos abona a que un cambio de mayor impacto se gesté en el corto o mediano plazo.

Destinar recursos como tiempo y espacio para dotar de vegetación a un área ya sea en casa o localidad, así como invertir en la habilitación de superficies impermeables, son estrategias que indican conciencia de la realidad y a la vez búsqueda para transformar esa realidad. Disminuir los efectos de una isla de calor urbana debe iniciar por conocer que existen y que son originados como consecuencia de la urbanización de los espacios. Si bien, la presencia de población y de edificaciones aumenta, esto no debe ser indicador para que la temperatura del lugar se eleve sin procurar un control en ella.

Mientras los científicos, activistas y funcionarios se esfuerzan por encontrar soluciones para vivir en un planeta en constante calentamiento, las estrategias aquí presentadas en pro de controlar las altas temperaturas quedan como una opción que se puede emprender de forma individual o colectiva como iniciativas de responsabilidad social en las áreas del territorio tabasqueño con presencia de islas urbanas de calor.

Bibliografía

- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Ascione, F., Bianco, N., de' Rossi, F., Turni, G., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?. *Applied Energy*, 104, 845-859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.068>

- Barradas, V. L. (2013). La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *Oikos*, 7, 16-19.
- Bautista Villegas, F. (2023). Más de 7 mil apagones en Tabasco sólo en primer semestre del 2023: CFE. XeVT. <https://www.xevt.com/primeraplana/mas-de-7-mil-apagones-en-tabasco-solo-en-primer-semester-del-2023-cfe/285671>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2013). *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Naciones Unidas, Santiago de Chile: Inter-American Institute. IAI. <https://www.cepal.org/en/node/21153>
- Fernández, D. (2021). Pavimento frío podría combatir el cambio climático. *El Sol de Toluca*, 1-6. <https://oem.com.mx/elsoldetoluca/finanzas/pavimento-frio-podria-combatir-el-cambio-climatico-14756762>
- Global Cool Cities Alliance (GCCA). (2012). *A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements*. Cool roof tool kit, 8-15. https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit_Full.pdf
- Heavyside, C., & Macintyre, H. (2019). Potential benefits of cool roofs in reducing heat-related mortality during heatwaves in a European city. *Environment International*, 430-441. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.065>
- Hernández-Pérez, I. (2021). Influence of Traditional and Solar Reflective Coatings on the Heat Transfer of Building Roofs in Mexico. *Applied Sciences*, 3263. <https://doi.org/10.3390/app11073263>
- INEGI (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Keijzer, C. S. (2020). Espacios verdes: un recurso para la salud mental. Instituto de Salud Global Barcelona. <https://www.isglobal.org/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/espacios-verdes-un-recurso-para-la-salud-mental/6113078/0#:~:text=Una%20mayor%20disponibilidad%20y%20acceso,de%20prestar%20atenci%C3%B3n%20y%20concentrarse>
- Moon, J. (2021). The effect of the heatwave on the morbidity and mortality of diabetes patients; a meta-analysis for the era of the climate crisis. *Environmental Research*, 195, 110762. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110762>
- Piñeiro Sande, N., Marínez Melgar, J. L., Alemparte Pardiola, E., & Rodríguez García, J. C. (2004). Golpe de calor. *Emergencias*, 16, 116-125. <https://revistaemergencias.org/numeros-antiores/volumen-16/numero-3/golpe-de-calor/>
- Ravelo, C. (2024). Calor rompió récord histórico de mayo en Tabasco. *El Heraldo de Tabasco*. <https://oem.com.mx/elheraldodetabasco/local/cuando-fue-el-dia-mas-caluroso-de-mayo-en-tabasco-13119402>
- Rincón-Martínez J. C., García-Gómez C., & González-Trevizo M. E. (2022). Estimación del rango de confort higrotérmico para exteriores en dos bioclimas extremos de México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23 (02), 01-14. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.014>
- Wang, C., Wang, Z. H., & Yang, J. (2018). Cooling effect of urban trees on the built environment of contiguous United States. *Earth's Future*, 6(8), 1066-1081. <https://doi.org/10.1029/2018EF000891>
- Zimbrón, A. (2021). Pavimento frío, material de construcción que podría combatir el cambio climático. NOTIPRESS. <https://notipress.mx/tecnologia/pavimento-frio-material-construccion-podria-combatir-cambio-climatico-8358>

Transición energética y apropiación de tecnologías sustentables en comunidades originarias de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México

Yovany Galindo ^{1,*}, José Núñez ¹, Carlos A. García ¹, Anahi Arreaga ²

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

² Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente No. 1150, Col. Potinaspak, C.P. 29018, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

* Autor de correspondencia: jgalindo@enesmorelia.unam.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 22 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 30 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.448>

Resumen: Este trabajo documenta la implementación de tecnologías de energías renovables en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán en el periodo 2023-2024, como parte de una estrategia para mejorar el acceso a servicios básicos y reducir impactos ambientales en contextos rurales. La metodología consistió en conocer la perspectiva global y local para la implementación participativa de sistemas fotovoltaicos en escuelas y casetas de vigilancia, luminarias solares en espacios comunitarios, estufas de leña mejoradas, un biodigestor educativo y un sistema de captación de agua de lluvia, integrando además la capacitación técnica de estudiantes y habitantes. Los resultados muestran beneficios tangibles en electrificación, manejo de residuos, seguridad, salud y educación ambiental. Sin embargo, se identificaron barreras importantes como la falta de conocimientos técnicos, la resistencia al cambio de prácticas tradicionales de cocción, los picos de demanda eléctrica derivados de la carpintería local, y desigualdades de género en el acceso a la formación. Se concluye que la eficacia de estas tecnologías no depende únicamente de su desempeño técnico, sino de su apropiación cultural, social y organizativa, lo cual requiere enfoques de implementación sensibles al contexto comunitario y sostenidos en el tiempo.

Palabras clave: Transición energética; tecnologías sustentables; energía rural; equidad de género; pobreza energética.

Introducción

A nivel global, las tecnologías de energía limpia han sido ampliamente reconocidas por su potencial para enfrentar la crisis climática y mejorar el acceso a servicios energéticos en contextos vulnerables. Estas tecnologías contribuyen a la reducción de emisiones contaminantes y al fortalecimiento de modelos de desarrollo sustentable. Incluyen fuentes que generan electricidad o calor con bajas o nulas emisiones, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y la bioenergía.

En México, la transición energética comenzó a consolidarse a partir de la promulgación de la Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética en 2008. Esta legislación estableció las bases para diversificar la matriz energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y fomentar el uso de fuentes limpias.

En este contexto, diversas políticas públicas han buscado ampliar el acceso a estas fuentes en zonas rurales mediante la promoción de tecnologías renovables. Programas institucionales impulsados por dependencias como la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTEASE) han priorizado criterios de equidad territorial, viabilidad técnica y sostenibilidad económica para mejorar la cobertura energética en comunidades marginadas.

La introducción de tecnologías limpias, como los sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, estufas ecológicas de biomasa y biodigestores han resuelto necesidades energéticas básicas como la iluminación, la cocción de alimentos, el bombeo de agua o la carga de dispositivos. Además, estas tecnologías han demostrado ser efectivas en la reducción de emisiones contaminantes (Juárez-Hernández *et al.*, 2014; Hernández Pérez, 2021) y mejorar la salud pública, especialmente al sustituir estufas convencionales por modelos más eficientes que reducen la exposición al humo y sus efectos respiratorios adversos (Díaz Jiménez *et al.*, 2011; García-Martínez *et al.*, 2023).

El objetivo de este trabajo es presentar una perspectiva internacional y nacional sobre las tendencias en el estudio de tecnologías de energías renovables más estudiadas en contextos rurales. Como parte de este análisis, se incorpora el estudio de caso de la comunidad purépecha de San Francisco Pichátaro, en Michoacán, donde se han implementado diversas soluciones tecnológicas como sistemas fotovoltaicos, estufas ecológicas, biodigestores y captadores de agua pluvial.

Desarrollo

La relevancia de estudiar tecnologías de energías renovables no sólo radica en sus beneficios prácticos, sino también en la necesidad de comprender sus impactos y adaptaciones en distintos contextos. Analizar su adopción, eficiencia y sostenibilidad a nivel técnico, ambiental y social permite tomar decisiones informadas en el diseño de políticas públicas y proyectos comunitarios con pertinencia local.

A lo largo de la última década, la comunidad científica ha investigado una amplia gama de tecnologías con enfoques diversos, como se muestra en la Figura 1, que ilustra la cantidad de artículos y citas asociadas a cada una de ellas en contextos rurales globales. La Figura 1 revela que el sistema fotovoltaico es la tecnología más citada y documentada, seguido por la energía eólica, plantas solares, estufas de cocción y diversas aplicaciones basadas en biomasa, como biodigestores y gasificación.

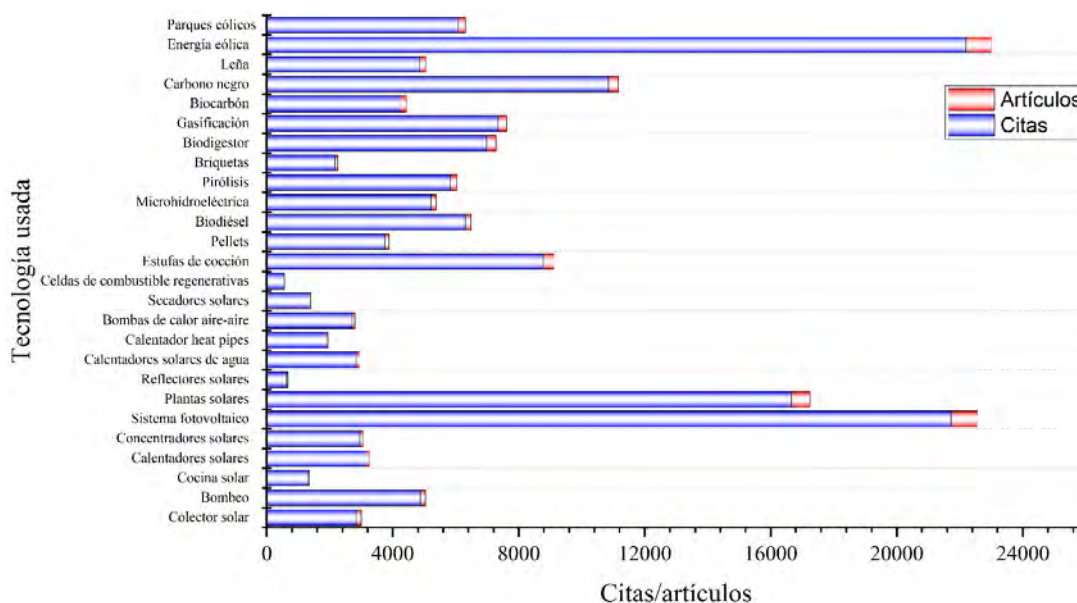


Figura 1. Número de artículos y citas científicas asociadas a tecnologías de energías renovables aplicadas en contextos rurales a nivel global, según búsqueda en la base de datos Scopus (consulta 2025, palabras claves: rural technologies, renewable energy, renewable energies y rural technology).

Según una revisión bibliográfica realizada en la base de datos Scopus, correspondiente al periodo 2014–2024, la Figura 2 muestra las tecnologías más investigadas por la comunidad científica de México en contextos rurales. La bioenergía se posiciona como el campo más estudiado, con 76 publicaciones y más de 1400 citaciones, seguido de la energía fotovoltaica, estufas solares y energía eólica. En contraste, tecnologías como las microhidroeléctricas, calentadores solares, concentradores solares y la geotermia presentan un número reducido de publicaciones, lo que sugiere oportunidades de investigación en esas áreas con orientación a comunidades rurales. La distribución evidencia tanto las prioridades de estudio actuales como los vacíos temáticos que pueden ser explorados en futuros trabajos.

Entre las tecnologías sustentables más utilizadas en las comunidades indígenas de Michoacán destacan los sistemas de cocción solar, los sistemas de purificación solar de agua y los dispositivos multipropósito para el calentamiento y tratamiento de recursos básicos. Estas tecnologías han sido desarrolladas en varias generaciones, pasando de prototipos iniciales a diseños validados por los propios usuarios, con mejoras tanto en funcionalidad como en apropiación social.

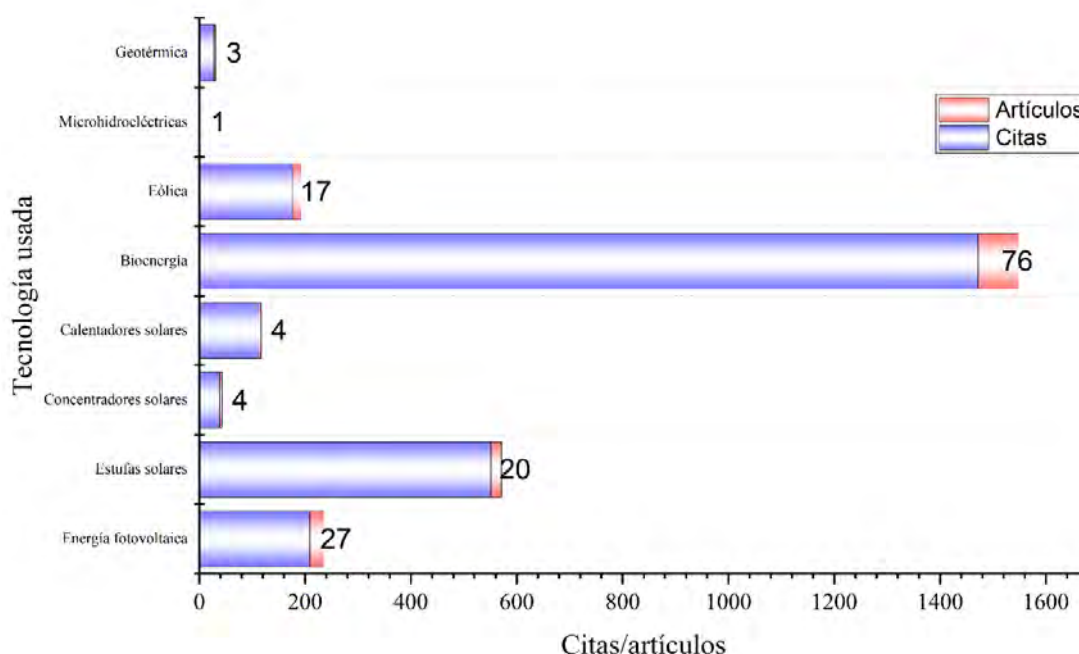


Figura 2. Análisis bibliométrico por tecnología renovable en zonas rurales de México. Datos obtenidos a partir de una búsqueda temática en Scopus (consulta 2025, palabras claves: rural technologies mexico, renewable energy mexico, renewable energies mexico y rural technology mexico).

A lo largo de los últimos diez años, se ha registrado un crecimiento constante en la implementación de tecnologías sustentables en comunidades rurales, pasando de unas cuantas unidades en sus etapas iniciales a más de 200 familias beneficiadas directamente y más de 100 metros cuadrados de superficie instalada para la captación solar. En este mismo periodo, se han distribuido e instalado más de 10,000 estufas ecológicas, lo que representa un avance significativo en la mejora de las condiciones de salud y el uso eficiente de la biomasa (Díaz Jiménez *et al.*, 2011). Este proceso ha estado acompañado por un esfuerzo formativo sostenido: aproximadamente 10,000 personas han sido capacitadas en el uso, mantenimiento y reproducción de estas tecnologías, promoviendo su apropiación y sostenibilidad (López-Sosa *et al.*, 2018).

Implementación de tecnologías en San Francisco Pichátaro

San Francisco Pichátaro es una comunidad indígena purépecha ubicada en el estado de Michoacán, México, dentro del municipio de Tingambato. Su localización geográfica se encuentra aproximadamente en las coordenadas 19.576156° N, -101.812981° O, en una zona boscosa de la Meseta Purépecha. Esta región se caracteriza por su fuerte identidad comunitaria, su relación estrecha con el bosque y un notable nivel de organización social que ha facilitado la implementación de proyectos enfocados en el bienestar colectivo, particularmente en lo relacionado con el acceso a energía y servicios básicos mediante tecnologías sustentables.

Como parte de estas acciones, se han instalado diversas tecnologías de energía renovable y manejo ambiental con un enfoque participativo. Entre ellas, destacan los sistemas fotovoltaicos autónomos colocados en una escuela de nueva creación, así como en casetas de vigilancia y en el panteón municipal. Estas instalaciones han permitido dotar



Figura 3. Implementación de sistemas fotovoltaicos en la comunidad de San Francisco Pichátaro en casetas de vigilancia, escuelas y panteón (CONACYT, 2021).

de electricidad a espacios que previamente carecían de acceso a la red, mejorando sus condiciones operativas y de seguridad (Figura 3).

Además, se instalaron luminarias solares en puntos estratégicos, con participación comunitaria tanto en la selección de los sitios como en la fabricación de estructuras de soporte (Figura 4 a). Paralelamente, se distribuyeron aproximadamente 70 estufas de leña mejoradas, entre ellas los modelos Patsari, Keri, Tuya y Patsari Móvil (Figura 4 b). Estas tecnologías han permitido reducir significativamente el consumo de leña y la exposición al humo doméstico, al tiempo que fomentaron el empleo y la capacitación local, ya que algunas estufas fueron fabricadas por los propios habitantes.



Figura 4. (a) Participación de la comunidad San Francisco Pichátaro en la selección y capacitación de tecnologías. (b) Implementación de diferentes estufas ecológicas (CONACYT, 2021).

Además de las tecnologías energéticas, se llevaron a cabo instalaciones orientadas al uso eficiente y sostenible de recursos naturales. En el Colegio de Bachilleres del Estado de Michoacán (COBAEM) de San Francisco Pichátaro (ubicado en las coordenadas 19.566312° N, -101.802304° O) se implementó un biodigestor HomeBiogas 2.0 para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos. Este sistema tiene una función tanto práctica como educativa, pues es utilizado en laboratorios y áreas verdes escolares (Figura 5 a). Asimismo, en la escuela secundaria se construyó un sistema de captación de agua de lluvia con una capacidad de 5000 litros, equipado con filtro tipo tlaloque y mecanismos de tratamiento inicial, que permite abastecer sanitarios y áreas verdes, fortaleciendo el uso responsable del agua y promoviendo una cultura ambiental entre estudiantes y docentes (Figura 5 b).



Figura 5. (a) Implementación de biodigestor en el COBAEM de San Francisco Pichátaro en la selección y capacitación de tecnologías. (b) Implementación de sistema de captación de agua en escuela secundaria (CONACYT, 2021).

Barreras en la adopción de las tecnologías

Durante el proceso de instalación y seguimiento de las tecnologías sustentables en San Francisco Pichátaro, se identificaron diversas barreras que condicionaron su adopción y sostenibilidad. Una de las principales limitaciones fue la falta de conocimiento técnico por parte de los usuarios, lo cual generaba incertidumbre respecto al uso adecuado de los sistemas y temor a dañarlos. Esto fue particularmente evidente en tecnologías como los sistemas fotovoltaicos autónomos, donde la manipulación de baterías, inversores o paneles solares requería cierto nivel de capacitación. También se observó que la comunidad cuenta con una economía local fuertemente ligada a la carpintería, lo que implica el uso de herramientas eléctricas con picos de demanda energética elevados, esta característica dificultó el diseño de sistemas de energía autónoma capaces de cubrir de forma continua y segura los requerimientos eléctricos.

Otra barrera importante fue la desconfianza comunitaria hacia iniciativas externas, derivada de experiencias previas en las que los proyectos no fueron ejecutados de forma participativa o no cumplieron con las expectativas generadas. Esta resistencia se expresó en una baja participación inicial en algunas actividades, así como en dudas respecto a la pertinencia de las tecnologías ofrecidas. Asimismo, se observó que algunas estructuras de organización comunitaria no estaban preparadas para asumir la gestión técnica y operativa de las tecnologías implementadas. La ausencia de mecanismos formales para el seguimiento, así como la rotación en los liderazgos locales, dificultaron la continuidad de acciones. Estos hallazgos resaltan la importancia de diseñar estrategias de acompañamiento más integrales, que incluyan capacitación técnica, fortalecimiento comunitario y procesos de apropiación cultural de la tecnología.

Además, se evidenciaron problemas de género relacionados con la distribución desigual del conocimiento técnico. Durante los talleres y capacitaciones, se observó que la participación masculina predominaba en los espacios de formación técnica; mientras que, muchas mujeres principales usuarias de las estufas no accedían plenamente a esos conocimientos, lo que generaba brechas en la apropiación real de la tecnología. También se detectaron tensiones cuando las decisiones comunitarias eran tomadas mayoritariamente por hombres, sin considerar las necesidades específicas de las mujeres usuarias. Estos elementos subrayan la importancia de incorporar enfoques sensibles al contexto cultural y de género en el diseño, implementación y seguimiento de proyectos tecnológicos en comunidades indígenas.

Tendencias en el estudio y adopción de las tecnologías

La investigación sobre tecnologías de energía limpia en comunidades rurales ha crecido en los últimos 10 años a un ritmo de 11% anual. De acuerdo con el análisis bibliográfico realizado, los países India, Estados Unidos, China, Reino Unido, Alemania, España, Italia, Sudáfrica y Malasia concentran cerca del 50 % de las publicaciones, dentro de un universo de más de 100 países que han contribuido en esta área del conocimiento. Los tópicos más investigados giran en torno a; “renewable energy, sustainable development, electricity supply, wind turbines, battery technologies, innovation adoption, agricultural technology, information and communication technologies, y biogas anaerobic digestion”.

Estas tendencias indican que la investigación está priorizando el estudio al acceso a electricidad como eje para el desarrollo rural. Asimismo, se observa un creciente interés en el desarrollo de soluciones energéticas aplicadas a la agricultura y a la digitalización rural, mediante el uso de sistemas de información y comunicación energizados con fuentes renovables. Al mismo tiempo, tecnologías como el biogás y la digestión anaeróbica están ganando protagonismo por su potencial en el manejo de residuos orgánicos y la producción de energía descentralizada.

Las tendencias actuales en el estudio de las barreras para la adopción de tecnologías de energía limpia a nivel internacional, se centran en aspectos como la aceptación pública, los modelos de propiedad, los esquemas de incentivos como las tarifas de alimentación, así como en la toma de decisiones complejas mediante análisis de criterios múltiples. También destacan las investigaciones sobre la adopción de sistemas fotovoltaicos, particularmente en lo relacionado con su aceptación social, su sostenibilidad a largo plazo y los desafíos técnicos para su integración en redes inteligentes y sistemas de gestión energética. Estos enfoques reflejan que, más allá del desarrollo tecnológico, la adopción futura de energías renovables en entornos rurales está condicionada por factores económicos, sociales, institucionales y culturales que requieren atención desde una perspectiva multidisciplinaria.

El análisis de los términos clave en publicaciones sobre estudios en energías limpias en México revela un crecimiento en el estudio de tópicos como *bioenergy*, *solar energy*, *wind power* y *renewable energy systems*, así como en temas vinculados a la transición energética. Esta tendencia indica un enfoque más aplicado y orientado a soluciones concretas para el contexto nacional. En contraste, términos como *renewable resource* y *energy planning* presentan un declive, lo que sugiere un desplazamiento hacia líneas más especializadas. Conceptos como *electricity generation* se mantienen estables, reflejando su papel transversal.

En el análisis de barreras para la implementación de energías limpias, se observa una creciente atención a factores sociales y estructurales. Términos como *political ecology*, *patriarchy*, *social exclusion* y *poverty alleviation* evidencian que la desigualdad y la exclusión limitan el acceso equitativo a estas tecnologías. También emergen enfoques ligados a la *urban sustainability* y la *environmental technology*, que destacan la necesidad de soluciones contextualizadas. Aunque se mantiene el interés en fuentes como la energía eólica e hidroeléctrica, conceptos como *energy price* y *business service* señalan que las barreras económicas siguen siendo relevantes. Esto reafirma la importancia de abordar la transición energética desde un enfoque integral, que incluya dimensiones sociales, económicas y territoriales.

Conclusiones

Los hallazgos de este trabajo evidencian que las tecnologías de energía limpia han ganado protagonismo como herramientas clave para promover el desarrollo sustentable en comunidades rurales. A nivel internacional, las investigaciones se orientan hacia soluciones aplicadas al suministro eléctrico, la agricultura y la digitalización, con énfasis en tecnologías como la bioenergía, los sistemas fotovoltaicos y la digestión anaeróbica. En México, estas tendencias se reflejan en el avance de políticas públicas y programas que han impulsado la implementación de tecnologías sustentables en contextos indígenas, como en San Francisco Pichátaro. No obstante, persisten barreras que condicionan su adopción, relacionadas con factores técnicos, sociales, institucionales y de género. Estas limitaciones, junto con la evidencia bibliométrica sobre los tópicos más estudiados, subrayan la necesidad de enfoques integrales y culturalmente sensibles que fortalezcan la apropiación tecnológica. En este sentido, los trabajos futuros deberán incorporar de forma estrecha las conexiones con factores sociales para superar las barreras estructurales y avanzar hacia una transición energética más justa, equitativa y sostenible.

Bibliografía

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2021–2024). *Desarrollo e implementación de alternativas energéticas sustentables en comunidades rurales de la Meseta Purépecha*, Michoacán (Proyecto PRONACES 319333, FOP04-2021-03). CONACYT.
- Díaz Jiménez, R., Berrueta Soriano, V., & Masera Cerutti, O. (2011). *Estufas de leña*. Cuadernos Temáticos sobre Bioenergía, No. 3. Red Mexicana de Bioenergía, A.C., México.
- García-Martínez, R., Hernández-Soto, F. N., & Rodríguez-Soto, J. M. (2023). Uso de leña y estufas ecológicas en comunidades rurales de la región de Valle de Bravo, Estado de México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 2376–2386. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.8860
- Hernández Pérez, J. (2021). Efecto del consumo de energía renovable en las emisiones de gases de efecto invernadero en países con ingresos bajos y altos. *Acta Universitaria*, 31. <https://doi.org/10.15174/au.2021.3030>
- Juárez-Hernández, S., & León, G. (2014). Energía eólica en el Istmo de Tehuantepec: desarrollo, actores y oposición social. *Problemas del Desarrollo*, 45(178), 139–162. [https://doi.org/10.1016/S0301-7036\(14\)70663-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7036(14)70663-2)
- López-Sosa, L. B., González-Avilés, M., Servín Campuzano, H., & García-Avilés, M. (2018). *10 años de tecnologías sustentables para el sector indígena michoacano: una experiencia desde la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán*. Universidad Intercultural Indígena de Michoacán.

Refrigeración magnética: enfriar sin contaminar

Ana María Bolarín-Miró, Cristhian Antonio Taboada-Moreno y Félix Sánchez-De Jesús *

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México

* Autor de correspondencia: fsanchez@uaeh.edu.mx; Tel.: +527717172000

Artículo de divulgación científica

Recibido: 28 de mayo de 2025 Aceptado: 28 de junio de 2025 Publicado: 2 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.461>

Resumen: En este artículo se analiza la refrigeración magnética, como una alternativa ecológica a la refrigeración convencional. Esta tecnología se basa en el efecto magnetocalórico, una propiedad de ciertos materiales para cambiar su temperatura mediante la aplicación y remoción de campos magnéticos y que permite enfriar sin utilizar gases contaminantes, presentándose como una alternativa ecológica y eficiente a la refrigeración convencional. Se abordan los dos tipos principales de materiales magnetocalóricos: metálicos y cerámicos, describiendo sus características, diferencias y ventajas. Se incluye una revisión actualizada del estado del arte, apoyada en estudios recientes que analizan tanto materiales avanzados como técnicas para su obtención. Además, se explican los parámetros fundamentales del efecto magnetocalórico, como el cambio de entropía magnética y la capacidad de enfriamiento, con ejemplos de cálculos sencillos para facilitar su comprensión. Las aplicaciones en dispositivos de refrigeración doméstica, industrial y médica se discuten para resaltar el impacto potencial de esta tecnología. Finalmente, se concluye que el desarrollo y la implementación de materiales magnetocalóricos ofrecen una vía prometedora para reducir el consumo energético y la contaminación ambiental asociada con los sistemas tradicionales, fomentando un futuro más sostenible.

Palabras clave: refrigeración magnética; refrigeración ecológica; efecto magnetocalórico; magnetismo.

Introducción

En una sociedad cada vez más consciente de la importancia de cuidar el medio ambiente, la manera en que se refrigeran espacios habitacionales, alimentos, medicamentos y equipos tecnológicos se vuelve un tema de vital relevancia, especialmente estos últimos, cada vez más requerido para las actividades diarias y especialmente con el uso de sistemas informáticos que brindan herramientas de inteligencia artificial, los cuales requieren sistemas de refrigeración robustos y permanentes. En muchos sistemas de refrigeración convencionales, como los refrigeradores o los aires acondicionados que se usan en casas o en la industria, se utilizan ampliamente gases de tercera generación llamados hidrofluorocarbonos (HFC) que a pesar de ser menos contaminantes que sus predecesores, todavía tienen un alto potencial de contribuir al calentamiento global. Por tal motivo, estos gases están siendo reemplazados gradualmente por gases de cuarta generación denominados Hidrofluoroolefinas (HFO). Los HFO, aunque son más amigables con el medio ambiente, siguen siendo objeto de estudio debido a inconvenientes relacionados con sus propiedades físico-químicas tales como: los productos de degradación, la toxicidad, la inflamabilidad la estabilidad térmica y el mecanismo de descomposición (Zhang et. al., 2024, Bolarín et al., 2024). Además, su producción y uso consumen grandes cantidades de energía eléctrica, a menudo proveniente de fuentes no renovables, contribuyendo negativamente al ecosistema. Por esta razón, científicos e ingenieros buscan alternativas más limpias y eficientes que puedan sustituir estas tecnologías tradicionales y reducir el daño ambiental. Una de las alternativas más innovadoras y prometedoras es la refrigeración magnética, que se basa en un fenómeno físico, denominado efecto magnetocalórico, descubierto hace más de un siglo pero que ha cobrado interés real en las últimas décadas, y que se analizará en los siguientes párrafos.

Desarrollo

Estado del Arte

Durante muchos años, el gadolinio y sus aleaciones han sido los materiales magnetocalóricos más importantes para estudiar y aprovechar su intensa respuesta magnetocalórica cercana a la temperatura ambiente. Sin embargo, el alto costo y la limitada disponibilidad de estos elementos por ser del grupo de las tierras raras (materiales estratégicos), (Morales et al., 2024) han motivado la búsqueda de otras opciones más accesibles y sostenibles.

Actualmente, las investigaciones se han diversificado mucho, explorando dos grandes familias: los materiales metálicos y los cerámicos o inorgánicos. Los materiales metálicos, como algunas aleaciones basadas en manganeso, hierro y silicio, han mostrado un gran potencial porque sus propiedades pueden ser controladas mediante cambios en la composición química o tratamientos térmicos especiales. Por ejemplo, aleaciones como $\text{MnFe}(\text{P}, \text{Si})$ o $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ tienen transiciones o cambios en comportamientos magnéticos muy importantes, que incrementan el efecto magnetocalórico (Ghorai *et al.*, 2024). Por otro lado, los materiales cerámicos, tipo óxidos metálicos, como los óxidos de hierro o ferritas y los óxidos de manganeso o manganitas, con una organización de sus átomos en una estructura tipo perovskita, ofrecen ventajas en estabilidad química y bajo costo, aunque generalmente muestran un efecto magnetocalórico más moderado que la presentada por los materiales metálicos. En el afán de mejorar sus propiedades, los científicos continúan explorando nuevos caminos, como el caso de los materiales compósitos, formados por la combinación de varios materiales, donde combinan características de ambos, y podrían abrir nuevas posibilidades para incrementar su eficiencia (Taboada *et al.*, 2023).

En los últimos años, el avance tecnológico de los sistemas de control e informáticos ha acelerado la investigación en este campo. Herramientas de inteligencia artificial ayudan a predecir qué combinaciones de materiales pueden funcionar mejor, reduciendo tiempo y costos en laboratorio. Investigaciones recientes han logrado mejoras significativas en la eficiencia del efecto magnetocalórico, acercando estos materiales hacia aplicaciones comerciales (Law *et al.*, 2023; Yuan *et al.*, 2024).

Características

El efecto magnetocalórico, mostrado en la Figura 1, consiste en que ciertos materiales pueden calentarse o enfriarse al ser expuestos a ciclos de magnetización-desmagnetización, sin necesidad de usar gases refrigerantes. Tal como se observa en la Figura 1, cuando un material no está bajo la influencia de un campo magnético externo (B), tiene sus espines electrónicos o momentos magnéticos de espín posicionados al azar (Figura 1a), pero al aplicar un campo magnético sobre un material magnetocalórico, los momentos magnéticos en el material se ordenan en la misma dirección que el campo magnético externo aplicado (Figura 1b), liberando calor y aumentando la temperatura (Taboada *et al.*, 2020). Al retirar el campo, estos momentos se desordenan, absorbiendo calor y enfriando el material.

El efecto que ejerce un campo magnético externo (B) sobre algunos materiales específicos, hace posible el diseño de un ciclo de refrigeración magnética, mostrado esquemáticamente en la Figura 2, por el cual al aplicar un campo magnético se generan una liberación de calor ($+Q$), aumentando la temperatura, mientras que, al retirar el campo, el material absorbe energía calorífica o calor del material, enfriándolo ($-Q$). Por lo tanto, la refrigeración magnética se basa en aplicar ciclos de magnetización-desmagnetización (calentamiento-enfriamiento) a un material magnetocalórico que se encuentra en contacto con un fluido, propiciando un intercambio de energía entre ambos.

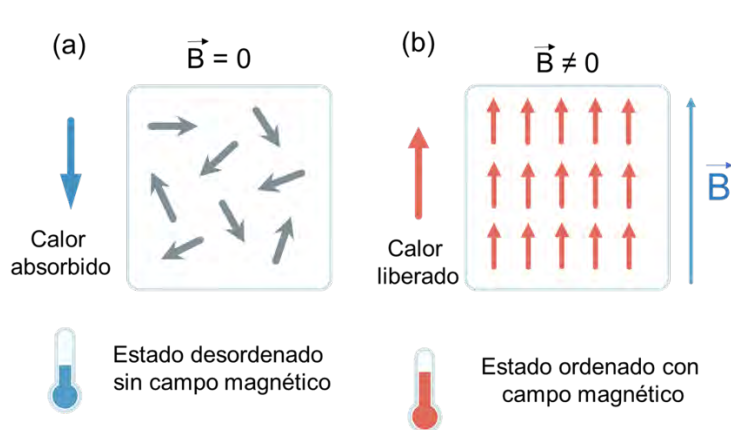


Figura 1: Reorientación de los espines a causa del efecto magnetocalórico: (a) sin la aplicación de campo magnético externo ($B=0$) los espines del material están ordenados aleatoriamente y desordenado, (b) al aplicar un campo externo ($B \neq 0$) se orientan sus espines en la dirección del campo, liberando calor.

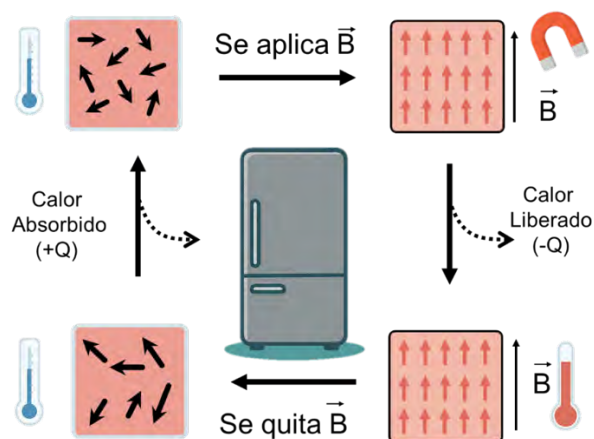


Figura 2: Esquema ilustrativo del ciclo de refrigeración basado en el efecto magnetocalórico, donde se aprecia la alineación y desalineación de los momentos magnéticos y el cambio de temperatura asociado.

Para comprender mejor cómo funcionan estos materiales y poder aplicarlos para sistemas de refrigeración, es útil conocer los dos parámetros más importantes que describen el efecto magnetocalórico, mostrados gráficamente en la Figura 3. El primero es el cambio de entropía magnética (ΔS_M), es una propiedad asociada al cambio de orden-desorden de los momentos magnéticos, la cual indica la cantidad de calor que el material puede intercambiar debido a la reorganización de sus momentos magnéticos. El segundo es la capacidad de refrigeración (RC), entendida como la capacidad para absorber o ceder energía calorífica de los materiales, y que se mide matemáticamente como el área bajo la curva del cambio de entropía frente a la temperatura. Estos parámetros se determinan mediante experimentos donde se mide la magnetización del material a diferentes temperaturas y campos magnéticos. Cabe mencionar que, en la actualidad, la simulación computacional también permite estimar estos valores con gran precisión (Zhang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024).

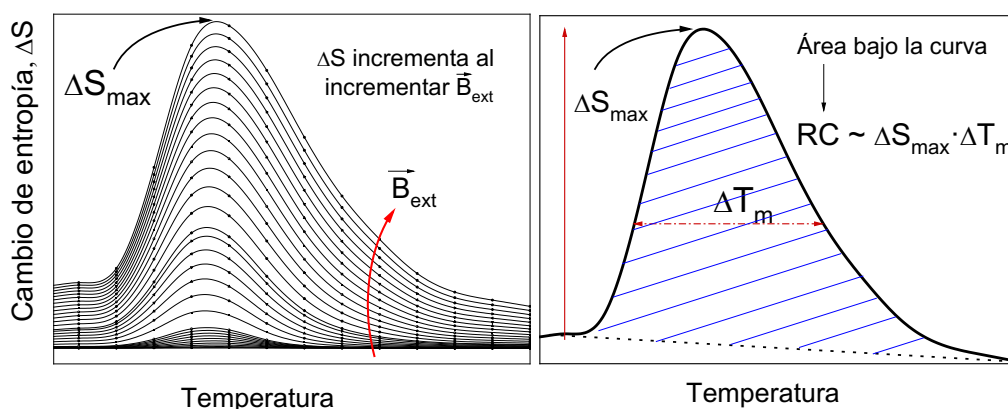


Figura 3: Curvas características de cambio de entropía magnética (ΔS_M) y la determinación de la capacidad de refrigeración (RC), frente a la temperatura y el campo magnético aplicado para un material magnetocalórico.

Aplicaciones

La refrigeración magnetocalórica promete revolucionar varios sectores. En el hogar, podría reemplazar a los refrigeradores tradicionales, eliminando la necesidad de gases contaminantes y reduciendo el consumo eléctrico (Bolarín *et al.*, 2020). En la industria, los sistemas de enfriamiento basados en este fenómeno serían más silenciosos, duraderos y menos propensos a fugas de refrigerantes. Además, en la medicina, la refrigeración portátil para transporte de vacunas o medicamentos sensibles podría beneficiarse enormemente de esta tecnología, además del uso de materiales que presentan el efecto magnetocalóricos en un rango estrecho de temperatura cercana a la temperatura corporal, en el tratamiento de cáncer a través de la metodología denominada hipertermia, que ya es una realidad.

Conclusiones

La tecnología de refrigeración basada en materiales magnetocalóricos representa una opción limpia, eficiente y prometedora para sustituir los sistemas convencionales que han demostrado ser dañinos para el planeta. Aunque todavía enfrenta retos, como la optimización del desempeño de los materiales, reducción de costos y desarrollo de sistemas comerciales, el avance científico es muy alentador. La colaboración interdisciplinaria, desde la física y química hasta la ingeniería y la computación, está acelerando la llegada de esta tecnología al mercado. Su aplicación masiva en los diferentes sectores podría contribuir significativamente a mitigar el cambio climático, reducir la dependencia de combustibles fósiles y promover un futuro más sostenible para las próximas generaciones.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen el apoyo financiero de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) bajo el proyecto CF-2023-I-769.

Bibliografía

Xinxin Zhang , Yingzhen Li (2024). A review of recent research on hydrofluoroolefin (HFO) and hydrochlorofluoroolefin (HCFO) refrigerants. *Energy*, 311, 133423. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133423>

- Bolarín-Miró, A. M., Taboada-Moreno, C. A., & Cortés-Escobedo, C. A. (2024). Tuning the magnetocaloric properties of lanthanum-strontium manganite by rare-earth Nd³⁺ doping. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 12665–12674. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13565-y>
- Bolarín-Miró, A. M., Taboada-Moreno, C. A., Cortés-Escobedo, C. A., Rosales-González, O., Torres-Villaseñor, G., & Sánchez-De Jesús, F. (2020). Effect of high-energy ball milling on magnetocaloric properties of La_{0.7}Ca_{0.2}Sr_{0.1}MnO₃. *Applied Physics A*, 126, 369. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03555-w>
- Ghorai, S., Okamoto, S., Matsuda, T., Taniyama, T., & Kindo, K. (2024). Giant magnetocaloric effect in the (Mn,Fe)NiSi-system. *Physical Review Materials*, 8(12), 124401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.8.124401>
- Law, J. Y., Yeo, S. J., Goh, S. H., Sivarajan, R., & Omar, M. H. (2023). Current perspective in magnetocaloric materials research. *Journal of Applied Physics*, 133(4), 040903. <https://doi.org/10.1063/5.0130035>
- Liu, W., Zhang, Y., Wang, J., & Chen, H. (2024). A matter of performance & criticality: a review of rare-earth-based magnetocaloric intermetallic compounds for hydrogen liquefaction. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2405.01128>
- Morales Álvarez, F., Gómez, A., & Pérez, L. (2023). Magnetocaloric effect of nanostructured La_{0.6}Sr_{0.4}CoO₃. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2310.05722>
- Taboada-Moreno, C. A., Bolarín-Miró, A. M., Pedro-García, F., Cortés-Escobedo, C. A., & Sánchez-De Jesús, F. (2023). Role of Gd³⁺ on the magnetocaloric properties of lanthanum-strontium manganite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 570, 170542. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170542>
- Taboada-Moreno, C. A., Sánchez-De Jesús, F., Pedro-García, F., Cortés-Escobedo, C. A., Betancourt-Cantera, J. A., Ramírez-Cardona, M., & Bolarín-Miró, A. M. (2020). Large magnetocaloric effect near room temperature in Sr²⁺ doped La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 496, 165887. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165887>
- Yuan, J., Li, X., Wang, Y., Zhang, X., & Liu, H. (2024). Enhancing magnetocaloric material discovery: A machine learning approach using an autogenerated database. *AIP Advances*, 14(8), 085125. <https://doi.org/10.1063/5.0206855>
- Zhang, Z., Chen, Q., Li, L., Wang, R., & Zhao, Y. (2023). Structural, magnetic and magnetocaloric properties in distorted RE₂NiTiO₆ double perovskite compounds. *Journal of Physics: Energy*, 5(1), 014017. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/acb176>
- Zheng, S.-H., Li, J., Wang, X., & Chen, Y. (2023). Excellent magnetocaloric performance of Fe₇Ce₁₃B₉ metallic glasses. *Materials*, 16(12), 4393. <https://doi.org/10.3390/ma16124393>

Diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético

Alida Ramirez-Jimenez ¹, José Rafael Dorrego-Portela ² y Quetzalcoatl Hernandez-Escobedo ^{3,*}

¹ Escuela Internacional de Doctorado, Universidad de Almería, Almería, Andalucía, España.

² Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Tehuantepec, Oaxaca, México.

³ Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia: ghernandez@unam.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de marzo de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 2 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.401>

Resumen: El diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético representa una evolución en la generación de energía renovable, combinando la producción eólica con sistemas de almacenamiento para optimizar la eficiencia y la estabilidad del suministro eléctrico. Estos parques integran aerogeneradores con tecnologías de almacenamiento, como baterías (litio-ion, flujo redox) o sistemas de almacenamiento térmico, permitiendo almacenar el exceso de energía generada durante períodos de alta producción y liberarla en momentos de baja generación o alta demanda. Esto reduce la intermitencia típica de la energía eólica, mejorando la integración en la red eléctrica y maximizando el aprovechamiento de los recursos renovables. El diseño de estos sistemas requiere un enfoque multidisciplinario, considerando factores como la ubicación geográfica, la capacidad de generación eólica, la demanda energética local y las características del sistema de almacenamiento. Además, se optimiza la gestión energética mediante algoritmos avanzados que predicen la producción eólica y la demanda, ajustando la carga y descarga del almacenamiento para maximizar la rentabilidad y minimizar el impacto ambiental. Estos parques híbridos son clave en la transición energética, ya que incrementan la flexibilidad y confiabilidad de las redes, reducen la dependencia de combustibles fósiles y contribuyen a la descarbonización del sector energético.

Palabras clave: Parques eólicos; energías renovables; almacenamiento de energía.

Introducción

La transición hacia un sistema energético sostenible y descarbonizado es uno de los mayores desafíos globales del siglo XXI. En este contexto, las energías renovables, como la eólica, han emergido como pilares fundamentales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. Sin embargo, la naturaleza intermitente y variable de la energía eólica plantea desafíos significativos para su integración en las redes eléctricas, especialmente en términos de estabilidad y confiabilidad del suministro (IRENA – International Renewable Energy Agency, 2025). Para abordar estos desafíos, el diseño de parques eólicos híbridos con sistemas de almacenamiento energético ha ganado relevancia, ya que combina la generación de energía eólica con tecnologías de almacenamiento que permiten gestionar de manera más eficiente los excedentes energéticos y garantizar un suministro continuo.

Los parques eólicos híbridos no solo maximizan la utilización de los recursos renovables, sino también mejoran la flexibilidad de la red, reducen los costos operativos y disminuyen la dependencia de combustibles fósiles para equilibrar la demanda energética (GWEC, 2025). Además, estos sistemas son particularmente útiles en regiones con alta penetración de energías renovables, donde la variabilidad de la generación puede afectar la estabilidad de la red. Este trabajo tiene como objetivo explorar el estado del arte en el diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético, analizando las tecnologías más avanzadas, los desafíos técnicos y económicos, y las tendencias futuras en este campo.

Tecnologías de Generación Eólica y su Integración con Almacenamiento

La energía eólica ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, convirtiéndose en una de las fuentes de energía renovable más importantes a nivel global. Según el Global Wind Energy Council (GWEC, 2025), la capacidad instalada de energía eólica superó los 900 GW en 2023, con proyecciones de alcanzar los 1.500 GW para 2030. Sin embargo, la integración de grandes cantidades de energía eólica en la red eléctrica presenta desafíos técnicos, como la variabilidad en la generación y la dificultad para predecir con precisión los recursos eólicos (IRENA – International Renewable Energy Agency, 2025).

Para abordar estos desafíos, los parques eólicos híbridos han surgido como una solución innovadora. Estos sistemas combinan la generación eólica con tecnologías de almacenamiento energético, como baterías electroquímicas, sistemas de almacenamiento térmico o hidrógeno verde, permitiendo una gestión más eficiente de la energía generada (AL Jarrah & AL Dwairi, 2024). Por ejemplo, las baterías de litio-ion, debido a su alta densidad energética y eficiencia, son una de las tecnologías de almacenamiento más utilizadas en combinación con parques eólicos (Ayyildiz & Erdogan, 2024).

Diseño y optimización de parques eólicos híbridos

El diseño de parques eólicos híbridos con almacenamiento energético requiere un enfoque multidisciplinario que considere aspectos técnicos, económicos y ambientales. Uno de los principales desafíos es la optimización del tamaño y la capacidad de los sistemas de almacenamiento en relación con la capacidad de generación eólica. Un sistema de almacenamiento sobredimensionado puede aumentar los costos del proyecto, mientras que uno subdimensionado puede limitar la capacidad de gestionar la variabilidad de la generación eólica (de Moura Ribeiro *et al.*, 2024).

Para abordar este desafío, se han desarrollado modelos de optimización que utilizan algoritmos avanzados para determinar la configuración óptima de los sistemas híbridos. Estos modelos consideran factores como la variabilidad del recurso eólico, los patrones de demanda energética, los costos de inversión y operación, y las políticas regulatorias (Dhoot *et al.*, 2021). Por ejemplo, estudios recientes han utilizado técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático, para predecir la generación eólica y optimizar la gestión del almacenamiento energético (Drapalik *et al.*, 2024).

Desarrollo

El estudio se desarrolla en Juchitán, en el Istmo de Tehuantepec Oaxaca México. En la Figura 1 se observa el sitio estudiado. El diseño y análisis de parques eólicos híbridos con sistemas de almacenamiento energético requieren un enfoque sistemático que combine la evaluación de recursos, la selección de tecnologías, la modelización de sistemas y la optimización de la gestión energética. A continuación, se describe la metodología empleada en este estudio, que incluye la recopilación de datos, el diseño del sistema híbrido, la simulación de escenarios y la evaluación de resultados.

Sitio estudiado

El estudio se realiza en una zona altamente ventosa como se muestra en la Figura 1. El primer paso en el diseño de un parque eólico híbrido es la evaluación del recurso eólico en la ubicación seleccionada. Para ello, se utilizaron datos históricos de rapidez y dirección del viento, obtenidos de bases de datos globales, como MERRA 2. Estos datos se procesaron utilizando el software especializado WAsP, para generar modelos de microescala del recurso eólico y estimar la energía anual generable en el sitio (Esnaola *et al.*, 2024).

Además, se analizaron los patrones de demanda energética de la región, utilizando datos de operadores del Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE) (Centro Nacional de Control de Energía | Gobierno | gob.mx, s. f.).



Figura 1. Sitio estudiado.

Esto permitió identificar los períodos de alta y baja demanda, así como las fluctuaciones estacionales, que son críticos para dimensionar el sistema de almacenamiento, (ver Figura 2).

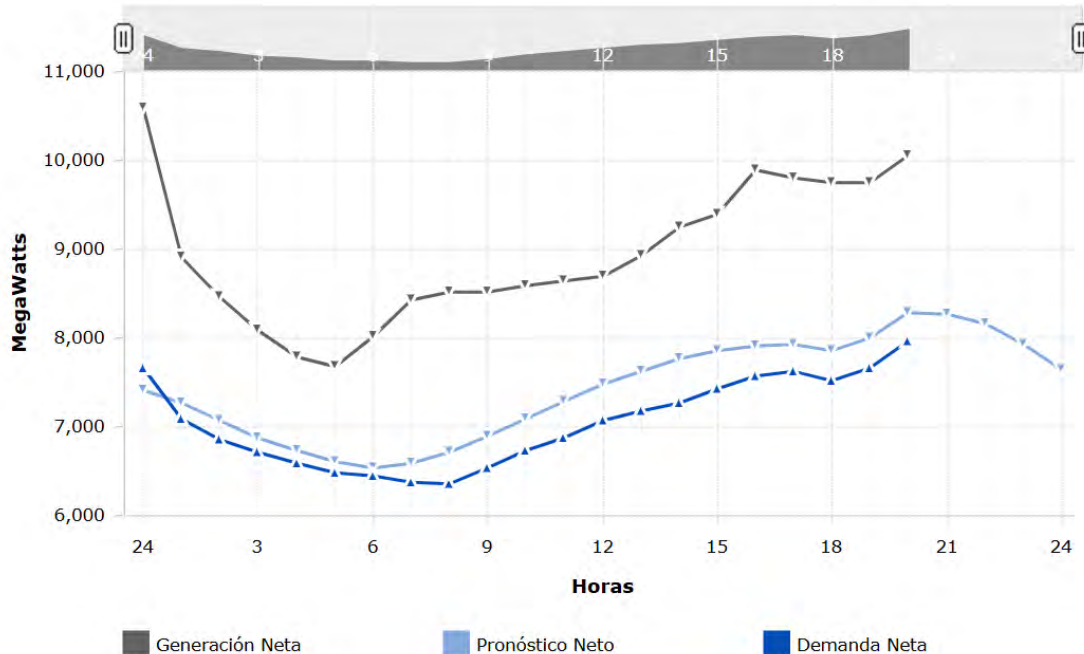


Figura 2. Demanda de la región.

Como se observar en la Figura 2, la demanda en la región occidental presenta su incremento a partir de las 15:00 h teniendo su pico a las 24:00 h.

Tecnologías de generación y almacenamiento

En función de las características del recurso eólico y la demanda energética, se seleccionaron las tecnologías de generación y almacenamiento más adecuadas. Para la generación eólica, se consideraron aerogeneradores de última generación con capacidades que oscilan entre 1 MW y 2 MW, dependiendo de las condiciones del sitio. Estos aerogeneradores fueron seleccionados utilizando la distribución de Weibull y el coeficiente de potencia del aerogenerador, así se garantiza la selección adecuada del aerogenerador (Fatahian *et al.*, 2024). En cuanto al almacenamiento energético, se evaluaron varias tecnologías las Baterías de litio-ion (Li-ion), baterías de flujo redox, y almacenamiento de hidrógeno.

Baterías de litio-ion

Las baterías de litio-ion (Li-ion) las cuales se han convertido en una de las tecnologías de almacenamiento de energía más utilizadas en aplicaciones que van desde dispositivos electrónicos portátiles hasta sistemas de almacenamiento a gran escala para redes eléctricas. Su popularidad se debe a su alta densidad energética, eficiencia y capacidad para soportar múltiples ciclos de carga y descarga. A continuación, se describe en detalle esta tecnología, incluyendo su funcionamiento, ventajas, desafíos y aplicaciones en el contexto de parques eólicos híbridos (He, *et al.*, 2024).

Las baterías de litio-ion almacenan energía mediante reacciones electroquímicas que involucran el movimiento de iones de litio entre dos electrodos: un ánodo (generalmente hecho de grafito) y un cátodo (compuesto por óxidos de litio, como LiCoO_2 , LiFePO_4 o LiNiMnCoO_2). Estos electrodos están separados por un electrolito, que es una solución conductora de iones, pero no de electrones. Durante la carga, los iones de litio se mueven del cátodo al ánodo, almacenando energía. Durante la descarga, los iones regresan al cátodo, liberando energía en forma de electricidad (He *et al.*, 2022). La reacción general en una batería de litio-ion se expresan con las ecuaciones (1) y (2).



Los componentes principales son el ánodo que generalmente está compuesto por grafito, tiene una estructura laminar que permite la intercalación de iones de litio; Cátodo el cual puede estar hecho de diversos materiales, como óxidos de litio ($LiCoO_2$, $LiFePO_4$, $LiNiMnCoO_2$), que determinan la capacidad, voltaje y seguridad de la batería; Electrolito es una solución líquida o sólida que permite el movimiento de iones de litio entre los electrodos. Los electrolitos líquidos suelen ser sales de litio disueltas en solventes orgánicos, mientras que los electrolitos sólidos son materiales cerámicos o poliméricos; el separador es una membrana porosa que evita el contacto directo entre el ánodo y el cátodo, permitiendo solo el paso de iones; y la carcasa es la que protege los componentes internos y puede ser rígida (para baterías prismáticas o cilíndricas) o flexible (para baterías de bolsa).

En el contexto de parques eólicos híbridos, las baterías de litio-ion desempeñan un papel crucial en la gestión de la energía generada. Ya que estabilizan la red eléctrica al almacenar el exceso de energía generada durante períodos de alta producción eólica y la liberan durante períodos de baja generación o alta demanda, ayudando a equilibrar la red. Estas baterías permiten almacenar energía cuando los precios de la electricidad son bajos y venderla cuando los precios son altos, maximizando los ingresos del parque eólico. Pueden combinarse con sistemas de almacenamiento de hidrógeno o térmico para proporcionar soluciones de almacenamiento a corto y largo plazo (Hu *et al.*, 2023).

Baterías de flujo redox

Las baterías de flujo redox (Redox Flow Batteries, RFB) son una tecnología de almacenamiento de energía electroquímica que se distingue por su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía de manera escalable y flexible. A diferencia de las baterías convencionales, donde la energía se almacena en electrodos sólidos, las baterías de flujo redox almacenan energía en soluciones líquidas de electrolitos, lo que permite una separación entre la capacidad de almacenamiento (determinada por el volumen de los tanques de electrolito) y la potencia (determinada por el tamaño de la celda electroquímica). Esta característica las hace especialmente adecuadas para aplicaciones de almacenamiento a gran escala, como la integración con parques eólicos híbridos (Jargalsalkhan *et al.*, 2023).

Durante la carga, la energía eléctrica se convierte en energía química mediante la oxidación y reducción de las especies redox en los electrolitos. Durante la descarga, el proceso se invierte, liberando energía eléctrica. Las reacciones generales en una batería de flujo redox utilizando un ejemplo común basado en vanadio pueden resumirse de la siguiente manera. En una batería de flujo redox de vanadio, ambos electrolitos contienen vanadio en diferentes estados de oxidación. Las reacciones son las siguientes:

Tabla 1. Reacciones de baterías de flujo redox de vanadio.

Durante la descarga (liberación de energía)		
En el ánodo (electrolito negativo)	$V^{2+} \rightarrow V^{3+} + e^{-}$	El vanadio en estado de oxidación +2 (V^{2+}) se oxida a vanadio en estado +3 (V^{3+}), liberando un electrón.
En el cátodo (electrolito positivo)	$VO_2^{+} + 2H^{+} + e^{-} \rightarrow VO^{2+} + H_2O$	El ion vanadilo (VO_2^{+}) en estado +5 se reduce a vanadio en estado +4 (VO^{2+}), aceptando un electrón.
Durante la carga (almacenamiento de energía)		
En el ánodo (electrolito negativo)	$V^{3+} + e^{-} \rightarrow V^{2+}$	El vanadio en estado +3 (V^{3+}) se reduce a vanadio en estado +2 (V^{2+}), aceptando un electrón.
En el cátodo (electrolito positivo)	$VO^{2+} + H_2O \rightarrow VO_2^{+} + 2H^{+} + e^{-}$	El vanadio en estado +4 (VO^{2+}) se oxida a vanadilo (VO_2^{+}) en estado +5, liberando un electrón.

Aunque el vanadio es el sistema más común, existen otros pares redox utilizados en baterías de flujo. En la Tabla 2 se describen algunos casos.

Tabla 2. Pares redox.

Batería de hierro-cromo (Fe/Cr)	
Ánodo (<i>Cr</i>)	$Cr^{2+} \rightarrow Cr^{3+} + e^{-}$
Cátodo (<i>Fe</i>)	$Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$
Batería de bromuro de zinc (Zn/Br ₂)	
Ánodo (<i>Zn</i>)	$Zn + Zn^{2+} \rightarrow 2e^{-}$
Cátodo (<i>Br₂</i>)	$Br_2 + 2e^{-} \rightarrow 2Br^{-}$
Batería de hierro-azufre (Fe/S)	
Ánodo (<i>Fe</i>)	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^{-}$
Cátodo (<i>S</i>)	$S + 2e^{-} \rightarrow S^{2-}$

Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento de hidrógeno y la energía eólica son dos pilares fundamentales en la transición hacia un sistema energético más sostenible y descarbonizado. La energía eólica, una de las fuentes de energía renovable más utilizadas, tiene el potencial de generar electricidad de manera limpia y eficiente. Sin embargo, su naturaleza intermitente requiere soluciones de almacenamiento que permitan equilibrar la oferta y la demanda de energía. El hidrógeno, especialmente el hidrógeno verde producido mediante electrólisis utilizando energía renovable, emerge como una solución prometedora para almacenar y transportar energía a largo plazo.

La energía eólica se obtiene a través de aerogeneradores que convierten la energía cinética del viento en electricidad. Este proceso es limpio, ya que no emite gases de efecto invernadero durante la generación de energía. Sin embargo, la disponibilidad de viento no es constante, lo que genera fluctuaciones en la producción de electricidad. Estas variaciones pueden dificultar la integración de la energía eólica en la red eléctrica, especialmente en momentos de baja demanda o exceso de generación. Para maximizar el aprovechamiento de esta energía, es esencial contar con sistemas de almacenamiento que permitan guardar el excedente y liberarlo cuando sea necesario.

El hidrógeno, particularmente el hidrógeno verde, se produce mediante la electrólisis del agua, un proceso que utiliza electricidad renovable para separar el hidrógeno y el oxígeno. Este hidrógeno puede almacenarse en tanques a alta presión, en forma líquida a bajas temperaturas, o en materiales sólidos como hidruros metálicos. Una de las ventajas clave del hidrógeno es su alta densidad energética, lo que lo convierte en un medio eficaz para almacenar grandes cantidades de energía durante períodos prolongados. Además, el hidrógeno puede ser transportado y utilizado en diversos sectores, como la industria, el transporte y la generación de electricidad, mediante celdas de combustible o combustión directa (Kim *et al.*, 2024).

La combinación de energía eólica y almacenamiento de hidrógeno ofrece una solución sinérgica para abordar los desafíos de la intermitencia de las energías renovables. Durante períodos de alta generación eólica, el excedente de electricidad puede utilizarse para producir hidrógeno mediante electrólisis. Este hidrógeno almacenado puede luego convertirse nuevamente en electricidad cuando la demanda supere la generación eólica, o utilizarse directamente en aplicaciones industriales o de transporte. Este enfoque no solo mejora la flexibilidad del sistema energético, sino que también contribuye a la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado y la industria química (Pelser *et al.*, 2023).

El almacenamiento de hidrógeno puede realizarse mediante diferentes métodos, cada uno de los cuales involucra reacciones químicas específicas. En la Tabla 3 se describen las reacciones químicas asociadas con los principales métodos de almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 3. Reacciones químicas asociadas al almacenamiento de hidrógeno.

Tipo	Reacciones químicas	Proceso
Almacenamiento de Hidrógeno en Forma de Gas (Comprimido)		Este método no implica una reacción química, sino un proceso físico en el que el hidrógeno gaseoso (H_2) se comprime a altas presiones (generalmente entre 350 y 700 bar) para reducir su volumen y facilitar su almacenamiento y transporte (Hannan <i>et al.</i> , 2022).
Almacenamiento de Hidrógeno en Forma Líquida (Criogénica)	$H_2(gas) \xrightarrow{-235\text{ }^{\circ}C} H_2(líquido)$	El hidrógeno se licúa a temperaturas extremadamente bajas (-253 °C o 20 K) para reducir su volumen. Este proceso tampoco implica una reacción química, sino un cambio de fase físico (Zohuri & Zohuri, 2019).
Almacenamiento de Hidrógeno en Hidruros Metálicos	$Mg + H_2 \rightarrow MgH_2$ Absorción de hidrógeno (hidrogenación) $MgH_2 \rightarrow Mg + H_2$ Liberación de hidrógeno (deshidrogenación)	Los hidruros metálicos son compuestos formados por metales que pueden absorber y liberar hidrógeno mediante reacciones químicas reversibles. Un ejemplo común es el hidruro de magnesio (MgH_2) (Bellon Monsalve, 2017).
Almacenamiento de Hidrógeno en Líquidos Orgánicos Portadores de Hidrógeno (LOHC)	$C_7H_8(tolueno) + 3H_2 \rightarrow C_7H_{14}(metilciclohexano)$ Hidrogenación (almacenamiento) $C_7H_{14}(metilciclohexano) \rightarrow C_7H_8(tolueno) + 3H_2$ Deshidrogenación (liberación)	Los LOHC son compuestos orgánicos que pueden unirse químicamente al hidrógeno y liberarlo mediante reacciones reversibles (Gutierrez De La Llave, 2023).
Almacenamiento de Hidrógeno en Amoníaco (NH_3)	$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$ Síntesis de amoníaco (almacenamiento) $2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$ Descomposición de amoníaco (liberación)	El amoníaco es un compuesto químico que puede almacenar hidrógeno y liberarlo mediante reacciones químicas (Blázquez Calderón, 2024).
Almacenamiento de Hidrógeno en Forma de Agua (Electrólisis y Combustión)	$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ Electrólisis del agua (producción de hidrógeno) $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ Combustión de hidrógeno (liberación de energía)	El hidrógeno puede almacenarse indirectamente en forma de agua (H_2O) y liberarse mediante electrólisis o combustión (Casio Herrera & Huayna Huaman, 2024).
Almacenamiento de Hidrógeno en Compuestos Químicos (Hidruros Complejos)	$NaBH_4 + 2H_2O \rightarrow NaBO_2 + 4H_2$ Hidrólisis de borohidruro de sodio (liberación de hidrógeno)	Algunos compuestos químicos, como los borohidruros (por ejemplo, $NaBH_4$), pueden almacenar hidrógeno y liberarlo mediante reacciones químicas (Hernández Fernández, 2023).

Resultados

El modelado del recurso eólico es crucial para el emplazamiento de aerogeneradores, para un correcto análisis se utiliza un mapa vectorial de la orografía del sitio, el factor de rugosidad, y la meteorología, en la Figura 3 se presenta el mapa vectorial del sitio. Las variables meteorológicas de Juchitán, como la temperatura es en promedio de 26.5 °C, la velocidad del viento 5.9 m/s, o la radiación solar global de 5.3 kWh/m²/día. En la Figura 4 se presenta el modelo de microescala del recurso eólico.

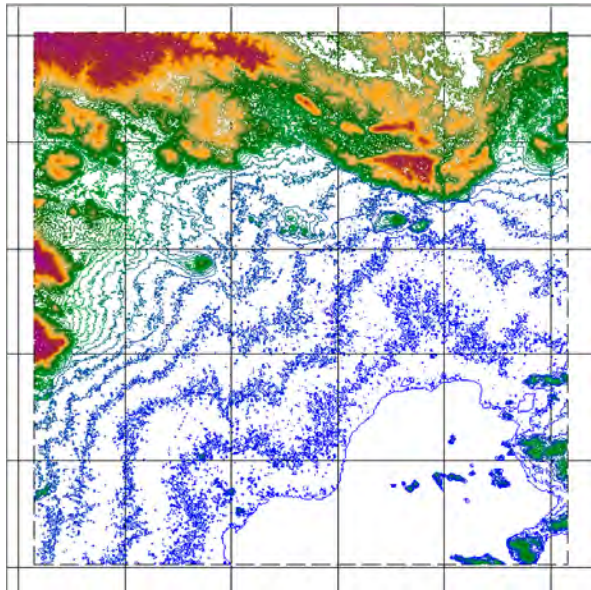


Figura 3. Mapa de orografía.

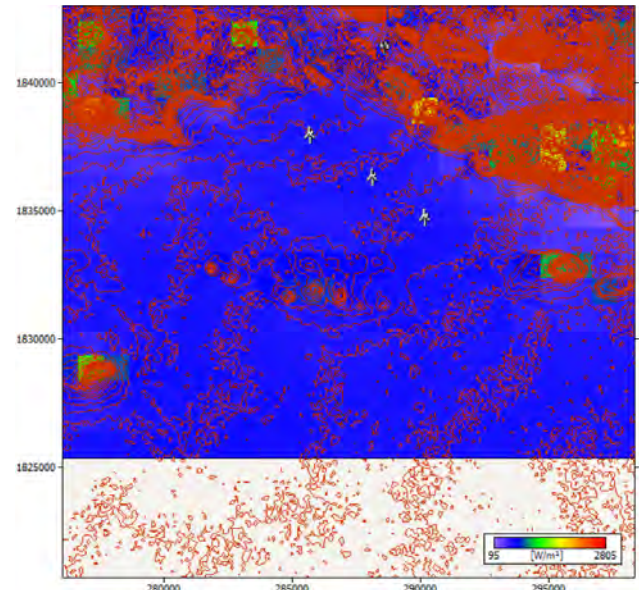


Figura 4. Emplazamiento eólico.

En la Figura 5 se presenta la relación entre la radiación solar global y la velocidad del viento.

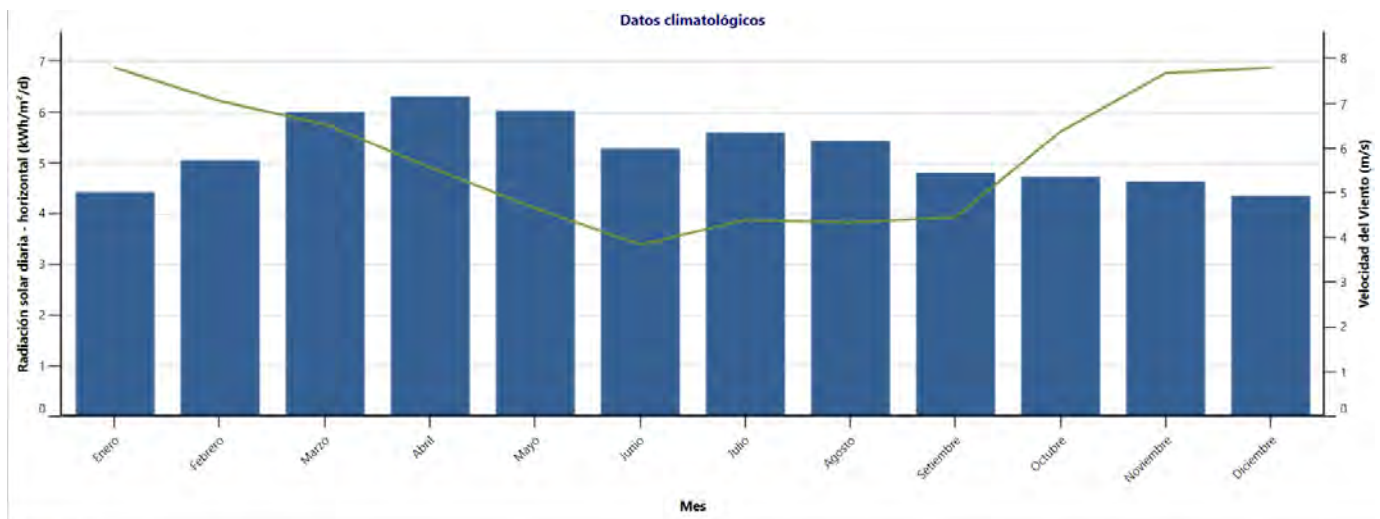


Figura 5. Relación entre variables meteorológicas.

Como se muestra en la Figura 5 en un análisis de un año promedio, la radiación solar global (kWh/m²/día) a lo largo del año presenta una mayor cantidad los meses de mayo a septiembre, mientras que la mayor velocidad del viento (m/s) se presenta en los meses de octubre a marzo, lo que hace un lugar correcto para instalación de sistemas híbridos solar-eólicos.

Conclusiones

El diseño de parques eólicos implica tomar en cuenta varios aspectos, como la orografía y la rugosidad, también las condiciones meteorológicas influyen en una correcta evaluación del recurso eólico. En este trabajo se mostró que en los parques eólicos es posible instalar paneles fotovoltaicos, en especial en el caso de Juchitán Oaxaca, la mayor radiación solar se presenta en los meses donde la temporada ventosa tiene los vientos más bajos, esto podría ayudar a disminuir la intermitencia en la generación de energía eléctrica.

El almacenamiento energético propuesto contempla tres métodos, se necesita realizar un análisis de viabilidad técnico-económica para determinar cuál método es el óptimo. Para trabajos futuros se pretende analizar los sitios con mayor potencial eólico y solar para determinar la viabilidad de sistemas híbridos, también se podrían evaluar otros tipos de recurso renovable.

Bibliografía

- AL Jarrah, A. M., & AL Dwairi, R. A. (2024). Jordan wind energy potential and suggested areas for large-scale wind turbines investment. *Energy for Sustainable Development*, 80, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101452>
- Ayyildiz, E., & Erdogan, M. (2024). A comprehensive approach to evaluate risk mitigation strategies in offshore wind farms using spherical fuzzy decision making analysis. *Ocean Engineering*, 311, 118881. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118881>
- Bellon Monsalve, D. (2017). *Almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos: Síntesis y caracterización*.
- Blázquez Calderón, A. (2024). *Análisis techno-económico del uso de amoníaco como vector en el transporte y almacenamiento de hidrógeno*.
- Casío Herrera, D. H., & Huayna Huaman, J. G. (2024). Implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto.
- Centro Nacional de Control de Energía | Gobierno | gob.mx. (s. f.). Recuperado 20 de marzo de 2022, de <https://www.gob.mx/cenace>
- de Moura Ribeiro, A., Hallak, P. H., de Castro Lemonge, A. C., & dos Santos Loureiro, F. (2024). Automatic grouping of wind turbine types via multi-objective formulation for nonuniform wind farm layout optimization using an analytical wake model. *Energy Conversion and Management*, 315, 118759. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118759>
- Dhoot, A., Antonini, E. G. A., Romero, D. A., & Amon, C. H. (2021). Optimizing wind farms layouts for maximum energy production using probabilistic inference: Benchmarking reveals superior computational efficiency and scalability. *Energy*, 223, 120035. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120035>
- Drapalik, M., Vavrik, V., & Liebert, W. (2024). The effect of wind turbines with low rotor power density on power fluctuations. *Next Energy*, 5, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100156>
- Esnaola, G., Ulazia, A., Sáenz, J., & Ibarra-Berastegi, G. (2024). Future changes of global Annual and Seasonal Wind-Energy Production in CMIP6 projections considering air density variation. *Energy*, 307, 132706. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132706>
- Fatahian, E., Mishra, R., Jackson, F. F., & Fatahian, H. (2024). Optimization and analysis of self-starting capabilities of vertical axis wind turbine pairs: A CFD-Taguchi approach. *Ocean Engineering*, 302, 117614. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117614>
- Gutierrez De La Llave, N. (2023). *Almacenamiento de hidrógeno en líquidos orgánicos*.
- GWEC. (2025, marzo 26). <https://www.gwec.net>
- Hannan, M. A., Abu, S. M., Al-Shetwi, A. Q., Mansor, M., Ansari, M. N. M., Muttaqi, K. M., & Dong, Z. Y. (2022). Hydrogen energy storage integrated battery and supercapacitor based hybrid power system: A statistical analysis towards future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(93), 39523-39548. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.099>
- He, R., Yang, H., Lu, L., & Gao, X. (2024). Site-specific wake steering strategy for combined power enhancement and fatigue mitigation within wind farms. *Renewable Energy*, 225, 120324. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120324>
- He, R., Yang, H., Sun, S., Lu, L., Sun, H., & Gao, X. (2022). A machine learning-based fatigue loads and power prediction method for wind turbines under yaw control. *Applied Energy*, 326, 120013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120013>
- Hernández Fernández, A. (2023). *Hidrógeno verde y su almacenamiento energético: Estado del arte*.
- Hu, Z., Gao, B., & Mao, Y. (2023). Nonlinear model predictive control-based active power dispatch strategy for wind power plant considering dynamic wake effect. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108996. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.108996>
- IRENA – International Renewable Energy Agency. (2025, marzo 26). <https://www.irena.org/>
- Jargalsaikhan, N., Ueda, S., Masahiro, F., Matayoshi, H., Mikhaylov, A., Byambaa, S., & Senjyu, T. (2024). Exploring influence of air density deviation on power production of wind energy conversion system: Study on correction method. *Renewable Energy*, 220, 119636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119636>
- Kim, J., Shin, H.-J., Lee, K., & Hong, J. (2024). Enhancement of ANN-based wind power forecasting by modification of surface roughness parameterization over complex terrain. *Journal of Environmental Management*, 362, 121246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121246>
- Pelser, T., Weinand, J. M., Kuckertz, P., McKenna, R., Linssen, J., & Stolten, D. (2024). Reviewing accuracy & reproducibility of large-scale wind resource assessments. *Advances in Applied Energy*, 13, 100158. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100158>
- Zohuri, B., & Zohuri, B. (2019). Cryogenics and liquid hydrogen storage. *Hydrogen energy: challenges and solutions for a cleaner future*, 121-139.

Depuración sostenible de efluentes piloncilleros mediante un sistema híbrido innovador: digestión anaerobia + humedal construido

Norma Alejandra Vallejo-Cantú, Isis Giovanna Amador-Suárez, Andrea Alvarado-Vallejo, Erik Samuel Rosas-Mendoza y Alejandro Alvarado-Lassman *

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: alejandro.al@orizaba.tecnm.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 1 de junio de 2025 Aceptado: 7 de julio de 2025 Publicado: 9 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.561>

Resumen: La elaboración artesanal de piloncillo en los trapiches veracruzanos, actividad que sostiene a cientos de familias mexicanas, genera efluentes ácidos (pH 3.9-5.5) y con DQO > 40 g L⁻¹, valores fuera de los límites de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Para ofrecer una alternativa eficiente de bajo costo, se construyó un sistema híbrido que combina un reactor anaerobio de biopelícula fija (FBBR) y humedales construidos con biopelícula fija (HC-BF). El FBBR (150 L útiles, relleno de tubos corrugados y matriz de fibra polimérica trató durante 45 días agua piloncillera (10.6 g DQO L⁻¹) y removió 57 % de la carga. El digestato diluido, alimentó seis celdas HC-BF plantadas con *Canna indica* y *Cyperus papyrus*; tras dos lotes de 15 d, la DQO final fue de 0.15 g L⁻¹ y la remoción global alcanzó 65 %, estabilizando el pH en 6.7. Las macrófitas mostraron crecimiento y floración, evidenciando adaptación al efluente. La combinación tezontle-matriz de fibra polimérica resultó una opción económica y replicable, mientras que el biogás del FBBR abre la puerta a integrar energías renovables y economía circular. El sistema FBBR + HC-BF es una solución prometedora que ayuda a los productores de piloncillo a cumplir la norma y avanzar hacia los ODS 6 y 7.

Palabras clave: efluentes piloncilleros; reactor anaerobio de biopelícula fija; humedales construidos; energía circular.

Introducción

La caña de azúcar constituye uno de los cultivos agroindustriales más relevantes de México; en 2022 el sector aportó 3.8 % de la producción mundial y el 60.5 % de la producción nacional se concentra en los estados de Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí (CONDESUCA, 2022). Dentro de esta cadena de producción (Figura 1), la elaboración artesanal de panela o piloncillo (bloques de azúcar morena solidificada) se realiza en pequeños molinos denominados trapiches, y es la principal fuente de ingresos para cientos de comunidades rurales veracruzanas (Cabrera Martínez & Aguilar Rivera, 2018); sin embargo, su operación implica un uso intensivo de agua y la posterior generación de efluentes con elevada carga orgánica y carácter ácido (Mozhiaras *et al.*, 2023).

Estudios de campo reportan consumos de agua de 6.5 a 7.5 m³ día⁻¹ (jornada de 8 h), para el lavado, enfriamiento y empackado del producto (Amador-Báez & Rangel-Calderón, 2019). Los efluentes de la industria azucarera varían según el tipo de proceso; para descargas piloncilleras se han medido pH ácidos de 3.9 a 5.5 (Quezada-Moreno *et al.*, 2017; Amador-Báez & Rangel-Calderón, 2019). En términos de carga orgánica, la vinaza de caña presenta alrededor de 29 g L⁻¹ de DQO, mientras que la melaza diluida utilizada en digestión anaerobia es de ≈ 40 g L⁻¹ de DQO (Meng *et al.*, 2017).

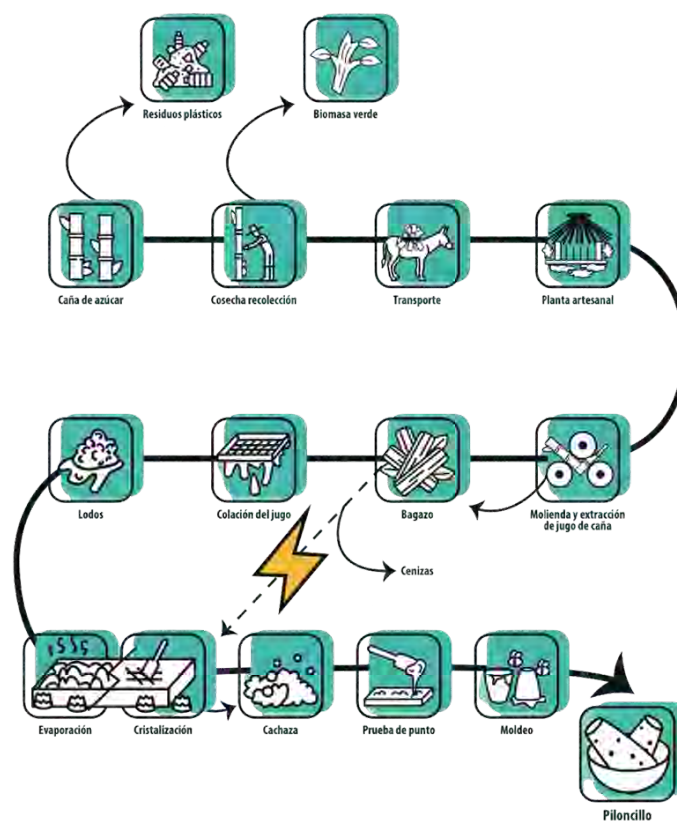


Figura 1. Proceso de producción de panela y puntos de generación de aguas residuales (Sánchez Castillo *et al.*, 2024).

Por otro lado, la melaza cruda puede alcanzar entre 134 y 1,089 g L⁻¹, y hasta ~1,170 g L⁻¹ cuando se expresa con la densidad industrial promedio (Oliveira *et al.*, 2020; Sukphun *et al.*, 2023). El contenido de sólidos totales (ST) se ha reportado entre 750 y 850 g L⁻¹ (Sukphun *et al.*, 2023). Estos valores se encuentran muy por encima de los límites permitidos para descargas en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

La compleja composición del efluente piloncillero demanda sistemas de tratamiento robustos. Los sistemas de tratamiento convencionales para aguas residuales industriales suelen ser eficaces, pero consumen mucha energía; en contraste, los tratamientos biológicos, como los reactores anaerobios y humedales construidos (HC), ofrecen una depuración eficiente de bajo costo energético y contribuyen al Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Wu *et al.*, 2023; Satyendra *et al.*, 2024). Los reactores anaerobios de biopelícula fija (FBBR, por sus siglas en inglés), retienen biomasa microbiana en soportes inertes, favoreciendo las interacciones microbianas y una mayor resistencia a variaciones de carga orgánica o pH (Alvarado-Vallejo *et al.*, 2024); por su parte, los HC reproducen la acción sinérgica de macrófitas, microorganismos y medio granular para mejorar la calidad del agua residual tratada (Agaton & Guila, 2023).

En cuanto al desempeño de la digestión anaerobia aplicada a efluentes azucareros, un sistema de dos etapas con lecho fijo alcanzó 7 L biogás L⁻¹ día⁻¹ (58 % CH₄) y ≈ 90 % de remoción de DQO a 35 °C en el tratamiento de melaza de caña (Meng *et al.*, 2017). En termofilia (55 °C), la configuración en dos etapas probada por Oliveira *et al.* (2020) elevó la productividad a 3.9 L CH₄ L⁻¹ día⁻¹ y el rendimiento a 311 NL CH₄ g⁻¹ DQO, superando los rendimientos obtenidos con una etapa (2.7 L CH₄ L⁻¹ día⁻¹; 173 NL CH₄ g⁻¹ DQO) y manteniendo ≈ 85 % de reducción en la carga orgánica. Estudios recientes mostraron que la co-digestión de vinaza y melaza de caña en un arreglo secuencial de reactores anaerobios de lecho fluidizado (AFBR, por sus siglas en inglés) con cargas de hasta 22.5 kg COD m⁻³ día⁻¹ aumentó la producción de metano y mantuvo eficiencias mayores al 80 % de remoción (Ribeiro *et al.*, 2024). De acuerdo con la revisión de Sukphun *et al.* (2023), los residuos azucareros tratados en sistemas bifásicos suelen generar entre 0.24 y 0.30 L CH₄ g⁻¹ DQO, lo que los convierte en una alternativa viable para valorizar energéticamente los efluentes piloncilleros.

La digestión anaerobia en dos etapas maximiza la recuperación energética frente a los sistemas monofásicos; sin embargo, la inversión inicial puede ser hasta 60 % mayor por los requerimientos extras de calentamiento, agitación y deshidratación (Mozhiarasi *et al.*, 2023). Para compensar ese sobre-costeo, se han propuesto arreglos híbridos que acoplan un reactor anaerobio compacto con un humedal de bajo mantenimiento. Un ejemplo reciente combina un reactor anaerobio a baffles (ABR) y humedales de flujo ascendente (UCW) rellenos con bloques de concreto celular y cáscara de coco; con 24 h de HRT se lograron remociones de 96 % SST, 84 % DQO, 68 % nitrógeno total y 65.5 % fósforo, generando un efluente apto para riego y uso doméstico, todo ello con una construcción sencilla y costos operativos bajos (Satyendra *et al.*, 2024).

A partir de estos antecedentes se diseñó un sistema híbrido FBBR + HC con soportes de matriz de fibra polimérica para el crecimiento de biopelícula. Este estudio de caso, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Orizaba, evalúa la capacidad de tratamiento del sistema y documenta su potencial de réplica en comunidades piloncilleras.

Desarrollo

Durante el primer trimestre de 2025 se realizaron ensayos piloto para comprobar la viabilidad de un sistema híbrido FBBR + HC-BF construido con materiales de bajo costo (tubos corrugados de PEAD y matriz de fibra polimérica) y para tratar los desechos de las comunidades piloncilleras. El esquema completo se observa en la Figura 2.

Caracterización del efluente

Se tomaron muestras en tres trapiches veracruzanos y se analizó la DQO soluble como indicador de carga orgánica. Las descargas presentaron 42.5 ± 10.9 g L⁻¹ DQO.

Primera etapa: reactor anaerobio de biopelícula fija (FBBR)

El FBBR (Figura 2A) -fabricado en fibra de vidrio y resina epoxi-viniléster Derakane Momentum 411-350- posee 215 L de volumen total (150 L útiles) y está relleno con tubos corrugados de ½" × 8 cm, empaquetados con matriz de fibra polimérica que proporcionan > 300 m² m⁻³ de área específica para biopelícula. El reactor se alimentó de forma

semicontinua con agua residual diluida a 10.63 ± 2.74 g DQO L^{-1} (dilución 1:4 respecto al vertido crudo), a un caudal de 20 L $día^{-1}$, lo que fija un TRH de 5 días. Durante 45 días de operación se obtuvo un efluente (digestato) de 2.48 ± 0.45 g DQO L^{-1} , equivalente a una remoción promedio de 56.94 ± 0.44 %.



Figura 2. Sistema híbrido FBBR + HC-BF. (A) Reactor anaerobio de biopelícula fija; (B) Humedales construidos con biopelícula fija.

Segunda etapa: humedales construidos con biopelícula fija (HC-BF)

El digestato se diluyó 1:10 y se condujo a seis celdas de polipropileno (30 L) con lecho de tezontle (10–25 mm) y flujo subsuperficial (Figura 2B). Cada celda cuenta con bastidores portafibras para reforzar la biopelícula y se plantó según la configuración de la Figura 3B:

- **HC-A y HC-E:** *Canna indica* (2 ejemplares).
- **HC-B y HC-F:** *Cyperus papyrus* (2 ejemplares).
- **HC-C y HC-D:** mezcla *C. indica* + *C. papyrus* (1 + 1 ejemplar).

Se aplicaron dos lotes de alimentación, cada uno de 15 d: el primero con 0.38 ± 0.02 g DQO L^{-1} y el segundo con 0.39 ± 0.03 g DQO L^{-1} (HRT de 24 horas).

Al finalizar la alimentación del primer lote, la DQO promedio descendió a 0.17 ± 0.04 g L^{-1} , lo que representa una remoción global de 57.08 ± 9.52 %. Posteriormente, después de la alimentación del segundo lote, la DQO se redujo a 0.15 ± 0.04 g L^{-1} y la remoción global aumentó a 64.61 ± 9.12 %. El incremento sugiere una mejor adaptación de la microbiota, consolidación del medio filtrante y mayor estabilidad hidráulica. El pH de salida se estabilizó en torno a 6.7, dentro del rango aceptable para cuerpos receptores clase B.

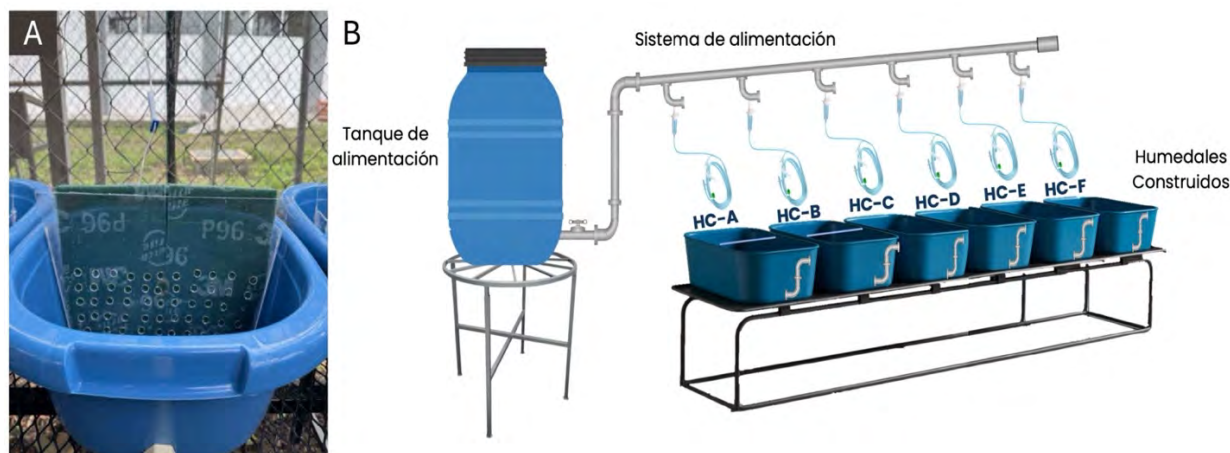


Figura 3. Diseño del HC-BF: (A) bastidores con fibras Scotch-Brite 96; (B) diagrama de distribución de celdas HC-A a HC-F.

Durante los 30 días de operación en el HC-BF, *Canna indica* y *Cyperus papyrus* emitieron nuevos brotes y aumentaron su biomasa aérea; en *C. indica* aparecieron inflorescencias (Figura 4). La respuesta vegetal confirma la tolerancia de ambas especies al efluente diluido y su aporte a la estabilidad del sistema.



Figura 4. Desarrollo de macrófitas tras dos lotes de operación: (A) crecimiento de *C. indica* (HC-A); (B) crecimiento de *C. papyrus* (HC-B); (C) floración de *C. indica* (HC-C).

El ensayo piloto demuestra que el esquema FBBR + HC-BF puede alcanzar remociones globales de DQO de $\approx 60\%$. Estos resultados preliminares respaldan la continuación de las pruebas para optimizar la comunidad microbiana y el crecimiento vegetal.

El sistema se alinea con las tendencias mundiales de transición energética: la etapa anaerobia genera biogás aprovechable como fuente renovable de calor o electricidad, lo que convierte al tratamiento en un nodo de **economía circular** y contribuye a la descarbonización de la cadena piloncillera. De continuar su optimización—por ejemplo, capturando y refinando el metano o integrando paneles fotovoltaicos para bombear el caudal—la tecnología puede evolucionar hacia un modelo autosuficiente que refuerce el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (energía asequible y limpia) y complemente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento). Así, el FBBR + HC-BF no solo representa una opción viable para cumplir la NOM-001-SEMARNAT-2021, sino también un punto de partida para incorporar energías renovables y cerrar los ciclos de materia y energía en las comunidades piloncilleras.

Conclusiones

Los ensayos piloto confirman la pertinencia del enfoque híbrido propuesto: la etapa anaerobia en el FBBR redujo cerca de la mitad de la carga orgánica inicial pese a la acidez característica del efluente piloncillero, y el tratamiento subsiguiente en el sistema HC-BF elevó la remoción global de DQO hasta $\sim 65\%$, mientras estabilizaba el pH y propiciaba el crecimiento de *Canna indica* y *Cyperus papyrus*. El empleo combinado de matriz de fibra polimérica y tezontle se perfiló como una solución económica y prometedora para el soporte y crecimiento microbiano, al aprovechar materiales de fácil adquisición y operación sencilla. Estos resultados preliminares avalan la continuación de pruebas para la validación del sistema FBBR + HC-BF como tecnología basada en la naturaleza que puede ayudar a los pequeños trapiches a cumplir la NOM-001-SEMARNAT-2021 y, simultáneamente, avanzar hacia el ODS 6 mediante el reúso seguro del agua depurada.

Bibliografía

- Agaton, C. B., & Guila, P. M. C. (2023). Ecosystem services valuation of constructed wetland as a nature-based solution to wastewater treatment. *Earth*, 4(1), 78–92. <https://doi.org/10.3390/earth4010006>
- Alvarado-Vallejo, A., Marín-Peña, O., Rosas-Mendoza, E. S., Méndez-Contreras, J. M., & Alvarado-Lassman, A. (2024). The valorization of fruit and vegetable wastes using an anaerobic fixed biofilm reactor: A case of discarded tomatoes from a traditional market. *Processes*, 12(9), Article 1923. <https://doi.org/10.3390/pr12091923>

- Amador-Báez, K. S., & Rangel-Calderón, H. (2019). *Propuesta de un sistema de tratamiento de agua residual industrial en el proceso de elaboración de la panela en la empresa Doña Panela LTDA* [Tesis de licenciatura, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/4f1e78ca-44ed-4160-a0f7-41ac5aacfb90/content>
- Cabrera Martínez, H. & Aguilar Rivera, N. (2018). Sustentabilidad socioeconómica y ambiental de la producción de piloncillo en la región centro de Veracruz Socio-economic and environmental sustainability of production of panela in the central region of Veracruz. *Medio ambiente, sustentabilidad y vulnerabilidad social*, 5, 19-39.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [CONDESUCA]. (2022). *Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2021-2024*.
- Meng, X., Yuan, X., Ren, J., Wang, X., Zhu, W., & Cui, Z. (2017). Methane production and characteristics of the microbial community in a two-stage fixed-bed anaerobic reactor using molasses. *Bioresource Technology*, 241, 1050–1059. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.181>
- Mozhiarasi, V., Natarajan, T. S., & Kondusamy, D. (2023). A high-value biohythane production: Feedstocks, reactor configurations, pathways, challenges, technoeconomics and applications. *Environmental Research*, 219, 115094. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115094>
- Nouhou Moussa A. W., Sawadogo B., Konate Y., & Sidibe S. D. S.. (2023). Critical state of the art of sugarcane industry wastewater treatment technologies and perspectives for sustainability. *Membranes*, 13(8), 709. <https://doi.org/10.3390/membranes13080709>
- Oliveira, C. A., Fuess, L. T., Soares, L. A., & Damianovic, M. H. R. Z. (2020). Thermophilic biomethanation of sugarcane molasses comparing single- and two-stage systems: Process performance and energetic potential. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100590>
- Quezada Moreno, C. W. F., Contreras Moya, A. M., Domínguez, E. R., Quezada Torres, D., Molina Borja, F. A., & Rojas Molina, J. O. (2017). Environmental impact evaluation of the industry of panela by life cycle analysis. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(1), 545–552. <https://doi.org/10.22161/ijeab/2.1.68>
- Ribeiro, A. R., Devens, K. U., Camargo, F., Sakamoto, I. K., & Fuess, L. T. (2024). Synergizing sugarcane waste valorization: Optimization of two-stage anaerobic co-digestion for enhanced methane recovery and organic matter removal. *Industrial Crops and Products*, 221, 119297. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119297>
- Sánchez Castillo, M. A., Martínez Jasso, C. M., Palomo González, L. F., Escudero Lourdes, C., & Gómez Torres, S. A. (2024). *El trapiche: corazón de la comunidad piloncillera Tének*. *Universitarios Potosinos*, 21(278), 3–10.
- Satyendra, & Vijay, R. (2024). *Anaerobic baffled reactor followed by up-flow constructed wetland for treatment of municipal wastewater*. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104810. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104810>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, 11 de marzo). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Sukphun, P., Sittijunda, S., & Reungsang, A. (2023). Two-stage biohydrogen and methane production from sugarcane-based sugar and ethanol industrial wastes: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 386, 129519. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129519>
- Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., Cheng, C., Hu, Z., Zhuang, L., Guo, Z., Xie, H., & Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 218–234. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z>

Efecto del flujo de aire en la distribución de tiempos de residencia en un fotobiorreactor Applikon

Gerardo E. González-Landero ¹, José Vicente Martínez ¹, Nayeli Gutiérrez-Casiano ¹, Luis Antonio Velázquez Herrera ¹, Adolfo Castillo Morán ²
Eduardo Hernández-Aguilar ^{1,*}

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prol. De Ote. 6 número 1009, colonia Rafael Alvarado. Orizaba, Veracruz. 94340. México.

² Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, Calle Josefa Ortiz de Domínguez, camino peñuela-Amatlán, s/n. Peñuela, Municipio de Amatlán de los reyes, Ver. C.P. 94945

* Autor de correspondencia: eduhernandez@uv.mx; Tel.: (+52)272 782 3714

Artículo de divulgación científica

Recibido: 21 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 12 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.446>

Resumen: En la ingeniería Química se encuentra la rama de diseño de reactores, la cual se encarga de modelar simular y optimizar. Sin embargo, en la realidad se observan comportamientos muy diferentes a los modelos ideales, esto debido a una deficiente agitación generando zonas muertas o estancadas por lo que es importante estudiar y evaluar estos comportamientos y una de las formas es mediante la distribución de tiempos de residencia y CFD. El objetivo de este trabajo es evaluar tres diferentes aireaciones (1.6, 3.2 y 4.8 L/min) las cuales por medio de burbujeo generan la agitación en un biorreactor Applikon. Para ello se utilizó un trazador (NaCl) con una concentración de 1 molar, del cual se inyectan 5 ml con el método de pulso e inmediatamente es monitoreado con un medidor digital. La distribución de tiempos de residencia mostró en la aireación de 1.6 y 3.2 L/min gran cantidad de picos indicando cortos circuitos a comparación a la de 4.8 L/min, obteniendo un mezclado más homogéneo con respecto al tiempo. Esto igual se observó en los porcentajes de zonas muertas obtenidas en la simulación CFD, las cuales fueron 27 % en 1.6 L/min, 21 % en 3.2 L/min y 12 % para 4.8 L/min.

Palabras clave: DTR; Biorreactor; CFD.

Introducción

Existen diferentes tipos de biorreactores que de acuerdo con las necesidades pueden ser abiertos o cerrados, por lo que la implementación y optimización de sistemas de mezclado óptimos se ven reflejados en costos y resultados. Hoy en día los biorreactores juegan un papel importante para el tratamiento de aguas residuales debido a que en la vida real el comportamiento dentro de ellos no es el ideal, esto debido a una mala circulación del fluido o por la formación de zonas muertas, por lo que el conocimiento de una hidrodinámica y una distribución de tiempo de residencia (RTD por sus siglas en inglés), nos permite ajustar el modelo de manera óptima y poder así predecir el tiempo específico de una especie química (Ramírez *et al.*, 2020).

La presente investigación está enfocada en la mezcla por medio de aireación en un biorreactor Applikon a escala laboratorio el cual es empleado en la biorremediación de agua residuales mediante microalgas. Para ello se propusieron tres diferentes tipos de velocidad de aireación 1.6, 3.2 y 4.8 L/min y con ayuda de la RTD podemos evaluar los tiempos de mezclado no idealidades de acuerdo con las velocidades propuestas y con ayuda de la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) que es una herramienta ampliamente utilizada para investigar las zonas muertas o estancadas que se generan dentro del biorreactor por operaciones o diseños geométricos (Hernández *et al.*, 2016).

Con esta información, se puede estudiar cómo optimizar el biorreactor para mejorar el movimiento del agua, lo que favorece el crecimiento de la microalga, la eliminación de contaminantes en aguas residuales y la captura de dióxido de carbono. Esto trata dos problemas ambientales importantes que forman parte de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible: el objetivo 6 sobre agua limpia y saneamiento, y el objetivo 13 sobre acción por el clima.

Desarrollo

El análisis del tiempo de permanencia se llevó a cabo empleando tres niveles de aireación: 1.6, 3.2 y 4.8 L/min. Se empleó el volumen máximo del biorreactor (4 L) y se instaló un medidor digital con dos electrodos, uno de entrada y otro de salida, tal como se muestra en la Figura 1. Se llevó a cabo una prueba de pulso utilizando una bomba

dosificadora. Para mantener el volumen, se ajustó el flujo de entrada y salida a 20 ml por minuto. Luego, se inyectó 5 ml de trazador de cloruro de sodio, con una concentración de 1 molar, y se monitoreó cada 15 segundos hasta completar un minuto, y luego cada minuto hasta que la concentración se diluyera por completo.

Para la realización de la simulación fue necesario efectuar una determinación del tamaño de burbuja, para ello se tomaron diez imágenes digitales de las tres diferentes aireaciones las cuales fueron procesadas y analizadas en el software *imagi* el cual es de uso libre. Con ellos se determinó el diámetro de burbuja, la Tabla 1 muestra los diferentes valores obtenidos con respecto a cada aireación.

Finalmente, con los datos recopilados se hizo un promedio con el método de Sauter, este método sirve para calcular el diámetro de una burbuja en un sistema empleando la Ecuación 1. Donde D_{32} es el diámetro ponderado de la burbuja n_i es el número de burbujas y d_i es el diámetro de estas. Es importante conocer el diámetro de burbuja ya que es un parámetro necesario para llevar a cabo la simulación.

Tabla 1. Diámetro de burbujas obtenidos en las diferentes aireaciones

Aireación		
1.6 L/min	3.2 L/min	4.8 L/min
Tamaño de burbuja		
1.5 mm	3 mm	4 mm
2 mm	3 mm	4 mm
1.5 mm	2.5 mm	4 mm
1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm
1.5 mm	3 mm	4 mm
1 mm	3 mm	5 mm
2 mm	2.5 mm	4.5 mm
2 mm	3 mm	4 mm
2 mm	2.5 mm	5 mm
1.5 mm	2.5 mm	4 mm

$$\bar{d}_{32} = \frac{\sum_i^n n_i d_i^3}{\sum_i^n n_i d_i^2} \quad (1)$$

Este estudio se usó para imitar el movimiento de fluidos en el mundo digital. Se usó el programa de diseño SolidWorks para crear la geometría. El biorreactor mide 52 centímetros de alto y tiene un muro de 0.35 centímetros. Se divide en tres partes: la parte de arriba, que tiene un diámetro de 14 centímetros y una altura de 7.5 centímetros; tiene forma cilíndrica de 65 centímetros y una altura de 75 centímetros. Ver Figura 1. Se usó el software de simulación COMSOL multiphysics 6.2 para realizar la simulación. En esta ocasión, el biorreactor Applikon basa su sistema de homogenización o mezclado en el movimiento ascendente de las burbujas inyectadas, este movimiento se simuló usando el modelo RANS (ecuaciones de Reynolds, Average Navier-Stokes) y la ecuación de turbulencia k-ε. La burbuja llegó a medir 3.48 milímetros, un flujo de 1.6 litros por minuto a una temperatura de 25°C.

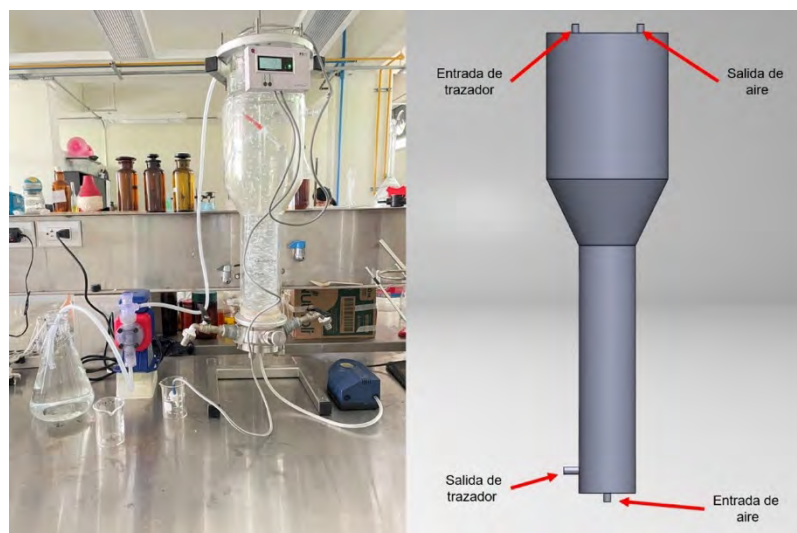


Figura 1. a) biorreactor montado y puesto en marcha b) geometría de biorreactor en 3D.

Las variables para utilizar fueron el diámetro de burbuja, la velocidad de entrada, temperatura y viscosidad. Para posteriormente especificar cada punto de estas variables en la geometría, e indicar las condiciones de cada una de las paredes según sea el caso, Figura 1.

El tipo de mallado utilizado fue tetraédrico y cuadrática, ambas mallas se calibraron a dinámica de fluidos y el tamaño de elemento fue fino esto con la finalidad de optimizar los recursos computacionales ya que esto es crucial en cuestión de tiempo al correr la simulación Tabla 2. El equipo utilizado para el análisis de la simulación fue una Workstation Lenovo Intel Xeon a 2.10GHz y una RAM de 250 GB.

Tabla 2. Detalles geométricos del mallado utilizado.

Applikon			
Geometría	Elementos	Domino	Tamaño de elemento
Cuerpo principal	4440	cuadro	fino
Entrada y salida	2542	tetraédrico	fino

Resultados

La Figura 2 muestra la cinética de concentración de trazador ($C(t)$) en la que se comparó la concentración de salida del trazador con respecto al tiempo para las tres aireaciones propuesta. En la cual se observa como la aireación de 4.8 L/min tiene un mezclado rápido y homogéneo, con respecto a los otros niveles de aireación, sin embargo, el consumo de potencia de aireación es mayor.

La forma de la curva mostro el comportamiento característico de un reactor de mezcla completa, al ir disminuyendo su concentración gradualmente. A diferencia de un flujo pistón que desaparece repentinamente como el reportado por Díaz Marrero *et al.* (2014) en un Reactor Empacado de Flujo Ascendente (REFA). Sin embargo tambien se puede deducir que el comportamiento tiende a la idealidad. A diferencia del flujo no ideal presentado en reactores Ovoides estudiados por Hernández-Aguilar *et al.* (2016).

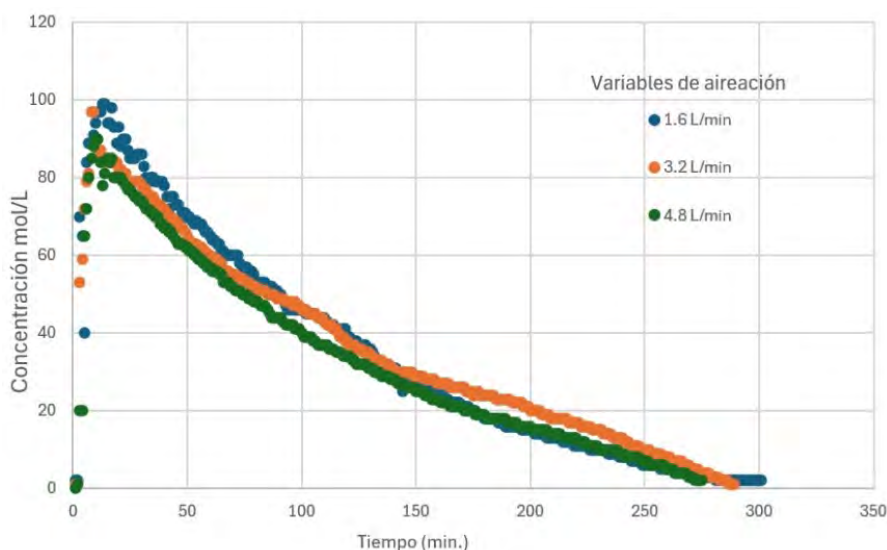


Figura 2. Distribución de tiempos de residencia

De igual manera se observa el funcionamiento de tipo mezcla completa donde la concentración del trazador fue aumentando de manera progresiva para los 3 niveles de aireación a partir del segundo 45. en la cual la aireación de 1.6 L/min presento la mayor concentración máxima esto ocurre por la presencia de zonas muertas como lo presento Bahl *et al.* (2012) en su reactor de reflujo.

La tabla 3 se muestran los datos experimentales los cuales interpretan los resultados de los tiempos de residencia de la curva en donde t_p es el tiempo transcurrido, t_i es el tiempo desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente, t_c es el tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/2$, t_b es el tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/10$ y t_m es el tiempo correspondiente a la salida del 50% de la cantidad de trazador inyectado estas relaciones son planteadas por Unigarro *et al.* (2014) t_p/t_o , t_i/t_o , t_c/t_o , t_b/t_o y t_m/t_o . Las cuales nos indica un regimen de flujo de mezcla completa con presencia de zonas muertas y cortos circuitos.

Tabla 3. Análisis de tiempos de residencia

Caudal de alimentación			
Tiempo	1.6 L/min	3.2 L/min	4.8 L/min
t_o	800	800	800
t_p	99	97	90
t_i	3	2	2
t_c	5	4	4
t_b	175	167	156
t_m	84.28	91.30	85.63
t_p/t_o	0.123	0.121	0.112
t_i/t_o	0.003	0.002	0.002
t_c/t_o	0.006	0.005	0.005
t_b/t_o	0.218	0.208	0.195
t_m/t_o	0.105	0.114	0.107
t_p/t_o	Predomina flujo mezclado	Predomina flujo mezclado	Predomina flujo mezclado
t_i/t_o	Predomina flujo mezclado con cortos circuitos	Predomina flujo mezclado con cortos circuitos	Predomina flujo mezclado con cortos circuitos
t_c/t_o	Flujo mezcla completa	Flujo mezcla completa	Flujo mezcla completa
t_b/t_o	No aplica	No aplica	No aplica
t_m/t_o	Cortos circuitos y/o zonas muertas	Cortos circuitos y/o zonas muertas	Cortos circuitos y/o zonas muertas

Perfiles hidrodinámicos

La Figura 3a muestra cómo se mueve el flujo en el biorreactor con una aireación de 1.6 L/min. Las líneas blancas indican el camino de la aireación y se pueden ver áreas muertas, especialmente donde se forman más vórtices, esto se debe a la baja velocidad del flujo. Al aumentar la velocidad de aireación a 3.2 L/min (Figura 3b), se pueden ver cambios en el flujo y una reducción de las áreas muertas, lo que indica que hay un mejor mezclado por la menor resistencia del líquido.

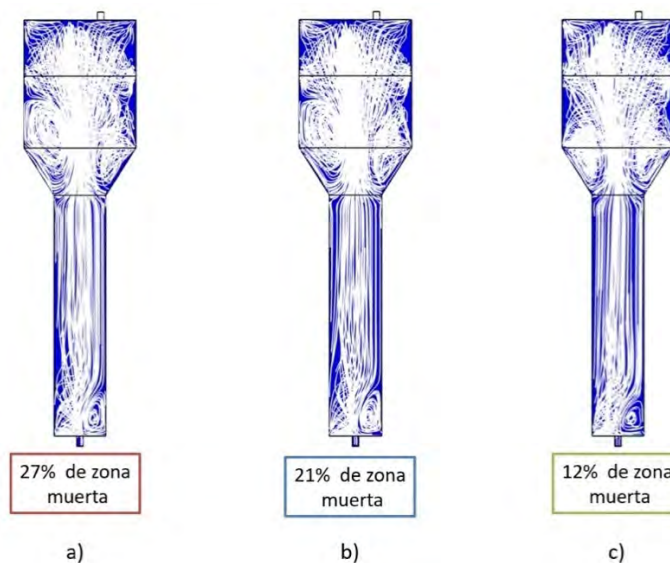


Figura 3. Simulación CFD de perfiles de velocidad a) Sistema con aireación de 1.6 L/min, b) Sistema con aireación de 3.2 L/min, c) Sistema con aireación de 4.8 L/min.

Finalmente, se observa que la aireación de 4.8 L/min (Figura 3c) produjo menos zonas muertas o estancadas al aumentar el flujo de aire. Esto sucede porque rompe más rápidamente la resistencia creada por el líquido, tal como lo muestra Salehpour *et al.* (2019) en su estudio sobre el comportamiento hidrodinámico de un reactor airlift con tubo de circulación tipo en varias configuraciones. Cabe mencionar que las zonas muertas fueron calculadas por medio de volumetría tomando como referencias las partes de color azul donde no se muestra ningún movimiento de fluido o es muy bajo.

Conclusiones

Según los resultados de los RTD, se observó un sistema de mezcla completa con tres diferentes caudales de aireación. Sin embargo, se encontraron picos que indicaron cortocircuitos, lo que muestra un comportamiento no ideal. Además, los resultados hidrodinámicos indican que hay una mejor mezcla y menos zonas muertas con la aireación a una velocidad de 4.8 L/min. Esto indica que, a mayor velocidad de alimentación, el sistema de mezclado funciona mejor, y esto también se muestra en los resultados de los RTD. Por esto, es importante la CFD y la determinación experimental de RTD en el diseño y mejora de reactores.

Bibliografía

- A. Ramírez, L., L. Pérez, E., García Díaz, C., Camacho Luengas, D., Ratkovich, N., & H. Reyes, L. (2020). CFD and Experimental Characterization of a Bioreactor: Analysis via Power Curve, Flow Patterns and $k_L a$. *MDPI*, 1-28. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/7/878>
- Bahl C. D., Gely, M. C. , & Pagano, A. M. (2012). Patrones de Flujo en Reactores Químicos: Desarrollo de Modelos Matemáticos y Numéricos Basados en CFD. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 49-68. <https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4051>
- Díaz Marrero, M., Dueñas Moreno, J., & Cabrera Díaz, A. (2014). Estudio hidrodinámico de reactores empacados de flujo ascendente (REFA). *Ingeniería Hidráulica Ambiental*, 101-108.
- Hernández Aguilar, E., Alvarado Lassman, A., Osorio Mirón, A., & Méndez Contreras, J. M. (2016). Development of energy efficient mixing strategies in egg-shaped anaerobic reactors through 3D CFD simulation. *Journal of Environmental Science and Health*, 536-543. <https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1141619>
- Salehpour, R., Jalilnejad, E., Nalband, M., & Ghasemzadeh, K. (2019). Hydrodynamic behavior of an airlift reactor with net draft tube with different configurations: Numerical evaluation using CFD technique. *Particuology Science and Technology of Particles*, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.09.005>
- Unigarro, O., Dimitriv, G., Zambrano, R., Lizeth, H., & Gallo, C. (2014). Caracterización y Modelación del Comportamiento Hidrodinámico de un Reactor UASB. *revista EIA*, 67-75. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/Reveiaenglish/article/view/940>

Colectores solares para calentar aire. Energía renovable para las necesidades de hoy

Lilia L. Méndez-Lagunas, Juan Rodríguez-Ramírez *, Vicencio Almaraz-Almaraz

Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Oaxaca, México

* Autor de correspondencia: jrodrigr@ipn.mx; Tel.: 5557296000 ext 82772

Artículo de divulgación científica

Recibido: 5 de junio de 2025 Aceptado: 28 de junio de 2025 Publicado: 18 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.474>

Resumen: El uso de la energía se ha convertido en una preocupación crucial en las últimas décadas debido al rápido aumento de la demanda energética. Además, el decremento en la disponibilidad de los recursos energéticos, el cambio climático y calentamiento global obliga a buscar fuentes alternas de energía. El secado de alimentos es uno de los procesos industriales donde existe una alta demanda de energía. Las necesidades energéticas del secado pueden ser proporcionadas de manera parcial o total por la energía solar. En este estudio se evaluó un colector solar de doble paso y se encontró que temperaturas de hasta 53 °C son posibles de alcanzar durante el día, lo cual es suficiente para el proceso de secado de alimentos. Se concluye que los colectores solares tienen gran potencial de aplicación en el proceso de secado ya que reducen significativamente el uso de energía convencional con claras ventajas ambientales en el secado de frutas y hortalizas.

Palabras clave: Colector solar; Energía térmica; Secado solar, Sistema híbrido

Introducción

La creciente demanda de energía para las necesidades domésticas, así como para la industria de procesos ha favorecido el desarrollo de tecnologías innovadoras en el área de energía solar. Algunas aplicaciones ya son comerciales como los calentadores solares de agua, sin embargo, otras aplicaciones como el calentamiento de aire usando colectores solares es poco conocido (Pathak *et al.* 2023). En México, se estimaba que se utilizaba en captadores solares una superficie de 2,506,602 m², distribuidos en captadores planos descubiertos 34.1%, captadores planos cubiertos 37.6%, captadores de tubo de vacío 27% y captadores de aire 0.4 % (García Valladares & Pilatoswky Figueroa, 2017).

El propósito de los colectores solares es capturar la energía solar y transferirla a un fluido de servicio que puede ser agua, aire o aceites. La energía proporcionada por los colectores se denomina energía solar térmica.

El colector solar está conformado por una cubierta transparente superficie o placa absorbedor, carcasa con o sin aislante térmico, placa absorbedores y aislante térmico, generalmente ubicado bajo la placa absorbente (Figura 1).

Existen diversas clasificaciones de colectores solares. Pueden clasificarse de acuerdo con la temperatura que puede alcanzar el fluido térmico (alta, media y baja); de acuerdo con el tipo de colector (plano y parabólico, tubos evacuados, Fresnel y concentradores cilíndricos-parabólicos compuestos); de acuerdo con su movilidad (estacionario y no estacionario). Otra clasificación es de acuerdo con la manera de aprovechar el fluido térmico (directa o indirecta).

Un ejemplo del uso indirecto de la energía térmica es el calentamiento de aceite calentado por concentradores solares. Este fluido principal puesto en contacto con un fluido secundario, generalmente a través de intercambiadores de calor, el cual finalmente es aplicado en algún proceso.

El aire también puede ser un fluido de servicio que, al ser calentado por colectores solares, puede ser utilizado directamente para calefacción de los hogares o en aplicación en procesos, como el secado de alimentos.



Figura 1. Partes del colector plano: 1) Superficie transparente, 2) Carcasa, 3) Placa absorbidora y 4) Aislante térmico.

Abordaremos más a detalle estos colectores y las implicaciones de su uso en el secado de alimentos.

Desarrollo

Los colectores solares planos para calentar aire son poco conocidos particularmente para aplicación en procesos como el secado de los alimentos.

Las temperaturas requeridas para secar alimentos son, en general, entre 40 y 70°C por lo que los colectores solares de baja temperatura son suficiente para proporcionar la energía requerida. Las temperaturas alcanzadas dependen de la ubicación geográfica donde se colocan los colectores. En México, la mayor parte del país reúne las condiciones de irradiación suficiente para proporcionar, al menos por algunas horas, la energía suficiente para calentar aire hasta 50 °C (García Zamora, 2022). Se ha reportado que en promedio se recibe una irradiación global de 5.5 kWh/m² (Santos *et al.*, 2023), energía suficiente para el propósito de secado de alimentos. Fuera de las horas de alta irradiación se requiere complementar la energía térmica para alcanzar temperaturas mayores o mantener un mínimo de temperatura aún en condiciones de baja irradiación solar. Para esas condiciones se desarrollaron los sistemas híbridos, en donde se combina la energía solar con otras energías como la energía eléctrica, gas y biomasa (Figura 2).

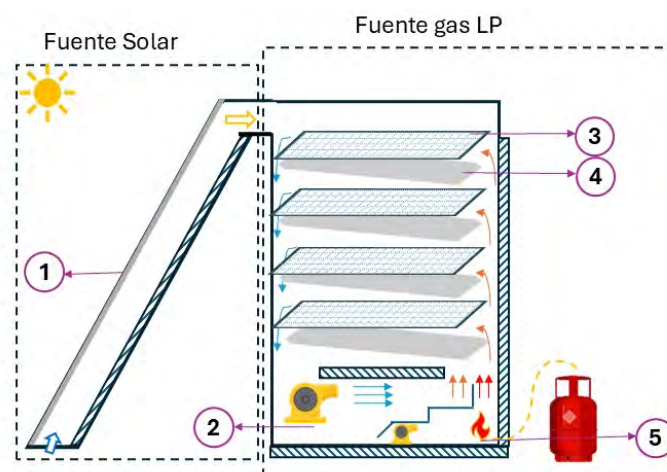


Figura 2. Sistema de secado híbrido con fuente de energía solar y gas LP (Desarrollado en CIIDIR-Oaxaca), 1) Colector solar, 2) Ventilador radial, 3) Bandejas de secado, 4) Deflectores de aire y 5) Quemador de gas LP.

Los colectores solares planos que calientan aire se pueden conectar a secadores de alimentos (Figura 3). El aire caliente circula desde el colector hasta el secador utilizando un ventilador. La energía necesaria para mover el ventilador puede ser proporcionada también por la energía solar a través de una placa fotovoltaica que genera electricidad.

En el interior de los secadores el aire circula de manera transversal o longitudinal de acuerdo con el diseño de los secadores. En secadores convectivos (que hacen uso de aire caliente para la deshidratación) es necesario que los secadores tengan un diseño que permita que una proporción del aire de secado con alto contenido de humedad relativa salga del secador, para permitir que entre a la cámara de secado aire caliente con un bajo contenido de humedad relativa proveniente del colector solar.

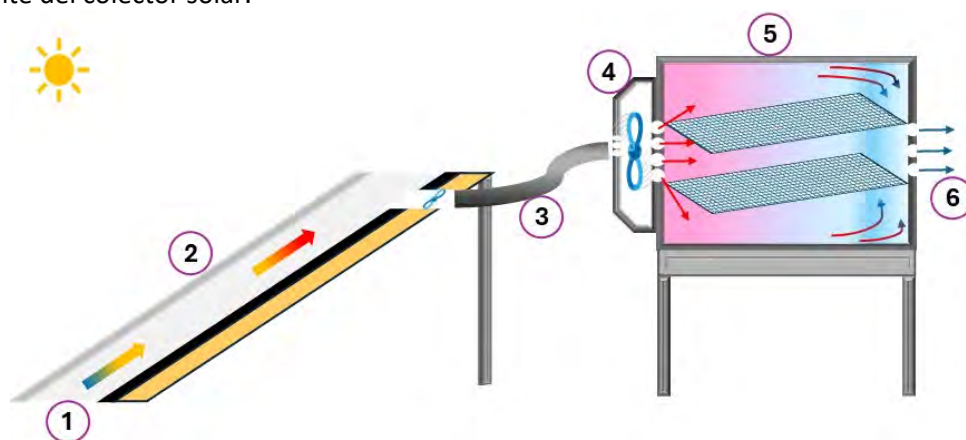


Figura 3. Sistema de secado solar de un paso, 1) Entrada de aire, 2) Colector solar para calentamiento de aire, 3) Conducto de aire (Colector-cámara de secado), 4) Ventilador de distribución de aire caliente, 5) Cámara de secado y 6) salida de aire.

De acuerdo como el aire circula en el interior del colector solar, los colectores se clasifican en de “dos pasos” o de “un paso” (Figura 4). Un ejemplo de colector solar de doble paso es el desarrollado en el Instituto Politécnico Nacional (Patente 5600). Este colector tiene la ventaja de ser ligero, con un peso de 34 kg; construido con aluminio grado alimenticio, resistente a la intemperie; eficiente, ya que proporciona hasta $0.6 \text{ kW/h}\cdot\text{m}^2$ en el período del día entre 10-16 h y cuenta con una placa fotovoltaica insertada que proporciona la energía para el ventilador, lo que lo hace completamente independiente de otros tipos de energía. El aire caliente proporcionado por este colector de doble paso alcanza temperaturas de hasta 53°C y tiene la capacidad de proporcionar la energía térmica necesaria para un deshidratador de gabinete de 1.49 m^2 de área efectiva de secado.



Figura 4. Sistema de secado solar con colector de doble paso (Desarrollado en CIIDIR-Oaxaca), a) Colector solar con panel fotovoltaico y b) cámara de secado (patente del Instituto Politécnico Nacional, Mx/u/2023/000266).

Secadores con mayor capacidad de carga, tal como las de tamaño industrial o semiindustrial, requieren más energía que la proporcionada por los colectores solares planos. Algunas alternativas son utilizar colectores parabólicos o concentradores solares. Alternativamente pueden utilizarse colectores auxiliares o complementarios de más capacidad y alta eficiencia. Aunque no proporcionan la energía total requerido por el deshidratador de alimentos estos colectores complementan la energía proporcionada por otros métodos térmicos.

En este trabajo, para valorar la temperatura alcanzada a lo largo del día por un colector de doble paso se midió la temperatura del aire de salida del colector (Figura 4). Se utilizaron termopares tipo *K* conectados a un sistema de adquisición de datos Keysight DAQ970A. Un termopar fue colocado en la entrada del colector y otro a la salida para medir el incremento de la temperatura del aire. Las temperaturas fueron monitoreadas de 9:00 a las 14:00 del día 6 de marzo del 2025.

El comportamiento de la temperatura del colector solar de doble paso es mostrado en la Figura 5. La temperatura máxima alcanzada fue de 53°C , con una diferencia promedio de 17.40°C entre la temperatura de salida y entrada. Esta temperatura es suficiente para el secado de alimentos, pero debido a que la temperatura mínima requerida se mantuvo por 5 horas, se requerirá de dos días de secado para alimentos con alto contenido de humedad con una carga en el gabinete de secado de 10 kg. Ese tiempo de secado se puede acortar si se utiliza una energía complementaria de otras fuentes, como la energía eléctrica o gas (López-Vidaña *et al.*, 2013).

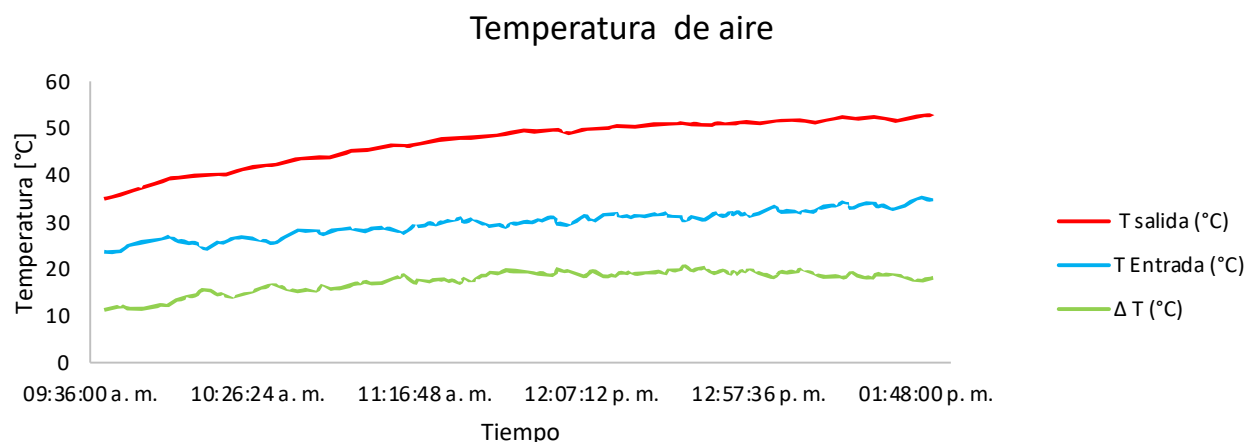


Figura 5. Perfil de temperatura de aire en un colector de doble paso.

Conclusiones

La sustentabilidad de los procesos donde se requiere energía térmica puede ser alcanzada con la ayuda de colectores solares. En particular, en el proceso de secado de los alimentos, el aire caliente proporcionado por los colectores solares tiene un gran potencial debido a que podría reducir significativamente el consumo de energía fósil.

El uso de colectores solares promueve el desarrollo económico a través de la producción de alimentos procesados, sin comprometer los recursos energéticos de las generaciones futuras para satisfacer las necesidades de ahora.

Bibliografía

- García Valladares, O., & Pilatoswky Figueroa, I. (2017). Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. Ciudad de México: IER. <http://coralito.umar.mx:8383/jspui/handle/123456789/1469>
- García Zamora, R. (2022). *Energías Renovables en México*. Ciudad de Mexico: ICEX España. <https://www.camarabilbao.com/wp-content/uploads/2023/03/ENERGIAS-RENOVABLES-Ficha-del-sector-Energías-Renovables-México-2022.pdf>
- López-Vidaña, E. C., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Efficiency of a hybrid solar–gas dryer. *Solar energy*, 93, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.027>
- Pathak, S. K., Tyagi, V. V., Chopra, K., Pandey, A. K., Goel, V., Saxena, A., & Ma, Z. (2023). Energy, exergy, economic and environmental analyses of solar air heating systems with and without thermal energy storage for sustainable development: A systematic review. *Journal of Energy Storage*, 59, 106521. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106521>
- Rodríguez Suárez, S., Espinoza Navarrete, E., Rosenbuch, J., Ortega Navarro, H., Martínez Fernández, M., Cedano Villavicencio, K., & Armenta, M. (2017). *La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México*. Ciudad de México: ProMéxico. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf
- Santos, I., Silva, A., Straffon, A., & Masera, O. (2023). *Hacia un programa nacional de calentadores solares de agua*. México: Pronace ECC-Conahcyt. https://secihtl.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_tematicos/Cuaderno_tematico_IV.pdf

Revisión de las principales tecnologías de captura de CO₂ para los efluentes de sistemas de producción de energía

Daniel Enrique Hernández-Hernández, Esveidi Montserrat Valdovinos-García y Moisés Abraham Petriz-Prieto *

División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Jalpa de Méndez, Tabasco, México.

* Autor de correspondencia: moises_petriz@ujat.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 8 de junio de 2025 Aceptado: 12 de julio de 2025 Publicado: 23 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.485>

Resumen: El desarrollo industrial ha incrementado significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, provocando un aumento acelerado en la temperatura global y agravando el problema del calentamiento global. Para enfrentar esta crisis, es fundamental implementar estrategias efectivas, sostenibles y económicamente viables. Entre los gases responsables, el CO₂ es el más relevante, lo que ha impulsado una intensa investigación en técnicas de captura para mitigar su impacto ambiental. Este artículo presenta una revisión bibliográfica enfocada en analizar las principales ventajas y desafíos de tres tecnologías de captura de CO₂: separación por membranas, absorción y adsorción. Los hallazgos indican que la absorción y la adsorción han sido ampliamente investigadas, con avances significativos en los últimos años. En particular, la absorción ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de nuevos materiales, como aminas y líquidos iónicos, con el objetivo de mejorar la eficiencia de captura y reducir el consumo energético. Por otro lado, la adsorción ha incorporado procesos como la radiación por microondas para optimizar su desempeño. Asimismo, la revisión reveló que las tecnologías de membrana y adsorción aún se encuentran en etapas piloto y de demostración, mientras que la absorción ya ha alcanzado una fase comercial, lo que explica su mayor implementación y uso.

Palabras clave: captura de CO₂; membranas; adsorción; absorción; cambio climático.

Introducción

En la actualidad, el cambio climático es consecuencia del incremento en la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero, Figura 1(a) y 1(b). Aunque este compuesto desempeña un papel clave en el equilibrio térmico del planeta y en la preservación de la biodiversidad, su aumento descontrolado ha intensificado los efectos del calentamiento global (Yan *et al.*, 2017). El incremento significativo de CO₂ en la atmósfera desencadena diversos problemas, como la elevación del nivel del mar, el deshielo de los glaciares y la acidificación de los océanos. Estos cambios impactan a todos los seres vivos, incluidos los seres humanos (Fu *et al.*, 2022).

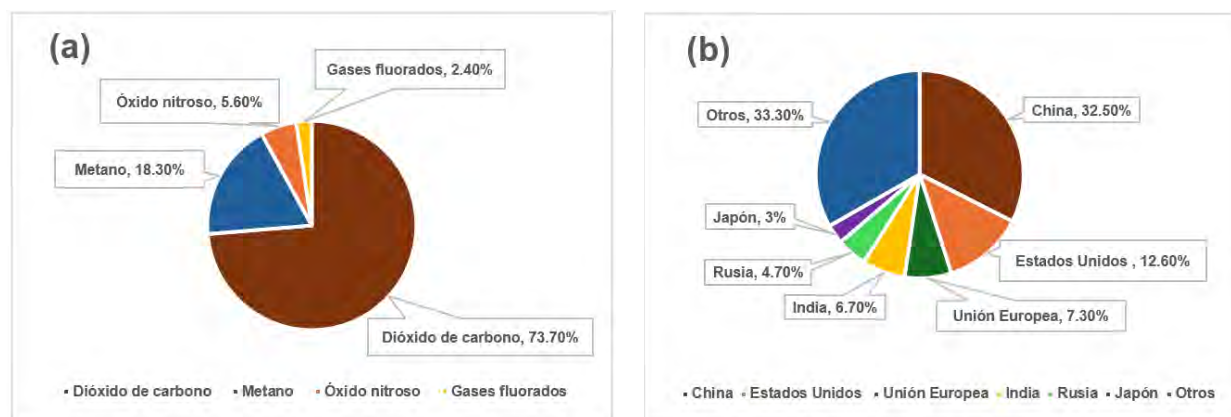


Figura 1. (a) Emisiones globales de gases de efecto invernadero en 2018 por gas (Dziejarski *et al.*, 2023) y (b) Emisiones globales de CO₂ provenientes de la quema de combustibles fósiles en 2020 por país (Dziejarski *et al.*, 2023).

Los gases de efecto invernadero se emiten principalmente a gran escala desde fuentes fijas con altas concentraciones de CO₂, como las plantas de generación eléctrica y diversos procesos industriales. Estas emisiones provienen de la combustión de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo y el carbón (Lillia *et al.*, 2018). Hasta la Revolución Industrial, los niveles de CO₂ se mantenían estables en alrededor de 280 ppm; desde entonces, las actividades humanas

han generado aproximadamente 1.5 billones de toneladas de dióxido de carbono, y las emisiones totales han aumentado un 47 % en la última década, en 2022, los niveles alcanzaron 421 ppm (Cantador-Fernández *et al.*, 2023).

Como resultado, muchas fuentes importantes de emisiones han adoptado uno de los tres sistemas de captura de carbono disponibles: sistemas de captura de oxicombustión, precombustión y postcombustión. Estos sistemas están orientados hacia el rendimiento de la captura y los requisitos mínimos de energía (Yoro *et al.*, 2016).

El sistema de captura de oxicombustión utiliza un gas de combustión principalmente de CO₂ y H₂O, que se crea mediante el uso de oxígeno puro en lugar de aire ambiente (Wohlthan *et al.*, 2024). En un sistema de precombustión, se produce un proceso de conversión en el que el CO₂ es el producto no deseado generado y capturado (Favre, 2007), tanto el monóxido de carbono como los gases de hidrógeno reaccionan con el oxígeno/aire, generando un exceso de CO₂. Un sistema de captura de postcombustión tiene la capacidad de reducir la concentración de CO₂ entre un 5% y un 15% cuando se captura de la corriente de gases residuales después de la conversión de la fuente de carbono (Tontiwachwuthikul *et al.*, 2011).

Los tres sistemas son potencialmente útiles para mitigar las emisiones de CO₂ globales. No obstante, la captura de postcombustión es más ventajosa que los otros dos sistemas porque se puede adaptar a las plantas existentes, lo que reduce los costos de capital iniciales de esta fuente de mitigación (Madden & Curtin, 2016).

Desarrollo

Separación por membranas: adaptabilidad en sistemas de precombustión y postcombustión

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la relación entre la selectividad y la permeabilidad en los tres tipos de membrana (Esther Puentes Quiroz Laura Andrea Velandia Charris & Omar Andrés Benavides Prada, n.d.).

Membranas	Ventajas	Desventajas	Fuente
Poliméricas	Fácil síntesis y fabricación Bajo costo de producción Buena estabilidad mecánica	Baja estabilidad térmica y química Plastificación El tamaño de los poros no se puede ajustar Sigue el equilibrio entre selectividad y permeabilidad	(Kamolov <i>et al.</i> , 2023; Vinoba <i>et al.</i> , 2017)
Inorgánicas	Mayor estabilidad química, mecánica y térmica El tamaño de los poros es ajustable Capaz de trabajar en condiciones duras Compensación moderada entre selectividad y permeabilidad	Frágil Alto costo Dificultades a la hora de su aplicación	(Kamolov <i>et al.</i> , 2013)
De Matriz Mixta	Mejor estabilidad mecánica y térmica Menor plastificación Menor necesidad de energía Compactos a mayor presión Supera el equilibrio entre selectividad y permeabilidad	La elevada fracción de cargas lo hace frágil en la matriz polimérica La calidad de la matriz polimérica dicta la estabilidad química y térmica	(Joglekar <i>et al.</i> , 2019; Tang <i>et al.</i> , 2021)

Las técnicas de separación mediante membranas representan una alternativa moderna y eficiente para extraer CO₂ de mezclas gaseosas resultantes de procesos de combustión (Mondal *et al.*, 2012). Este método se basa en el uso de una delgada película de material semipermeable, capaz de permitir el paso selectivo de ciertos componentes del gas. La separación ocurre cuando se aplica una fuerza impulsora, como una diferencia de presión, temperatura o un gradiente

eléctrico entre ambos lados de la membrana. Como resultado, la corriente original de gas (también conocida como corriente de alimentación) se divide en dos flujos: uno que atraviesa la membrana, llamado permeado, y otro que queda retenido, conocido como retentado (Dziejarski *et al.*, 2023).

Las membranas empleadas en la separación de CO₂ pueden clasificarse atendiendo a tres aspectos fundamentales: su origen, su morfología y su estructura. El desempeño de una membrana está directamente relacionado con los materiales empleados en su fabricación, así como con su capacidad para permitir el paso del CO₂ y su nivel de selectividad. Estos dos factores, permeabilidad y selectividad son determinantes en la viabilidad económica de un proceso de separación de gases. En particular, la selectividad es clave, ya que permite alcanzar altos niveles de pureza y eficiencia en la recuperación del CO₂ (Jasim *et al.*, 2023).

Existen tres tipos principales de membranas: poliméricas, inorgánicas y de matriz mixta (MMM), cada una de ellas clasificada en membranas porosas y no porosas (Mahenthiran & Jawad, 2021). Las membranas orgánicas o poliméricas, elaboradas con polímeros como acetato de celulosa o poliamidas, permiten ajustar su desempeño mediante su composición y método de fabricación (Song *et al.*, 2023). Las inorgánicas, hechas de materiales como cerámicos, metales o zeolitas, destacan por su alta estabilidad térmica y química (Cheng *et al.*, 2023). Por último, las membranas de matriz mixta combinan un polímero con relleno inorgánico, aprovechando lo mejor de ambos materiales en términos de permeabilidad y selectividad (Niu *et al.*, 2024).

Absorción: la solución tradicional en la captura postcombustión

La captura de CO₂ mediante absorción se fundamenta en la transferencia del CO₂, presente en una corriente gaseosa, hacia una fase líquida, utilizando una solución acuosa de carácter alcalino que actúa como absorbente selectivo. En los procesos industriales, esta operación se lleva a cabo en un sistema compuesto por dos torres principales. La primera, conocida como columna de absorción, opera a temperaturas entre 40 y 60 °C, y es donde el solvente químico atrapa el CO₂ del gas. La solución que resulta cargada de dióxido de carbono es enviada luego a una segunda torre, llamada columna de regeneración. En esta etapa, el solvente se somete a temperaturas elevadas, entre 100 y 140 °C, bajo una presión cercana a la atmosférica, lo que permite liberar el CO₂ absorbido. Una vez regenerado, el solvente puede ser reutilizado en el ciclo, ya con una concentración mínima de CO₂ (Buvik *et al.*, 2021).

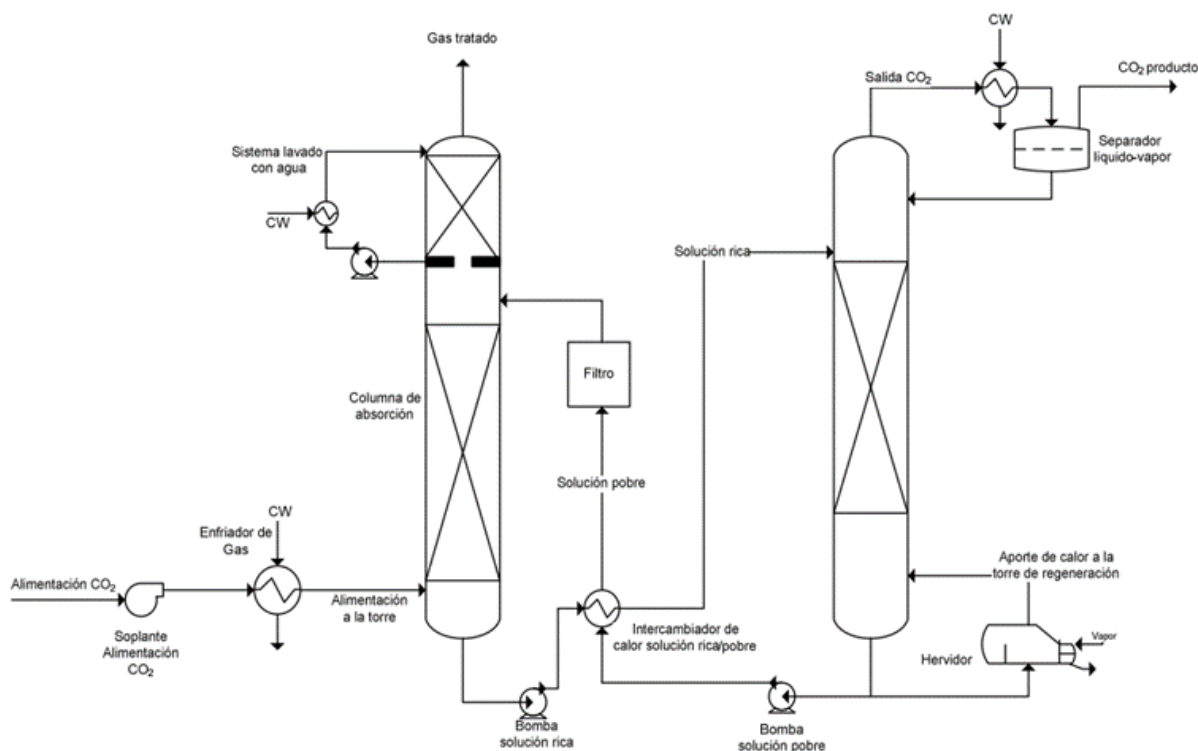


Figura 2. Diagrama básico comercial para un sistema de absorción de CO₂ (Luis & Fuentes, 2007).

La absorción del dióxido de carbono puede clasificarse según el tipo de interacción que se produce entre los componentes del gas y el líquido absorbente. En el caso de la absorción física, el CO₂ se disuelve preferentemente en el líquido sin que ocurra una reacción química, debido a su mayor solubilidad en comparación con otros gases presentes. Por otro lado, en la absorción química, sí se da una reacción entre el CO₂ y algún compuesto presente en la fase líquida. Un ejemplo representativo es el uso de aminas como solventes, donde el gas rico en dióxido de carbono entra en contacto con el líquido absorbente dentro de una columna empacada. Entre los solventes más utilizados se encuentran la monoetanolamina (MEA), la dietanolamina (DEA) y la metildietanolamina (MDEA), cada una con propiedades específicas que las hacen adecuadas para distintas condiciones de operación (Buvik *et al.*, 2021).

Durante muchos años, las aminas han sido empleadas en procesos de endulzamiento del gas natural. Sin embargo, su aplicación en la captura de CO₂ postcombustión presenta ciertos inconvenientes, como el elevado consumo energético y los problemas de corrosión, asociados principalmente al alto contenido de agua en el sistema y a las temperaturas necesarias para regenerar el solvente. A pesar de estas limitaciones, la absorción química sigue siendo una opción eficaz para remover CO₂, especialmente cuando se trata de corrientes con baja concentración de este gas y operando a presiones moderadas o bajas (D. F. Chuahy *et al.*, 2023).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los absorbentes en absorción (Esther Puentes Quiroz *et al.*, 2024)

Absorbente	Ventajas	Desventajas
MEA	Alta velocidad de reacción con CO ₂ . Moderada capacidad de absorción. Bajo costo del disolvente.	Alto requisito energético. Consume hasta el 50% de energía del proceso. Impacto nocivo para el medio ambiente. Alto consumo operativo.
DEA	Bajo costo. Alta velocidad de reacción.	Alta energía para la regeneración del solvente debido a su alto calor de absorción.
MDEA	Bajo costo. Propiedades mejoradas contra la degradación y la corrosión.	Tasas de absorción más bajas.

Adsorción en la postcombustión: precisión en la separación y alternativa en evolución

La adsorción es un método muy utilizado para separar y concentrar el dióxido de carbono presente en mezclas gaseosas, como los gases de combustión o el aire ambiente. Las partículas tienen la capacidad de unirse a adsorbentes específicos como zeolitas, carbonos porosos (carbón activado, tamices moleculares de carbono), óxidos metálicos, silicatos porosos y estructuras organometálicas (Mukherjee *et al.*, 2019).

El proceso de adsorción es cíclico y consta de dos procesos separados: la adsorción y la desorción de CO₂. Tiene lugar como resultado de la capacidad de sorción desigual del adsorbente y la velocidad de la cinética de adsorción de agentes gaseosos seleccionados de la mezcla separada. Durante la adsorción, se llena un aparato experimental con el adsorbente. Después de eso, el gas de combustión que contiene CO₂ se transporta a través de él. Además, la mezcla de gases se conduce a la superficie del material absorbente sólido, que adsorbe moléculas de CO₂ y pasa otros gases a través de su estructura. Después de la adsorción, el CO₂ se elimina de la capa adsorbente (proceso de desorción): la regeneración del adsorbente para su reutilización y luego el CO₂ desorbido se transporta, acondiciona y comprime (Younas *et al.*, 2016).

La tecnología basada en adsorción, que generalmente utiliza adsorbentes en lechos empacados, puede agruparse en tres modos operativos principales, según cómo se lleva a cabo la regeneración del adsorbente: adsorción por oscilación de presión (PSA), adsorción por oscilación de vacío (VSA) y adsorción por cambio de temperatura (TSA).

En el proceso de adsorción, se dispone de una amplia gama de sorbentes, tanto comercialmente disponibles como en desarrollo. Estos incluyen carbones activados, zeolitas, estructuras organometálicas (MOF) y estructuras orgánicas covalentes (COF). Este amplio espectro demuestra que la elección del adsorbente es esencial para llevar a cabo un proceso eficiente, considerando aspectos como alta capacidad de regeneración, alta selectividad, baja penalización de energía para la captura de CO₂, capacidad cíclica estable, estabilidad a largo plazo y sobre todo un bajo costo.

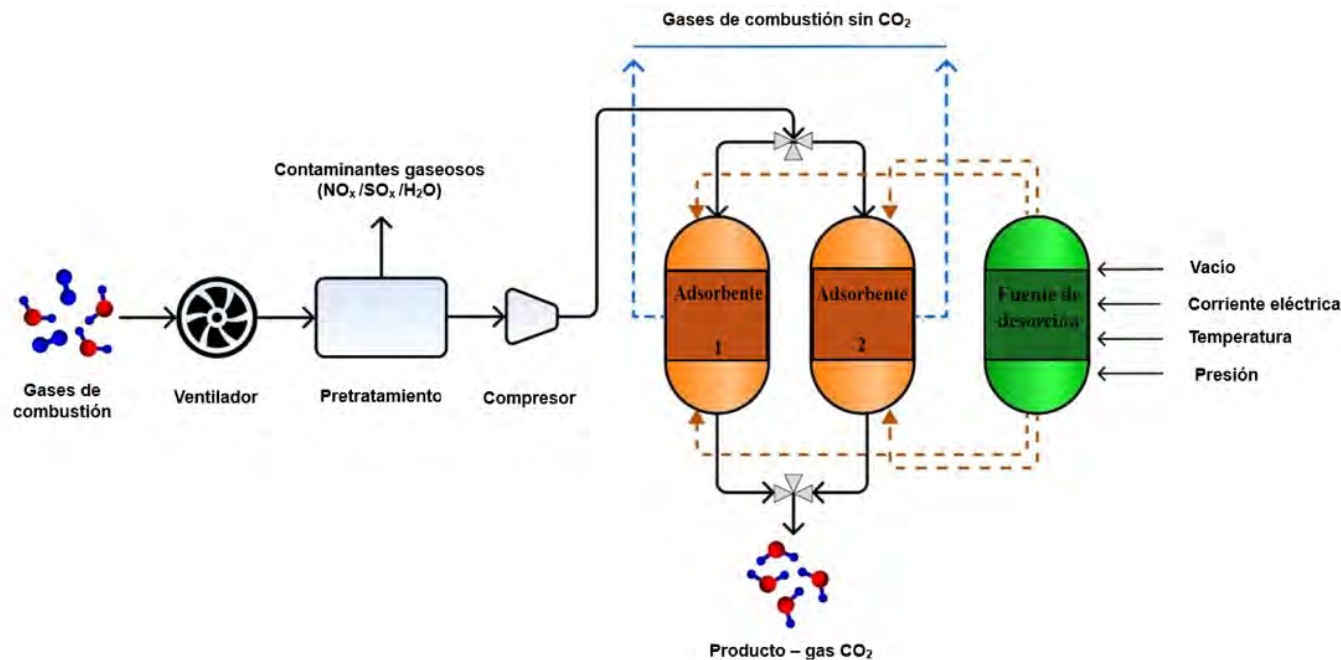


Figura 3. Diagrama esquemático del proceso de adsorción de CO₂ (Dziejarski *et al.*, 2023).

Comparación de las tres tecnologías

La Tabla 3 resume una comparativa de las tres tecnologías de separación para la captura de CO₂.

Tabla 3. Ventajas y desventajas para las tecnologías de separación para la captura de CO₂ (Esther Puentes Quiroz *et al.*, 2024).

Proceso	Ventajas	Desventajas
Absorción	Tecnología más madura. Altas eficiencias de absorción (>90%). El disolvente se regenera por encima de 95%. Los absorbentes se pueden regenerar mediante despresurización y calentamiento. La alta reactividad. Bajo costo del solvente.	Degradación del disolvente. LA regeneración requiere una gran cantidad de energía. Entorno corrosivo. Emisiones por degradación del disolvente. Costo de mantenimiento relativamente alto. La eficiencia de la absorción depende en gran medida de las concentraciones de CO ₂ .
Adsorción	Proceso reversible y absorbentes reciclables. Altas eficiencias de adsorción (>85%). Baja generación de residuos. Resistente al uso a largo plazo. Menor impacto ambiental.	Se necesitan adsorbentes de alta temperatura. Requiere alta energía para la desorción de CO ₂ . El proceso de desorción consume mucha energía.
Membrana	Altas eficiencias de separación (>80%). Sin procesos de regeneración. Se producen menos residuos sólidos. Menos consumo de químicos.	Equilibrio de permeabilidad y selectividad. Altos costos de funcionamiento. Alta energía para los compresores.

Revisión de avances recientes en tecnologías de captura de CO₂

Las membranas utilizadas para la captura de CO₂ han mostrado avances notables en los últimos años gracias al desarrollo de membranas híbridas, conocidas como de matriz mixta (MMM). Estas combinan materiales poliméricos con rellenos inorgánicos, logrando superar la tradicional limitación entre permeabilidad y selectividad. En un estudio reciente, Li, Kujawa, *et al.* (2024) reportaron que las MMM con nanorrellenos bidimensionales alcanzaron una selectividad CO₂/N₂ superior al 50 % junto con una alta estabilidad mecánica, demostrando su potencial para aplicaciones industriales (Li, Kujawa, *et al.*, 2024).

La absorción química continúa siendo ampliamente utilizada, especialmente con solventes basados en aminas. Sin embargo, investigaciones recientes han buscado aumentar su eficiencia y reducir su elevado consumo energético mediante nuevas formulaciones. Por ejemplo, Li, Shen, *et al.* (2024) evaluaron una mezcla ternaria de aminas (DEEA+PZ+PD) y encontraron una capacidad de carga de CO₂ de 0.988 mol CO₂/mol amina, con un consumo energético de regeneración de 2.14 GJ/t CO₂, lo que supone una mejora del 43.7 % respecto a la monoetanolamina tradicional (Li, Shen, *et al.*, 2024).

En el caso de la adsorción, la investigación se ha centrado en el uso de materiales sólidos como zeolitas y tamices moleculares de carbono. Estos adsorbentes han demostrado alta selectividad y buena capacidad de captura, aunque con retos asociados a la regeneración. Un estudio comparativo realizado por Gutierrez-Ortega *et al.* (2022) mostró que las zeolitas sin aglutinante ofrecieron mayor selectividad CO₂/N₂ y menor consumo energético en regeneración frente a los tamices moleculares de carbono, confirmando su potencial en procesos de postcombustión (Gutierrez-Ortega *et al.*, 2022).

Conclusiones

La presente revisión ha abordado de manera integral tres de las tecnologías más relevantes para la captura de dióxido de carbono: separación por membranas, absorción y adsorción. Cada una de ellas representa una estrategia con potencial comprobado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el impacto del cambio climático.

La separación por membranas se perfila como una opción atractiva gracias a su bajo requerimiento energético, ya que aprovecha gradientes de presión y concentración, y puede operar a temperaturas moderadas, lo que reduce los costos operativos en comparación con otros métodos. No obstante, su implementación a gran escala aún enfrenta retos importantes, particularmente en el equilibrio entre permeabilidad y selectividad, lo que mantiene a esta tecnología en fases piloto y de demostración.

Por su parte, la absorción química ha sido ampliamente usada en la industria mediante aminas como la MEA, demostrando ser una técnica eficiente para eliminar CO₂. Sin embargo, presenta limitaciones como el elevado consumo energético durante la regeneración del solvente y problemas asociados a la corrosión. Frente a estas dificultades, la investigación actual ha orientado sus esfuerzos hacia el desarrollo de absorbentes alternativos como mezclas de aminas, nanofluidos y líquidos iónicos, en busca de procesos más sostenibles y económicos.

Finalmente, la adsorción ha mostrado resultados prometedores en cuanto a eficiencia de captura, empleando materiales como carbón activado, zeolitas y estructuras tipo MOF. A pesar de ello, su aplicación industrial enfrenta desafíos relacionados con los altos costos de regeneración y reposición de los adsorbentes. No obstante, la combinación de esta técnica con otros métodos de separación, así como el desarrollo de nuevos materiales, abre un panorama alentador para el futuro.

Estos avances evidencian que la captura de CO₂ no es un camino único, sino un abanico de soluciones en constante evolución. Para que estas tecnologías logren una implementación amplia y efectiva, es indispensable continuar invirtiendo en investigación, desarrollo de nuevos materiales y mejoras en la eficiencia de los procesos. Solo así será posible convertir estas estrategias en herramientas económicamente viables y ambientalmente sostenibles, capaces de integrarse de manera realista en la lucha global contra el cambio climático.

Bibliografía

- Buvik, V., Bernhardsen, I. M., Figueiredo, R. V., Vevelstad, S. J., Goetheer, E., van Os, P., & Knuutila, H. K. (2021). Measurement and prediction of oxygen solubility in post-combustion CO₂ capture solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 104, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103205>
- Cantador-Fernández, D., Suescum-Morales, D., Esquivel, D., Jiménez, J. R., & Fernández-Rodríguez, J. M. (2023). CO₂ adsorption by ethane periodic mesoporous organosilica at low temperatures and high pressure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110582. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110582>
- Cheng, X., Liao, Y., Lei, Z., Li, J., Fan, X., & Xiao, X. (2023). Multi-scale design of MOF-based membrane separation for CO₂/CH₄ mixture via integration of molecular simulation, machine learning and process modeling and simulation. *Journal of Membrane Science*, 672, 121430. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121430>
- D. F. Chuahy, F., Kincaid, K., & Nawaz, K. (2023). A thin-film modeling approach for analysis of carbon capture sorbent-based devices. *Carbon Capture Science & Technology*, 9, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100134>
- Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, 342, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>
- Esther Puentes Quiroz Laura Andrea Velandia Charris, L., & Omar Andrés Benavides Prada, C. (2024). *TECNOLOGÍAS PARA CAPTURA DE CO₂ 1 Revisión Sistemática de Tecnologías para Captura de CO₂*.
- Favre, E. (2007). Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: Can gas permeation membranes compete with absorption? *Journal of Membrane Science*, 294(1–2), 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.02.007>
- Gutierrez-Ortega, A., Montes-Morán, M. A., Parra, J. B., Sempere, J., Nomen, R., & Gonzalez-Olmos, R. (2022). Comparative study of binderless zeolites and carbon molecular sieves as adsorbents for CO₂ capture processes. *Journal of CO₂ Utilization*, 61, 102012. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102012>
- Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J., & Xu, P. (2022). Research progress on CO₂ capture and utilization technology. *Journal of CO₂ Utilization*, 66, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>
- Jasim, D. J., Mohammed, T. J., Harharah, H. N., Harharah, R. H., Amari, A., & Abid, M. F. (2023). Modeling and Optimal Operating Conditions of Hollow Fiber Membrane for CO₂/CH₄ Separation. *Membranes*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/membranes13060557>
- Lillia, S., Bonalumi, D., Grande, C., & Manzolini, G. (2018). A comprehensive modeling of the hybrid temperature electric swing adsorption process for CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 74, 155–173. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.04.012>
- Luis, A., & Fuentes, L. (2007). Captura de CO₂ en postcombustión: absorción.
- Li, G., Kujawa, J., Knozowska, K., Kareiva, A., Favre, E., Castel, C., & Kujawski, W. (2024). The advancements in mixed matrix membranes containing functionalized MOFs and 2D materials for CO₂/N₂ separation and CO₂/CH₄ separation. *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100267>
- Li, G., Shen, X., Jiao, X., Xie, F., Hua, J., Lin, H., Yan, F., Wu, H., & Zhang, Z. (2024). Novel tri-solvent amines absorption for flue gas CO₂ capture: Efficient absorption and regeneration with low energy consumption. *Chemical Engineering Journal*, 493, 152699. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152699>
- Madden, D., & Curtin, T. (2016). Carbon dioxide capture with amino-functionalised zeolite-β: A temperature programmed desorption study under dry and humid conditions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 228, 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.03.041>
- Mahenthiran, A. V., & Jawad, Z. A. (2021). A prospective concept on the fabrication of blend pes/peg/dmf/nmp mixed matrix membranes with functionalised carbon nanotubes for co₂/n₂ separation. In *Membranes* (Vol. 11, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes11070519>
- Mondal, M. K., Balsora, H. K., & Varshney, P. (2012). Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review. *Energy*, 46(1), 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.006>
- Mukherjee, A., Okolie, J. A., Abdelrasoul, A., Niu, C., & Dalai, A. K. (2019). Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. *Journal of Environmental Sciences*, 83, 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>
- Niu, Z., He, N., Yao, Y., Ma, A., Zhang, E., Cheng, L., Li, Y., & Lu, X. (2024). Mixed matrix membranes for gas separations: A review. *Chemical Engineering Journal*, 494, 152912. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152912>
- Song, X., Yao, X., Zhang, F., Ang, E. H., Rong, S., Zhao, K., He, K., & Xiang, H. (2023). Nanofiber membrane coated with lithiophilic polydopamine for lithium metal batteries. *Journal of Membrane Science*, 685, 121951. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121951>
- Tontiwachwuthikul, P., Idem, R., Gelowitz, D., Liang, Z. H., Supap, T., Chan, C. W., Sanpasertparnich, T., Saiwan, C., & Smithson, H. (2011). Recent progress and new development of post-combustion carbon-capture technology using reactive solvents. In *Carbon Management* (Vol. 2, Issue 3, pp. 261–263). <https://doi.org/10.4155/cmt.11.20>
- Wohlthan, M., Thaler, B., Helf, A., Keller, F., Kaub, V., Span, R., Gräbner, M., & Pirker, G. (2024). Oxyfuel combustion based carbon capture onboard ships. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 137, 104234. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104234>
- Yan, M., Li, Y., Chen, G., Zhang, L., Mao, Y., & Ma, C. (2017). A novel flue gas pre-treatment system of post-combustion CO₂ capture in coal-fired power plant. *Chemical Engineering Research and Design*, 128, 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.10.005>
- Yoro, K. O., Sekoai, P. T., Levy, J. K., & Yu, P. (2016). The Potential of CO₂ Capture and Storage Technology in South Africa's Coal-Fired Thermal Power Plants. *Environments* 2016, Vol. 3, Page 24, 3(3), 24. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS3030024>
- Younas, M., Sohail, M., Leong, L. K., Bashir, M. J., & Sumathi, S. (2016). Feasibility of CO₂ adsorption by solid adsorbents: a review on low-temperature systems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(7), 1839–1860. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1008-1>

Aerogel nanoestructurado a base de sílice: aplicaciones en aislamiento térmico

Luis Alejandro García-López, Rogelio Núñez-Batres y Angel Daniel Ramírez-Herrera *

Ingeniería en Nanotecnología, Universidad de La Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo, Sahuayo de Morelos, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: 130357@ucemich.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 7 de junio de 2025 Aceptado: 12 de julio de 2025 Publicado: 24 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.483>

Resumen: Ante la creciente demanda de recursos y energía en la actualidad, se buscan materiales que tengan las mismas propiedades que los convencionales o, incluso, mejores con menos recursos. Es de vital importancia encontrar materiales sostenibles que sean capaces de aminorar los daños ambientales de origen antrópico. Por tanto, en el presente trabajo se describe el potencial de los aerogeles a base de sílice, con el propósito de ser aplicado en el sector de la construcción como aislante térmico. El aerogel de sílice (AS) debido a su estructura nanoporosa reduce considerablemente la transmisión de calor, lo que puede ayudar a disminuir el uso de calefacción o refrigeración, minimizando la utilización de recursos. En comparación a materiales convencionales que tienen limitantes y, que, si no son tratados adecuadamente generan residuos contaminantes. La implementación de AS a materiales como el hormigón, recubrimientos como yeso o, incluso, ventanas reducen significativamente la entrada de temperatura. El AS promete mucho en el futuro como nanomaterial sustentable. Por el momento es utilizado en aplicaciones específicas, por tanto, aún se encuentra en desarrollo con costos de producción elevados. No obstante, se busca la producción de cantidades industriales para aumentar su accesibilidad a construcciones convencionales.

Palabras clave: nanomateriales; materiales ultraligeros; método sol-gel; superaislantes; estructura nanoporosa.

Introducción

Actualmente existen objetivos ambientales globales, en búsqueda de la sostenibilidad en torno a la energía asequible sin ser contaminante, la acción por el clima, así como la búsqueda de ciudades y comunidades sostenibles (Naciones Unidas, 2015). Uno de los sectores clave para el cumplimiento de dichos objetivos es el sector de la construcción, a causa de que se posiciona como uno de los mayores contribuyentes a la crisis climática actual (Elhegazy *et al.*, 2024). No solo eso, sino que los edificios son responsables de consumir hasta un 40 % de la energía total en numerosos países desarrollados, que contribuye al 40 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero, uno de los principales contaminantes en la actualidad (Berardi, 2019). Este alto consumo energético se debe principalmente a la demanda de calefacción, refrigeración y climatización, que conlleva a la necesidad de mejorar los estándares de aislamiento térmico en las construcciones. Los materiales convencionales usados para el aislamiento térmico como el poliestireno expandido, la lana de vidrio y espumas de poliuretano, son rentables. Sin embargo, poseen desventajas significativas como: baja eficiencia térmica, inflamabilidad y, en algunos casos, la emisión de gases contaminantes o residuos dañinos para la salud (Koebel *et al.*, 2012). Asimismo, son compuestos con persistencia prolongada en el ambiente, a causa de la mala gestión de sus desechos.

Frente a las limitantes de los materiales aislantes convencionales el aerogel de sílice (AS), emerge como una alternativa sostenible debido a sus propiedades, superando las limitaciones de los aislantes convencionales. El AS es un material nanoporoso menos denso que el aire y posee la conductividad térmica más baja del mercado, gracias a su estructura de pequeños poros en forma de tejido. Su potencial es tal que, en las últimas décadas investigaciones, así como el sector industrial han explorado aplicaciones de aerogeles nanoestructurados que aíslan las edificaciones mediante recubrimientos, morteros adicionados, ventanas y paneles (Berardi, 2019). Incluso, en octubre de 2021, la revista científica *Science* posicionó al AS como “un material milagroso” que podría cambiar el mundo (Lu *et al.*, 2024). Los AS funcionan como redes que gracias a su tamaño (unos cuantos nanómetros) anulan la transferencia de calor, brindando un ambiente cómodo que no necesita de aparatos eléctricos o sistemas de combustión para regular la temperatura del interior del inmueble, sea utilizado en muros o ventanas, debido a que tampoco permite el paso de luz, pues la dispersa (Wang *et al.*, 2020).

Con base en lo antes mencionado y considerando la revolución tecnológica que implican los materiales como el AS en aras de la sostenibilidad. El presente artículo tiene la finalidad de mostrar un panorama general de las investigaciones en torno al AS, como aislante térmico implementado en el sector de la construcción.

Desarrollo

Una de las grandes innovaciones en materiales avanzados del siglo XXI, son los AS, que destacan por su estructura nanoporosa ultraligera. Los AS están constituidos por partículas ultrafinas en un patrón de “collar de perlas” tridimensional con orificios intersticiales llenos de aire, que típicamente representan entre el 85 % y el 99.8 % del volumen total del aerogel (Goryunova & Gahramanli, 2024). El AS a causa de su aspecto físico, consistencia y composición mayoritaria de aire es conocido también como “humo sólido”. La red de sílice que compone los AS tiene un amplio rango de poros que abarca desde 1 a 100 nm (Figura 1), los cuales se clasifican por su tamaño en: microporos que oscilan en dimensiones de 1 hasta 20 nm, mesoporos de 20 a 40 nm y los macroporos de 40 a 100 nm (Saboktakin & Saboktakin, 2015).

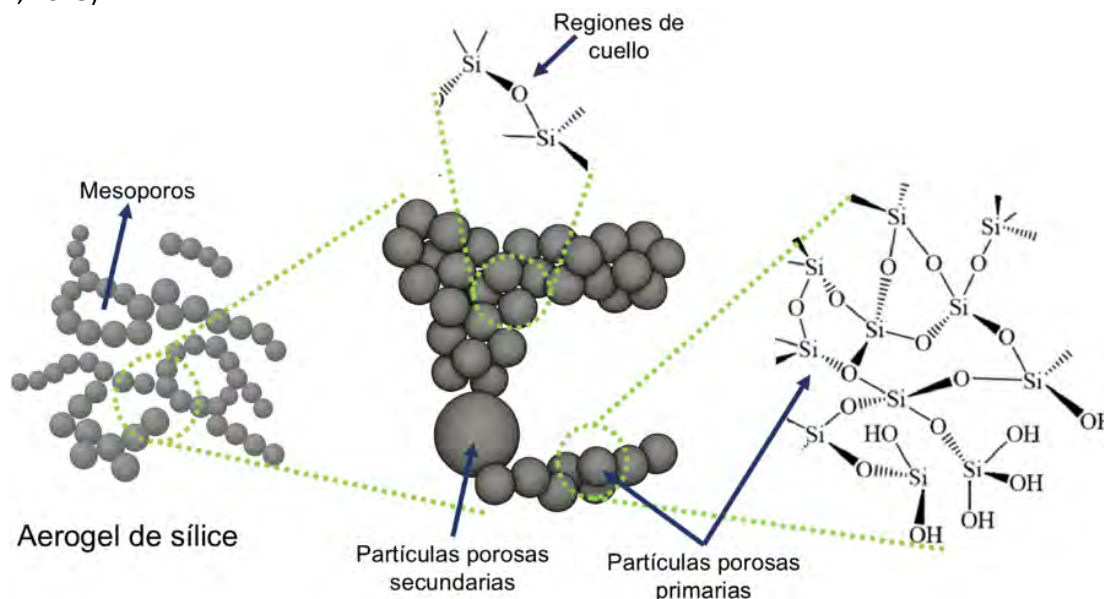


Figura 1. Microestructura de los AS (basada en Li *et al.*, 2021).

La estructura del AS se obtiene mediante el proceso de síntesis conocido como "sol-gel" (Figura 2). Este método parte de una solución, en la cual, se agregan compuestos puros de precursores, que reaccionan rompiendo enlaces entre sí y generando nuevos. Los nuevos compuestos se agregan en partículas dispersas en la solución, que posteriormente comienzan a agregarse con otras. A medida que la reacción avanza la mezcla toma una textura viscosa, como un gel. Los compuestos que no reaccionaron son eliminados mediante solventes, consecutivamente se realiza un proceso de envejecimiento al gel, para ser finalmente sometido a un proceso de secado especial y obtener el aerogel (Saboktakin & Saboktakin, 2015).

La hidrólisis es la primera fase del proceso de síntesis sol-gel, se utilizan precursores orgánicos que contienen generalmente alcóxidos de silicio como el tetraetoxisilano o tetrametoxisilano, que son agregados a un medio líquido compuesto por un solvente que puede ser etanol o metanol y agua (Rashid *et al.*, 2023). Las reacciones son catalizadas modificando el pH del medio, a ácido o base, que facilita el rompimiento de enlaces, lo que facilita la generación de grupos silanol, que se dispersan y condensan formando grupos de nanopartículas de sílice (Niculescu *et al.*, 2024). En la fase de hidrólisis se puede ajustar el rango predominante de los tamaños de poro en el material final. Por ejemplo, si se utilizan condiciones de catálisis ácida, los microporos se vuelven predominantes, mientras que, si predomina el medio básico, como en el caso de la adición de precursores de sílice modificados con grupos básicos (como aminas), se favorece la formación de macroporos (Goryunova & Gahramanli, 2024). A medida que avanza la condensación las nanopartículas se entrelazan hasta tomar una consistencia semisólida parecida a un gel (gelación), así se fortalece la estructura, el gel se somete a un envejecimiento controlado donde los grupos silanol residuales generan nuevos enlaces potenciando la resistencia mecánica, compactándose ligeramente la red sin colapsar los poros (Hasan *et al.*, 2017). El paso más importante es el secado supercrítico, el gel se coloca en el equipo de autoclave (reactor de alta presión diseñado para el secado) y se expone a un enjuague CO₂ líquido a una temperatura controlada, así como altos niveles de presión (Cuce *et al.*, 2014). Este proceso elimina el solvente sin generar una sobrecarga que pueda romper la estructura porosa. Finalmente, según sea el caso, se genera un proceso de sililación mediante agentes como el

trimetilclorosilano para reemplazar los grupos silanol de la superficie con grupos hidrofóbicos, para darle propiedades hidrofóbicas al aerogel obtenido (Saboktakin & Saboktakin, 2015).

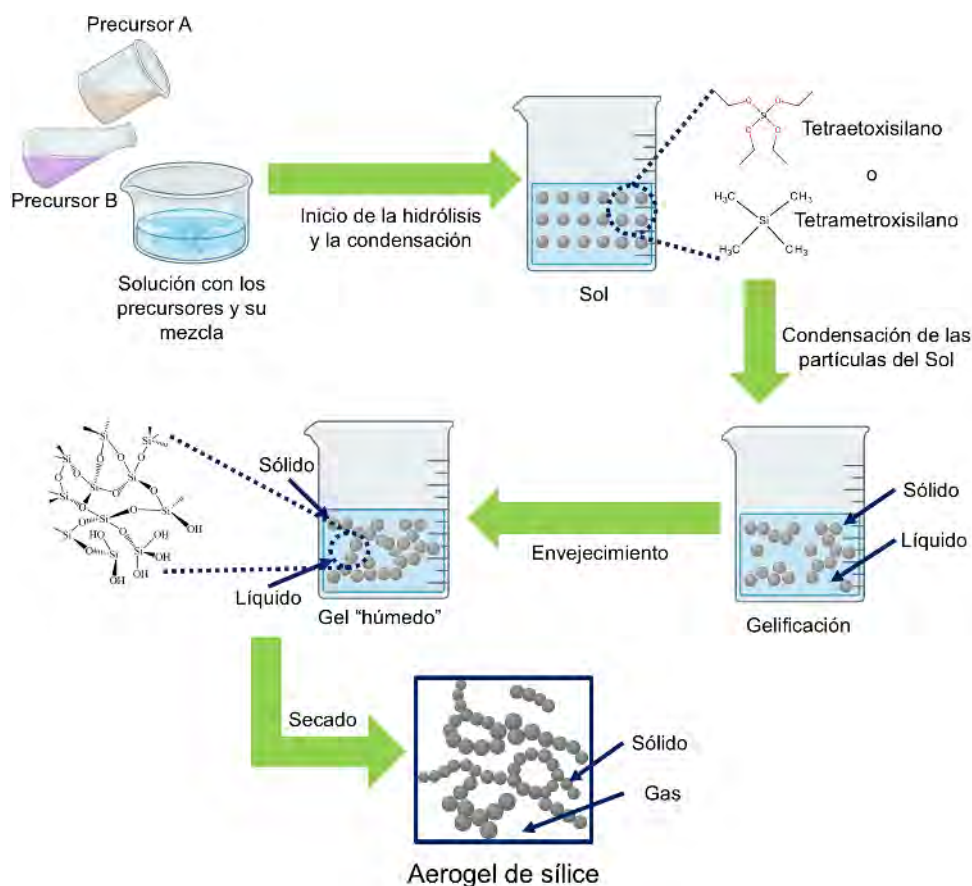


Figura 2. Esquema general para la preparación del aerogel mediante el procesamiento sol-gel (basada en Berardi, 2019).

Una de las principales ventajas de los AS es que no solo se emplean en forma monolítica (bloques sólidos), sino también como granulados o polvo. Lo anterior, facilita su integración en diferentes tipos de aislamientos y estructuras, además de reducir costos de fabricación y manipulación (Niculescu *et al.*, 2024). Asimismo, la nanoestructura de los AS les otorga propiedades que los diferencian de otros materiales aislantes. Presentan una densidad ultrabaja, como se mencionó anteriormente, que ronda entre 0.003 a 0.15 kg/m³, lo que los sitúa entre los sólidos más ligeros conocidos con una transferencia térmica excepcionalmente reducida de 0.012 hasta 0.02 W/m K, que los convierte en superaislantes (Li *et al.*, 2021). El AS es capaz de reducir significativamente dos tipos de transferencia de calor (Figura 3): a) por convección, este tipo de transferencia de calor es eliminado con tamaños microporo inferiores a 20 nm, ya que los fonones (vibraciones térmicas en la red de sílice) se dispersan a través de estos; y b) por radiación, los AS tienen la capacidad de ser dopados con opacificadores (como TiO₂) que absorben selectivamente radiación sin comprometer su aislamiento térmico (Wang *et al.*, 2020). Además, gracias a su composición principal de poros, que representan hasta un 99.8 % de la composición total, les permite una alta transmitancia lumínica de más del 90 % (que puede aumentar con agentes dopantes), una resistencia térmica de hasta 1200 °C, así como gran área superficial que oscila entre los 600 a 1000 m²/g, que les permite actuar como filtros eficientes para contaminantes como el dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles e, incluso, metales pesados (Liu *et al.*, 2016).

A causa de las múltiples propiedades de los AS se ha generado gran interés para su aplicación en el sector de la construcción, puesto que podría permitir reducir el espesor de las capas aislantes sin sacrificar el rendimiento térmico, permitiendo mayor espacio útil y ahorro energético (Koebel *et al.*, 2012). Se ha observado que el uso de aerogeles en materiales utilizados en la construcción puede modificar significativamente las propiedades térmicas de morteros, pero, disminuye la resistencia mecánica de dichos materiales específicamente la fuerza de compresión (Fickler *et al.*, 2015; Jang *et al.*, 2021). Un caso particular es el hormigón modificado con AS. Ng *et al.*, (2015) reportaron que al incorporar un 20 % en volumen de aerogel al hormigón, este presenta una reducción en la resistencia a la compresión

de 120 a 70 MPa. En cambio, con contenidos del 50 % de AS, la conductividad térmica disminuye considerablemente (0.55 W/m K) al igual que la resistencia a la compresión (20 MPa), pero presenta las características idóneas para ser aplicado en muros periféricos. Lo anterior, demuestran el potencial transformador que puede tener los AS en la construcción, a la vez que señala los desafíos a resolver.

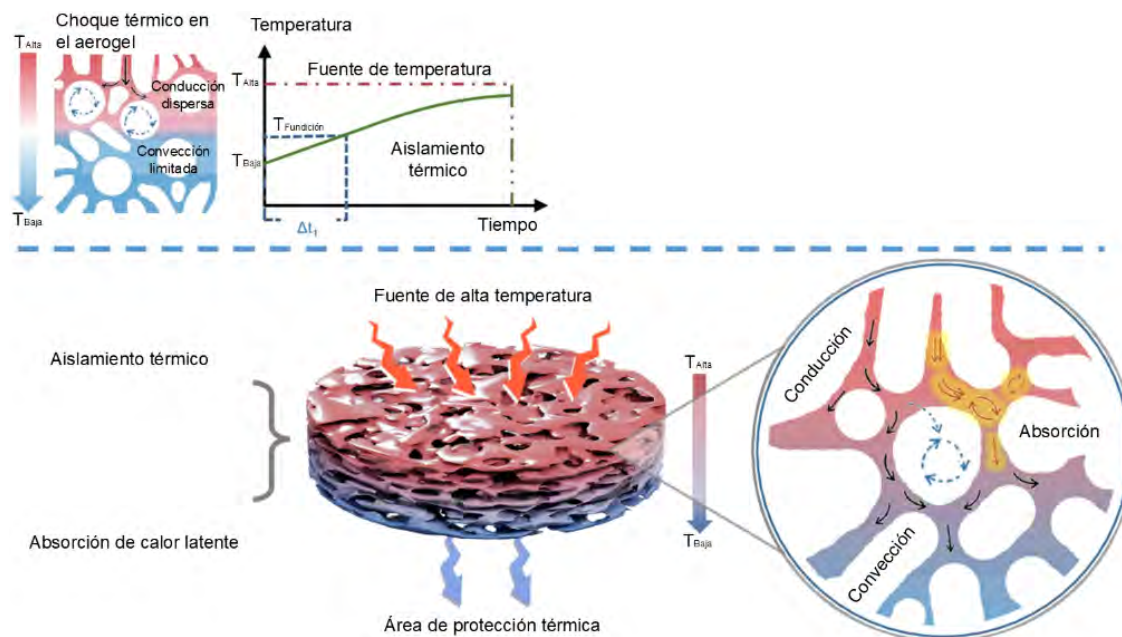


Figura 3. Respuesta térmica de aerogeles y su capacidad de aislar los choques térmicos, impidiendo efectivamente la transferencia de calor en estado estable y manteniendo diferenciales de temperatura significativos (modificado y traducido de Xiong *et al.*, 2024).

En cuanto otras aplicaciones en el sector de la construcción, se encuentra la adición de AS en yesos. Los yesos implementados con AS presentan mejoras en el proceso de instalación, a causa de que facilita la creación de capas continuas de aislamiento térmico que permite mayor capacidad envolvente en un edificio (Buratti *et al.*, 2014). Por ejemplo, Berardi & Nosrati (2018) mostraron que la adición del AS al yeso reduce la conductividad térmica del material al igual que disminuye la densidad de este. Asimismo, encontraron un punto de equilibrio entre la adición del AS al yeso, el cual es a 70 % de volumen de AS donde el material mantiene buenas propiedades aislantes (0.032 W/m K) y baja densidad (230 kg/m³). Sin embargo, si bien, a mayor proporción aumenta el aislamiento térmico las propiedades mecánicas disminuyen considerablemente. Además, debido a la naturaleza del AS los yesos modificados adquieren propiedades hidrofóbicas, evitando la absorción de agua, pero permitiendo la transpiración del vapor de agua, a diferencia de los yesos convencionales (Berardi, 2019).



Figura 4. Acristalamientos superaislantes basados en el uso de placas de AS de AIRGLASS AB (Koebel *et al.*, 2012).

Otra aplicación novedosa que aprovecha al máximo la capacidad de aislante térmico del AS, no son exclusivos de materiales de construcción sino de otros elementos del mismo sector, como en el caso de cristales en ventanas. Para lo cual se encapsulan monolitos de AS entre dos paneles de vidrio, lo que reduce el consumo de energía en calefacción hasta un 50 % en climas fríos e incluso aumentar el aislamiento acústico como menciona Wang *et al.* (2020). A mayor espesor del AS, mayor aislamiento térmico, pero se reduce considerablemente el paso de luz, por ejemplo, con un monolito de 15 mm de grosor la cantidad de luz puede disminuir entre un 50 a un 76 %, dependiendo del AS utilizado. Desafortunadamente, el procesamiento de fabricación de este tipo de ventanas que implementa alta tecnología es bastante complejo y es posible que puedan presentarse defectos propios de la fabricación como la debilidad mecánica, aunado a los costos que conlleva (Koebel *et al.*, 2012).

Pese a las múltiples ventajas que podría tener la implementación de AS la mayor limitante existente son en la actualidad los costos de producción. Por lo que solo se han considerado para aplicaciones sumamente específicas, debido a los altos costos de producción y su limitada producción a escala de laboratorio (Niculescu *et al.*, 2024). Si bien hay casos de productos que contienen AS y son comercializados en la actualidad, como el caso del yeso mejorado desarrollado en el Instituto Federal Suizo EMPA con nombre comercial de FIXIT 222, desde 2013 (Berardi, 2019). No todos los productos con base de AS tienen la misma suerte. Por lo que se requiere mayor investigación en torno a los procesos de obtención para ser posible la obtención industrial a costos más asequibles a la población.

Conclusiones

Las estructuras de los AS son un material que se propone como sostenible, debido a que es capaz de aislar temperaturas, incluso en climas extremos, permitiendo grandes ahorros energéticos en comparación a los materiales convencionales existentes en el mercado. Lo que es relevante en la reducción del impacto ambiental que generan las edificaciones, y más aún las grandes ciudades. Existen reportes de la utilización de AS, con resultados bastante alentadores que muestran la gran aplicabilidad que podrían tener en el día a día, pero aún hay deficiencias con gran capacidad de ser mejoradas para que sea un producto escalable. Como es el caso de su método de obtención, debido a que las condiciones de obtención son bastante específicas y complejas, ocasionando una producción limitada a escala industrial por los altos costo. Sin embargo, una vez que su producción sea rentable al igual que asequible para el público en general, los beneficios no serían únicamente en el sector constructivo sino se amplificaría a otros sectores como el aeroespacial, automotriz, entre muchos otros.

Bibliografía

- Berardi, U. & Nosrati, R. (2018). Long-term performances of aerogel-enhanced insulating materials. *Energy*, 147, 1188-1202. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.053>
- Berardi, U. (2019). Aerogel-enhanced insulation for building applications. In *Nanotechnology in Eco-efficient Construction* (pp. 395–416). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00017-7>
- Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E. & Agosti, F. (2014). Development of innovative aerogel based plasters: preliminary thermal acoustic performance evaluation. *Sustainability*, 6(9), 5839-5852. <https://doi.org/10.3390/su6095839>
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J. & Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
- Elhegazy, H., Zhang, J., Amoudi, O., Zaki, J. N., Yahia, M., Eid, M. & Mahdi, I. (2024). An Exploratory Study on the Impact of the Construction Industry on Climate Change. *Journal of Industrial Integration and Management*, 9(3), 397-418, <https://doi.org/10.1142/S2424862222500282>
- Fickler, S., Milow, B., Ratke, L., Schnellenbach-Held, M. & Welsch, T. (2015). Development of high performance aerogel concrete. *Energy Procedia*, 78, 406-411. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.684>
- Goryunova, K. I. & Gahramanli, Y. N. (2024). Insulating materials based on silica aerogel composites: synthesis, properties and application. *RSC Advances*, 14(47), 34690–34707. <https://doi.org/10.1039/D4RA04976D>
- Hasan, M. A., Sangashetty, R., Esther, A. C. M., Patil, S. B., Sherikar, B. N. & Dey, A. (2017). Prospect of Thermal Insulation by Silica Aerogel: A Brief Review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 98, 297–304. <https://doi.org/10.1007/s40033-017-0136-1>
- Jang, D., Yoon, H.N., Seo, J., Lee, H.K. & Kim G.M. (2021). Effects of silica aerogel inclusion on the stability of heat generation and heat-dependent electrical characteristics of cementitious composites with CNT. *Cement and Concrete Composites*, 115, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103861>
- Koebel, M., Rigacci, A. & Achard, P. (2012). Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 63, 315–339. <https://doi.org/10.1007/s10971-012-2792-9>
- Li, C., Chen, Z., Dong, W., Lin, L., Zhu, X., Liu, Q., Zhang, Y., Zhai, N., Zhou, Z., Wang, Y., Chen, B., Ji, Y., Chen, X., Xu, X., Yang, Y. & Zhang, H. (2021). A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 553, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120517>
- Liu, Z. h., Ding, Y. d., Wang, F. & Deng, Z. p. (2016). Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel. *Construction and Building Materials*, 122, 548–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.096>
- Lu, L., Wang, H., Yun, S., Hu, J. & Wang, M. (2024). A state-of-the-art review of novel aerogel insulation materials for building exterior walls. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 16231–16252. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2424915>
- Naciones Unidas (2015). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I., Gao, T. & Wallevik, O.H. (2015). Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.064>
- Niculescu, A. G., Tudorache, D. I., Bocioagă, M., Mihaiescu, D. E., Hadibarata, T. & Grumezescu, A. M. (2024). An Updated Overview of Silica Aerogel-Based Nanomaterials. *Nanomaterials*, 14(5), 1-23. <https://doi.org/10.3390/nano14050469>
- Rashid, A. B., Shishir, S. I., Mahfuz, Md. A., Hossain, Md. T. & Hoque, Md. E. (2023). Silica Aerogel: Synthesis, Characterization, Applications, and Recent Advancements. *Particle & Particle Systems Characterization*, 40(6), 1-22. <https://doi.org/10.1002/ppsc.202200186>

- Saboktakin, A. & Saboktakin, M. R. (2015). Improvements of reinforced silica aerogel nanocomposites thermal properties for architecture applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 230–234. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.024>
- Wang, J., Petit, D. & Ren, S. (2020). Transparent thermal insulation silica aerogels. *Nanoscale Advances*, 2(12), 5504–5515. <https://doi.org/10.1039/D0NA00655F>
- Xiong, F., Zhou, J., Jin, Y., Zhang, Z., Qin, M., Han, H., Shen, Z., Han, S., Geng, X., Jia, K. & Zou, R. (2024). Thermal shock protection with scalable heat-absorbing aerogels. *Nature Communications*, 15, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51530-3>

Anammox: un tratamiento sustentable para el agua residual de rastros

Sergio Reyes-Rosas ^{1*}, Alejandro Alvarado-Lassman ², Óscar Marín-Peña ³, Ofelia Landeta-Escamilla ², Erik Samuel Rosas-Mendoza ² y Juan Manuel Méndez-Contreras ²

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Km 4 Carretera a la Compañía S/N, Tepetitlanapa, Zongolica 95005, Veracruz, México.

² División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México.

³ Estancia Posdoctoral SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) Tecnológico Nacional de México/ITS de Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: sergio_reyes_pd0225@zongolica.tecnm.mx; Tel.: +522721251205

Artículo de divulgación científica

Recibido: 7 de junio de 2025 Aceptado: 12 de julio de 2025 Publicado: 24 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.482>

Resumen: El tratamiento de aguas residuales generadas en rastros representa un desafío ambiental significativo, debido a su alta carga de nitrógeno y materia orgánica. Tradicionalmente, se han utilizado procesos de nitrificación-desnitrificación para remover el nitrógeno, pero estos implican altos costos energéticos, uso de productos químicos y generación de lodos. En este contexto, el proceso Anammox (oxidación anaerobia de amonio) surge como una alternativa biotecnológica innovadora, eficiente y sustentable. Este artículo explora las características del proceso Anammox y su aplicación en el tratamiento de efluentes de rastros. Se analizan casos exitosos, las principales ventajas frente a tecnologías convencionales, y los desafíos técnicos actuales, como la sensibilidad a compuestos tóxicos y la retención de biomasa. Asimismo, se destacan las perspectivas futuras del proceso, incluyendo el desarrollo de sistemas híbridos y la optimización de condiciones operativas. A través de una revisión de literatura científica reciente (2021-2025), se concluye que el proceso Anammox puede transformar el tratamiento de aguas residuales en rastros, al reducir el consumo energético, las emisiones y los residuos. Su implementación contribuye a una industria alimentaria más responsable con el medio ambiente y alineada con los principios de la sostenibilidad y la economía circular.

Palabras clave: aguas residuales de rastro; remoción de nitrógeno; oxidación anaerobia de amonio

Introducción

Los rastros, esenciales en la cadena alimentaria, generan diariamente grandes volúmenes de aguas residuales con altas concentraciones de nitrógeno, principalmente en forma de amonio. Este tipo de efluente, si no se trata adecuadamente, puede provocar eutrofización en cuerpos de agua, emisión de gases de efecto invernadero y riesgos sanitarios para las comunidades cercanas (Mofijur *et al.*, 2021; Rivera-Castellanos *et al.*, 2023; Dos Santos Pereira *et al.*, 2024; Marín-Peña *et al.*, 2024). Tradicionalmente, el tratamiento de estas aguas ha dependido de procesos biológicos convencionales como la nitrificación-desnitrificación, los cuales requieren altos insumos energéticos y la adición de fuentes externas de carbono, elevando los costos operativos y la huella ambiental de las plantas de tratamiento (Zhang *et al.*, 2019; Gholami-Shiri *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2022).

En este contexto, el proceso Anammox (Oxidación Anaerobia de Amonio) emerge como una alternativa innovadora y sostenible para la remoción de nitrógeno. Este proceso biológico, descubierto en la década de 1990, permite la conversión directa de amonio y nitrito en nitrógeno gaseoso bajo condiciones anaerobias, sin necesidad de oxígeno ni de fuentes externas de carbono. Además, el proceso Anammox consume hasta un 60% menos de oxígeno y produce aproximadamente un 90% menos de lodos en comparación con los métodos tradicionales (Wu *et al.*, 2022; Magrí & Lotti, 2023; Witkabel & Abendroth *et al.*, 2024).

Estudios recientes han demostrado la viabilidad del proceso Anammox en el tratamiento de aguas residuales de rastros. Por ejemplo, la integración de la nitrificación parcial seguida de Anammox ha logrado eficiencias de remoción de nitrógeno total superiores al 84% en efluentes con altas cargas de nitrógeno y bajas relaciones carbono/nitrógeno (Miao *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020; Silveira *et al.*, 2021; Al-Hazmi *et al.*, 2022; Al-Hazmi *et al.*, 2023; Tong *et al.*, 2023; Parde *et al.*, 2024; Preetham *et al.*, 2024). Estos resultados indican que el proceso Anammox no solo es eficiente en la remoción de nitrógeno, sino que también es adaptable a las características específicas de las aguas residuales generadas en los rastros.

Este artículo tiene como objetivo explorar el potencial del proceso Anammox como una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales de rastros. Se abordarán las características de estas aguas, los principios fundamentales del proceso Anammox, su aplicación en contextos reales y las perspectivas futuras para su implementación a gran escala.

Desarrollo

El problema del agua residual en rastros

Los rastros, fundamentales en la industria alimentaria, generan diariamente grandes volúmenes de aguas residuales con una composición compleja (Figura 1). Estas aguas contienen altos niveles de materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, sólidos suspendidos, grasas, aceites y microorganismos patógenos. Su origen proviene de diversas actividades, incluyendo el lavado de animales, escaldado, limpieza de instalaciones y equipos, y procesamiento de subproductos (Aziz *et al.*, 2019; Mofijur *et al.*, 2021; Zanol *et al.*, 2024).



Figura 1. Aguas residuales de rastros vertidas en arroyos sin tratamiento previo.
Fuente: Marín-Peña *et al.*, (2024)

La carga contaminante de estas aguas es significativa. Estudios han reportado concentraciones elevadas de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (FT), superando en muchos casos los límites permitidos para descarga en cuerpos de agua (Tabla 1). Además, la presencia de productos químicos utilizados en la limpieza puede alterar los ecosistemas acuáticos, poniendo en peligro la vida de peces y plantas.

Tabla 1. Contaminantes en efluentes de rastro

Referencias	pH	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	NT (mg/L)	NH ₄ ⁺ – N (mg/L)	PT (mg/L)	PO ₄ ⁻³ (mg/L)
Bustillo-Lecompte <i>et al.</i> , 2017	6.5	5,000	3,000	-----	450	-----	50	-----
Saghir & Hajjar, 2022	6.60 ± 0.21	5,350.01 ± 1,401.01	3,891.01 ± 909.01	-----	-----	326.02 ± 62.01	-----	119.03 ± 24.04
Rivera-Castellanos <i>et al.</i> , 2023	6.88 ± 0.15	9,718.50 ± 1,716.41	762.43 ± 733.57	9,685.25 ± 3,942.86	838.00 ± 682.00	223.98 ± 193.98	-----	64.00 ± 56.00
Marín-Peña <i>et al.</i> , 2023	7.8	5,880	3 050	2 360	494.83	-----	30.15	-----
Marín-Peña <i>et al.</i> , 2024	7.51 ± 0.29	5,880.00 ± 2,590.00	3,050.00 ± 1,180.00	2,360.00 ± 1,140.00	494.83 ± 143	-----	-----	-----

El impacto ambiental de la descarga inadecuada de estas aguas es considerable. La acumulación de nutrientes como nitrógeno y fósforo en cuerpos de agua puede provocar eutrofización, caracterizada por un crecimiento excesivo de algas que consume el oxígeno disuelto, afectando la vida acuática. Además, la presencia de patógenos representa un riesgo para la salud pública, especialmente en comunidades cercanas a los puntos de descarga (dos Santos Pereira *et al.*, 2024). Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales en rastos incluyen procesos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones, como alta demanda energética, generación de lodos en grandes cantidades y necesidad de adición de productos químicos. Por ejemplo, los procesos de lodos activados requieren aireación intensiva, lo que incrementa los costos operativos (Dan *et al.*, 2021). Además, la eficiencia en la remoción de nutrientes puede ser insuficiente, especialmente en efluentes con altas cargas orgánicas y relaciones bajas de carbono/nitrógeno.

Ante estos desafíos, es necesario explorar alternativas de tratamiento más sostenibles y eficientes. Una de estas alternativas es el proceso Anammox, que permite la remoción de nitrógeno de manera más eficiente y con menor consumo energético, representando una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales en rastos.

¿Qué es el proceso Anammox?

El proceso Anammox es una ruta biológica descubierta en la década de 1990, que permite la conversión directa de amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2^-) en nitrógeno gaseoso (N_2) bajo condiciones anaerobias, es decir, sin la presencia de oxígeno (Figura 2).

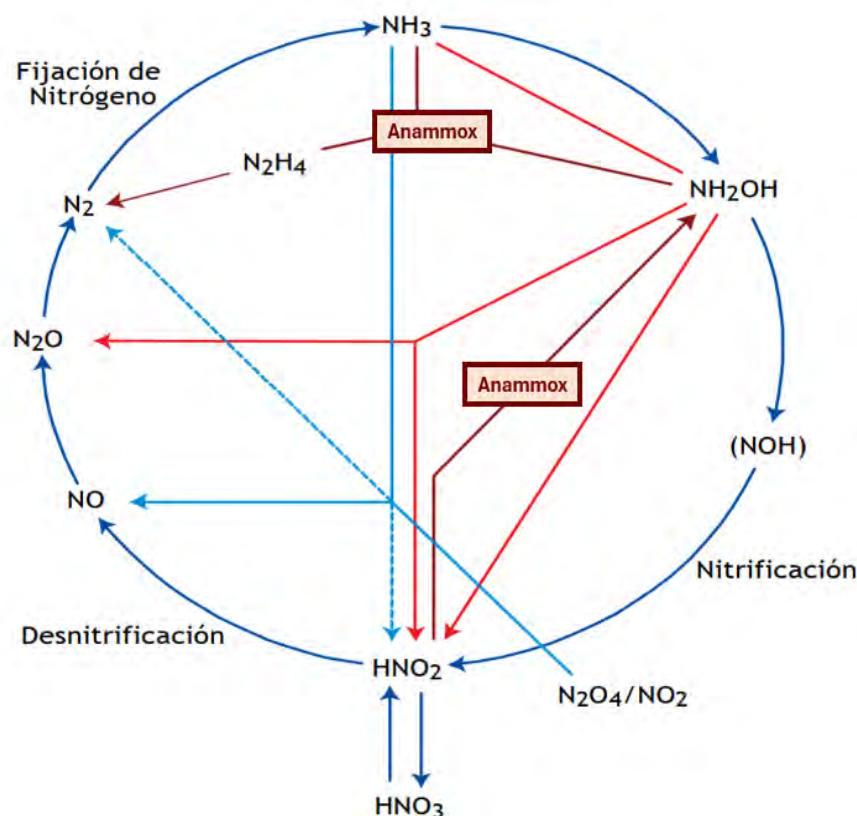


Figura 2. Rutas de Anammox en el Ciclo Global del Nitrógeno
Adaptado de López Vázquez *et al.* (2017).

Este proceso es llevado a cabo por bacterias del grupo *Planctomycetes*, conocidas como bacterias Anammox, que utilizan el nitrito como aceptor de electrones y el amonio como donador, generando como producto final nitrógeno molecular y agua (Magrí & Lotti, 2023) (véase Figura 3, donde se muestran los gránulos característicos de biomasa Anammox).



Figura 3. Gránulos de ANAMMOX en reactores de tratamiento de aguas residuales
Fuente: Driessen & Hendrickx (2021)

A diferencia de los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, que requieren etapas separadas de nitrificación y desnitrificación, el proceso Anammox combina estas etapas en una sola, reduciendo significativamente el consumo de energía y la necesidad de añadir fuentes externas de carbono. Además, produce menos lodos residuales, lo que disminuye los costos asociados a su manejo y disposición (Al-Hazmi *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2022).

En el contexto de los rastros, donde las aguas residuales presentan altas concentraciones de amonio y una baja relación carbono/nitrógeno, el proceso Anammox se presenta como una solución eficiente y sostenible para la eliminación de nitrógeno, contribuyendo a la protección del medio ambiente y al cumplimiento de las normativas de descarga.

Aplicación del proceso Anammox en rastros

La implementación del proceso Anammox en rastros ha demostrado ser una solución eficaz y sostenible para el tratamiento de aguas residuales con alta carga de nitrógeno. Este proceso ha sido aplicado con éxito en diversas instalaciones, mejorando la eficiencia del tratamiento y reduciendo los costos operativos. Un estudio realizado por Silveira *et al.* (2021) evaluó un sistema de dos etapas que combina la nitrificación parcial y el proceso Anammox para el tratamiento de aguas residuales de subproductos de rastros. Este enfoque permitió una eliminación eficiente del nitrógeno, alcanzando tasas de remoción superiores al 90%. La clave del éxito radicó en el control estricto de la nitrificación parcial, logrando concentraciones de nitrito y amonio cercanas a la proporción estequiométrica ideal para el proceso.

Además, una revisión de Driessen & Hendrickx (2021) destaca la experiencia acumulada durante dos décadas en la aplicación del proceso Anammox basado en lodos granulares. Este enfoque ha demostrado ser resistente a variaciones en la composición del agua residual y ha mantenido un rendimiento estable en plantas a escala real, incluyendo aquellas que tratan efluentes industriales ricos en nitrógeno, como los provenientes de rastros. La implementación del proceso Anammox en rastros no solo mejora la eficiencia en la eliminación de nitrógeno, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir el consumo de energía y la generación de lodos. Estos beneficios hacen del proceso Anammox una opción atractiva para modernizar las plantas de tratamiento de aguas residuales en la industria cárnica.

Ventajas del proceso Anammox frente a métodos tradicionales

El proceso Anammox ha emergido como una alternativa eficiente y sostenible frente a los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, siendo especialmente útil en instalaciones como los rastros, donde las aguas contienen altas concentraciones de nitrógeno y una baja relación carbono/nitrógeno.

A diferencia de los procesos tradicionales de nitrificación-desnitrificación, que requieren una aireación intensiva para oxidar el amonio a nitrato, Anammox opera en condiciones anaerobias, eliminando la necesidad de oxígeno y permitiendo una reducción del consumo energético de hasta un 65% en los costos de aireación (Al-Hazmi *et al.*, 2023).

Además, este proceso no requiere la adición de fuentes externas de carbono, como metanol, ya que utiliza el amonio como donador de electrones y el nitrito como aceptor, lo que reduce los costos operativos y minimiza la generación de subproductos no deseados (Singh *et al.*, 2022). Otra ventaja relevante es la drástica disminución en la generación de lodos, que puede ser hasta del 90% en comparación con los métodos convencionales, lo que representa menores costos y desafíos en el manejo y disposición de estos residuos (Deng *et al.*, 2025). Asimismo, Anammox contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂) y los óxidos de nitrógeno (N₂O), gracias a su operación sin oxígeno ni carbono externo (Ponce-Jahen *et al.*, 2024). Finalmente, las bacterias responsables del proceso han demostrado una notable capacidad de adaptación ante variaciones en la composición del agua residual, incluyendo cambios en temperatura, salinidad y carga orgánica, lo que hace de Anammox una tecnología especialmente adecuada para tratar aguas residuales complejas y variables como las de origen pecuario (Cho *et al.*, 2020).

Desafíos y perspectivas futuras del proceso Anammox en rastros

A pesar de los avances y beneficios del proceso Anammox en el tratamiento de aguas residuales de rastros, su implementación a gran escala enfrenta varios desafíos técnicos y operativos.

Desafíos actuales

El proceso Anammox, a pesar de sus múltiples ventajas, también presenta ciertas limitaciones que deben considerarse al implementarse en el tratamiento de aguas residuales de rastros. Una de las principales desventajas es la sensibilidad de las bacterias Anammox a compuestos tóxicos presentes en este tipo de aguas, como sulfuros, metales pesados y antibióticos, los cuales pueden inhibir su actividad metabólica y reducir significativamente la eficiencia del sistema (Cho *et al.*, 2020). Además, en algunos casos se ha observado la acumulación de nitrato como resultado de la actividad de bacterias oxidantes de nitrito (NOB), lo que interfiere con la eficiencia global del proceso Anammox al desviar parte del nitrito necesario para la reacción principal (Al-Hazmi *et al.*, 2023). Otro desafío importante es la retención de biomasa, ya que las bacterias Anammox tienen una tasa de crecimiento extremadamente baja, lo que dificulta mantener una concentración adecuada de biomasa activa en el reactor y puede comprometer la estabilidad y el rendimiento del sistema en el largo plazo (Trinh *et al.*, 2021).

Perspectivas futuras

Para superar las limitaciones del proceso Anammox y potenciar su aplicación en el tratamiento de aguas residuales complejas como las de rastros, se están desarrollando diversas estrategias tecnológicas y operativas. Una de ellas es la implementación de sistemas híbridos que combinan Anammox con tecnologías complementarias, como la desnitrificación parcial, lo cual permite mejorar la eficiencia en la eliminación de nitrógeno y reducir la acumulación de nitrato generada por la actividad de bacterias oxidantes de nitrito (Rudithongru *et al.*, 2024). Asimismo, se están llevando a cabo investigaciones orientadas a la optimización de las condiciones operativas, ajustando variables clave como la temperatura, el pH y la relación carbono/nitrógeno, con el objetivo de maximizar la actividad de las bacterias Anammox y reducir el impacto de compuestos inhibidores (Cho *et al.*, 2020). Otro enfoque importante es la adaptación del proceso a diferentes escenarios, explorando su capacidad para operar eficazmente bajo condiciones variables de carga orgánica, presencia de tóxicos y fluctuaciones propias de las aguas residuales generadas en rastros, lo que ampliaría su aplicabilidad en contextos reales y exigentes (Rudithongru *et al.*, 2024).

Conclusiones

El proceso Anammox se consolida como una alternativa innovadora y sostenible para el tratamiento de aguas residuales con alta carga de nitrógeno, como las generadas en los rastros. Su capacidad para operar en condiciones anaerobias, sin requerir oxígeno ni fuentes externas de carbono, lo posiciona como una solución eficiente frente a los procesos tradicionales de nitrificación-desnitrificación. La evidencia científica más reciente demuestra que el proceso Anammox puede alcanzar eficiencias de remoción de nitrógeno superiores al 90%, reduciendo además el consumo energético y la producción de lodos en más de un 60%. Esto representa una contribución significativa tanto en términos económicos como ambientales para la industria cárnica y el tratamiento de sus efluentes. A pesar de sus múltiples ventajas, la implementación del proceso Anammox a gran escala aún enfrenta retos técnicos, como la sensibilidad a

inhibidores presentes en el agua residual, la acumulación de nitrato o la baja velocidad de crecimiento de las bacterias involucradas. No obstante, los avances en biotecnología, diseño de reactores y control de condiciones operativas permiten vislumbrar un futuro prometedor para esta tecnología. Anammox representa no solo una alternativa viable para mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas en rastros, sino también un paso firme hacia una gestión más sostenible de los recursos hídricos en la industria alimentaria. Su adopción progresiva podría contribuir significativamente a la reducción del impacto ambiental, el cumplimiento normativo y la transición hacia modelos productivos más circulares.

Bibliografía

- Al-Hazmi, H. E., Maktabifard, M., Grubba, D., Majtacz, J., Hassan, G. K., Lu, X., & Mąkinia, J. (2023). An advanced synergy of partial denitrification-anammox for optimizing nitrogen removal from wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 381, 129168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129168>
- Al-Hazmi, H. E., Hassan, G. K., Maktabifard, M., Grubba, D., Majtacz, J., & Mąkinia, J. (2022). Integrating conventional nitrogen removal with anammox in wastewater treatment systems: Microbial metabolism, sustainability and challenges. *Environmental research*, 215, 114432. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114432>
- Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Khan, S. U., & Farooqi, I. H. (2019). Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. *Science of the total environment*, 686, 681-708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>
- Bustillo-Lecompte, C., & Mehrvar, M. (2017). Slaughterhouse wastewater: treatment, management and resource recovery. *Physico-chemical wastewater treatment and resource recovery*, 153-174. <http://dx.doi.org/10.5772/65499>
- Cho, S., Kambey, C., & Nguyen, V. K. (2020). Performance of Anammox Processes for Wastewater Treatment: A Critical Review on Effects of Operational Conditions and Environmental Stresses. *Water*, 12(1), 20. <https://doi.org/10.3390/w12010020>
- Dan, N. H., Phe, T. T. M., Thanh, B. X., Hoinkis, J., & Le Luu, T. (2021). The application of intermittent cycle extended aeration systems (ICEAS) in wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101909. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101909>
- Deng, Z., Sun, C., Ma, G., Zhang, X., Guo, H., Zhang, T., & Kong, Z. (2025). Anaerobic treatment of refractory industrial organic wastewater: A review of bioenergy recovery and low-carbon nitrogen removal toward carbon neutrality. *Journal of Water Process Engineering*, 72, 107515. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107515>
- dos Santos Pereira, A. K., Teixeira, K. C., Pereira, D. H., & Cavallini, G. S. (2024). A critical review on slaughterhouse wastewater: Treatment methods and reuse possibilities. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104819. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104819>
- Driessen, W., & Hendrickx, T. (2021). Two decades of experience with the granular sludge-based anammox® process treating municipal and industrial effluents. *Processes*, 9(7), 1207. <https://doi.org/10.3390/pr9071207>
- Gholami-Shiri, J., Azari, M., Dehghani, S., & Denecke, M. (2021). A technical review on the adaptability of mainstream partial nitrification and anammox: substrate management and aeration control in cold weather. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106468. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106468>
- Li, J., Li, J., Peng, Y., Wang, S., Zhang, L., Yang, S., & Li, S. (2020). Insight into the impacts of organics on anammox and their potential linking to system performance of sewage partial nitrification-anammox (PN/A): A critical review. *Bioresource Technology*, 300, 122655. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122655>
- López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., A. García, H., & Cervantes Carrillo, F. J. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- Magrí, A., & Lotti, T. (2023). Special Issue on "Anammox-Based Processes for Wastewater Treatment". *Processes*, 11(5), 1422. <https://doi.org/10.3390/pr11051422>
- Marín-Peña, O., Alvarado-Lassman, A., Alvarado-Vallejo, A., Sandoval-Herazo, M., Hernández-Castelán, D. A., Zamora-Castro, S. A., & Sandoval Herazo, L. C. (2024). Evaluation of a pilot-scale anaerobic biofilm reactor for the treatment of slaughterhouse effluents in rural areas. *Water Practice & Technology*, 19(9), 3706-3720. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.234>
- Miao, Y., Peng, Y., Zhang, L., Li, B., Li, X., Wu, L., & Wang, S. (2018). Partial nitrification-anammox (PNA) treating sewage with intermittent aeration mode: Effect of influent C/N ratios. *Chemical Engineering Journal*, 334, 664-672. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.072>
- Mofijur, M., Fattah, I. R., Kumar, P. S., Siddiki, S. Y. A., Rahman, S. A., Ahmed, S. F., & Mahlia, T. M. I. (2021). Bioenergy recovery potential through the treatment of the meat processing industry waste in Australia. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105657. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105657>
- Parde, D., Behera, M., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2024). A review on anammox processes: Strategies for enhancing bacterial growth and performance in wastewater treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 191, 105812. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105812>
- Ponce-Jahen, S. J., Cercado, B., Estrada-Arriaga, E. B., Rangel-Méndez, J. R., & Cervantes, F. J. (2024). Anammox with alternative electron acceptors: perspectives for nitrogen removal from wastewaters. *Biodegradation*, 35(1), 47-70. <https://doi.org/10.1007/s10532-023-10044-3>
- Preetham, V., Saidulu, D., Tiwary, C. S., & Gupta, A. K. (2024). Enhancement of simultaneous nitrification denitrification (SND) and simultaneous nitrification-anammox-denitrification (SNAD) via 3D printed carriers: Insights into critical factors, functional microbes, and potential solutions. *Journal of Cleaner Production*, 458, 142520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142520>
- Rivera-Castellanos, J., Marín-Peña, O., Reyes, Z. M. J., Sandoval-Herazo, M., Nani, G., González-Moreno, H. R., & Sandoval-Herazo, L. C. (2023). Wastewater management from municipal slaughterhouses in Mexico: Quantities produced, existing legislation, treatment processes applied and future challenges. *Renewable energy, biomass & sustainability*, 5(2), 12-23. <https://doi.org/10.56845/rebs.v5i2.84>

- Silveira, N. C., Oliveira, G. H. D., Damianovic, M. H. R. Z., & Foresti, E. (2021). Two-stage partial nitrification-Anammox process for nitrogen removal from slaughterhouse wastewater: Evaluation of the nitrogen loading rate and microbial community analysis. *Journal of Environmental Management*, 296, 113214. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113214>
- Singh, V., Ormeci, B., Mishra, S., & Hussain, A. (2022). Simultaneous partial Nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) – A review of critical operating parameters and reactor configurations. *In Chemical Engineering Journal*, 433, 133677. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133677>
- Rudithongru, L., & Jamir, L. (2024). Standard techniques for preservation of anammox biomass. In *Anammox Process* (pp. 187-211). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19209-8.00003-X>
- Tong, S., Zhao, Y., Li, J., Wei, J., & Li, J. (2023). Advanced removal of organics and nitrogen in upgraded anaerobic-aerobic slaughterhouse wastewater treatment process. *Desalination and Water Treatment*, 308, 80-89. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29940>
- Trinh, H. P., Lee, S. H., Jeong, G., Yoon, H., & Park, H. D. (2021). Recent developments of the mainstream anammox processes: challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105583. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105583>
- Witkabel, P., & Abendroth, C. (2024). A systematic literature review of microbial anammox consortia in UASB/EGSB-reactors. *Chemosphere*, 367, 143630. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143630>
- Wu, P., Chen, J., Garlapati, V. K., Zhang, X., Jenario, F. W. V., Li, X., & Zhang, X. (2022). Novel insights into Anammox-based processes: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 444, 136534. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136534>
- Zanol, M. B., Lima, J. P. P., Assemany, P., & Aguiar, A. (2024). Assessment of characteristics and treatment processes of wastewater from slaughterhouses in the state of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 358, 120862. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120862>
- Zhang, M., Wang, S., Ji, B., & Liu, Y. (2019). Towards mainstream deammonification of municipal wastewater: Partial nitrification-anammox versus partial denitrification-anammox. *Science of the Total Environment*, 692, 393-401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.293>

Quitosano: alternativa sostenible para el control fúngico

Edson Rayón-Díaz ¹, Surelys Ramos-Bell ¹, Estefanía Martínez-Batista ¹, Juan Antonio Herrera-González ², Porfirio Gutiérrez-Martínez ^{1*}

¹ Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tepic, Tepic, Nayarit, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Uruapan, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: pgutierrez@ittepic.edu.mx; +523111392832

Artículo de divulgación científica

Recibido: 1 de junio de 2025 Aceptado: 19 de julio de 2025 Publicado: 28 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.464>

Resumen: El creciente interés en tecnologías limpias y sostenibles para la conservación de alimentos está en aumento. En este sentido, el quitosano ha surgido como una solución natural prometedora. Este biopolímero, derivado de la quitina, es altamente valorado por sus propiedades biológicas y químicas que le atribuyen sus cualidades biodegradables y no tóxicas. Su estructura molecular, con grupos amino (NH₂) e hidroxilo (OH), le confiere características únicas como la biocompatibilidad y una gran capacidad para interactuar con otros compuestos. Gracias a estas propiedades, el quitosano tiene un amplio abanico de aplicaciones en la industria alimentaria, médica y agrícola. En el sector agroindustrial, por ejemplo, se ha demostrado su eficiencia para retrasar e inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos en frutas como aguacates, mangos, papayas y arándanos, así como en semillas de maíz. Considerando todo esto, el quitosano se propone como un aliado clave para la conservación de alimentos más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: quitosano, antifúngico, postcosecha

Introducción

Las frutas y verduras son esenciales en la dieta humana, y su calidad impacta directamente en un estilo de vida saludable. Sin embargo, las enfermedades fúngicas poscosecha causan la pérdida de casi el 25% de estos alimentos anualmente (Bano *et al.*, 2023). Este problema ha impulsado a organizaciones internacionales a buscar tecnologías limpias y seguras para su control, dado que el uso excesivo de fungicidas químicos genera preocupación por la presencia de residuos tóxicos en los alimentos y el desarrollo de resistencia en los hongos fitopatógenos (Rodríguez-Guzmán *et al.*, 2021).

Frente a esta situación, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, subraya la urgencia de desarrollar soluciones innovadoras. En este contexto, el quitosano, un compuesto generalmente conocido como seguro (GRAS), no tóxico y biodegradable, emerge como una prometedora alternativa a los fungicidas sintéticos. Diversas investigaciones demuestran su éxito en la preservación de cultivos y la inhibición de enfermedades fúngicas en frutas y verduras (Rodríguez-Guzmán *et al.*, 2021; Herrera-González *et al.*, 2022; Martínez-Batista *et al.*, 2024; Rayón-Díaz *et al.*, 2024; Ramos-Bell *et al.*, 2024). Por ello, el objetivo de este trabajo es dar a conocer las principales características, mecanismos y aplicaciones del quitosano, un polímero escondido con gran futuro.

Desarrollo

Quitina: El tesoro oculto que aún no conocías

¿Qué tienen en común la cáscara de camarón, el caparazón de un insecto y algunos hongos? Todos contienen quitina, el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza (Bautista-Baños *et al.*, 2017). Aunque es muy resistente y se encuentra en abundancia, la quitina tiene una limitación clave: es extremadamente difícil de disolver en agua y otros solventes, lo que complica sus aplicaciones (El-Araby *et al.*, 2024).

En los últimos años, la ciencia ha encontrado la solución a su insolubilidad: la desacetilación (Figura 1). Este proceso químico implica tratar la quitina con hidróxidos a altas temperaturas eliminando el grupo acetilo de la cadena lineal y formando grupos amino. Esta transformación genera dos unidades distintas, como la D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina, las cuales contribuyen a la generación de un compuesto soluble en condiciones ácidas, y un derivado mucho más versátil (Torres-Rodríguez *et al.*, 2021).

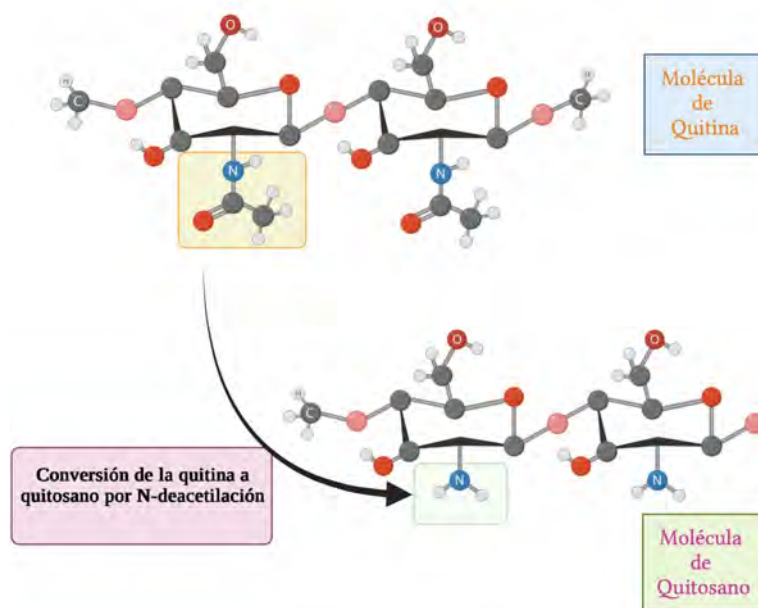


Figura 1. Proceso de desacetilación de la quitina a quitosano.
 Imagen creada con el programa BioRender.com (Elaboración propia)

El quitosano no solo es soluble en condiciones ácidas, sino que también adquiere propiedades únicas, como la capacidad de formar películas y una notable acción antimicrobiana. Estas características de su funcionalidad se ajustan dependiendo de su peso molecular y su grado de desacetilación, por lo que sus aplicaciones se extienden por diferentes industrias, incluyendo la alimentaria, médica y agrícola (Espinosa-Cavazos *et al.*, 2020; Ortega-Cardona y Aparicio-Fernández, 2020; Mehta *et al.*, 2022).

¿Qué hace tan especial al quitosano?

El quitosano cuenta con “ganchos” químicos llamados grupos amino (NH_2) y grupos hidroxilo (OH) (Saucedo-Plascencia *et al.*, 2023; Rayón-Díaz *et al.*, 2024). Estos “ganchos” son clave en su funcionalidad, además, le permiten unirse a muchas otras sustancias, convirtiendo al quitosano en un verdadero camaleón molecular y uno de los polímeros bioactivos más prometedores (Figura 2). Estas características le otorgan al quitosano propiedades asombrosas como la biocompatibilidad y funcionalidad con otros compuestos orgánicos e inorgánicos, biodegradabilidad sin dejar residuos dañinos, rentabilidad y nula toxicidad, lo que es crucial para su uso en salud y alimentos (Gowda y Sriram, 2023; Ramos-Bell *et al.*, 2023; El-Araby *et al.*, 2024).

¿Cómo actúa el quitosano?: Los “superpoderes” que protegen a tus frutas

Los microorganismos patógenos (hongos y bacterias) poseen una pared y membrana celular que actúan como barrera protectora. El quitosano, con su naturaleza policatiónica (es decir, cargado positivamente), actúa como un “imán” que se adhiere a estas paredes (Figura 3). Principalmente, los grupos amino son los que son atraídos por las cargas negativas de la membrana de los patógenos, provocando la desestabilización y salida de material intracelular vital para la supervivencia de estos patógenos; y una vez perdidos los componentes y su equilibrio interno, el patógeno no puede sobrevivir (Herrera-González *et al.*, 2022; Lopez-Moya *et al.*, 2019; Valenzuela-Ortiz *et al.*, 2022). Sin embargo, la susceptibilidad al quitosano entre especies fúngicas puede diferir por la composición de su membrana plasmática, ya que, a mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados (FFA) mayor será la fluidez de la membrana, incrementando la sensibilidad del patógeno (Debnath *et al.*, 2022).

Además de atacar a los patógenos invasores, el quitosano también actúa como un “entrenador” para las frutas, jactivando sus propias defensas! Cuando las moléculas de quitosano entran en contacto con la pared celular del fruto, desencadenan una serie de reacciones bioquímicas activando el sistema inmune del fruto. mediante este proceso se produce la expresión de genes de defensa, una “explosión oxidativa” y la estimulación en la síntesis de metabolitos

protectores como sustancias antioxidantes (enzimáticos y no enzimáticos) fortaleciendo las barreras físicas del fruto, impidiendo el establecimiento del patógeno (Mukarram *et al.*, 2023; Debnath *et al.*, 2022).

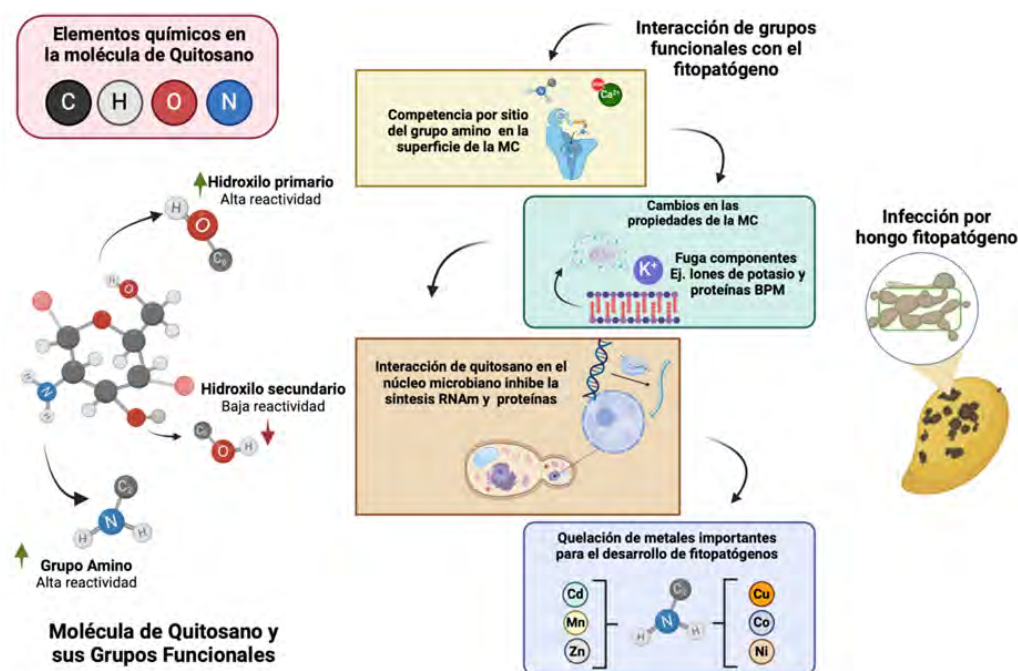


Figura 2. Molécula de quitosano y la interacción de sus grupos funcionales con hongos fitopatógenos.

MC: membrana celular. BPM: bajo peso molecular. Imagen creada con el programa BioRender.com (Elaboración propia)

Finalmente, el quitosano también actúa como un recubrimiento protector en la superficie del fruto, similar a un envoltorio invisible. Esta fina capa tiene múltiples beneficios, como la disminución en la pérdida de agua, retraso en la velocidad de procesos como la respiración y producción de etileno (la hormona de la maduración), protección contra daños mecánicos y la prevención del crecimiento de microorganismos en la superficie del fruto (Saber *et al.*, 2024). Gracias a esta barrera, el quitosano puede prolongar significativamente la vida útil de frutas y semillas durante el almacenamiento, manteniendo su frescura por más tiempo.

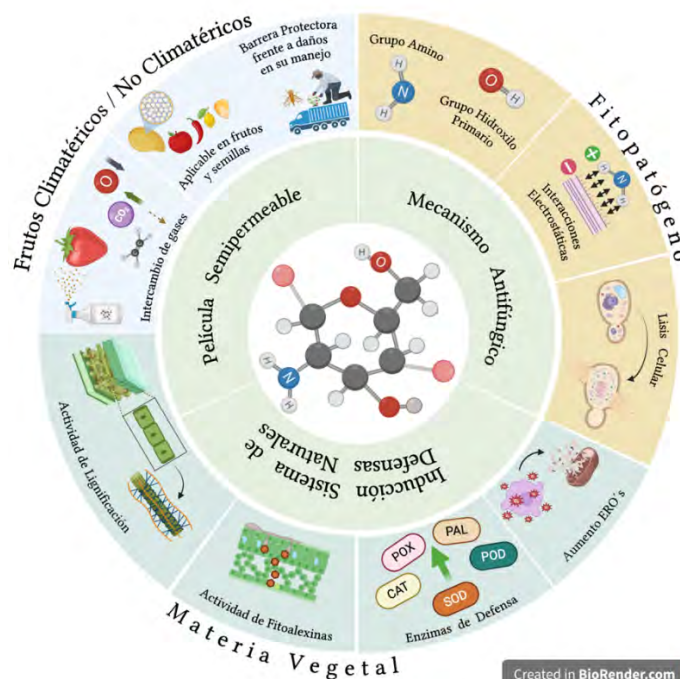


Figura 3. Mecanismos de acción del quitosano. Imagen creada con el programa BioRender.com (Elaboración propia)

El quitosano en acción: ¡Protegiendo a tus alimentos!

¿Alguna vez has notado que las frutas del supermercado tienen presencia de manchas, golpes o deshidratación? Esto se debe a que, después de ser cosechados, pueden sufrir daños por temperatura, humedad, mal manejo propiciando la aparición de hongos. Para evitar que estos problemas afecten la calidad del fruto, el quitosano puede jugar un papel fundamental.

Investigadores en Ciencia de los Alimentos han demostrado que el quitosano puede prevenir el crecimiento de diversos tipos de hongos que dañan las frutas. Se aplica en los almacenes o empacadoras antes de que los frutos sean distribuidos, ya sea rociándolos o sumergiéndolos en una solución de quitosano. Cuando las frutas son tratadas con quitosano, los resultados son notables, ya que mejoran su coloración y firmeza, maduran más lentamente lo que ocasiona que su deterioro sea menos rápido, además de que su sabor y olor no se ven afectados, manteniendo su calidad natural. Se ha probado en diferentes frutos como el mango, papaya, plátano, yaca, arándanos y aguacate, así también en cereales como el maíz, mostrando resultados sorprendentes (Rayón-Díaz *et al.*, 2024; Herrera-González *et al.*, 2022; Ramos-Bell *et al.*, 2024; Martínez-Batista *et al.*, 2024) (Figura 4).

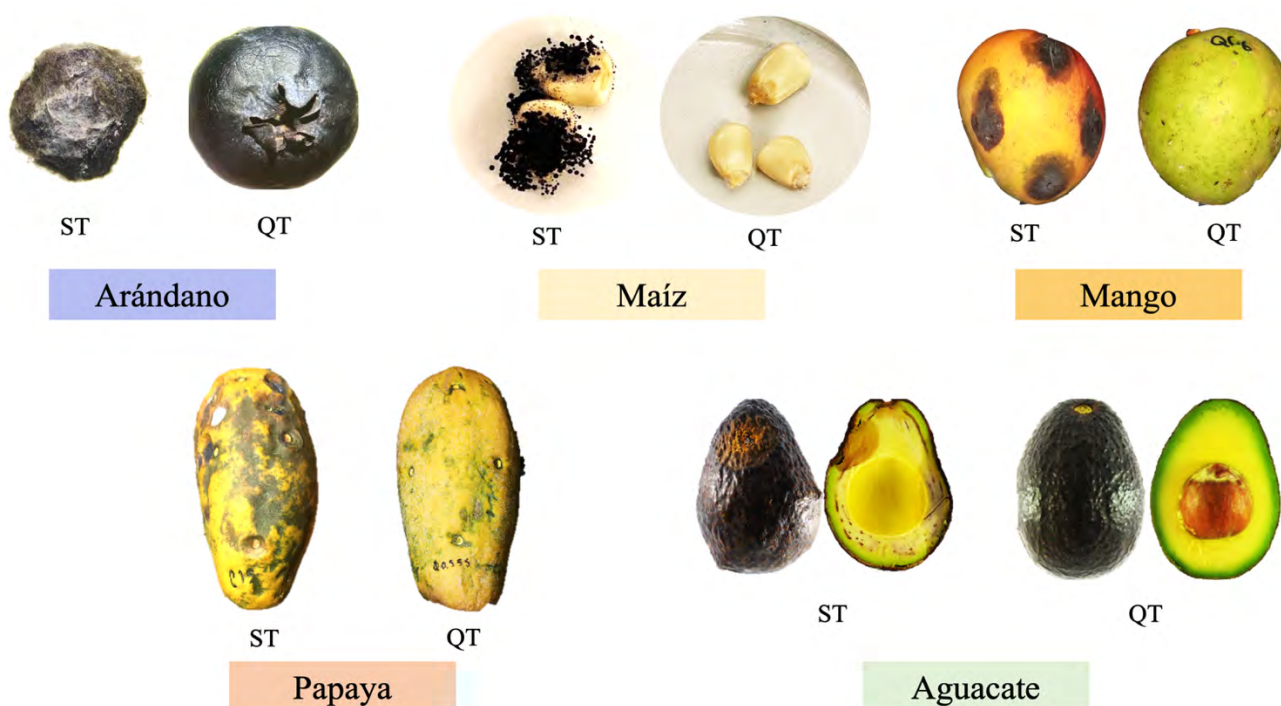


Figura 4. Comparación de aplicaciones de tratamientos de quitosano en el control de enfermedades fúngicas en frutos y semillas. (Imágenes tomadas de trabajos elaborados en el Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos). ST (Sin tratamiento); QT (Tratamiento de quitosano)

Conclusiones

La constante búsqueda de nuevas tecnologías para mejorar la calidad y preservar los alimentos es cada vez más vital. En este panorama, el quitosano emerge como una de las soluciones más prometedoras que ofrece la naturaleza. Desde su fascinante estructura molecular hasta su impacto en los mercados, este polímero demuestra su capacidad única para proteger los alimentos de microorganismos dañinos, estimular las defensas naturales de las frutas y crear una barrera protectora que alarga la vida útil de estos sin afectar su calidad.

Aplicar tecnologías como esta es clave para una agricultura más sostenible y segura, especialmente para alimentos esenciales en la dieta diaria. Sin duda, el futuro de la conservación de alimentos es mucho más brillante gracias a este sorprendente polímero natural.

Bibliografía

- Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Correa-Pacheco, Z., & Corona-Rangel, M. L. (2017). Chitosan: a versatile antimicrobial polysaccharide for fruit and vegetables in postharvest – a review. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 23(2), 103–121. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.11.030>
- Bano, A., Gupta, A., Prusty, M. R., & Kumar, M. (2023). La elicitación de la infección por hongos de la fruta y su respuesta protectora para mejorar la calidad posterior a la cosecha de las frutas. *Estrés*, 3(1), 231-255. <https://doi.org/10.3390/stresses3010018>
- Debnath D, Samal I, Mohapatra C, Routray S, Kesawat MS and Labanya R. 2022. Chitosan: An Autocidal Molecule of Plant Pathogenic Fungus. *Life* 12. <https://doi.org/10.3390/life12111908>
- El-Araby, A., Janati, W., Ullah, R., Ercisli, S., & Errachidi, F. (2024). Chitosan, chitosan derivatives, and chitosan-based nanocomposites: eco-friendly materials for advanced applications (a review). *Frontiers in Chemistry*, 11. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1327426>
- Espinosa-Cavazos, K. G., Sáenz-Galindo, A., & Castañeda-Facio, A. O. (2020). Películas de quitosano propiedades y aplicaciones. *Afinidad*, 77(591), 203–208. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/377418/470720>
- Gowda, S., & Sriram, S. (2023). Green synthesis of chitosan silver nanocomposites and their antifungal activity against *Colletotrichum truncatum* causing anthracnose in chillies. *Plant Nano Biology*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100041>
- Herrera-González, J. A., Hernández-Sánchez, D. A., Bueno-Rojas, D., Ramos-Bell, S., Velázquez-Estrada, R. M., Bautista-Rosales, P. U., & Gutiérrez-Martínez, P. (2022). Effect of commercial chitosan on in vitro inhibition of *Colletotrichum siamense*, fruit quality and elicitor effect on postharvest avocado fruit. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(1), 1–5. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio2706>
- Lopez-Moya, F., Suarez-Fernandez, M., & Lopez-Llorca, L. V. (2019). Molecular mechanisms of chitosan interactions with fungi and plants. In *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms20020332>
- Martínez-Batista, E., González-Arias, C. A., Velázquez-Estrada, R. M., Herrera-González, J. A., & Gutiérrez-Martínez, P. (2024). In vitro and in vivo antifungal activity of chitosan and identification of potentially toxigenic fungi in stored maize of Nayarit, Mexico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 23(2). <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio24223>
- Mehta, M. R., Biradar, S. P., Mahajan, H. P., Bankhele, R. R., & Hivrale, A. U. (2022). Chapter 21 - Chitosan and chitosan-based nanoparticles in horticulture: past, present and future prospects. In Dr. S. Kumar & S. V Madihally (Eds.), *Role of Chitosan and Chitosan-Based Nanomaterials in Plant Sciences* (pp. 453–474). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85391-0.00014-9>
- Mukarram M, Ali J., Dadkhah H, Kurjak D, Kačik F and Đurković, J. 2023. Chitosan-induced biotic stress tolerance and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. *Frontiers in Plant Science* 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1217822>
- Ortega-Cardona, C. E., & Aparicio-Fernández, X. (2020). Quitosano: una alternativa sustentable para el empaque de alimentos. *Revista Digital Universitaria*, 21(5). <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2020.21.5.4>
- Ramos-Bell, S., Hernández-Montiel, L. G., Velázquez-Estrada, R. M., Moreno-Hernández, C. L., & Gutiérrez-Martínez, P. (2023). Chitosan and salicylic acid as alternatives for the control of postharvest fungal diseases in blueberries (*Vaccinium corymbosum*). *International Food Research Journal*, 30(4), 992–1000. <https://doi.org/10.47836/ifrj.30.4.16>
- Ramos-Bell, S., Díaz-Cayetano, G., Hernández-Montiel, L. G., Velázquez-Estrada, R. M., Montalvo-González, E., & Gutiérrez-Martínez, P. (2024). Physicochemical preservation of blueberries treated with chitosan and salicylic acid in postharvest. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(5), e3391. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i5.3391>
- Rayón-Díaz, E., Hernández-Montiel, L. G., Sánchez-Burgos, J. A., Zamora-Gasga, V. M., González-Estrada, R. R., & Gutiérrez-Martínez, P. (2024). Natural Compounds and Derivates: Alternative Treatments to Reduce Post-Harvest Losses in Fruits. In *AgriEngineering*, 6(2) 1022–1042. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020059>
- Rodríguez-Guzmán, Carlos A., Montañón-Leyva, Beatriz, Velázquez-Estrada, Rita M., Sánchez-Burgos, Jorge A., García-Magaña, María de Lourdes, González-Estrada, Ramsés R., & Gutiérrez-Martínez, Porfirio. (2021). Estado actual de métodos alternativos, de control de hongos y su efecto en la calidad postcosecha de frutos de jitomate (*Solanum lycopersicum*). *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 24. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.388>
- Saberi R, Vatankhah M, Hassanisaadi M, Shafiei Z and Kennedy JF. (2024). Advancements in coating technologies: Unveiling the potential of chitosan for the preservation of fruits and vegetables. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127677>
- Saucedo-Plascencia, M. D., Guevara Martínez, S. J., Zamudio-Ojeda, A., & Castillo-Romero, A. (2023). Nanopartículas de quitosano: una prometedora estrategia para combatir la resistencia a antimicrobianos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9562–9575. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5078
- Torres-Rodríguez, J. A., Reyes-Pérez, J. J., Castellanos, T., Angulo, C., Quiñones-Aguilar, E. E., & Hernandez-Montiel, L. G. (2021). A biopolymer with antimicrobial properties and plant resistance inducer against phytopathogens: Chitosan. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(1), 15. <https://doi.org/10.15835/nbha49112231>
- Valenzuela-Ortiz, G., Gaxiola-Camacho, S. M., San-Martín-hernández, C., Martínez-Téllez, M. Á., Aispuro-Hernández, E., Lizardi-Mendoza, J., & Quintana-Obregón, E. A. (2022). Chitosan Sensitivity of Fungi Isolated from Mango (*Mangifera indica* L.) with Anthracnose. *Molecules*, 27(4). <https://doi.org/10.3390/molecules27041244>

¿Cómo elegir el lugar ideal para una planta de bioetanol? Guía para su localización óptima en México

Enrique Ávila-Soler ¹, Brenda Aracely Ramírez-Barraza ^{2,*} y Arturo Ernesto Mares-Gardea ³

¹ Departamento de Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero – TECNM, Ciudad de México, México.

² Departamento de Economía, Universidad Autónoma Metropolitana Campus Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

³ Dirección General, Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero – TECNM, Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: barb@azc.uam.mx;

Artículo de divulgación científica

Recibido: 5 de junio de 2025 Aceptado: 19 de julio de 2025 Publicado: 28 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.470>

Resumen: La ubicación estratégica de una planta de bioetanol es fundamental para maximizar su eficiencia operativa, reducir costos logísticos además de garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Este estudio tiene como objetivo desarrollar una guía para determinar la localización óptima de una planta de bioetanol en México, integrando criterios técnicos, logísticos, económicos, sociales y ambientales. La metodología se basa en un enfoque en dos etapas: la macrolocalización se realiza mediante el método de factores ponderados, que permite identificar los estados con mejores condiciones integrales; la microlocalización se lleva a cabo con el método del centro de gravedad, que facilita seleccionar el municipio más adecuado dentro del estado elegido. Se emplean herramientas cuantitativas y geoespaciales, como evaluaciones multicriterio junto con sistemas de información geográfica, para comparar alternativas y modelar escenarios sustentados en datos objetivos. Los resultados permiten identificar zonas con alto potencial para albergar proyectos de bioetanol, optimizar el acceso a recursos naturales e infraestructura, minimizar impactos ambientales negativos así como favorecer la aceptación social. En conclusión, una localización bien fundamentada no solo mejora la rentabilidad del proyecto, sino que también impulsa una transición energética más justa, eficiente y territorialmente equilibrada en México.

Palabras clave: localización industrial; bioetanol; evaluación multicriterio; logística; sostenibilidad

Introducción

A finales de 2006, el precio del petróleo alcanzó su nivel más alto en más de dos décadas, coincidiendo con una serie de fenómenos meteorológicos extremos que reforzaron la evidencia del cambio climático como una amenaza global (Lamy, 2006). Estos eventos marcaron un punto de inflexión en la discusión internacional sobre el uso de combustibles fósiles, el desarrollo sostenible y la necesidad de transitar hacia fuentes de energía más limpias y seguras. Desde entonces, los países han replanteado sus políticas energéticas, reconociendo que la seguridad energética no solo depende del acceso inmediato a fuentes diversas además de estables, sino también de la inversión a largo plazo en tecnologías e infraestructuras que garanticen un suministro sustentable y resiliente, con criterios de eficiencia energética e incorporación de energías limpias, de tal manera que el modelo energético promueva la prosperidad, el desarrollo sostenible y el bienestar (Herrero de Castro, 2016).

Ante la necesidad de diversificar las fuentes energéticas y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, las energías renovables como la solar, eólica, geotérmica y las derivadas de la biomasa han adquirido un papel protagónico a nivel global. En este contexto, los biocombustibles, definidos como aquellos combustibles obtenidos directa o indirectamente a partir de biomasa; estos se clasifican en primera, segunda y tercera generación, según el tipo de materia prima y el proceso tecnológico utilizado.

Los biocombustibles de primera generación se producen a partir de cultivos agrícolas tradicionales como la caña de azúcar, el maíz, el trigo, la palma aceitera, la soya, entre otros, que también son utilizados en la alimentación humana o animal. En este grupo se encuentran el biodiésel, el bioetanol y el biogás, que han sido los más desarrollados y comercializados en las últimas décadas.

Los de segunda generación se obtienen a partir de biomasa lignocelulósica, es decir, residuos agrícolas, forestales e industriales que no compiten directamente con los alimentos; y los de tercera generación emplean cultivos energéticos avanzados, como microalgas (Alejos y Calvo, 2015).

Entre los biocombustibles de primera generación, el bioetanol se ha consolidado como uno de los más utilizados a nivel mundial. Se trata de etanol (C_2H_5OH) producido por métodos biológicos, utilizado principalmente como aditivo para la gasolina, aunque también existen motores que funcionan con etanol anhidro. Su producción implica tecnologías clave como la fermentación microbiana de azúcares, el pretratamiento de carbohidratos (como almidón y celulosa), la destilación del caldo de fermentación hasta la deshidratación final del producto (Chisti y Karimi, 2024).

Estados Unidos y Brasil lideran la producción mundial de bioetanol, representando conjuntamente más del 80 % del total (Renewable Fuels Association, 2024). La Agencia Internacional de Energía proyecta un aumento de 30 % en la demanda de biocombustibles para 2028 (IEA, 2023). En México, se estima que la producción alcance 128.4 millones de litros en 2025, aunque enfrenta retos como falta de infraestructura (SENER, 2020). El crecimiento del mercado mundial de bioetanol se estima a una tasa compuesta anual de 5.1 % hacia 2032 (Precedence Research, 2023). Este impulso responde a políticas de transición energética hacia la reducción de emisiones.

Dado este panorama, surge la necesidad de identificar los factores estratégicos para la localización óptima de una empresa dedicada a la producción de bioetanol. Esta decisión debe considerar no solo aspectos técnicos, económicos, ambientales, logísticos y regulatorios, con el fin de maximizar su viabilidad y contribuir al desarrollo sostenible.

La localización de plantas es un proceso estratégico mediante el cual una empresa selecciona el sitio óptimo para establecer una instalación productiva, considerando factores como la proximidad a materias primas, acceso a mercados, infraestructura disponible, costos operativos, y aspectos sociales y ambientales. Se busca maximizar la eficiencia operativa, reducir costos logísticos y operativos, y asegurar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo (Gothwal y Saha, 2015). La elección del sitio para plantas de bioetanol se ha abordado en la literatura mediante distintos enfoques, como el Análisis de Proceso Jerárquico (AHP), el Proceso Analítico de Red (ANP), métodos GIS (Sistemas de Información Geográfica), y modelos combinados. Estos métodos permiten integrar criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales de manera objetiva y reproducible (Saaty, 2008; Malczewski, 2006). La integración de GIS con análisis multicriterio facilita la visualización espacial y el manejo de grandes bases de datos, mejorando la precisión y la planificación estratégica (Malczewski y Rinner, 2015). Adicionalmente, la evaluación de impactos sociales y ambientales es crucial para garantizar la aceptación comunitaria y minimizar conflictos por uso de recursos naturales, contribuyendo así a la sostenibilidad del proyecto (Pereira *et al.*, 2021). Las experiencias internacionales, especialmente en Brasil y Estados Unidos, demuestran la necesidad de equilibrar la proximidad a materias primas, la infraestructura y la conectividad con los mercados, bajo políticas públicas que apoyen el desarrollo regional y energético (Goldemberg, 2007).

La relevancia global de la localización de plantas productoras de bioetanol radica en su contribución directa a la seguridad energética y a la reducción de emisiones contaminantes. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), se espera que la demanda de biocombustibles aumente en 38 mil millones de litros entre 2023 y 2028, lo que representa un incremento cercano al 30% respecto al período anterior, consolidando al bioetanol como un componente esencial en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles (IEA, 2023). En este contexto, la correcta ubicación de las plantas es clave para maximizar la eficiencia operativa, reducir costos y minimizar impactos ambientales, siendo fundamentales aspectos como la cercanía a fuentes de biomasa, la disponibilidad de infraestructura adecuada y la integración con redes logísticas y de distribución (Chandel *et al.*, 2019). Esta visión estratégica es un factor determinante en el éxito de los proyectos de bioetanol a nivel global.

En México, la localización de plantas de bioetanol es clave para aprovechar recursos naturales y promover el desarrollo económico local. Además, SAGARPA ha impulsado siete plantas con capacidad de 42.2 millones de litros anuales, apoyando cultivos como caña de azúcar y palma de aceite (SAGARPA, 2017). Estas acciones buscan optimizar la eficiencia, reducir costos y contribuir a la sostenibilidad energética regional. Desde 2005, México cuenta con la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, que regula el aprovechamiento de la caña para la producción de biocombustibles, a caña de azúcar tiene un alto rendimiento de producción de etanol. En México, se producen anualmente más de 55.5 millones de toneladas de caña de azúcar, una cantidad significativa que respalda la producción de biocombustibles (SAGARPA, 2024).

México cuenta con regiones de alto potencial para el desarrollo de bioetanol. Estados como Veracruz (sorgo dulce, caña de azúcar), Sonora (a partir de remolacha azucarera y sorgo dulce) y Chiapas (productos agrícolas no comestibles

como aceite de *jatropha curcas*, aceite de palma y aceite reciclado) reúnen condiciones favorables (clima, recursos agrícolas, infraestructura) que deben evaluarse mediante metodologías objetivas como las aquí presentadas, a fin de orientar inversiones estratégicas que impulsen el desarrollo regional (Gobierno de México, 2015; Primera plana digital, 2016; Expansión, 2010). Para el año 2024, el estado de Sonora tuvo una producción de 226,764.86 ton de sorgo forrajero verde, Veracruz produjo 31,263.59 ton de sorgo y de 2023 a 2024 tuvo una producción de 20 millones de toneladas de caña de azúcar (SIAP, 2025; Salazar, 2024).

La instalación plantas de biocombustibles contribuye al desarrollo económico rural, mejora ingresos, reduce emisiones del transporte y promueve el uso sostenible de recursos locales (Montaño-Herrera *et al.*, 2021). En consecuencia, esta guía presenta una metodología estructurada para seleccionar el sitio óptimo para una planta de bioetanol en México, de segunda generación integrando análisis multicriterio además de herramientas geoespaciales. La metodología integra dimensiones económicas, técnicas, sociales y ambientales, mediante un proceso riguroso y replicable que impulsa una transición energética eficiente, justa y sostenible.

Desarrollo

El proceso de determinar dónde instalar una planta de bioetanol no es arbitrario: requiere el análisis riguroso de información económica, geográfica, social y ambiental. Para lograr una decisión eficiente, se utilizó una metodología en dos etapas basada en herramientas cuantitativas: el método de factores ponderados, así como el método del centro de gravedad (Figura 1).

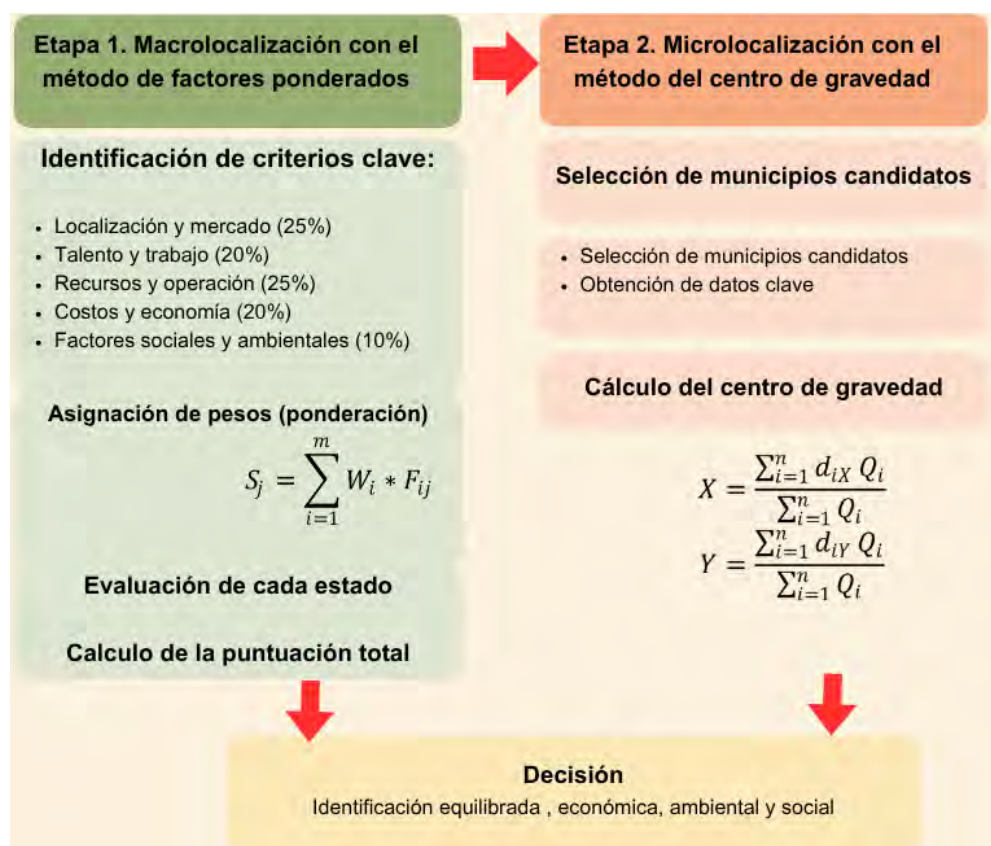


Figura 1. Proceso para determinar la localización de una planta de Bioetanol.

Etapa 1: Macrolocalización con el método de factores ponderados

En esta primera etapa se evalúa qué entidad federativa del país reúnen las mejores condiciones para albergar una planta de bioetanol. Para ello se emplea el método de factores ponderados, una herramienta que permite comparar distintas alternativas (en este caso, entidades federativas) tomando en cuenta diversos criterios de decisión.

¿Cómo funciona este método?

1. Identificación de criterios clave: Se eligieron cinco factores que influyen en la viabilidad del proyecto:
 - Localización y mercado (25%): corresponde a la cercanía a consumidores y redes de transporte.
 - Talento y trabajo (20%): evalúa la disponibilidad de mano de obra calificada de la región.
 - Recursos y operación (25%): mide el acceso a materia prima e infraestructura industrial.
 - Costos y economía (20%): representa los incentivos fiscales, costos laborales y de energía.
 - Factores sociales y ambientales (10%): indica la aceptación comunitaria e impacto ecológico en la región.
2. Asignación de pesos (ponderación): A cada factor se le asignó un porcentaje según su relevancia, lo que permite priorizar algunos aspectos sobre otros.
3. Evaluación de cada estado: Para cada uno de los estados analizados, se asignó una calificación del 1 al 10 en cada criterio.
4. Cálculo de la puntuación total: Se usó la siguiente fórmula:

$$S_j = \sum_{i=1}^m W_i * F_{ij} \quad (1)$$

Donde: S_j Puntuación global de cada alternativa j ; W_i Es el peso ponderado de cada factor i ; F_{ij} es la puntuación de las alternativas j para cada uno de los factores (Lazzari *et al.*, 1994). En este contexto i representa los cinco factores ponderados, por su parte, j indica los estados evaluados.

¿Qué se logró? Con este método se identifican los estados que reúnen las mejores condiciones combinadas, dando paso a un análisis más detallado dentro del estado mejor evaluado.

En la Tabla 1 se presenta el resultado del método de factores ponderados del Estado de México, el cual obtuvo una puntuación total de 76 puntos, lo cual refleja un nivel competitivo en los factores evaluados.

Tabla 1 . Método de factores ponderados para el estado de México.

Factor de localización	Peso ponderado del factor % W_i	Puntuación F_{ij}	Peso ponderado por la puntuación $W_i * F_{ij}$
Localización y mercado	25%	78	19.5
Talento y trabajo	20%	75	15
Factores de costos y economía	20%	61	12.2
Factores sociales y ambientales	10%	68	6.8
Total	100%	372	76

Etapas 2: Microlocalización con el método del centro de gravedad

Una vez seleccionado el estado más adecuado, el siguiente paso es identificar el municipio óptimo donde ubicar la planta. Para ello se emplea el método del centro de gravedad, una técnica matemática útil para optimizar la ubicación de instalaciones. ¿Cómo funciona?

1. Selección de municipios candidatos: Se eligen n- cantidad de municipios del estado, los municipios designados destacan por su conectividad, recursos y factibilidad de operación.
2. Obtención de datos clave: De cada municipio se recuperaron:
 - Sus coordenadas geográficas (longitud y latitud).
 - Su población, usada como indicador de demanda o fuerza laboral.
3. Cálculo del centro de gravedad: Se calcularon las coordenadas promedio ponderadas por población, lo que señala el punto más eficiente para ubicar la planta, se emplearon las siguientes formulas:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iX} Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iY} Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (3)$$

Donde, d_{iX} y d_{iY} corresponden a las coordenadas cartesianas de la ubicación i ; Q_i es el peso de la ubicación i , determinado por la población del municipio (Render y Heizer, 2014). Por ejemplo, en la Tabla 2 se muestran los datos necesarios para la obtención del punto óptimo en el estado de México.

Tabla 2. Método del centro de gravedad para el Estado de México.

Zona	Municipio	Población (Q_i)	Coordenada X (d_{iX})	Coordenada Y (d_{iY})	$d_{iX} \cdot Q_{iX}$	$d_{iY} \cdot Q_{iY}$
Norte	Jilotepec	71,624	19.951944	-99.532778	1,429,038.037	-7,128,935.691
Este	Texcoco	35,491	19.500000	-98.880000	692,074.500	-3,509,350.080
Centro	San Mateo Atenco	97,418	19.267600	-99.532100	1,877,011.057	-9,696,218.118
Oeste	Villa Allende	53,275	19.374700	-100.147500	1,032,187.143	-5,335,358.063
Sur	Tlatlaya	32,997	18.616944	-100.208056	614,303.301	-3,306,565.224
Total		290,805			5,644,614.038	-28,976,427.18

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iX} Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{5,644,614.038}{290,805} = 19.4098 \quad (4)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iY} Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{-28,976,427.18}{290,805} = -99.6206 \quad (5)$$

Los resultados de las coordenadas (19.4098, -99.6206) cae en el municipio de Ocoyoacac, Estado de México, justo entre Lerma y la zona de Santa Fe (CDMX), lo cual lo convierte en un lugar central entre los municipios considerados, especialmente respecto a San Mateo Atenco (centro) y los municipios del norte y sur. Este punto está ubicado estratégicamente de modo que minimiza la distancia ponderada a todos los municipios incluidos.

El resultado es la identificación de un punto geográfico estratégicamente ubicado dentro del estado, que permite minimizar los costos de transporte, facilitar el acceso a recursos humanos y optimizar la distribución del producto final.

El resultado de este proceso no es solo encontrar un lugar en el mapa. Se trata de identificar la opción más equilibrada entre economía, medio ambiente y bienestar social. Una planta bien ubicada puede reducir significativamente los costos de operación, asegurar el suministro constante de materia prima al mismo tiempo, generar beneficios para la comunidad local.

El enfoque utilizado presenta diversas ventajas, entre ellas su objetividad, ya que se basa en datos concretos y no en suposiciones; su carácter multicriterio, al considerar de forma simultánea factores económicos, sociales y logísticos; y su reproducibilidad, lo que permite aplicar esta metodología en otros proyectos industriales o del sector energético con resultados consistentes.

En cuanto a las tendencias actuales, el interés por los biocombustibles como el bioetanol está creciendo rápidamente, impulsado por la necesidad global de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. Esto ha llevado a que cada vez más gobiernos además de empresas inviertan en estudios y tecnologías para ubicar estas plantas en lugares estratégicos. Se espera que, en los próximos años, las decisiones de localización consideren no solo aspectos técnicos o económicos, sino también criterios sociales y de justicia ambiental, en línea con los objetivos globales de sostenibilidad.

Conclusiones

La elección del sitio ideal para una planta de bioetanol en México no puede dejarse al azar; exige un proceso riguroso, fundamentado en herramientas analíticas capaces de ponderar múltiples dimensiones. Esta guía demuestra que la combinación de metodologías cuantitativas con criterios estratégicos permite obtener resultados eficientes, reproducibles y sostenibles.

La localización óptima se construye mediante análisis jerárquicos. La metodología empleada permite reducir de forma sistemática el conjunto de alternativas hasta identificar el punto geográfico más conveniente. Esta secuencia garantiza decisiones fundamentadas en evidencia y no en suposiciones.

En la etapa de macrolocalización se identifican las regiones con mayores ventajas competitivas. A través del método de factores ponderados, se evalúan cinco dimensiones clave: cercanía al mercado, disponibilidad de talento, recursos e infraestructura, costos operativos, condiciones sociales y ambientales. Al asignar pesos diferenciados a cada criterio, es posible priorizar los estados con el balance más favorable para la instalación de la planta.

La microlocalización permite afinar la decisión en términos de eficiencia logística y operativa. Una vez seleccionado el estado más viable, el método del centro de gravedad facilita la elección del municipio óptimo al considerar la distribución espacial de la población como indicador de demanda y disponibilidad de mano de obra, lo que contribuye a reducir costos de transporte mejorando la eficiencia del proyecto.

Este enfoque multidimensional facilita decisiones sostenibles, ya que no solo identifica el punto más rentable, sino también el más equilibrado entre viabilidad técnica, eficiencia económica, impacto ambiental y aceptación social. Así, una planta estratégicamente ubicada no solo mejora su desempeño operativo, sino que también genera beneficios tangibles para las comunidades locales.

En un contexto de transición energética, la localización de plantas debe alinearse con principios de sostenibilidad y justicia ambiental. Esto implica considerar la equidad social, la resiliencia territorial y la mitigación de impactos ecológicos en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En conclusión, esta guía demuestra que la localización óptima de una planta de bioetanol es alcanzable mediante herramientas rigurosas que integren de forma simultánea criterios económicos, sociales, técnicos y ambientales. Este enfoque no solo fortalece la rentabilidad de un proyecto, sino que también contribuye a una transición energética más justa, sostenible y territorialmente equilibrada para México.

Bibliografía

- Alejos, C., & Calvo, E. (2015). Biocombustibles de primera generación. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 18(2), 19–30. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/11784>
- Chandel, A. K., Garlapati, V. K., Singh, A. K., Antunes, F. A. F., & da Silva, S. S. (2019). The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. *Bioresource Technology Reports*, 8, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100235>
- Expansión (2010). *Planta de biocombustible abre en Chiapas*. <https://expansion.mx/obras/2010/11/29/construccion-chiapas-biodiesel-energia>
- Chisti, Y., & Karimi, K. (2024). Bioethanol Production. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies, Second Edition: Volumes 1-4*, 279–294. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00017-6>
- Gobierno de México (2015). *Inauguran planta piloto para producción de bioetanol a base de sorgo dulce en Veracruz*. <https://www.gob.mx/agricultura%7CVeracruz/articulos/inauguran-planta-piloto-para-produccion-de-bioetanol-a-base-de-sorgo-dulce-en-veracruz-137290>
- Goldemberg, J. (2007). Ethanol for a sustainable energy future. *Science*, 315(5813), 808–810. <https://doi.org/10.1126/science.1137013>
- Gothwal, S., & Saha, R. (2015). Plant location selection of a manufacturing industry using analytic hierarchy process approach. *International Journal of Services and Operations Management*, 22(2), 235–255. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2015.071531>
- Herrero de Castro, R. D. (2016). La seguridad energética y la estrategia global de seguridad de la Unión Europea. *Revista UNISCI*, 42. <http://dx.doi.org/10.5209/RUNI.53788>
- IEA. (2023). “Renewables 2023”. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- Lamy, J. (2006). *De un G8 al otro: seguridad energética y cambio climático*. <https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/0604-LAMY-Esp.pdf>
- Lazzari, L. L., Machado, E. A., & Pérez, R. H. (1994). *Matemática borrosa: técnicas de gestión para el tratamiento de la incertidumbre*. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas.

- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. (Vol. 1, pp. 55-77). New York: Springer.
- Montaño-Herrera, M., Rodríguez-Vázquez, R., & Reyes-Gómez, V. M. (2021). Potencial de residuos agrícolas para biocombustibles en México. *Energy*, 237, 121593. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121593>
- Pereira, L., Schneider, M., & Carvalho, L. (2021). Social and environmental justice in bioenergy: Assessing local impacts of bioethanol production. *Energy Policy*, 156, 112374. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112374>
- Precedence Research. (2023). "Bioethanol Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034". <https://www.precedenceresearch.com/bioethanol-marketprecedenceresearch.com+4precedenceresearch.com+4precedenceresearch.com+4>
- Primera plana digital (2016). "Sonora tiene potencial para producir bioetanol, afirma investigador" <https://www.primeraplanadigital.com.mx/sonora-tiene-potencial-para-producir-bioetanol-afirma-investigador/>
- Render, B., & Heizer, J. (2014). Principios de administración de operaciones. (Novena ed., Vol. 1). México: Pearson Educación.
- Renewable Fuels Association. (2024). "2024 Ethanol Industry Outlook". https://d35t1syewk4d42.cloudfront.net/file/2666/RFA_Outlook_2024_full_final_low.pdf35t1syewk4d42.cloudfront.net
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Salaza, M. (2024). 17 de los 18 ingenios azucareros de Veracruz comienzan zafra durante 6 meses [MAPA]
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] (2025). *Avance de Siembras y Cosechas*. https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/
- Secretaría de Energía (SENER). (2020). "Prospectiva de energías renovables 2020–2034". Gobierno de México <https://www.gob.mx/sener>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017). "Impulsa SAGARPA producción de biocombustibles en México". <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/impulsa-sagarpa-produccion-de-biocombustibles-en-mexico>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2024). "Biocombustibles derivados de la caña de azúcar". <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/biocombustibles-derivados-de-la-cana-de-azucar?idiom=es#:~:text=Conoce%20c%C3%B3mo%20se%20produce%20este,contexto%20de%20la%20sostenibilidad%20energ%C3%A9tica.&text=En%20M%C3%A9xico%2C%20gracias%20al%20trabajo,una%20opci%C3%B3n%20prometedora%20y%20sostenible.>

La leña: tradición energética, impactos ambientales y alternativas sostenibles

Jarinzi Corona-Terán *, José Guadalupe Rutiaga-Quñones

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

* Autor de correspondencia: cjarinzi@yahoo.com.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 5 de junio de 2025 Aceptado: 26 de julio de 2025 Publicado: 31 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.475>

Resumen: La leña constituye el principal recurso energético para muchas comunidades rurales, especialmente en México, donde su uso está relacionado a prácticas culturales y necesidades básicas. Se realiza una exploración sobre el uso y manejo de especies forestales como leña, analizando criterios de selección de especies, impactos en los ecosistemas, su relación con la calidad del aire y el cambio climático, los efectos del humo en la salud y la implementación de tecnologías más eficientes.

Palabras clave: calidad del aire; daños a la salud; degradación forestal; estufas de leña; selección de especies

Introducción

A nivel mundial, los bosques aportan aproximadamente el 40% de la energía renovable en forma de dendrocombustible, recurso forestal del que dependen cerca de 2,400 millones de personas para satisfacer sus necesidades energéticas básicas como cocinar, hervir agua y calentar sus hogares, siendo esta dependencia particularmente alta en África, en donde alcanza el 63%, seguida de Asia y Oceanía con un 38%, y América Latina y el Caribe con un 15% (FAO, 2018). En el año 2023, se produjeron 1,900 millones de m³ de leña en todo el mundo. África y Asia representaron la mayor parte de la producción con 37% cada una, América, 18% y Europa 9% (WBA, 2023).

En México, la producción forestal maderable se destinó en un 70.1%, equivalente a 5.8 millones de m³, a madera para aserrío, que incluye escuadría y durmientes; un 10%, correspondiente a 0.8 millones de m³, se utilizó para productos celulósicos; mientras que el 19.9% restante, es decir, 1.7 millones de m³, se empleó en la fabricación de chapa y triplay, postes, pilotes, morillos y combustible como leña y carbón (SEMARNAT, 2018).

Ese mismo año, la producción de leña en México fue de 1,069,380 m³, siendo los estados de Durango, Chihuahua y Oaxaca los principales productores (SEMARNAT, 2018). En los hogares mexicanos, la mayor parte de la energía consumida para usos térmicos, proviene de gas LP, que representa el 79%, seguido de la leña o carbón con 11% y el gas natural con el 7%, empleándose principalmente en la cocción de alimentos y el calentamiento de agua (INEGI, 2018).

Dada la importancia que tiene el uso de especies forestales como fuente de leña por las comunidades rurales, este artículo aborda los criterios utilizados para la selección de especies, afectación al ecosistema, su relación con la calidad del aire y cambio climático, efectos del humo de leña en la salud, así como la implementación de tecnologías eficientes.

Desarrollo

Selección de especies

La selección de especies forestales para su uso como leña depende de diversos factores que interactúan entre sí. Las comunidades rurales eligen las especies de acuerdo a sus características, tales como: facilidad para cortar, secado rápido, baja producción de humo, duración del fuego, que se relaciona con la cocción de diversos alimentos como tortillas o frijoles, duración de la flama, sabor que aporta a los alimentos, facilidad de ignición, baja producción de ceniza y disponibilidad en el entorno (Yescas-Albarrán *et al.*, 2016; Márquez-Reynoso *et al.*, 2017).

Las maderas blandas (por ejemplo, maderas de pino), se prefieren para iniciar el fuego debido a su rápida combustión y llamas intensas, mientras que las maderas duras (maderas de encino) se utilizan para mantener el fuego por más tiempo porque su combustión es más lenta (Bello-Román *et al.*, 2023).

Además, el uso de la leña permanece arraigado en la cultura doméstica, dado que las amas de casa la consideran insustituible para cocinar, debido a que la relacionan con un mejor sabor que adquieren los alimentos, así como a la posibilidad de generar un fuego lento o rápido según las necesidades específicas de ciertos platillos (Cruz-León *et al.*, 2016).

Asimismo, los usuarios clasifican la madera en dos categorías: madera de buena calidad, porque generan poco humo, arden lentamente y producen brasas duraderas; y maderas de baja calidad, que son menos apreciadas por ser maderas blandas. Además, el uso de las especies arbóreas se ve influenciado por las preferencias gastronómicas, especialmente en festividades locales (Quiroz-Carranza y Orellana, 2010).

Impacto al ecosistema

Estudios en bosques templados muestran que la extracción intensiva reduce en un 55% el contenido total de carbono, disminuye la hojarasca y afecta negativamente el carbono orgánico del suelo, así como nutrientes clave como amonio, carbono y nitrógeno en la biomasa microbiana (García-Oliva *et al.*, 2014). La accesibilidad influye en el grado de perturbación: áreas de difícil acceso presentan menos impacto, mientras que zonas accesibles y con actividades como pastoreo y cultivos anuales muestran menor biomasa de especies como pino y encino (Baroody, 2013). Mientras que los bosques tropicales, con baja extracción capturan significativamente más carbono: 213.4 Mg ha⁻¹ en pino y 189.5 Mg ha⁻¹ en encino; que aquellos con alta extracción: 138.2 Mg ha⁻¹ y 92.0 Mg ha⁻¹, respectivamente (Aryal *et al.*, 2018).

Sin embargo, también existen investigaciones que respaldan que la extracción de leña no siempre resulta perjudicial para los ecosistemas, especialmente cuando se realiza bajo prácticas de manejo forestal sostenible. En ese mismo sentido, Masera *et al.* (2011) señalan que la extracción de leña, reduce los daños ambientales asociados a su inadecuada disposición, tales como: la contaminación del aire y agua, aumento de plagas y enfermedades, deterioro del paisaje y calidad de vida de las poblaciones humanas. Cortés-Blobaum *et al.* (2019) reportan que, en ciertas comunidades caracterizadas por pertenecer a áreas naturales protegidas, la percepción local es que la extracción de leña impacta positivamente al bosque, cuando se realiza en un esquema de aprovechamiento de madera muerta y ramas, lo que puede reducir el riesgo de incendios y la presencia de plagas.

Calidad del aire y cambio climático

La quema de leña libera contaminantes, afectan la calidad del aire y contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero. La quema ineficiente e incompleta de leña con métodos tradicionales, es decir, en estufas sin ventilación y chimeneas abiertas, propicia contaminantes que incluyen hidrocarburos aromáticos policíclicos, material particulado, óxido nitroso, monóxido de carbono, carbono negro y dióxido de azufre, y sus concentraciones son dos o tres veces mayores en ambientes interiores (Ali *et al.*, 2021), metano (Sutar *et al.*, 2015), compuestos orgánicos volátiles, formaldehído, materia orgánica y radicales libres (Newell *et al.*, 2022), dióxido de carbono, levoglucosano, potasio, metales y metaloides (Achad *et al.*, 2018).

El uso intensivo de combustibles de madera conlleva a dos problemáticas ambientales: la regeneración de los bosques ocurre lentamente, y cuando la madera se extrae a un ritmo mayor que el de su recuperación, se genera una deforestación insostenible. Esto incrementa la erosión del suelo, destruye hábitats naturales y reduce la biodiversidad. Adicionalmente, la quema de madera extraída de manera insostenible genera emisiones netas de gases de efecto invernadero al liberar más carbono del que puede ser reabsorbido por la regeneración forestal (Ver Beek *et al.*, 2020).

Efectos del humo de leña en la salud

El uso de leña afecta de manera significativa a la salud, especialmente a las vías respiratorias y al sistema cardiovascular, debido a la exposición a contaminantes nocivos (Figura 1). En un estudio realizado con poblaciones indígenas, se analizó la exposición a hidrocarburos aromáticos policíclicos y monóxido de carbono, generados por la quema de biomasa forestal. Los resultados revelaron que el volumen espiratorio forzado promedio fue notablemente bajo, lo que indica función pulmonar comprometida (Rodríguez-Aguilar *et al.*, 2019). También se asocia a una mayor expresión de los reguladores de la inflamación vascular, lo que sugiere un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares entre las mujeres que usan leña (Ruíz-Vera *et al.*, 2018).

Al analizar el potencial daño al ADN asociado con el monóxido de carbono, en la población rural, se observó daño significativo en las mujeres expuestas al humo de la leña, lo que sugiere posibles consecuencias para la salud a largo plazo (Herrera-Portugal *et al.*, 2009). Además del riesgo de cáncer de pulmón, propiciado por la exposición a hidrocarburos aromáticos policíclicos y sus derivados nitrados mediante la inhalación de partículas finas; esta exposición proviene principalmente de las actividades de cocinar en fogatas abiertas (Orakij *et al.*, 2017; Kermani *et al.*, 2021).

Se ha demostrado que la exposición a los aerosoles de humo de madera, puede agravar las enfermedades inflamatorias crónicas de la piel y acelerar su proceso de envejecimiento (Fadadu *et al.*, 2023; Chao *et al.*, 2023). Analizando la respuesta en queratinocitos epidérmicos humanos, se demostró que los compuestos como el furfural y el siringol, inducen respuestas celulares relacionadas con el estrés oxidativo y la inflamación, provocando la formación de envolturas reticuladas, lo que indica daño celular, además se observó una alteración significativa en el perfil proteico de las células expuestas, con un aumento en la proporción de queratina (Karim *et al.*, 2024).

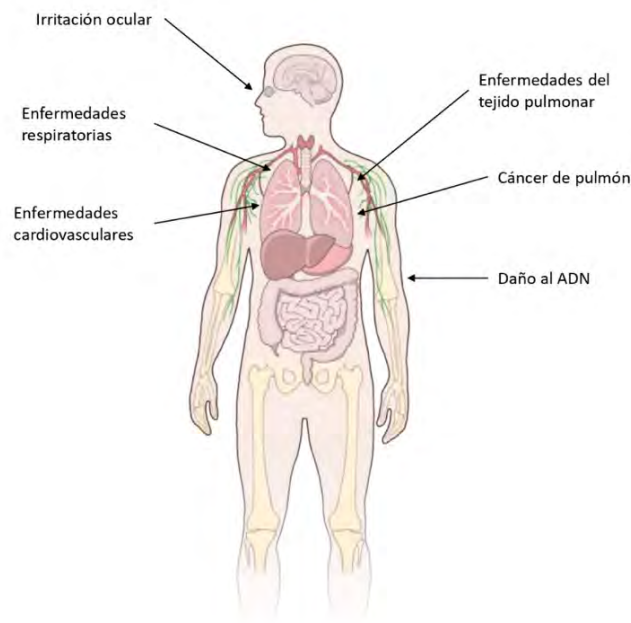


Figura 1. Enfermedades asociadas al humo de leña.
Elaboración propia.

Tecnologías innovadoras

En este contexto, las estufas de leña, resultan una estrategia para promover el uso sustentable de la leña y representan una opción para mejorar la calidad de los habitantes rurales. Con esta tecnología se obtiene una eficiencia energética cercana al 60%, en comparación con el fogón tradicional, lo que representa un mejor aprovechamiento del calor y una reducción de tiempo de trabajo de las mujeres al cocinar. La estufa reduce las emisiones de humo al canalizarlas hacia el exterior de la casa (Flores-Sotelo, 2016).

El uso de estufas de leña reduce la tasa y duración de las infecciones respiratorias en las vías superiores e inferiores (Schilman *et al.*, 2015). Además de la reducción de los síntomas respiratorios, oculares, función pulmonar, presión arterial y quemaduras (Jamali *et al.*, 2017).

Las mediciones directas de las concentraciones de material particulado y monóxido de carbono, obtenidas con estufas de chimenea tipo plancha Patsari, son de $21 \pm 8 \mu\text{g m}^{-3}$ y $1.7 \pm 0.5 \text{ mg m}^{-3}$, respectivamente. En el caso de estufas tipo Patsari-gas licuado de petróleo, los valores son de $24 \pm 5 \mu\text{g m}^{-3}$ y $3 \pm 1 \text{ mg m}^{-3}$. Ambos resultados están por debajo de los promedios anuales establecidos en el Objetivo Provisional de la Organización Mundial de la Salud, que son $35 \mu\text{g m}^{-3}$ para material particulado y 7 mg m^{-3} para monóxido de carbono (Medina *et al.*, 2019).

Las estufas de cocina mejoradas metálicas demuestran una reducción significativa de la leña en 639.78 t (33.85%) y de las emisiones de CO_2 en 1247.4 t (60.93%) por año (Budhathoki *et al.*, 2024).

Conclusiones

El uso de leña como fuente energética en comunidades rurales sigue siendo relevante por razones culturales, económicas y de acceso. Sin embargo, la extracción y quema tradicionales de leña conllevan riesgos ambientales, como la degradación de los ecosistemas y la reducción de la capacidad de captura de carbono, así como problemas de salud asociados a la exposición a contaminantes. El impacto negativo puede mitigarse mediante prácticas de manejo forestal sostenible, como la utilización de árboles muertos, residuos de aprovechamientos forestales, limpiezas de monte, podas de árboles y de arbustos que no sean refugio para fauna silvestre, ramas de árboles con rápido crecimiento, establecer

plantaciones forestales para tal fin, así como la adopción de tecnologías innovadoras, como estufas mejoradas, que aumentan la eficiencia y reducen las emisiones.

Bibliografía

- Achad, M., Caumo, S., Pérola de Castro, V. H. B., Gómez, D., & Smichowski, P. (2018). Chemical markers of biomass burning: Determination of levoglucosan, and potassium in size-classified atmospheric aerosols collected in Buenos Aires, Argentina by different analytical techniques. *Microchemical Journal*, 139, 181-187, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.02.016>
- Ali, M. U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M. E. M., Ullah, S., Zheng, C., Kuang, X., & Wong, M. H. (2021). Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126127, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126127>
- Aryal, D. J., Ruiz-Corzo, R., López-Cruz, A., Velázquez-Sanabria, C., Gómez-Castro, H., Guevara-Hernández, F., Pinto-Ruiz, R., Venegas-Venegas, J. A., Ley de Coss, A., Morales-Ruiz, D., & Euán-Chi, I. (2018). Biomass accumulation in forests with high pressure of fuelwood extraction in Chiapas, Mexico. *Revista Árvore*, 42(3), <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882018000300007>
- Baroody, J. (2013). Firewood extraction as a catalyst of pine-oak forest degradation in the Highlands of Chiapas, Mexico. Washington: University of Washington). <https://digital.lib.washington.edu/server/api/core/bitstreams/75f78ffe-c796-422c-91a1-a74c66bb9932/content>
- Bello-Román, M., García-Flores, A., Colin-Bahena, H., Román-Montes de Oca, E., & Beltrán-Rodríguez, L. (2023). Variación en el consumo de leña y factores que lo determinan en una comunidad campesina al suroeste del estado de Morelos, México. Variation in the consumption of firewood and factors that determine it in a peasant community in the southwest of the state of Morelos, Mexico. *Botanical Sciences*, 101(1), 149-163, <https://doi.org/10.17129/botsci.3147>
- Budhathoki, A., Choochuay, C., & Bhandary, S. (2024). Catalyzing progress: Unveiling the impact of metallic improved cooking stoves on energy security and sustainable development. *Heliyon*, 10(21), e39733, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39733>
- Chao, L., Feng, B., Liang, H., Zhao, X., & Song, J. (2023). Particulate matter and inflammatory skin diseases: From epidemiological and mechanistic studies. *Science of the Total Environment*, 905, 167111, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167111>
- Cortés-Blobaum, H. J., Rodríguez-Laguna, R., Otazo-Sánchez, E. M., Prieto-García, F., Fragoso-López, P. I., & Razo-Zárate, R. (2019). Patrones culturales de uso de leña en la primera área protegida de Latinoamérica, El Chico, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 6(2), 15-26, <http://reibci.org/publicados/2019/abr/3400108.pdf>
- Cruz-León, A., Uribe-Gómez, M., Lara-Bueno, A., Yescas-Albarrán, C. A., & Maldonado-Torres, R. (2016). Diálogo del saber campesino y la investigación científica: árboles nativos dendroenergéticos en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos, México. *Revue d'ethnoécologie*, <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.2493>
- Fadadu, R. P., Abuabara, K., Balmes, J. R., Hanifin, J. M., & Wei, M. L. (2023). Air pollution and atopic dermatitis, from molecular mechanismsto population-level evidence: A review. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 20, 2526, <https://doi.org/10.3390/ijerph20032526>
- FAO. (2018). El estado de los bosques del mundo. Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Roma. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/386cc341-e052-4064-b23b-253b044d765c/content>
- Flores-Sotelo, M. T. (2016). Alcances ambientales de la adopción de la estufa ahorradora de leña tlecalli en dos comunidades rurales del Estado de Morelos, México. *Ambiente y Desarrollo*, 20(39), 143-157, <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd20-39.aiae>
- García-Oliva, F., Covalada, S., Gallardo, J. F., Prat, C., Velázquez-Durán, R., & Etchevers, J. D. (2014). Firewoods extraction affects carbon pools and nutrients in remnant fragments of temperate forests at the Mexican Transvolcanic Belt. *Bosque*, 35(3), 311-324, <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002014000300006>
- Herrera-Portugal, C., Franco-Sánchez, G., Pelayes-Cruz, M., Schlottfeldt Trujillo, Y., & Pérez-Solís, B. L. (2009). Daño al ADN en mujeres expuestas al humo de la leña en Chiapas, México. *Acta Toxicológica Argentina*, 17(2), 56-61, <https://www.scielo.org.ar/pdf/ata/v17n2/v17n2a04.pdf>
- Jamali, T., Fatmi, Z., Shahid, A., Khoso, A., Masood Kadir, M., & Sathiakumar, N. (2017). Evaluation of short-term health effects among rural women and reduction in household air pollution due to improved cooking stoves: quasi experimental study. *Air Quality, Atmosphere & Health* 10, 809–819, <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0481-0>
- Karim, N., Yang, Y., Salemi, M., Phinney, B. S., Durbin-Johnson, B. P., Rocke, D. M., & Rice, R. H. (2024). Human Keratinocyte Responses to Woodsmoke Chemicals. *Chemical Research in Toxicology*, 37, 675–684, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.3c00353>
- Kermani, M., Jafari, A. J., Gholami, M., Farzadkia, M., Shahsavani, A., & Norzaee, S. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} atmospheric particles in Shiraz, a city in southwest Iran: sources and risk assessment. *Arabian Journal Geosciences*, 14, 1462, <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07863-0>
- Márquez-Reynoso, M. I., Ramírez-Marcial, N., Cortina-Villar, H. S., & Ochoa-Gaona, S. (2017). Propiedades dendro-energéticas de los árboles utilizados para leña en comunidades de la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote, Chiapas, México. En: Vulnerabilidad social y biológica ante el cambio climático en la Reserva Biósfera Selva El Ocote. Editores: Ruíz-Montoya, L., Álvarez-Gordillo, G., Ramírez-Marcial, N., Cruz-Salazar, B. Chiapas, México. El Colegio de la Frontera Sur. 567- 592, <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-retrievefile.pl?id=0e27c5cec49f2040b1781fbff7b46fdc>
- Masera, C. O., Coralli, F., García, B. C., Riegelhaupt, E., Arias, C. T., Vega, J., Díaz, J. G. R., Guerrero, P. G., & Cecotti, L. (2011). La bioenergía en México, situación actual y perspectivas. Red Mexicana de Bioenergía, A. C. <https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/CT4.pdf>
- Medina, P., Berrueta, V., Cinco, L., Ruiz-García, V., Edwards, R., Olaya, B., Schilman, A., & Masera, O. (2019). Understanding household energy transitions: evaluating single cookstoves to “clean stacking” alternatives. *Atmosphere*, 10(11), 693, <https://doi.org/10.3390/atmos10110693>

- Newell, K., Cusack, R. P., Kartsonaki, C., Chaudhary, N., & Kurmi, O. P. (2022). Household air pollution and associated health effects in low and middle income countries. *Encyclopedia of Respiratory Medicine (Second Edition)*, 387-401, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.11494-1>
- Orakij, W., Chetiyakornkul, T., Chuesaard, T., Kaganoi, Y., Uozaki, W., Homma, C., Boongla, Y., Tang, N., Hayakawa, K., & Toriba, A. (2017). Personal inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and their nitro-derivatives in rural residents in northern Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 510, <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6220-z>
- Quiroz-Carranza, J. & Orellana, R. (2010). Uso y manejo de leña combustible en viviendas de seis localidades de Yucatán, México. Use and management of firewood in dwellings of six localities from Yucatán, México. *Madera y Bosques*, 16(2), 47-67, <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1621172>
- Rodríguez-Aguilar, M., Díaz de León-Martínez, L., García-Luna, S., Gómez-Gómez, A., González-Palomo, A. K., Pérez-Vázquez, F. J., Díaz-Barriga, F., Trujillo, J., & Flores-Ramírez, R. (2019). Respiratory health assessment and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in Mexican indigenous population. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 25825-25833, <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05687-w>
- Ruiz-Vera, T., Ochoa-Martínez, Á. C., Pruneda-Álvarez, L. G., Zarazúa, S., & Pérez-Maldonado, I. N. (2018). Exposure to biomass smoke is associated with an increased expression of circulating miRNA-126 and miRNA-155 in Mexican women: a pilot study. *Drug and Chemical Toxicology*, 42(3), 335-342, <https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1526181>
- SEMARNAT. (2018). Anuario estadístico de la producción forestal 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- Schilmann, A., Riojas-Rodríguez, H., Ramírez-Sedeño, K., Berrueta, V. M., Pérez-Padilla, R., & Romieu, I. (2015). Children's respiratory health after an efficient biomass stove (Patsari) intervention. *EcoHealth* 12, 68-76, <https://doi.org/10.1007/s10393-014-0965-4>
- Sutar, K. B., Kohli, S., Ravi, M. R., & Ray, A. (2015). Biomass cookstoves: A review of technical aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1128-1166, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.003>
- Yescas-Albarrán, C. A., Cruz-León, A., Uribe-Gómez, M., Lara-Bueno, A., & Maldonado-Torres, R. (2016). Árboles nativos con potencial dendroenergético para el diseño de tecnologías agroforestales en Tepalcingo, Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7, 3301-3313, <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i16.398>
- Ver Beek, N., Vindel, E., Kuperus, H. M., & Brockway, P. E. (2020). Quantifying the Environmental Impacts of Cookstove Transitions: A Societal Exergy Analysis Based Model of Energy Consumption and Forest Stocks in Honduras. *Energies*, 13(12), 3206, <https://doi.org/10.3390/en13123206>
- WBA. (2023). Global bioenergy statistics report. World Bioenergy Association. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/231219%20GBS%20Report.pdf>

Codigestión anaerobia de lactosuero y purines vacunos para transitar hacia la circularidad

María Rebollo-Sampedro ¹, Esther Acha ^{1,2}, Estíbaliz Sáez de Cámara ^{1,2}, Erlantz Lizundia ^{1,3} y Ion Agirre ^{1,2,*}

¹ Aula de Transición Energética Fundación Repsol sobre "Economía Circular". Escuela de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Bilbao. España.

² Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Bilbao. España.

³ Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Bilbao. España.

* Autor de correspondencia: ion.agirre@ehu.eus

Artículo de divulgación científica

Recibido: 13 de junio de 2025 Aceptado: 26 de julio de 2025 Publicado: 4 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.512>

Resumen: El presente artículo aborda la valorización del lactosuero, subproducto altamente contaminante de la industria quesera generado durante la elaboración del queso. Dada su elevada carga orgánica su vertido está estrictamente regulado por la normativa europea ya que sería una amenaza para los ecosistemas acuáticos si se vertiera sin tratar. En este contexto, se plantea su tratamiento mediante digestión anaerobia como una estrategia de economía circular. La composición del lactosuero es rica en azúcares, proteínas, minerales y agua, convirtiéndolo en un sustrato adecuado para la producción de biogás. Se analizan los parámetros clave que afectan a su eficiencia, como la temperatura, el pH, la relación carbono/nitrógeno, y el tiempo de retención en las diferentes etapas del proceso de digestión anaerobia. Asimismo, se evidencia la importancia de la codigestión con otros residuos para evitar desequilibrios en el sistema. Si bien el uso energético del lactosuero mediante digestión anaerobia es prometedor, este estudio explora otros aprovechamientos complementarios en los sectores alimentario, ganadero, químico y biotecnológico. A pesar de su elevado potencial energético, la producción de biogás en Europa está muy por debajo de lo que se podría producir, lo que resalta la necesidad de fomentar su integración en el sistema energético actual. En conclusión, el lactosuero representa una oportunidad ambiental, energética y económica para la industria quesera si se implementan tecnologías de gestión adecuadas.

Palabras clave: codigestión anaerobia; lactosuero; purines; biogás; valorización energética; circularidad

Introducción

En el contexto actual de transición energética y de circularidad de los materiales, la gestión de residuos se ha convertido en un desafío crucial, pero a su vez en una gran oportunidad. Frente a las prácticas tradicionales de gestión de residuos, la valorización permite la reconversión de estos en recursos útiles, ya sea mediante generación de energía o mediante la obtención de nuevas materias. A través del enfoque de aprovechamiento del contenido energético de residuos no sólo se consigue recuperar energía, sino que también disminuye el volumen de residuos a tratar, reduciendo así su impacto ambiental. De esta manera también se facilita la transición hacia sistemas productivos menos dependientes de los combustibles fósiles y se evita la extracción de nuevas materias primas de nuestro planeta. En este contexto, el biogás obtenido a través de residuos es una alternativa de gran potencial. Con ello se da paso a que los residuos dejen de ser un problema y sean una oportunidad en términos energéticos, ambientales y económicos (Alengebawy *et al.*, 2024). Esta línea de actuación se alinea con las principales estrategias europeas en materia de sostenibilidad, como el Pacto Verde Europeo, el objetivo de alcanzar una Europa climáticamente neutra en 2050 y la visión de una economía orientada al residuo cero (*zero waste*).

Uno de los grandes subproductos de la industria láctea es el lactosuero, un líquido translúcido que se obtiene tras la separación del coágulo de la leche durante la elaboración del queso. Debido a su elevada carga orgánica -determinada

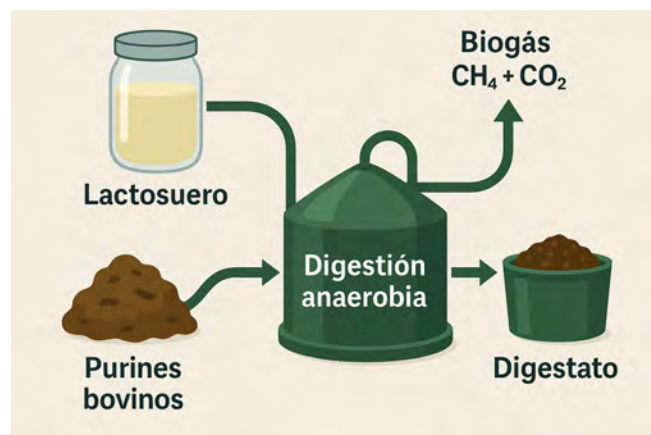


Figura 1. Proceso de codigestión de lactosuero con otros posibles sustratos como pueden ser los purines bovinos.

mediante la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO)-, el vertido del lactosuero sin tratar a cauces públicos queda prohibido por normativa de la Unión Europea - Directiva 2024/3019, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas - debido a los impactos ambientales a los que daría lugar. Por ello, se obliga a gestionarlo adecuadamente, ya sea mediante un tratamiento antes de verter a colector, aprovechamiento en alimentación animal o valorización en industrias alimentarias, farmacéuticas o cosméticas (Consejo UE, 2024; García González *et al.*, 2022). En este artículo se presenta una visión general de la valorización del lactosuero, los usos actuales y las oportunidades, así como su aprovechamiento mediante digestión anaerobia.

Desarrollo

El lactosuero: características y desafíos

El lactosuero se produce específicamente tras la precipitación de la caseína, la principal proteína de la leche, la cual se coagula para la producción del queso, y se presenta como un subproducto de interés. Se estima que se generan 9 kilogramos de lactosuero por cada kilogramo de queso producido (Díaz, 2020), lo cual representa alrededor del 85-90 % del volumen de la leche empleada en la producción del queso e incluye más de la mitad de sus nutrientes, concretamente el 55 % (Fernández Rodríguez *et al.*, 2016).

En España, la producción de queso ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años, impulsada principalmente por el aumento de la demanda exterior (García González *et al.*, 2022). En 2023, se alcanzó una producción de 534.34 mil toneladas de queso, lo que representaba un 4.9 % del total producido en Europa. De esta forma, España se posiciona como el sexto mayor productor europeo (European Union, 2025b). El lactosuero total generado en España en 2023 fue de alrededor de 4.8 millones de toneladas y 98.53 millones de toneladas en Europa, convirtiéndose su gestión adecuada en una prioridad para el sector.

Existen diversas alternativas que mitigan el impacto ambiental derivado de la gestión del lactosuero. Por ejemplo, mediante ultrafiltración es posible obtener concentrados de proteínas como: β -lactoglobulina, α -lactoalbúmina, que son ingredientes útiles para la industria alimentaria por su buena solubilidad y su capacidad para mejorar la textura, mezcla y conservación de los productos (Contexto ganadero, 2012). Otro uso es su transformación en suero de leche en polvo, empleado en la formulación de otros productos lácteos como: bebidas lácteas, yogures, helados, pastelería, bollería, y alimentos infantiles (Hannainst, 2024). También se usa como alimento para animales, por ser una fuente energética rica en proteínas y lípidos, especialmente útil para las crías de animales. Más allá de su uso alimenticio y ganadero, hay otras aplicaciones avanzadas, como es la obtención de ácido láctico y biopolímeros bioplásticos, por fermentación de microorganismos. O el desarrollo de recubrimientos comestibles para envases biodegradables de alimentos. Además, está en investigación la separación de algunos de sus componentes -como oligosacáridos, fosfolípidos, terpenos o fenoles- con potencial uso en industrias químicas, farmacéuticas o cosméticas (ITACyL, 2023). No obstante, mediante estas soluciones no es posible la salida a la totalidad del lactosuero producido.

Existen dos tipos de lactosuero dependiendo del tipo de queso producido: i) El lactosuero dulce, generado a partir de la coagulación enzimática por la renina y la acción de enzimas coagulantes sobre la caseína de la leche, que produce quesos duros o semiduros, con un pH alrededor de 6.5. ii) El lactosuero ácido, que resulta de la fermentación o adición de ácidos orgánicos o minerales para coagular la caseína, como se realiza para la elaboración de quesos frescos, donde se tiene un pH alrededor de 5 (Sharma *et al.*, 2022).

La composición de este subproducto hace que también pueda ser interesante valorizarlo a través de procesos biológicos llevados a cabo por microorganismos. En la Tabla 1 se muestra la composición de los dos tipos de lactosuero. El lactosuero dulce tiene mayor concentración de lactosa y de proteína. A pesar de que las proteínas no representen la fracción más abundante, estas tienen una gran importancia a nivel nutritivo, ya que son una fuente rica y equilibrada de aminoácidos esenciales, que son de alto valor biológico. Esta composición convierte al lactosuero en un buen sustrato para la digestión anaerobia, ya que las proteínas, además de ser una fuente de nitrógeno fácilmente asimilable para los microorganismos, favorecen la degradación y conversión de la materia orgánica presente, lo que resulta en un buen rendimiento de la digestión. Además, el elevado contenido de agua que contiene el lactosuero -alrededor del 87.6 y 93.4 % en volumen- contribuye al equilibrio hídrico del sistema de digestión sin la necesidad de añadir agua,

facilitando el manejo de la masa del interior del reactor y proporcionando una mezcla homogénea (Zimbardi *et al.*, 2024).

Tabla 1. Composición media del lactosuero dulce y ácido. Modificada de (Panesar *et al.*, 2007).

Composición	Lactosuero dulce [g L ⁻¹]	Lactosuero ácido [g L ⁻¹]
Sólidos Totales	66.5	66.5
Lactosa	49.0	45.0
Proteína	8.0	7.0
Calcio	0.5	1.4
Fosfato	2.0	3.3
Lactato	2.0	6.4
Cloruros	1.1	1.1

La digestión anaerobia: fundamentos y beneficios

Se trata de un proceso microbiológico natural, en ausencia de oxígeno, donde la acción de diversos microorganismos transforma la materia orgánica en biogás y en un residuo líquido aprovechable como fertilizante, denominado digestato. Este proceso, que ocurre espontáneamente en distintos medios naturales -como pantanos-, se puede replicar en reactores por medio de distintas condiciones controladas para tratar residuos orgánicos (Fernández Rodríguez *et al.*, 2016). De esta forma se puede valorizar energéticamente el lactosuero, incrementando la sostenibilidad del sector agroalimentario y su circularidad.

La digestión anaerobia ocurre en cuatro etapas (ver Figura 2). La primera etapa es la hidrólisis, donde los compuestos orgánicos complejos -carbohidratos, proteínas, y lípidos- son hidrolizados a moléculas más simples -como ácidos grasos, azúcares, y aminoácidos-. La siguiente fase es la acidogénesis, donde estos productos son fermentados por microorganismos acidogénicos en ácidos grasos volátiles -AGV- y otros. Posteriormente ocurre la acetogénesis, que se encarga de tomar estos productos y convertirlos en ácido acético, H₂ y CO₂, esenciales para la última etapa. Por último, tiene lugar la metanogénesis, de cuya etapa se encargan las arqueas metanogénicas, las productoras del metano -CH₄- y del dióxido de carbono adicional (Antonio & Aguilera, 2017).

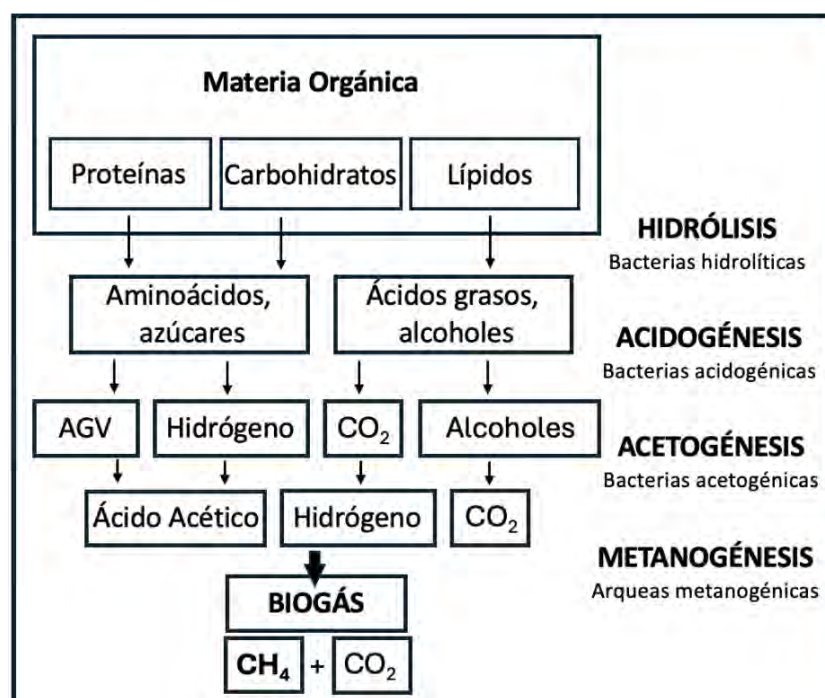


Figura 2. Transformación y Fases de la Digestión Anaerobia. Modificado de IDAE (2007).

El proceso de digestión anaerobia genera como producto el denominado biogás, donde el metano -CH₄- es el componente principal con entre un 55 y un 70 % en volumen. Este compuesto es el principal interés del biogás, debido a su alto poder calorífico entre 21.6 y 23.4 MJ m⁻³ (6.0 y 6.5 kW h m⁻³), por lo que cuanto mayor sea su porcentaje, mejor será la calidad del biogás y más rentable será su producción. En la digestión anaerobia también se obtienen dióxido de carbono en un 35-40 % en volumen, junto con trazas de otros gases como nitrógeno, hidrógeno o sulfuro de hidrógeno (Jameel *et al.*, 2024). Este biogás puede utilizarse como fuente directa de calor, electricidad, o tras su purificación, puede dar lugar a biometano, un sustituto compatible con el gas natural que se encuentra en las redes estatales (Secretaría de Estado de Energía, 2022).

Existen ciertos parámetros físico-químicos que afectan de forma significativa a la eficiencia de la digestión por su relación directa con la actividad microbiana -inóculo- y la estabilidad del sistema. Uno de los principales factores es la temperatura, debido a su gran influencia en la velocidad de digestión, ya que, según aumenta la temperatura, aumenta dicha velocidad, que se relaciona con el crecimiento de distintos grupos de microorganismos y que da lugar a mayores producciones de biogás. La temperatura también determina las comunidades microbianas predominantes, que según el rango térmico se diferencian en tres tipos: psicrófilo (por debajo de 25 °C), mesófilo (25-45 °C), y termófilo (45-65 °C); siendo el rango mesofílico el más utilizado (ver Tabla 2). Además, se debe garantizar una temperatura homogénea en el digestor, ya que los microorganismos anaerobios son muy sensibles a las condiciones ambientales, con lo que se debe tener un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura, para evitar inhibiciones y pérdidas de rendimiento (FAO, 2019a).

Tabla 2. Rangos de temperatura de comunidad microbiana y su tiempo de digestión.
Modificado de Varnero Moreno, (2011).

Comunidad Microbiana	Rango de temperatura mínima [°C]	Rango de T Óptima [°C]	Rango de T Máxima [°C]	Tiempo de digestión [días]
Psicrófilas	4 – 10	15 – 18	20 – 25	100
Mesófilas	15 – 20	25 – 35	35 – 45	30 – 60
Termófilas	25 – 45	50 – 60	75 – 80	10 – 15

Otro parámetro a controlar durante la digestión es el pH del sistema, ya que éste ha de situarse entre 6.8 y 7.2. Si se produce una acumulación excesiva de AGV, puede provocar una acidificación del sistema, con un descenso del pH -por debajo de 6.3- llevándolo a un shock ácido; y si aumenta la formación de amoníaco libre NH₃, provoca una inhibición, elevando el pH por encima de 7.8. En ambos casos estas desviaciones se traducen en una menor producción de metano (Jaya *et al.*, 2024). Por otro lado, la relación de carbono/nitrógeno -C/N- es esencial, ya que, el carbono es la fuente de la que se obtiene la energía para el proceso, y el nitrógeno es el que impulsa el crecimiento biológico (FAO, 2019). Por ello, se debe tener una relación óptima de ambos, situada en el rango de 20/1 a 30/1 para conseguir estabilidad en la digestión. Es importante controlar el contenido de nitrógeno, ya que un exceso de este elemento conlleva la producción y acumulación de amoníaco, provocando la inhibición de la digestión (Valoralgae, 2022). También se debe tener en cuenta la relación sustrato/inóculo -S/I-, la cual es fundamental en la fase de arranque de la digestión. Con una mayor relación de inóculo se consigue un comienzo de digestión más rápido y el comienzo del crecimiento de los microorganismos es más estable; sin embargo, con un aumento discriminado, puede reducir la eficiencia y dificultar la operación del reactor (Kassongo Id *et al.*, 2022). Por último, el tiempo de retención hidráulico -TRH- es la permanencia de la biomasa en el reactor o digestor, que debe ser suficiente para una completa degradación de la materia orgánica y un rendimiento máximo. Este tiempo se establece generalmente entre 10 y 25 días, pero dependerá de la temperatura, del tipo de sustrato y del sistema utilizado -véase la Tabla 2- (Jaya *et al.*, 2024).

El biogás producido mediante digestión anaerobia de lactosuero puede ser una fuente prometedora de energía renovable. Sin embargo, sigue estando infrutilizado en muchos países, existiendo en Europa un total de 18,943 instalaciones -en 2019- con una producción de 193 TWh, y 725 plantas específicas de biometano que produjeron 26.7 TWh (Secretaría de Estado de Energía, 2022). Teniendo en cuenta que el total de energía generada en la UE es de 20904 TWh, la energía obtenida del biogás sólo abarca un 0.9 % del total (European Union, 2025a). Sin embargo, esta fuente puede cubrir una parte significativa de la demanda global y ser clave en diseños de sistemas energéticos descentralizados, resilientes y bajos en carbono, evitando la emisión de aproximadamente 2.1 millones de toneladas

de CO₂ equivalente al año. Su integración junto con sectores ganaderos, agrícolas o agroindustriales, como la industria láctea, es estratégico para avanzar hacia un modelo más sostenible y potenciar la cadena de valor empresarial en el ámbito rural (IDAE, 2022). En este contexto, el lactosuero destaca como un sustrato ideal para digestión anaerobia, por su alto contenido en materia orgánica y su amplia disponibilidad como subproducto.

A pesar de los usos que se le dan al lactosuero en la actualidad, su digestión anaerobia es una de las alternativas más prometedoras para su valorización, más aún en el contexto de transición energética en el que nos encontramos. Se ha de añadir que, aunque, su uso como mono-sustrato sea rentable, se debe controlar la concentración de carbohidratos, ya que en exceso puede provocar una rápida fermentación, generando acumulaciones de AGV que desestabilizan el proceso, causando acidificación y disminución de la actividad metanogénica (Díaz, 2020). Por ello, una solución eficaz para evitar estos riesgos y para abordar la gestión de otros residuos puede ser la codigestión, que mezcla el lactosuero con otros subproductos de distinta composición para equilibrar la relación entre carbono/nitrógeno -C/N-, mejorar la estabilidad del sistema y aumentar el rendimiento del metano frente a la digestión mono-sustrato, por ejemplo, con la adición de purín vacuno (Hallaji *et al.*, 2019). La presencia de residuos cofermentados aporta nutrientes y compuestos amortiguadores que mantienen un pH óptimo -entre 6.8 y 7.2-, fundamental para las arqueas metanogénicas (Wei *et al.*, 2019).

Esta mejora en el comportamiento del proceso se puede observar en la Figura 3. La digestión del lactosuero como único sustrato refleja una secuencia de fases más escalonada e inestable, mientras que la codigestión con purines muestra una evolución más progresiva y estable. En cuanto a la composición de biogás, se observa que en la digestión mono-sustrato se obtiene una proporción del 55 % de CH₄ y 45 % de CO₂ mientras que en la codigestión se alcanza el 60 % de CH₄. Esto demuestra que la codigestión no sólo estabiliza el proceso, sino que también mejora la eficiencia energética al incrementar la fracción de metano en el biogás generado. Ambas digestiones se realizaron bajo las mismas condiciones operativas: T=39°C, relación sustrato/inóculo (S/I) de 1/2 en base a sólidos volátiles (SV), siendo la relación lactosuero/purines de 1/1 en SV en el caso de la codigestión.

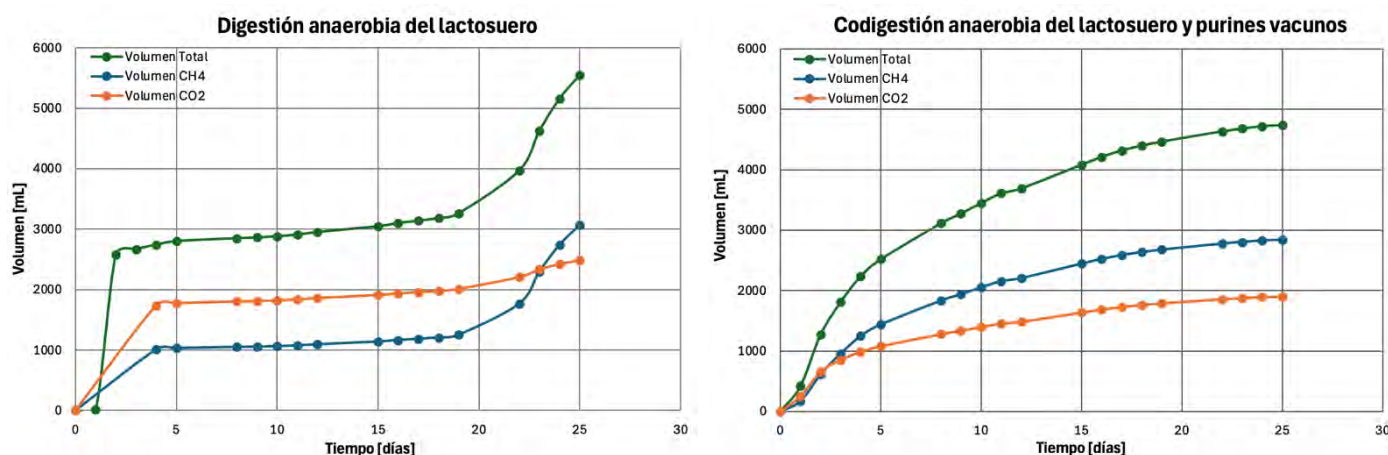


Figura 3. Representación del volumen generado de biogás, de CH₄, y de CO₂ de la digestión del lactosuero y la codigestión junto con purines bovinos.

Conclusiones

La gestión adecuada de subproductos como el lactosuero es un reto ambiental de gran relevancia y a la par una gran oportunidad para la industria láctea. La industria quesera genera millones de toneladas de este subproducto cada año, y su elevada carga orgánica lo convierte en un efluente altamente contaminante sin tratamiento previo. Por ello, su revalorización mediante digestión anaerobia emerge como una alternativa prometedora, no sólo para reducir su impacto ambiental, sino también para la producción de energía a través del biogás generado.

En este estudio se ha evidenciado que su composición altamente rica en nutrientes, con azúcares, proteínas, minerales, y además un alto volumen en agua, permiten favorecer la biodegradación, la actividad microbiológica y cubrir las necesidades hídricas que necesita el sistema de digestión anaerobia-sin recurrir a fuentes externas-. Debido a que su

uso como único sustrato puede dar lugar a desequilibrios -como la acumulación de AGV-, se considera la codigestión con otros residuos un aspecto a considerar para lograr un sistema estable. En concreto, la digestión con purines vacunos ha demostrado mejorar la estabilidad del proceso y favorecer una evolución más progresiva en la producción de biogás, además de mejorar la calidad del biogás generado en cuanto al ratio de CH_4/CO_2 , evidenciando con ello las sinergias entre sustratos que pueden permitir optimizar el rendimiento del sistema.

Aunque la valorización energética del lactosuero es una vía prometedora, no es la única forma de aprovechamiento existente, ya que se puede destinar a alimentación animal, producción de ingredientes u otros usos industriales, lo que amplía su gestión dentro de una estrategia de economía circular y de descarbonización del sector.

En conclusión, el lactosuero representa una oportunidad ambiental, energética y económica para la industria quesera si se implementan tecnologías de gestión adecuadas, siendo la codigestión una estrategia destacable para mejorar su viabilidad.

Bibliografía

- Alengebawry, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 2641–2668. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>
- Antonio, E., & Aguilera, R. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*.
- Consejo UE. (2024). *Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj><http://data.europa.eu/eli/C/2023/250/oj>
- Contexto ganadero. (2012). El lactosuero y su uso como producto. 09 de Noviembre de 2012. <https://www.contextoganadero.com/blog/el-lactosuero-y-su-uso-como-producto>
- Díaz, M. (2020). *El aprovechamiento del lactosuero para nuevos productos*. Red Estratégica SOSTALIMEN. <https://www.unioviado.es/poloalimentario/el-aprovechamiento-del-lactosuero-para-nuevos-productos/>
- European Union. (2025a). Eurostat: Energy data. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/envir?lang=en&subtheme=nrg.nrg_quant&display=list&sort=category
- European Union. (2025b). Eurostat: Production of cheese. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00040_custom_16961741/default/bar?lang=en
- FAO. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Colección Documentos Técnicos N° 12. www.fao.org
- Fernández Rodríguez, C., Martínez Torres, E. J., Morán Palao, A., & Gómez Barrios, X. (2016). Processos biológicos de tratamento do soro de leite para a produção de biogas e hidrogénio. Revisão da literatura. *Revista ION*, 29(1), 47-62. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>
- García González, M. C., Molinuevo Salces, B., & Riaño, B. (2022). *Proyecto LACTOCyL: alternativas sostenibles para la valorización de lactosuero*. Plataforma Tierra, Grupo Cajamar. <https://www.plataformatierra.es/innovacion/proyecto-lactocyl>
- Hallaji, S. M., Kuroshkarim, M., & Moussavi, S. P. (2019). Enhancing methane production using anaerobic co-digestion of waste activated sludge with combined fruit waste and cheese whey. *BMC Biotechnology*, 19(1), 19. <https://doi.org/10.1186/S12896-019-0513-Y>
- Hannainst. (2024). *Aprovechamiento y revalorización del lactosuero*. HANNA Instruments. <https://www.hannainst.es/blog/1793/aprovechamiento-y-revalorizacion-lactosuero>
- IDAE. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España.
- IDAE. (2022). *Hoja de Ruta del Biogás*. Instituto Para La Diversificación y Ahorro de La Energía. <https://www.idae.es/noticias/el-gobierno-aprueba-la-hoja-de-ruta-del-biogas>
- ITACyL. (2023). *La bioeconomía aplicada a la valorización del lactosuero en alimentación, transformación energética y obtención de bioproductos*. Junta de Castilla y León. https://www.itacyl.es/investigacion-e-innovacion/bioeconomia-agroalimentaria/economia-circular/-/asset_publisher/QroKfyOOIZRg/content/lactosuero?_asset_publisher=QroKfyOOIZRg/content/lactosuero?_asset_publisher=QroKfyOOIZRg/content/lactosuero
- Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., Mohammed, A. Jassim, Ghazy, H., Shakir, M. N., Lawas, A. M., Mohammed, S. khudhur, Idan, A. H., Mahmoud, Z. H., Sayadi, H., & Kianfar, E. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*, 7, 101549. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2024.101549>
- Jaya, D., Kumar, P., Kumar Mishra, R., Chinnam, S., Binnal, P., & Dwivedi, N. (2024). A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends. *Biotechnology Notes*, 5, 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.02.001>
- Kassongo Id, J., Shahsavari, E., & Ball, A. S. (2022). Substrate-to-inoculum ratio drives solid-state anaerobic digestion of unamended grape marc and cheese whey. *Plos One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262940>
- Panesar, P., Kennedy, J., Gandhi, D., & Bunko, K. (2007). Bioutilisation of whey for lactic acid production. *Food Chemistry*, 105(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.035>
- Secretaría de Estado de Energía. (2022). *Hoja de ruta del biogás*. In *NextGeneration EU*.
- Sharma, P., Sunkesula, V., & Jelen, P. (2022). Standardization of Fat and Protein. *Encyclopedia of Dairy Sciences: Third Edition*, 5, 167–173. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00394-9>
- Valoralgae. (2022). Estudio de operación y posibles limitaciones de la digestión en continuo de algas. *Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico, Gobierno de España*.

-
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de biogás*. <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
- Wei, L., Qin, K., Ding, J., Xue, M., Yang, C., Jiang, J., & Zhao, Q. (2019). Optimization of the co-digestion of sewage sludge, maize straw and cow manure: microbial responses and effect of fractional organic characteristics. *Scientific Reports*, 9(1), 2374. <https://doi.org/10.1038/S41598-019-38829-8>
- Zimbardi, F., Scherer, P. A., Arthur, R., Ramos-Suárez, J. L., Álvarez-Méndez, S. J., Tejera, E. P., Ritter, A., & Mata González, J. (2024). Temperature Control Effect on Cheese Whey Anaerobic Digestion with Low-Cost Tubular Digesters. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr12071452>

Diseño y construcción de un secador solar para agroresiduos con un enfoque en bioeconomía circular

María Mariana González-Urrieta ¹, Cecilia Vázquez-Gonzalez ¹, José Miguel Téllez-Zepeda ², Lorena Hernández-Velázquez ³, José Arturo Olguín-Rojas ^{1,*}

¹ Ingeniería en Alimentos, Universidad Tecnológica de Tecamachalco. Av. Universidad Tecnológica No. 1, Col. La Villita, CP. 7777, Tecamachalco, Puebla, México.

² Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Tecamachalco. Av. Universidad Tecnológica No. 1, Col. La Villita, CP. 7777, Tecamachalco, Puebla, México.

³ Licenciatura de Desarrollo de Negocios y Mercadotecnia, Universidad Tecnológica de Tecamachalco. Av. Universidad Tecnológica No. 1, Col. La Villita, CP. 7777, Tecamachalco, Puebla, México.

* Autor de correspondencia: j.a.olguin.rojas@personal.uttecama.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de junio de 2025 Aceptado: 11 de julio de 2025 Publicado: 4 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.480>

Resumen: El secado solar representa una alternativa sostenible para el aprovechamiento de agroresiduos, al permitir la conservación de productos agrícolas sin el uso de combustibles fósiles. En este proyecto se diseñó y construyó un secador solar indirecto, empleando materiales reciclados provenientes de mobiliario en desuso, con un enfoque en economía circular. El equipo incluye una cámara de secado, un captador solar, y un extractor alimentado por un panel solar que facilita la convección forzada. Para validar su funcionamiento, se realizaron pruebas con agroresiduos de cactáceas como cáscara de pitaya (*Stenocereus proinosus*.) y cladodios de pitahaya (*Hylocereus undatus*) obtenidos en la región Mixteca de Puebla. Se monitorearon curvas de pérdida de humedad y parámetros ambientales dentro de la cámara de secado. Los resultados mostraron una eficiencia aceptable del sistema, reduciendo la humedad de los materiales en un periodo de 12 horas. El proyecto integra principios de los ODS 7 y 12, al fomentar el uso de energías limpias y la valorización de residuos agrícolas. Además, su implementación en contextos académicos promueve el aprendizaje práctico y el desarrollo de competencias en tecnologías sustentables.

Palabras clave: bioeconomía circular; cactáceas; energías renovables

Introducción

El secado de productos agrícolas es una etapa fundamental en la industria agroalimentaria, ya que permite prolongar la vida útil de frutas, hortalizas y sus subproductos (como cáscaras y semillas), facilitando su almacenamiento, transporte y comercialización (Alonge *et al.*, 2020; Sreekumar *et al.*, 2008). Tradicionalmente, este proceso se realiza mediante métodos convencionales los cuales, suelen ser energéticamente costosos y dependientes de fuentes no renovables. En este contexto, los secadores solares indirectos se han consolidado como una alternativa eficiente, económica y sustentable frente al secado al sol tradicional, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso a energía eléctrica, basada en la conversión de la radiación solar en calor para remover la humedad de los alimentos (Quintanar Olguin y Roa Durán, 2017; El-Mesery *et al.*, 2022).

El diseño básico consta de tres componentes principales: un colector solar de aire, una cámara de secado aislada y un sistema de ventilación que puede ser natural o forzado. El colector capta la radiación solar y calienta el aire, que luego es conducido hacia la cámara donde se alojan los productos, lo cual permite controlar mejor las condiciones de secado y mantener las propiedades sensoriales y nutricionales del alimento (Lingayat *et al.*, 2020; Khidir, 2023).

La implementación de esta tecnología en espacios rurales se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 7 de la Agenda 2030, que promueve el acceso a una energía asequible, segura y limpia para todos ("Energía asequible y no contaminante"). Adicionalmente, el uso de la tecnología de secado solar en contextos agroalimentarios permite aprovechar subproductos o residuos como cáscaras, bagazos y podas, integrándose al enfoque de bioeconomía circular. Este aprovechamiento contribuye directamente al ODS 12: Producción y consumo responsables, al fomentar la valorización de residuos agrícolas y reducir el desperdicio mediante prácticas de transformación sustentables. De esta manera, se promueve una cadena productiva más eficiente, con menores impactos ambientales y mayor valor agregado (FAO, 2022).

De igual forma, la implementación de secadores solares en entornos académicos e institucionales permite, además, desarrollar capacidades técnicas en torno al aprovechamiento de energías renovables y la transformación agroindustrial. En este marco, el presente proyecto plantea el diseño y construcción de un secador solar que pueda utilizarse en prácticas de laboratorio. Su estructura fue fabricada con materiales reciclados, lo que contribuye a reducir costos, disminuir residuos y reforzar el enfoque de economía circular.

El objetivo del presente proyecto fue el diseño y la construcción de un secador solar indirecto, elaborado con materiales reciclados, destinado al secado de subproductos de cactáceas, como la cáscara de pitaya de mayo (*S. proinosus*) y cladodios de pitahaya (*H. undatus*).

Desarrollo

Diseño y construcción del secador solar

La economía circular busca reducir y cerrar los ciclos de materiales mediante el reciclaje, la reutilización y el diseño sostenible, con el objetivo de minimizar los residuos y la dependencia de los recursos vírgenes (Mejía Ochoa *et al.*, 2024; Tan & Lamers, 2021). En el contexto se realizó la búsqueda de materiales para la construcción del secador solar, partiendo de mobiliario de oficina (sillas, mesas y anaqueles) considerado como desecho. Con los materiales recuperados se establecieron las dimensiones del secador, en la Tabla 1 se presentan los resultados del diseño del secador solar, en la Figura 1 se presenta el diseño del equipo.

Tabla 1. Dimensiones del secador solar.

Componente	Dimensiones
Largo, ancho y altura	148 x 70 x 125 cm
Volumen de la cámara de secado	0.235 m ³
Área del captador de radiación solar	0.55 m ²
Volumen del captador de radiación solar	0.1134 m ³

Los materiales fueron limpiados y ajustados de acuerdo con los requerimientos del diseño, la construcción se realizó con la ayuda de aprendientes del programa Educativo de Procesos Bioalimentarios (Fig. 2). Al equipo de secado se añadió un extractor de humedad el cual funciona con un panel solar de 20 W (Fig. 2), con una velocidad promedio de aire de 2.5 ± 0.2 m/s, facilitando el secado mediante convección forzada. En el futuro, se planea automatizar el equipo de secado mediante un sistema auxiliar de calentamiento y entrada de aire, que estará asistido por una batería y panel solar. Una vez concluida la construcción se validó el equipo realizando cinéticas de secado con agroresiduos de la cadena productiva de frutos de cactácea.

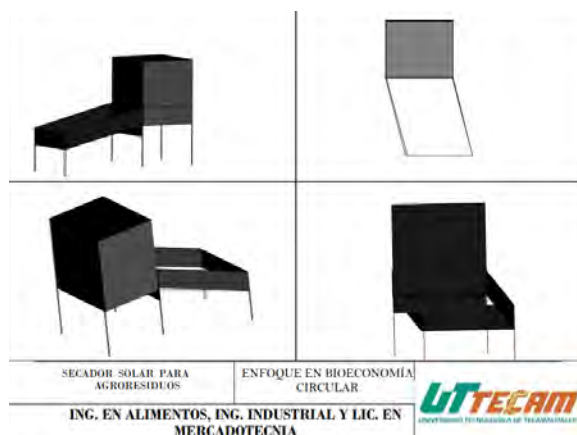


Figura 1. Diseño del secador solar indirecto.



Figura 2. Secador solar construido a partir de residuos de mobiliario de oficina.

Inducción a la bioeconomía circular

La bioeconomía circular integra a la economía circular priorizando el uso circular de la biomasa, el reciclaje de subproductos y el cierre del ciclo del carbono, con un fuerte énfasis en los principios ecológicos y la energía renovable (Muscat *et al.*, 2021). Para la evaluación del secador se realizaron cinéticas de secado de agroresiduos provenientes del sistema productivo de frutos de cactácea de la región Mixteca del Estado de Puebla, los cuales fueron cáscara de pitaya de mayo (*Stenocereus proinosus*) y podas de cladodios de pitahaya (*Hyloserus undatus*). Estos residuos, usualmente desechados, son ricos en fibra, compuestos fenólicos y betacianinas, por lo que tienen potencial para transformarse en harinas funcionales, suplementos alimenticios o incluso precursores de bioproductos (Lesmana *et al.*, 2022) Su incorporación en alimentos de consumo diario como galletas, puede mejorar el perfil nutricional al reducir compuestos nocivos y aumentar la capacidad antioxidante (Chumroenvidhayakul *et al.*, 2023).

Los cladodios de pitahaya se colectaron de parcelas de cultivo originarias de podas, fueron lavados con agua corriente para reducir la materia extraña presente posteriormente fueron reducidas en tamaño a rodajas de 5 ± 1 mm. Las cáscaras de pitaya se obtuvieron después del despulpado de los frutos y de igual manera lavadas. 250 g de cada agroresiduo fueron colocados en el secador solar a las 7:00 am por un periodo de 12 horas, se monitorearon las curvas de pérdida de humedad (Fig. 3a) y la evolución de la temperatura ambiente y la temperatura y humedad relativa en el interior de la cámara de secado (Fig. 3b).

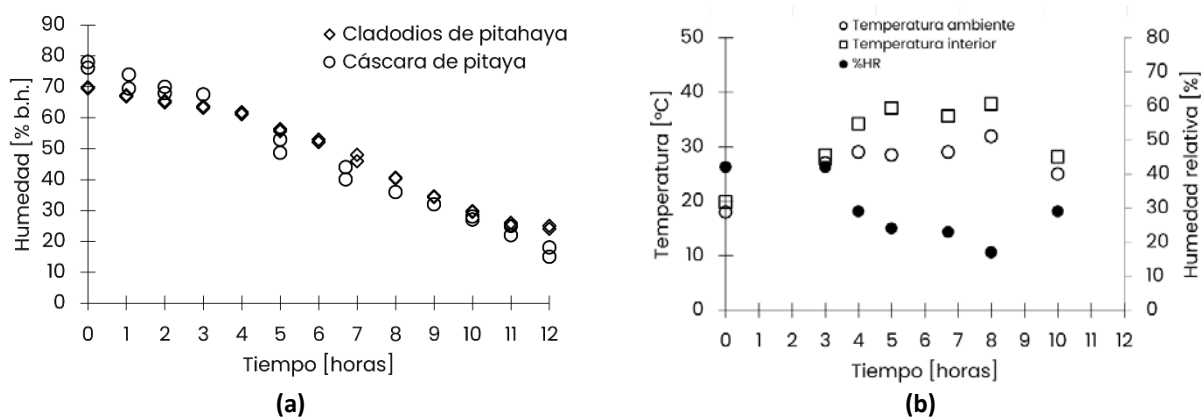


Figura 3. Cinéticas de secado de agroresiduos de cactáceas. (a) evolución de la humedad con respecto al tiempo y (b) evolución de la temperatura ambiente, humedad y temperatura del aire de secado en el secador.

En la Figura 3a se puede observar la cinética de humedad durante el secado de cladodios de pitahaya y cáscara de pitaya, los tiempos del proceso son congruentes con los reportados por otros autores durante el secado de frutas (Vega-Vázquez *et al.*, 2023). Posteriormente se determinó la eficiencia del secador utilizando las ecuaciones 1 - 3 (López-Vidaña *et al.*, 2020),

$$\eta_c = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{interior} - T_{exterior})}{Ac \cdot I} \quad (1)$$

$$Q_u = Ac \cdot I \cdot \eta_c \quad (2)$$

$$\eta_s = \frac{m_{H_2O} \cdot h_{fg}}{Ac \cdot I} \quad (3)$$

Donde $\dot{m}$ flujo masico de aire (kg/h), C_p capacidad calorífica del aire a presión constante (1.005 kJ/kg K), $T_{exterior}$ temperatura exterior del secador (°C), $T_{interior}$ temperatura interior del secador (°C), Ac es el área del colector (m²), I es la radiación solar global (Wh/m²), η_c es la eficiencia del colector. Q_u es el calor útil (Wh), m_{H_2O} masa de agua evaporada (kg), h_{fg} calor latente de evaporación a 50 °C (2383 kJ/kg), η_s eficiencia del secador.

Tomando en cuenta una radiación solar global de 6733 Wh/m² del 15 de mayo de 2025 (Tutiempo.net.), se estimó una eficiencia del colector del 22.1%, valor consistente con el rango de 20 a 50% reportado por Fakoor *et al.* (2011) para calentadores solares. Se determinó la cantidad de energía útil en el secador (Q_u) de 820.8 Wh y la eficiencia del secador (η_s) de 6.1%, resultados similares a los reportados por otros autores (López-Vidaña *et al.*, 2020; Yassen *et al.*, 2021).

Conclusiones

El diseño y construcción de un secador solar a partir de materiales reciclados permitió desarrollar una tecnología accesible, eficiente y alineada con los principios de la bioeconomía circular. Las pruebas realizadas con residuos de frutos de cactáceas demostraron que el equipo tiene un desempeño adecuado para reducir la humedad en tiempos comparables con los reportados en la literatura. Además, su implementación en espacios académicos contribuye a la formación de estudiantes y al fortalecimiento de competencias en tecnologías sostenibles. Este proyecto representa una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos agroindustriales y el impulso de prácticas responsables en el manejo de recursos energéticos y materiales.

Agradecimientos: Los autores agradecen al programa educativo de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco por su asistencia técnica. De igual manera un agradecimiento especial al Ingeniero Osvaldo Castro García y a las alumnas del 8vo cuatrimestre del Programa educativo de Procesos Bioalimentarios por su apoyo en la construcción del equipo de secado.

Bibliografía

- Alonge, A., Olaniyan, A., Oje, K., & Ajayi, K. (2020). Design, construction and preliminary testing of an automated solar dryer for cassava chips. *Journal of Engineering in Agriculture and the Environment*, 5(2). <https://doi.org/10.37017/jeae-volume5-no2.2019-3>
- Chumroenvidhayakul, S.; Thilavech, T.; Abeywardena, M.; Adisakwattana, S. (2023). Dragon fruit peel waste (*Hylocereus undatus*) as a potential ingredient for reducing lipid peroxidation, dietary advanced glycation end products, and starch digestibility in cookies. *Antioxidants* 2023, 12, 1002. <https://doi.org/10.3390/antiox12051002>
- El-Mesery, H. S., El-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>
- Fakoor Pakdaman, M., Lashkari, A., Basirat Tabrizi, H., & Hosseini, R. (2011). Performance evaluation of a natural-convection solar air-heater with a rectangular-finned absorber plate. *Energy Conversion and Management*, 52, 1215–1220. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.028>
- FAO. (2022). FAO and the 17 Sustainable Development Goals: Chapter 1. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/acf72f06-1ff0-4a38-acd2-a2799205bde9/content>
- Khidir, D. (2023). Manufacturing and evaluating of indirect solar dryers. *ARO–The Scientific Journal of Koya University*, 11(1), 1–7. <https://doi.org/10.14500/aro.11127>
- Lesmana, D., Vianney, Y. M., Goenawan, Y. A., Natalie, K., Sukweenadhi, J., Buschle-Diller, G., Mukti, Y. P., Erawati, C. M., & Purwanto, M. G. M. (2022). Valorization of peel-based agro-waste flour for food products: A systematic review on proximate composition and functional properties. *ACS Food Science & Technology*, 2(1), 3–20. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00353>
- Lingayat, A., Chandramohan, V. P., Raju, V. R. K., & Meda, V. (2020). A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Applied Energy*, 258, 114005. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114005>
- López-Vidaña, E. C., César-Munguía, A. L., García-Valladares, O., Pilatowsky Figueroa, I., & Brito Orosco, R. (2020). Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy*, 147, 845–855. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.018>
- Mejía Ochoa, F. J., Rosas Leyva, M. A., & Hernández Salinas, G. (2024). Economía circular en países con economías emergentes: Un estudio comparativo. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 1–5. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.183>
- Muscat, A., de Olde, E. M., Ripoll-Bosch, R., van Zanten, H. H. E., Metze, T., Termeer, C. J. A. M., van Ittersum, M. K., & de Boer, I. J. M. (2021). Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*, 2, 561–566. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00340-7>
- Quintanar Olguin, J., y Roa Durán R. 2017. Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2). México, ME:321-31. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.53>
- Sreekumar, A., Manikantan, P. E., & Vijayakumar, K. P. (2008). Performance of indirect solar cabinet dryer. *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1388–1395. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.005>
- Tan, E., & Lamers, P. (2021). Circular bioeconomy concepts—A perspective. *Frontiers in Sustainability*, 2, 701509. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.701509>
- Tutiempo.net. (2025). Radiación solar en Tecamachalco (México) - Energía solar. Recuperado el 13 de mayo de 2025, de <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/tecamachalco.html>
- Vega Vázquez, J., Jiménez Zaragoza, O., López Román, R., & Arroyo Luna, B. (2023). Deshidratador solar de frutas: Transformando la energía solar en confort y eficiencia. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 2(1), 218–225. <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/360>
- Yassen, T.A., Al-Jethelah, M.S.M., Dheyab, H.S. (2021). Experimental study of innovative indirect solar dryers. *International Journal of Heat and Technology*, 39(4), 1313-1320. <https://doi.org/10.18280/ijht.390430>

Más bioetanol, menos residuos: el papel de los soportes sólidos en la reutilización de levaduras

Daniela J. Cruz-Avilés ^{1,*}, Pedro E. Lázaro-Mixteco ², Agustín J. Castro-Montoya ¹, Ana A. Vargas-Tah ²

¹ División de Estudios de Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

² Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: 1208797h@umich.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de junio de 2025 Aceptado: 19 de julio de 2025 Publicado: 5 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.476>

Resumen: En los procesos de fermentación para producir bioetanol, se utilizan levaduras como biocatalizadores para convertir azúcares en etanol. La recuperación y reutilización de estos microorganismos es clave para mejorar la eficiencia y reducir costos. Una estrategia eficaz es la inmovilización celular sobre soportes sólidos, que permite reutilizar las células, aumentar la densidad celular y simplificar el proceso. Al emplear estos soportes, es posible eliminar etapas de separación, reducir el tamaño del equipo de fermentación y disminuir el impacto ambiental. Este artículo describe las características ideales que debe tener un soporte, compara distintos materiales —incluidos residuos agroindustriales— y muestra cómo influyen en la productividad del proceso de fermentación.

Palabras clave: soporte, inmovilización, fermentación, bioetanol, biocatalizadores.

Introducción

La fermentación alcohólica es una biorreacción que permite degradar azúcares en alcohol (y dióxido de carbono), y es crucial para la producción industrial de etanol, que se utiliza en la elaboración de bebidas alcohólicas y como combustible. Diversos microorganismos, como las bacterias y levaduras, son capaces de realizar la fermentación alcohólica. Usualmente, la producción de etanol se lleva a cabo en cultivos líquidos con células en suspensión; sin embargo, desde hace varios años, existe el interés por diseñar nuevas tecnologías para la fermentación, en donde las células se encuentren adheridas en soportes, con el objetivo de optimizar el proceso fermentativo. El proceso en el cual se fijan o adhieren células a un material comúnmente conocido como “soporte”, o bien son atrapadas o encapsuladas es conocido como “inmovilización celular”. El objetivo de este proceso es mantener la actividad celular, limitar su movimiento y facilitar su reutilización.

Una matriz soporte, o bien, un “soporte” es un material que sirve como una base que cumple con ciertas características físicas, químicas y mecánicas deseables para que exista fijación o adhesión de algún compuesto químico o biológico. El hecho de que las células se encuentren en un material soporte les brinda propiedades diferentes a las células libres, como una mejor estabilidad al esfuerzo cortante. Además, al emplear células inmovilizadas en un soporte, este último ayuda a tener una mayor concentración de estas mismas en un menor volumen, lo que incide en un menor tamaño del equipo de fermentación. La producción de bioetanol vía fermentación microbiana para diferentes fines como la generación de energía, la implementación como materia prima para productos de mayor valor agregado, la industria farmacéutica, entre otros, nos lleva a buscar procesos que tengan una mayor eficiencia global, lo que incide en un menor costo total del bioproceso y un menor impacto ambiental.

Desarrollo

Fermentación microbiana

La producción de bioetanol se puede llevar a cabo mediante la fermentación microbiana de azúcares provenientes de jugos o de hidrólisis de biomásas, empleando levaduras o bacterias como biocatalizadores para la conversión de azúcares a etanol. Cabe resaltar que un proceso fermentativo común, las células no se recuperan con facilidad; además de que es requerida una etapa de separación posterior a la fermentación para remover las células de levadura del líquido fermentado como se muestra en la Figura 1. Así, al ser requerida una operación unitaria de separación, el proceso global tiene un mayor consumo de energía.

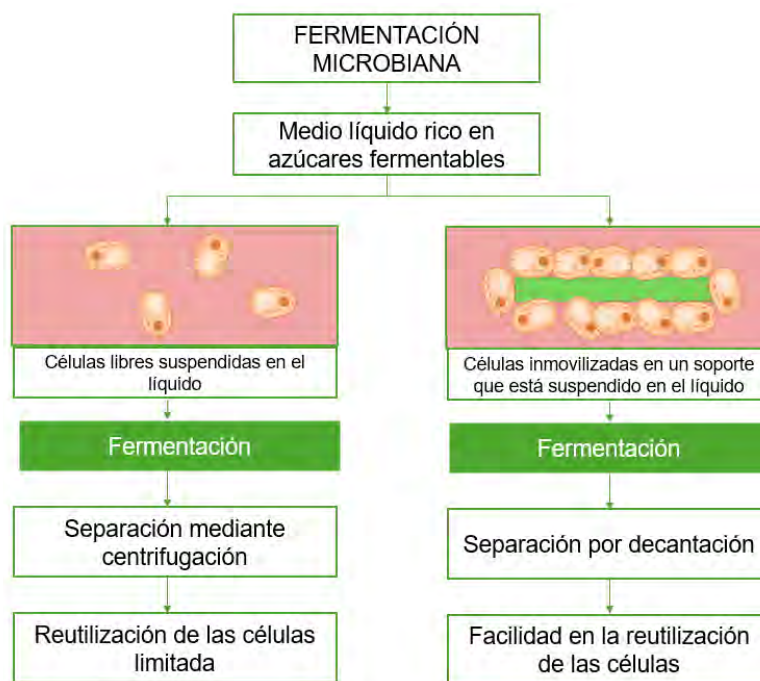


Figura 1. Proceso de fermentación microbiana con células libres y células inmobilizadas.

Al emplear una matriz soporte de base en la que las células que son responsables de la fermentación estén fijas o adsorbidas, el sistema conformado por las células y el soporte se puede recuperar y reutilizar en varios lotes de fermentación, aunado a que, dependiendo de las condiciones de operación, se puede lograr evitar una etapa de separación, logrando minimizar tiempos, equipos y materia prima, haciendo así un bioproceso global más rentable y de menor impacto ambiental.

Soportes para inmovilización celular

Por su naturaleza las células tienden a adherirse a superficies sólidas, sin embargo, pueden existir distintas fuerzas que hacen que se adhieran a un soporte, fuerzas débiles como son las fuerzas electrostáticas y las fuerzas de Vander Waals; o fuerzas más fuertes como son los enlaces covalentes. Cuando se requiere reutilizar un soporte sólido se buscan fuerzas débiles entre el soporte y las células, acorde a Eş *et al.*, (2015) esto trae consigo algunas desventajas como la posible pérdida de las biomoléculas, una menor estabilidad y la posibilidad de que exista desorción del biocatalizador. Por ello se han estudiado diferentes soportes que logren minimizar estos efectos adversos.

Un material soporte apto para la inmovilización celular debe poseer ciertas características para que se vea favorecida tanto la adsorción como la productividad, Kourkoutas *et al.*, (2004), Eş *et al.*, (2015) y Rodríguez-Restrepo y Orrego (2020) señalan que las características más importantes para un soporte son:

- **Amplia área superficial:** La inmovilización celular sobre un soporte sólido genera una capa única de células adheridas al material, como se muestra en la Figura 2. Por esta razón, se prefieren soportes con estructura porosa, ya que ofrecen una mayor superficie disponible. Esto permite concentrar una mayor cantidad de células en un espacio reducido en comparación con sistemas donde las células permanecen libres. Además, los poros facilitan tanto la entrada de azúcares, que sirven como fuente de energía para las células, como la salida del etanol producido durante la fermentación hacia el medio líquido.
- **Estabilidad mecánica:** el soporte debe tolerar las condiciones de operación del reactor, como puede ser agitación, cambios de presión, entre otros, sin degradarse o cambiar su forma.
- **Estabilidad química:** el soporte no debe ser soluble, ni ser degradado por solventes, además de ser resistente a cambios de pH.
- **Estabilidad térmica:** tolerancia a las condiciones de operación del reactor, y de la autoclave para su esterilización.

- Estabilidad biológica: que cuente con resistencia a la degradación microbiana.
- Estructura: las estructuras rugosas y porosas son más favorecidas para la adhesión de las células que las estructuras homogéneas y lisas acorde a Genisheva *et al.*, (2011).
- No debe ser tóxico: no debe causar la muerte celular de las levaduras al contacto prolongado con ellas.
- Facilidad de separación: que pueda separarse por operaciones como decantación o filtración, disminuyendo así costos energéticos como sería el uso de una centrifuga.
- Reutilizable: debido a que con el paso del tiempo se va perdiendo viabilidad celular, esto quiere decir que muchas células mueren o ya no cumplen con las mismas funciones para transformar azúcares a etanol, por lo cual deben ser removidas del material soporte para después inmovilizar o fijar un nuevo lote de células viables.
- Rentable y escalable: el costo del material soporte y su escalabilidad inciden en su aplicación a nivel industrial.

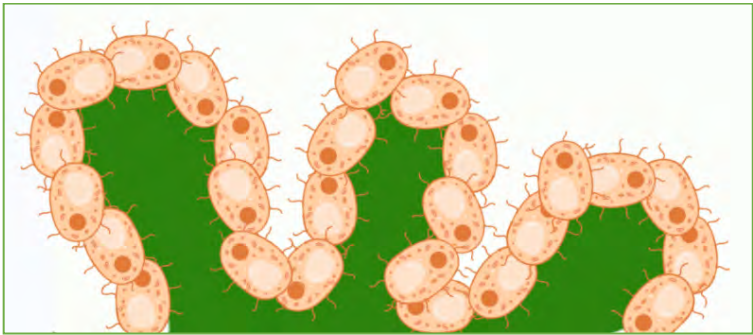


Figura 2. Adsorción de células de levadura en un soporte sólido.

Moreno *et al.*, (2018) clasifican a los soportes en soportes naturales, soportes orgánicos, soportes inorgánicos, membranas y agentes multifuncionales. Como soportes naturales se pueden considerar los residuos agrícolas, forestales (lignocelulósicos) o residuos de frutas; dentro de los soportes orgánicos podemos encontrar al quitosano, a la carragenina y al alginato; como soportes inorgánicos encontramos ciertos materiales cerámicos o vidrio poroso, por mencionar algunos ejemplos de estos. En la Tabla 1 se muestra una comparación de parámetros obtenidos de distintos soportes estudiados para la producción de etanol, como concentración de células inmovilizadas que es la cantidad de biomasa adsorbida (células fijas) por gramo de material soporte, la conversión en gramos de etanol obtenido sobre los gramos de sustrato (azúcares) alimentados y la productividad que es la cantidad de etanol obtenido por volumen y por tiempo.

Tabla 1. Comparación de parámetros cinéticos en diferentes soportes inmovilización de levaduras por adsorción física.

Soporte	Levadura	Concentración de células inmovilizadas (g/g)	Rendimiento (g etanol/g sustrato)	Productividad (g/L·h)	Referencia
Sin soporte (células libres)	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	N/R	2.55	Yu <i>et al.</i> , 2007
Aserrín con (dietilamino) etilo (DEAE)	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	0.375	N/R	Cha <i>et al.</i> , 2014
Astillas de madera	<i>S. cerevisiae</i>	0.032	0.47	8.60 +/- 0.60	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Bagazo de sorgo	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	0.47	5.72	Yu <i>et al.</i> , 2007
Bagazo de caña	<i>S. cerevisiae</i>	0.047	0.48	13.00 +/- 0.02	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Cáscara de naranja	<i>S. cerevisiae</i>	N/R	N/R	6.275	Plessas <i>et al.</i> , 2007
Hoja de maíz	<i>S. cerevisiae</i>	0.0147	0.53	8.76 +/- 0.20	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Mazorca de maíz	<i>S. cerevisiae</i>	0.023	0.52	9.06 +/- 0.03	Agudelo-Escobar <i>et al.</i> , 2012
Mazorca de maíz	<i>S. cerevisiae</i>	0.0222	0.51	3.35	Genisheva <i>et al.</i> , 2011
Pieles de uva	<i>S. cerevisiae</i>	0.0251	0.49	3.33	Genisheva <i>et al.</i> , 2011
Semillas de uva	<i>S. cerevisiae</i>	0.00168	0.51	3.41	Genisheva <i>et al.</i> , 2011
Tallos de uva	<i>S. cerevisiae</i>	0.00408	0.44	3.37	Genisheva <i>et al.</i> , 2011

Adicionalmente, en la Figura 3 se presenta una gráfica comparativa de la productividad entre diferentes soportes naturales donde se han inmovilizado células de *S. cerevisiae* y la de las células libres sin soporte. Genisheva *et al.*, (2011) ha reportado que la aplicación de residuos de la industria alimentaria puede traer ventajas sobre la inmovilización celular, debido a que el soporte contiene nutrientes que favorecen el desarrollo de las células que producen etanol.

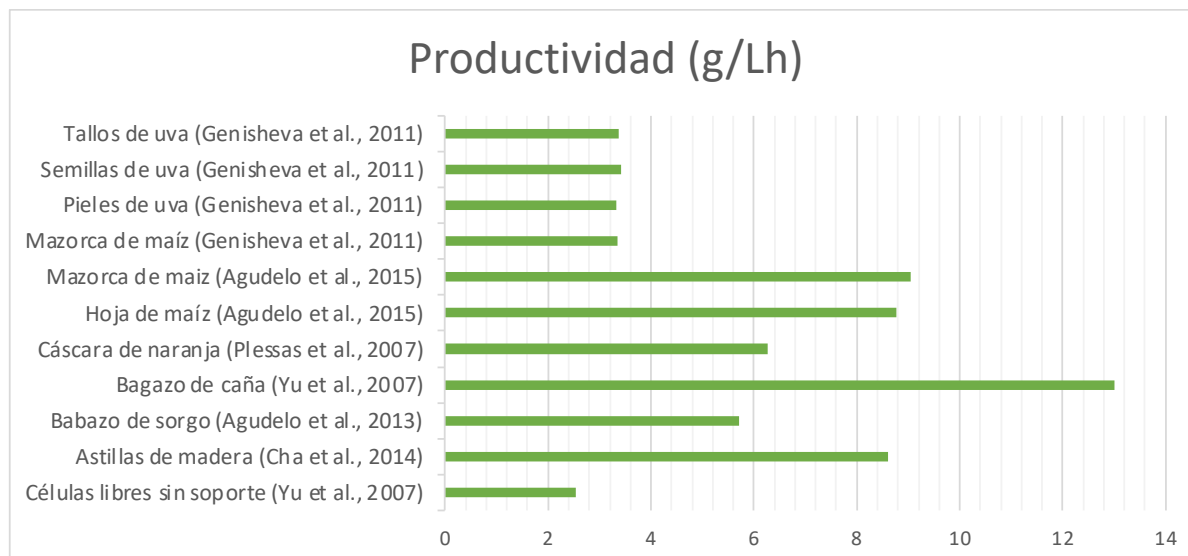


Figura 3. Comparación de la productividad respecto a los gramos de etanol obtenidos en diferentes soportes naturales.

Conclusiones

Un soporte idóneo para la inmovilización celular debe contar con ciertas cualidades donde se vea favorecida la fijación de células, su manipulación y además que no presente cambios en su estructura como efecto del ambiente de fermentación. Los residuos lignocelulósicos presentan gran parte de estas cualidades agregando que pueden tener nutrientes que favorezcan el crecimiento celular y por ende la productividad del bioetanol. Como se presenta en el gráfico independientemente del soporte sólido en el que estén inmovilizadas las células, todos los procesos fermentativos inmovilizados tienen una mayor productividad que los procesos fermentativos con células libres. Al utilizar células inmovilizadas en un soporte sólido se logra una mayor densidad celular debido al aprovechamiento del área superficial, lo que resulta en una mejor productividad en un equipo de fermentación más pequeño, reduciendo así costos de inversión y costos operativos.

Bibliografía

- Agudelo-Escobar, Lina., Salazar Álvarez, U., & Peñuela, M. (2012). Continuous production of ethanol in packed bed-bioreactors with immobilized yeast cells on lignocellulosic waste. *Dyna*, 79(174), 107-113.
- Cha, H. G., Kim, Y. O., Choi, W. Y., Kang, D. H., Lee, H. Y., & Jung, K. H. (2014). Evaluating Carriers for Immobilizing *Saccharomyces cerevisiae* for Ethanol Production in a Continuous Column Reactor. *Mycobiology*, 42(3), 249-255. DOI: <https://doi.org/10.5941/MYCO.2014.42.3.249>
- Eş, I., Vieira, J. D. G., & Amaral, A. C. (2015). Principles, techniques, and applications of biocatalyst immobilization for industrial application. *Applied microbiology and biotechnology*, 99, 2065-2082. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6390-y>
- Genisheva, Z., Mussatto, S. I., Oliveira, J. M., & Teixeira, J. A. (2011). Evaluating the potential of wine-making residues and corn cobs as support materials for cell immobilization for ethanol production. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 979-985. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.006>
- Kourkoutas, Y., Bekatorou, A., Banat, I. M., Marchant, R., & Koutinas, A. A. (2004). Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review. *Food microbiology*, 21(4), 377-397. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2003.10.005>
- Moreno-García, J., García-Martínez, T., Mauricio, J. C., & Moreno, J. (2018). Yeast immobilization systems for alcoholic wine fermentations: actual trends and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 9, 241. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00241>
- Plessas, S., Bekatorou, A., Koutinas, A. A., Soupioni, M., Banat, I. M., & Marchant, R. (2007). Use of *Saccharomyces cerevisiae* cells immobilized on orange peel as biocatalyst for alcoholic fermentation. *Bioresource Technology*, 98(4), 860-865. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.014>
- Rodríguez-Restrepo, Y. A., & Orrego, C. E. (2020). Immobilization of enzymes and cells on lignocellulosic materials. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 787-806. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00988-w>
- Yu, J., Zhang, X., & Tan, T. (2007). An novel immobilization method of *Saccharomyces cerevisiae* to sorghum bagasse for ethanol production. *Journal of biotechnology*, 129(3), 415-420. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.01.027>

Energía y carbono sin misterios: indicadores clave para entender el impacto ambiental de transformar los bosques templados en madera en Durango, México

Pedro Meza-López ^{1,*}, Juan Abel Nájera-Luna ², Beatriz Díaz-Ramírez ², Ricardo de la Cruz-Carrera ², Edgar Enrique Amezcua ³ y Aldo Alejandro Lujan-Espinoza ¹

¹ Departamento de Ingeniería Forestal, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, México.

² División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, México.

³ Estudiante de la carrera de Ingeniería Forestal, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, México.

* Autor de correspondencia: pettermezza@itelsalto.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 4 de julio de 2025 Aceptado: 28 de julio de 2025 Publicado: 8 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.560>

Resumen: El presente artículo esboza el proceso de transformación de madera en rollo en madera para escuadría y analiza el impacto ambiental que representa el aprovechamiento forestal maderable en la región de El Salto, Durango, mediante la estimación de dos indicadores clave de sustentabilidad: la intensidad de energía y carbono. Para ello, se realizó una auditoría energética en 11 aserraderos mediante visitas técnicas y análisis de consumo energético, con base en la metodología de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Los resultados muestran amplias variaciones en la eficiencia de transformación entre aserraderos. El mayor consumo de energía mensual entre los aserraderos evaluados fue de 27,532.23 kWh, lo que equivale a generar 9.99 tCO₂e. Intensidades de carbono menores (0.36) tCO₂e/kWh, sugieren una mayor eficiencia energética del proceso. En contraste, una intensidad de carbono elevada (0.54 tCO₂e/kWh), implica ineficiencias en el uso de energía. Así que intensidades energéticas bajas (0.03 kWh/pt) son deseables desde una perspectiva de sustentabilidad. La evaluación de estos indicadores permite a la industria de la madera establecer metas energéticas a través del monitoreo continuo y orientar sus esfuerzos hacia modelos de producción alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: eficiencia; meta energética; diagnóstico energético; objetivos de desarrollo sostenible; economía baja en carbono

Introducción

El uso de los bosques para obtener madera, también llamado aprovechamiento forestal maderable, es una actividad milenaria que provee materia prima indispensable para la construcción, fabricación de muebles, generación de energía y la industria de la celulosa y papel entre otros derivados. Asimismo, el aprovechamiento forestal maderable es una actividad económica esencial para el desarrollo rural y regional, especialmente en zonas con vocación forestal. No obstante, la actividad requiere de energía para producir bienes, y gran parte de esa energía proviene de fuentes convencionales como la quema de combustibles fósiles, liberando dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera como parte inevitable de su impacto ambiental.

En este contexto, comprender los indicadores de desempeño ambiental como la intensidad de energía y de carbono resulta de especial relevancia para evaluar de forma integral la sostenibilidad de las actividades económicas forestales. Por un lado, el indicador de intensidad de energía se refiere a la cantidad de energía requerida o consumida en el proceso para producir una unidad de producto (International Energy Agency [IEA], 2016). En la producción maderable la intensidad de energía se expresa en kilowatt-hora por pie-tabla (kWh/pt). Por otro lado, la intensidad de carbono contempla la cantidad de emisiones de GEI liberadas como consecuencia del consumo de una unidad de energía y se mide en toneladas de dióxido de carbono equivalente por kilowatt-hora (tCO₂e/kWh) (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2015). Ambos indicadores son herramientas que permiten medir el impacto de una actividad económica en el medio ambiente.

Datos recientes permiten ilustrar la magnitud de estos indicadores en la industria de transformación primaria. En un estudio llevado a cabo en aserraderos de Estados Unidos, específicamente en Virginia Occidental donde se localizan alrededor de 85 aserraderos se determinó que la intensidad de la energía oscila entre 0.08 y 0.17 kWh/pt, con una media de 0.12 kWh/pt (Devaru, 2015; Maddula, 2021). Una vez evaluados, estos indicadores ofrecen información clave para identificar puntos críticos de consumo excesivo de energía, establecer metas a través del monitoreo continuo, así como orientar la toma de decisiones hacia modelos de producción más eficientes y sostenibles.

El estado de Durango ocupa el segundo lugar como productor forestal, con una participación del 30.2% del total de 8.1 millones de metros cúbicos correspondientes a la producción proveniente de las autorizaciones de aprovechamiento forestal del país. La región de El Salto, en el estado de Durango destaca por poseer el primer lugar a nivel nacional en producción forestal maderable con 28.4% de la producción total (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021). Según la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, 2023), la región alcanzó una producción maderable de 2,518,376 metros cúbicos en 2018, siendo la escuadría el principal producto maderable, con 83.01% de la producción total, seguido de la leña (9.86%), los productos celulósicos (3.76%) y el carbón (2.69%). En la región existen alrededor de 63 aserraderos cuya actividad principal es la producción de madera para escuadría. Las operaciones que se desarrollan en los aserraderos pueden ser semi-mecanizadas o mecanizadas y se realizan de manera secuencial para cargar, transportar, apilar, cortar y seccionar la madera (Food and Agriculture Organization [FAO], 1991).

A nivel internacional, la transición hacia una economía baja en carbono exige pasar de la intención a la acción, esto supone una prioridad para la industria de la madera quien debe adoptar métricas claras, comparables y verificables sobre su desempeño energético y climático que le permitan alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (UN, 2015). Este artículo tiene como propósito analizar el impacto ambiental del aprovechamiento forestal maderable en la región de El Salto, Durango, mediante el estudio de dos indicadores clave de sustentabilidad: la intensidad de energía y la intensidad de carbono. De manera que la principal contribución de este estudio es promover la comprensión y adopción de estas métricas en el aprovechamiento forestal maderable. Al hacerlo, no solo se fomenta una gestión orientada a la mejora de la eficiencia energética sino también se reflexiona sobre la migración a fuentes renovables de energía como palanca clave para la sostenibilidad del polo maderero con mayor producción maderable del país.

Desarrollo

Los bosques templados en México

Los bosques templados se extienden y distribuyen principalmente en las cordilleras del país, con 34.2 millones de hectáreas, ocupando el 24.8% del territorio nacional. Por su extensión, se ubican principalmente en los estados de Chihuahua, Durango, Oaxaca, Jalisco, Guerrero, Sonora, Michoacán, Chiapas y Zacatecas como se muestra en la Figura 1. La superficie forestal de bosques templados en Durango es de 5,193,060 hectáreas, es decir 48.9% del territorio del estado, ocupando el segundo lugar en programas de manejo forestal maderable autorizados, con 370 programas lo que equivale a un volumen anual estimado de 2,301,693 metros cúbicos, siendo los núcleos agrarios o ejidos los principales productores maderables (SEMARNAT, 2021).

En términos económicos, la industria de la madera ha tenido un incremento sostenido aproximado del 4.79% durante el periodo del año 2012 al 2023 y representa el 55.04% del total del PIB forestal. El PIB del sector forestal fue de 95,016 millones de pesos y contribuye con 0.30% al PIB nacional. El número de empleos en el sector forestal representa alrededor del 0.4% del empleo de la economía del país, en otras palabras 262,604 empleos, de los cuales el aprovechamiento forestal ofreció empleo a 85,961 personas, mientras que la industria de la madera alcanzó 176,643 empleos en el año 2023. Aproximadamente 20,228 personas fueron empleadas en el sector forestal en el estado de Durango (CONAFOR, 2024). Con respecto a la balanza comercial, existe un déficit comercial de productos maderables de 2,013.66 millones de dólares. La exportación de madera con destino a los Estados Unidos de América, principal socio comercial maderable del país, representa el 97.73%, mientras que el origen de las importaciones también corresponde a ese país, con 37.96% (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2024).

La industria de transformación primaria de la madera

Existen recursos forestales no maderables y maderables. Estos últimos, en particular, están constituidos de vegetación leñosa que es susceptible de ser aprovechada, por ejemplo: las diferentes especies de pino y encino que corresponden al género *Pinus* spp y *Quercus* spp, respectivamente. De acuerdo con la CONAFOR (2023), el género *Pinus* spp es el recurso más utilizado, con 70.5% del total de los 8.1 millones de metros cúbicos de madera en rollo a nivel nacional. La madera en rollo o trocería es la materia prima de la industria y se refiere a los troncos de árboles talados, desramados y cortados en trozos con longitudes estandarizadas.

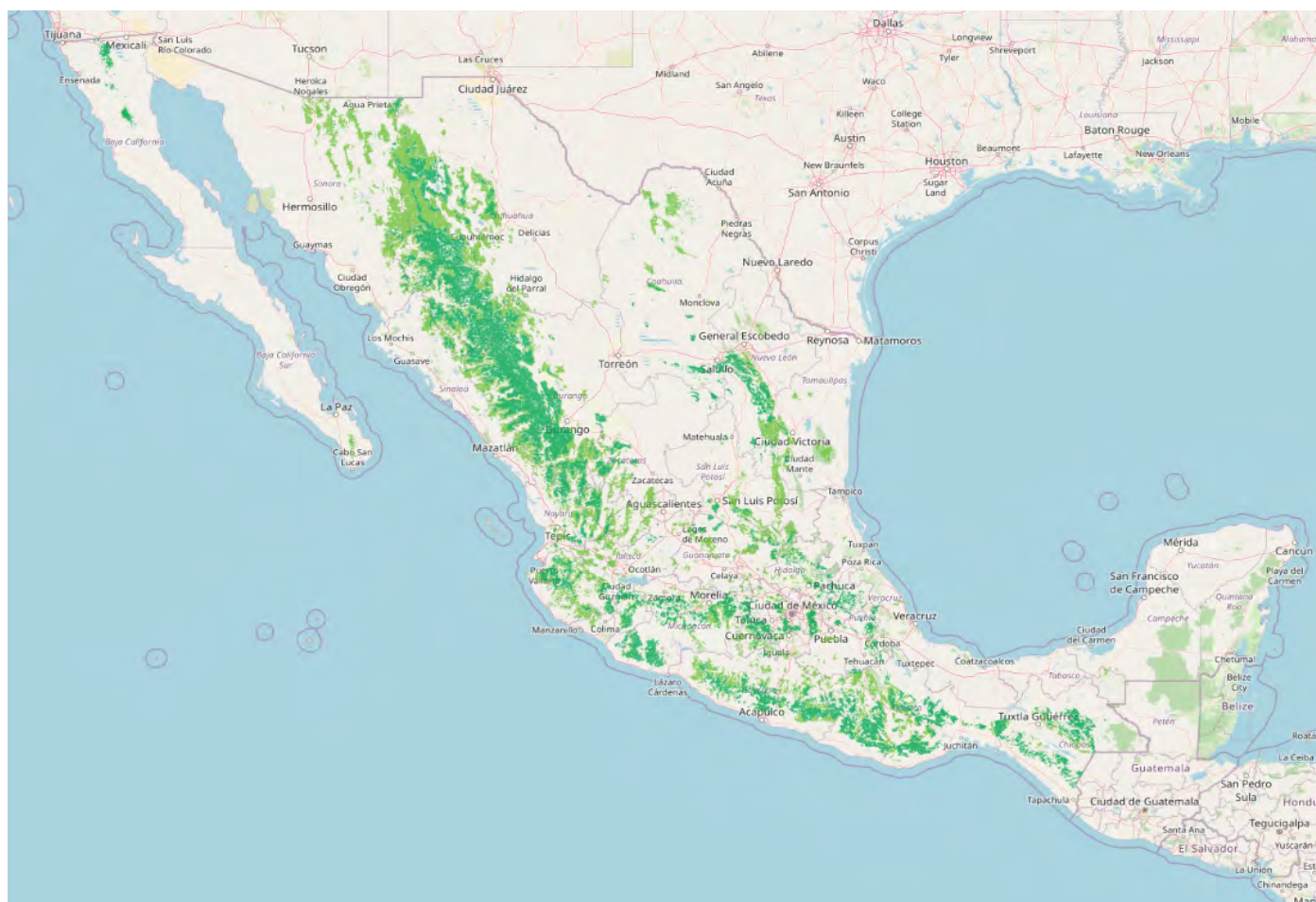


Figura 1. Distribución de los bosques templados de coníferas y encinos en México. Fuente: Uso de suelo y vegetación INEGI (Julio 26, 2025)

La industria forestal está comprendida por diversas etapas que van desde la extracción forestal hasta la transformación y la comercialización. El primer proceso de industrialización de los recursos forestales maderables se denomina transformación primaria, y es la intervención inicial a la que es sometida la trocena que proviene directamente del bosque. De acuerdo con el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMS, 2010) la transformación primaria incluye las etapas siguientes: manejo de madera en rollo en patio, descortezado, asierre, saneamiento y dimensionado, clasificación de la madera aserrada, manejo de madera aserrada en patio y estufado de la madera aserrada.

Estas etapas de transformación suceden en establecimientos denominados aserraderos donde la trocena es convertida en madera para escuadría. La madera para escuadría son piezas de madera cortadas del trozo en secciones rectangulares planas y perpendiculares entre sí con dimensiones y espesores diferentes, comúnmente denominadas tablas, tablones, vigas, barros polines o waldas (ver Figura 2). La unidad de producción que se utiliza es el pie-tabla (pt) y hace referencia al volumen de madera aserrada equivalente a un pie (ft) de largo por un pie de ancho por una pulgada (in) de espesor.

Manifestaciones de la energía y carbono en la industria de transformación primaria de la madera

La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma de una forma a otra. Este principio de conservación de la energía de la termodinámica es fundamental para el funcionamiento y operación de la maquinaria que asiste las operaciones de la industria forestal maderable. Las fuentes de energía en los aserraderos son la energía eléctrica comprada al suministrador de servicios básicos de la comisión federal de electricidad (CFE) y la energía química que proviene directamente de la quema de combustibles fósiles derivados del petróleo, tales como el diésel y la gasolina.

En pocas ocasiones la energía proviene de biocombustibles sólidos como la leña. La transformación de estas fuentes de energía para su uso final se logra mediante motores de combustión interna, máquinas eléctricas, calderas a leña y otros dispositivos (Meza *et al.*, 2024). El uso final de energía es la que se consume directamente por los dispositivos en los aserraderos.



Figura 2. Aserradero Industrias Quintana en la región de El Salto, Durango. a) En el primer plano se observa la trocería, al fondo se distingue las instalaciones de la línea de producción. b) Patio de madera para escuadría. c) Esquema de despiece del trozo para obtener madera para escuadría

En los aserraderos la energía se manifiesta en forma de calor (energía térmica), de electricidad (energía eléctrica), de luz (energía radiante), de reacción de combustión (energía química) y de posición y movimiento (energía mecánica). Al concebir la energía como la fuerza multiplicada por el desplazamiento en la dirección de la fuerza es posible referirse a ella como la capacidad de hacer un trabajo, es decir el poder y la acción con que se cuenta para mover, accionar o transformar algo.

La unidad estándar de medida de la energía en el sistema internacional de unidades (SI) es el Joule (J). Para formar múltiplos y submúltiplos de la unidad se utilizan los prefijos del SI, por ejemplo: kilojoules (kJ), megajoules (MJ) o gigajoules (GJ). Sin embargo, según la forma en que ésta se manifiesta se emplean unidades derivadas o unidades de otros sistemas de medición e incluso unidades no estandarizadas que facilitan su uso en la práctica comercial e industrial, por ejemplo: kilowatt-hora (kWh), British Therma Unit (BTU), tonelada equivalente de petróleo (tep), y barril de petróleo (boe) (Secretaría de Economía [SE], 2021).

Las emisiones de carbono en la industria forestal maderable se generan principalmente por la quema directa o indirecta de combustibles basados en carbono procedentes de hidrocarburos fósiles, incluidos el carbón, el petróleo y el gas natural (ver Figura 3). Aunque estrictamente el carbono es un elemento químico presente en la materia orgánica, el término emisiones de carbono se utiliza como una forma abreviada de referirse a la cantidad de masa de emisiones de GEI liberada a la atmósfera debido a actividades antropogénicas. Las emisiones de carbono agrupan distintos tipos de GEI, principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), en una sola unidad expresada en dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Como cada tipo de GEI tiene diferente potencial de calentamiento global (PCG),

las emisiones de CO₂e se calculan habitualmente, multiplicando la emisión de un GEI por su correspondiente PCG en un plazo dado y se suman las emisiones correspondientes a cada tipo de gas. Las emisiones de CO₂e se miden en unidades de masa, es decir kilogramos o toneladas de dióxido de carbono equivalente (kgCO₂e o tCO₂e) (IPCC, 2015).



Figura 3. Cargador frontal liberando emisiones de carbono por el consumo de diésel en el aserradero Sociedad de Producción Forestal Diamante en la región de El Salto, Durango.

Estimación de indicadores prioritarios de sostenibilidad en la industria forestal maderable. Un estudio de caso

La intensidad de energía y de carbono son indicadores prioritarios que permiten determinar el impacto que tiene una actividad económica en el medio ambiente. De forma análoga a la información que proporcionan los indicadores en el panel de instrumentos de un automóvil sobre el estado del mismo (nivel de combustible y temperatura del motor), los indicadores prioritarios permiten comprender el estado que guarda el desempeño de una actividad económica en términos medioambientales.

La intensidad de energía indica la cantidad de energía que se requiere para producir una unidad de producto, por ejemplo: la industria de la madera consume cierta cantidad de kilowatt-hora para producir un pie-tabla. Es como observar en el panel de instrumentos del automóvil el consumo de litros de gasolina por kilómetro recorrido. Por su parte, la intensidad de carbono indica la cantidad de emisiones de carbono liberada por consumir cierta cantidad de kilowatt-hora. En el caso del automóvil es posible visualizar las emisiones liberadas en el escape del vehículo derivado de la quema de la gasolina por kilómetro recorrido. Así como el conductor del automóvil monitorea el panel de instrumentos para ajustar su conducción, evitar niveles altos de temperatura o consumo excesivo de gasolina, los tomadores de decisiones en la industria de la madera pueden establecer metas a partir de la medición de estos indicadores, identificar inefficiencias, reducir emisiones y tomar decisiones informadas más sostenibles.

Para ilustrar la realidad, se llevó a cabo un estudio para determinar los indicadores de intensidad de energía y de carbono en la industria forestal maderable localizada al noroeste del país, específicamente en la región de El Salto, Durango. Para el desarrollo del estudio se efectuó una auditoría energética de nivel uno que consistió en realizar recorridos en las instalaciones de 11 aserraderos y analizar los historiales de consumo de energía y los niveles de producción como lo establece la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE (2011). La participación de los aserraderos fue voluntaria y sus características técnicas se muestran en la Tabla 1. Las metodologías de cálculo de los indicadores fueron las propuestas por el IPCC (2015) y la IEA (2016).

Tabla 1. Características técnicas de los aserraderos evaluados.

Especificación	Descripción
Volumen de madera en rollo promedio recibido por mes	1200 m ³ , con dimensiones variables (trozos con 44 cm de diámetro en promedio, con rangos de 18-70 cm y 22 ft de largo, con rangos de 8 a 36 ft)
Volumen de producción media mensual de madera aserrada	170,000 pt
Productos maderables	Tablas, tablones, vigas, barrotes polines o waldras, generalmente con una humedad del 15 al 20%
Rendimiento	54.83% de coeficiente de aserrío, aproximadamente (tiempo promedio para aserrar 1000 pt de 25.09 minutos, con productividad de 7.57m ³ por hora y velocidad de alimentación de 46.47 m por minuto. El rendimiento depende del diámetro, largo y conicidad de los trozos (Nájera-Luna <i>et al.</i> , 2011)
Configuración típica de la línea de producción	Secuencia lineal simplificada de las operaciones: Apilado de la trocería o madera en rollo en patio del aserradero Aserrado longitudinal de la trocería en una unidad principal conformada por rampa de alimentación, carro escuadra porta trozos y sierra banda Dimensionado transversal y saneamiento de la madera aserrada en unidades secundarias conformadas por recortadora y desorillador Clasificado de la madera aserrada en dimensiones y calidades en mesa de clasificado Apilado y enfajillado de madera aserrada en patio del aserradero
Potencia fija instalada	94.72 kW, incluye todas las clases de máquinas eléctricas (motores, eléctricos, herramienta, equipo y sistemas de iluminación)
Potencia móvil instalada	166.29 kW, incluye todas las clases de vehículos para servicios pesado y ligero todo terreno y máquinas de combustión internas portátiles (cargador frontal, montacargas y motosierras)
Motores eléctricos	Diversidad de marcas entre ellas SIEMENS, SP Motors, General Electric, Century y Motores U.S de México con potencia nominal entre 3.73 kW y 44.74 kW
Cargadores	Marca Caterpillar C950 y Caterpillar, generalmente con potencias promedio de 155.59 y 43.99 kW, respectivamente

La Tabla 2 muestra el enfoque piramidal para delimitar la cobertura o alcance de los indicadores con base en la disponibilidad de los datos recolectados. Este enfoque permite desagregar de forma descendente la información hasta niveles más detallados, según el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (INEGI, 2023).

Tabla 2. Enfoque de aproximación piramidal para indicadores prioritarios (INEGI, 2023 e IEA, 2015).

Cobertura o alcance		Indicadores prioritarios	Datos energéticos	Datos por actividad
Subsector	Industria de la madera	-	Consumo energético total de la industria expresado en kWh o MJ	Producción física de la industria expresada en m ³ o pt
Rama	Aserrado y conservación de la madera			
Subrama	Aserraderos	Intensidad de energía e intensidad de carbono	Consumo energético total por aserradero expresado en kWh o MJ	Producción física por aserradero expresada en m ³ o pt
Producto	Madera para escuadría			

El análisis reveló una variabilidad en el consumo de energía y emisiones de carbono entre aserraderos lo que permitió identificar diferencias en su desempeño ambiental como se muestra en la Tabla 3. El aserradero A11 presentó el mayor consumo de energía mensual, con 27,532.23 kWh, seguido por A9 con 16,036.32 kWh, lo que coincide con las mayores emisiones de carbono, 9.99 tCO₂e y 6.25 tCO₂e, respectivamente.

Tabla 3. Indicadores de energía y carbono en aserraderos.

Aserradero	Energía consumida (kWh·mes ⁻¹)	Emisiones de carbono (tCO ₂ e·mes ⁻¹)	Indicadores	
			Intensidad de energía	Intensidad de carbono
A1	11083.61	4.53	0.07	0.41
A2	11199.79	4.30	0.07	0.38
A3	7466.52	2.87	0.05	0.38
A4	5459.93	2.54	0.03	0.47
A5	6842.06	3.36	0.03	0.49
A6	8485.94	4.57	0.05	0.54
A7	5681.99	2.70	0.04	0.48
A8	4118.69	2.06	0.03	0.50
A9	16036.32	6.25	0.12	0.39
A10	6844.92	3.25	0.03	0.47
A11	27532.23	9.99	0.13	0.36

El aserradero A11 presenta la intensidad de carbono más baja (0.36 tCO₂e/kWh), lo cual sugiere una mayor eficiencia. En otras palabras, aunque consumió más energía que el resto de los aserraderos, emitió bajas cantidades de carbono por unidad de energía debido probablemente a maquinaria altamente eficiente. En contraste, el aserradero A6 alcanzó una intensidad de carbono más elevada (0.54 tCO₂e/kWh), a pesar de eso presenta un consumo energético menor, lo que podría implicar ineficiencias en el uso energético de la maquinaria. Por otro lado, A5 presenta la menor intensidad de energía (0.03 kWh/pt), lo cual es favorable desde el punto de vista de eficiencia energética dado es posible que produzca el mismo volumen de madera que el resto de aserraderos, pero con menor consumo de energía. En realidad, intensidades energéticas bajas como en A5, A8 y A10 son deseables desde una perspectiva de sostenibilidad. Los datos descritos son clave para identificar oportunidades de mejora en la eficiencia, resaltando la importancia de monitorear ambos indicadores en conjunto.

Hacia una transición sostenible de industria de transformación primaria de la madera

La transición hacia una economía baja en carbono exige a cualquier actividad económica, incluida la industria de la madera, a pasar de la intención a la acción, adoptando métricas claras, comparables y verificables que coadyuven con los compromisos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Por lo tanto, la implementación de acciones como una gestión efectiva de la energía y la integración de energías renovables autóctonas, por ejemplo: la micro generación de bioenergía, son clave para transitar hacia la sostenibilidad y el cumplimiento los compromisos globales. Específicamente con los ODS 7, 9 y 13 en los cuales se plantea duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética, invertir en más productos de alta tecnología que dominen las producciones manufactureras para aumentar la eficiencia energética y finalmente acelerar la integración de energías renovables y otras soluciones para reducir las emisiones de carbono (UN, 2015). Esta tendencia global marca una nueva ruta hacia una industria de la madera que no solo sea productiva, sino también ambientalmente responsable y alineada con los compromisos internacionales de sostenibilidad.

Conclusiones

En este estudio se analizó el impacto ambiental de la transformación primaria de la madera mediante los indicadores de intensidad de energía y la intensidad de carbono. La estimación de los indicadores facilitó la identificación de diferencias en consumo de energía y emisiones de carbono entre aserraderos. Además, el estudio demostró la

importancia de contar con métricas de sustentabilidad que permitan tomar decisiones informadas y transitar hacia una industria de la madera más sostenible.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento al proyecto de investigación “Intensidad energética y de carbono de la industria forestal primaria”.

Bibliografía

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2011). *Procedures for commercial building energy audits*. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/procedures-for-commercial-building-energy-audits>
- Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS). (2010). Manual de buenas prácticas en aserraderos de comunidades forestales [Edición 2010]. CCMSS. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Manual_de_buenas_practicas_en_aserraderos_de_comunidades_forestales.pdf
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). Estado que guarda el Sector Forestal en México 2023 [Informe anual]. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/947878/2024_07_31_EGSFM_2023.pdf
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2024). Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF). Gobierno de México. <https://snif.cnf.gob.mx/>
- Devaru, D. (2015). Estimation of energy intensity in wood processing sawmills based on analysis of product, process and system parameters [Master's thesis, West Virginia University]. West Virginia University Research Repository. <https://doi.org/10.33915/etd.5482>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1991). Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales (Cuaderno técnico No.93). FAO. <https://www.fao.org/3/t0269s/T0269S00.htm>
- International Energy Agency (IEA). (2015). Energy efficiency indicators: essentials for policy making. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-essentials-for-policy-making>
- International Energy Agency (IEA). (2016). Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-fundamentals-on-statistics>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R. K. Pachauri & L. A. Meyer (Eds.)]. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (Julio 26, 2025). Uso de suelo y vegetación [mapas]. Recuperado el 26 de julio de 2025, de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Clasificadores – Catálogo SCIAN México [Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte]. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/scian/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). Balanza Comercial de Mercancías de México (corte datos; abril 2024). <https://www.inegi.org.mx/programas/comext/>
- Maddula, R. B. (2021). Energy intensity determination in wood processing sawmills [Master's thesis, West Virginia University]. West Virginia University Research Repository. <https://doi.org/10.33915/etd.611>
- Meza-López, P., Nájera-Luna, J. A., & de la Cruz-Carrera, R. (2024). Estimating final energy consumption when logging and sawing timber. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 30(2). <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.04.021>
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., Corral-Rivas, J. J., & Vargas-Larreta, B. (2011). Tiempos y rendimientos del aserrío en la región de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 199–213. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.034>
- Secretaría de Economía (SE). (2021). NOM-008-SE-2021: Sistema general de unidades de medida [Norma oficial mexicana]. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5713228&fecha=29/12/2023
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). Anuario estadístico de la producción forestal 2018. SEMARNAT. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- United Nations (UN). (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. <https://sdgs.un.org/goals>

Incidencia de *Phytophthora capsici* L. en frutos de chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Sw.] en 7 localidades de Ixtaczoquitlán Ver.

Christian Andrés Ixmatlalhua-Rodríguez ¹, Jorge Alberto Alejandro-Rosas ², Jorge Molina-Torres ³, Leticia López-Zamora ^{1,*}

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba. Orizaba, Ver., México.

² LADISER - Universidad Veracruzana FCQ - Orizaba, Ver., México.

³ Laboratorio de Fitobioquímica - CINVESTAV Unidad Irapuato, Gto., México.

* Autor de correspondencia: leticia.lz@orizaba.tecnm.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 5 de junio de 2025 Aceptado: 19 de julio de 2025 Publicado: 8 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.469>

Resumen: El chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Sw.] en Veracruz México, aporta el 85% de la producción nacional; en postcosecha se ha detectado afectación al producto originada por “*Moho blanco*”, lo que representa menoscabos económicos durante el mercadeo nacional e internacional, en esta investigación, se identificó el fitopatógeno *Phytophthora capsici* Leonian, en el ciclo agrícola 2023, se llevó a cabo el muestreo de frutos de chayote de 7 localidades del municipio de Ixtaczoquitlán, Ver., se realizó el proceso de: Siembra, aislamiento, purificación, pruebas de patogenicidad para confirmar virulencia y obtener cultivos puros del patógeno para futuras investigaciones con otros centros de investigación. A partir del muestreo de las 7 localidades, se determinaron cuatro cepas de *P. capsici*, de mayor virulencia por medio de una escala patométrica. Se caracterizó el ADN por región espaciadora transcrita interna (ITS), únicamente de la cepa de Cuautlapan por ser la más agresiva en el desarrollo de la patogénesis en fruto, representando el mayor riesgo fitosanitario, optimizando recursos y asegurando una base para futuros estudios. Esta información científica y el buen manejo permitirá reducir la incidencia del patógeno en postcosecha, disminuir costos de producción y fortalecer la sanidad del cultivo, beneficiando directamente a la cadena productiva.

Palabras clave: chayote, *Phytophthora capsici*, patometría, postcosecha, ITS

Introducción

El cultivo de chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Sw.] es una hortaliza de importancia internacional, cultivada en los cinco continentes. Desde 1998, ha sido considerado un producto no tradicional desde el 2001 (Cadena-Iñiguez, 2010), con creciente demanda de exportación (Cadena, 2005). Su centro de origen se localiza en el estado de Veracruz, el cual concentra la mayor diversidad genética, seguido por Oaxaca y Chiapas (SINAREFI, 2011). Actualmente, Veracruz lidera la producción nacional con 2,337.75 ha distribuidas en tres zonas principales (Actopan, Coscomatepec e Ixtaczoquitlán), muchos de ellos con altos índices de marginación (Velázquez *et al.*, 2021; INPI, 2022). Esta superficie representa el 78.64% del total nacional sembrado, con una producción del 85.27%, equivalente a 166,457.94 t y un valor estimado de \$701,367,201.03 pesos M.N. (SIAP, 2019; SENASICA, 2022).

Una de las principales limitantes para su comercialización son las enfermedades postcosecha, al aparecer daños en los frutos cosechados, después de 3 o 4 días de haber sido transportados tanto a nivel nacional como internacional. Los frutos presentan pudriciones blandas con micelio blanquecino, asociadas a *Phytophthora capsici*, un Oomiceto cuya presencia ha sido registrada en zonas chayotera de Veracruz (GISEM, 2008; Álvarez *et al.*, 2022). Este patógeno prospera en ambientes húmedos con temperaturas de entre 15 y 23 °C y posee una serie de adaptaciones que lo hacen altamente virulento (Chávez, 2016).

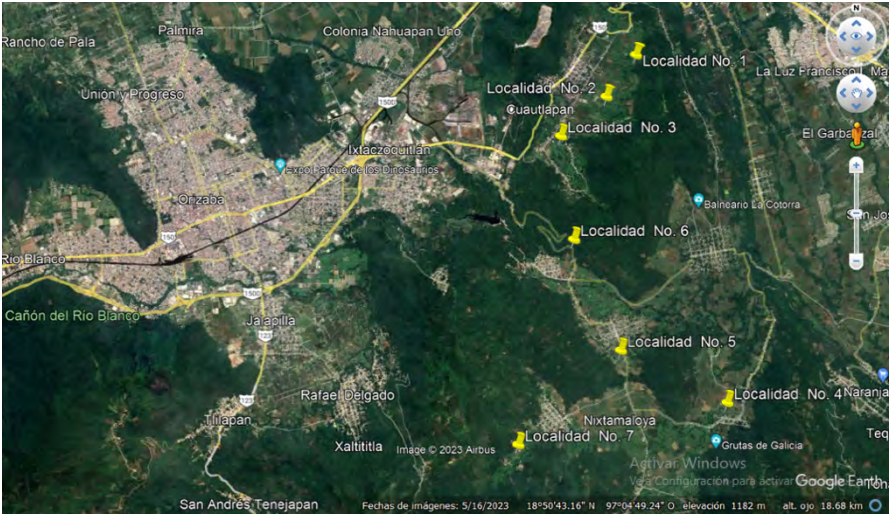
En este estudio, se aislaron Oomicetos a partir de muestras cosechadas en siete localidades del municipio de Ixtaczoquitlán, Ver., durante el ciclo productivo 2023. El material fue purificado y conservado *in vitro* para su caracterización morfológica y molecular. Se identificó un fitopatógeno no reportado previamente en frutos de chayote (*S. edule*) en las localidades antes mencionadas, cuya caracterización genética mediante la amplificación de la región espaciadora transcrita interna (ITS) constituye una base importante para el diseño de estrategias de manejo fitosanitario postcosecha. Esta enfermedad, representa una gran afectación económica para productores y exportadores, debido a que daña estructuras como raíz, tallo y especialmente los frutos durante la etapa postcosecha principalmente por el deterioro de frutos durante el transporte (Andrade-Luna *et al.*, 2017).

Desarrollo

Obtención del inóculo

Se georreferenciaron parcelas con presencia de problemas fitosanitarios en siete localidades del municipio de Ixtaczoquitlán, Veracruz, a fin de obtener el inóculo del fitopatógeno (Tabla 1).

Tabla 1. Geoposición de zonas de muestreo de frutos de chayote (Google Earth Pro, 2023).

Localidad	Geoposición	(MSNM)	Mapa con características edafoclimáticas del municipio de Ixtaczoquitlán Ver.
1	18°52'45.12" N 97°00'38.25" O	982	
2	18°52'13.93" N 97°01'00.12" O	994	
3	18°51'43.05" N 97°1'35.52" O	975	
4	18°48'22.43" N 96°59'24.15" O	784	
5	18°49'1.72" N 97°0'47.96" O	789	
6	18°50'25.44" N 97°1'24.86" O	804	
7	18°47'51.22" N 97°2'9.09" O	813	

Durante la época de lluvias del ciclo productivo 2023, se documentaron los daños causados por el agente patógeno en huertas de chayote (Figura 1). Se cosecharon al azar 420 frutos de chayote, equivalentes a 60 frutos por hectárea en siete hectáreas (una por localidad), a los 18 ± 2 días después de la floración (antesis), conforme a la Norma Oficial Mexicana NMX-FF-047-SCFI-2003 y la NOM-210-SSA1-2014, correspondientes a su madurez hortícola o de corte, es decir, el estado óptimo para su comercialización, previo a la madurez fisiológica completa.



Figura 1. Huerta comercial de chayote con incidencia de *Phytophthora capsici* en Ixtaczoquitlán Veracruz.

Los frutos se embolsaron y empacaron en cajas individuales a temperatura media de 21 ± 3 °C, simulando las condiciones típicas de manejo poscosecha para su comercialización. A los siete días, se evaluaron los frutos de cada localidad, registrándose un promedio del 20 % de incidencia de daño (12 frutos por localidad), con síntomas visibles compatibles con la presencia de fitopatógenos, de acuerdo a Sanogo *et al.* (2023).

Formulación de Patometría de la enfermedad en frutos de chayote

Se tomaron fotos con un equipo móvil Redmi Note 12S con cámara gran angular de 108MP/108MPf/1.90.7µm, agrupamiento 9 en 1 en un gran pixel de 2.1µm tamaño del sensor de 1/1.52" cámara ultra gran angular de 8MP/118°f/2.2 cámara macro de 2MPf/2.4, para evaluar la severidad del fitopatógeno *Phytophthora* sp. en campo, realizando una escala visual de 0 a 100% de daño dividida en 6 niveles (Lavilla *et al.*, 2021), ilustrada con fotos de frutos de chayote verde liso de las 7 localidades de muestreo, del municipio de Ixtaczoquitlán Ver.

Asilamiento en cajas Petri

Se disolvieron 19.5 g de papa dextrosa agar (PDA) PROBIOTEK® en 500 ml de agua destilada, se calentó en una parrilla TSU-SP131325 hasta disolver, se esterilizó a 121 °C y 20 lb/in² por 15 min en una autoclave vertical manual modelo EV-30. Posteriormente se vertieron 10 mL de medio papa dextrosa agar (PDA), en cajas Petri, dejando solidificar en la campana de flujo laminar LABCONCO® Class Type A2 Purifier Biological safety Cabinet. Se realizaron cortes de tejido enfermo en frutos de 0.50 x 0.50 cm, se desinfectaron con NaClO Cloralex® al 2% por 5 min, se enjuagaron con agua destilada estéril. Un fragmento tejido con síntomas que origina el fitopatógeno, se colocó por caja Petri en medio de cultivo PDA a 23 ± 2 °C, por 5 días. Todo el proceso se realizó dentro de la campana de flujo laminar LABCONCO®. Las observaciones del crecimiento de esporangios y micelios se realizaron con un microscopio VELAB® modelo VE-BC1, 40X y el SOFTWARE VE-MC3 para las métricas digitales de los fitopatógenos.

Purificación de fitopatógenos en frutos de chayote

Se realizó por medio de puntas hifales individualmente, en cajas Petri con medio PDA, a 22 ± 2 °C, por 5 días, obteniéndose cultivos monomicelios homogéneos sin contaminación.

Replicación de la enfermedad

Se recolectaron 28 frutos de chayote sanos y limpios, con madurez hortícola de corte de 18 ± 2 días post antesis, según lo establecido en la norma NMX-FF-047-SCFI-2003 (DOF, 2023). Los frutos presentaron un diámetro de 8–10 cm, longitud de 12–15 cm y un peso promedio de 250–300 g. Este lote fue independiente del muestreo poscosecha (420 frutos) y se obtuvo específicamente de una parcela con manejo fitosanitario óptimo, libre de síntomas visibles de enfermedad, ubicada en las coordenadas 18°49'56.55" N, 97°04'59.74" O, a 1182 msnm. Previo al ensayo de patogenicidad, los frutos fueron inspeccionados visualmente, lavados con agua potable, desinfectados con una solución de hipoclorito de sodio al 1.5 % durante 2 minutos, y enjuagados con agua destilada estéril. Posteriormente, fueron utilizados bajo condiciones controladas para realizar las pruebas de patogenicidad.

*Preparación de cultivos puros de *P. capsici**

Se disolvieron 20 g de agar-agar y 15 g de dextrosa, ambas MCD Lab®, en 1500 ml de agua, agitando 1 min para homogenizar. Se vertieron 10 ml de PDA caliente en cajas Petri estériles, enfriando dentro de la campana de flujo laminar LABCONCO®, cubriendo con sus respectivas tapas. Una vez gelificado el medio de cultivo, se realizaron las resiembras, recubriéndolas con papel aluminio calibre 18 para que queden en total oscuridad, a 22 ± 2 °C por 5 días.

Formación de Biomasa

Se lavaron 250 g de papa (*Solanum tuberosum*), cortando trozos de 4 ± 2 cm, se hirvieron en 1000 ml de agua destilada durante 45 min para obtener un caldo de papa en una parrilla Modelo: TSU-SP131325. El caldo se depositó en matraces Erlenmeyer, esterilizando a 121 °C y 20 lb/in² por 15 min en una autoclave vertical manual modelo EV-30. Se colocaron 50 ml del caldo nutritivo en un matraz Erlenmeyer de 125 ml, en la campana de flujo laminar LABCONCO®, para

mantener las condiciones estériles y dejar enfriar. Se realizó la siembra de los fitopatógenos en los matraces Erlenmeyer de 125 ml para obtener biomasa, posterior colocándolo en un agitador orbital Scorpion Scientific®, a 131.4 rpm, se trasvasó a tubos falcón de 50 ml para su almacenaje a un congelador horizontal Criotec® mod. CCT-10 a -20°C . por 7 días.

Extracción de ADN del Oomicete *P. capsici*

Se colocaron 0.25 g de micelio producto de los cultivos puros *in vitro* en microtubos de 1.5 mL con 500 μL de CTAB al 10 %, sumergiéndolo completamente la muestra. Se sometieron a ciclos de congelación en nitrógeno líquido y descongelación a 50°C por 30 min, seguido de vortexado e incubación a 65°C . Se agregaron 500 μL de cloroformo: alcohol isoamílico (24:1), se agitó suavemente y centrifugó a 9,000 rpm por 10 min, recuperando la fase acuosa. El ADN se precipitó con etanol absoluto o isopropanol frío, incubado a -20°C , centrifugado a 13,000 rpm y lavado con etanol al 70 %, secándose finalmente a temperatura ambiente $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Ivors y Forsyth, 2008).

Secuenciación del ADN del Oomicete *P. capsici*

Se emplearon 2 *Primers*: ITS5 5'(GGA AGT AAA AGT CGT AAC AAG G) 3' e ITS4 5'(TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC) 3' que se sintetizaron por la empresa T4Oligo con aproximadamente 50-100 ng de ADN plasmídico (doble cadena) como molde para la secuenciación de la PCR. Se realizó una búsqueda de similitud de secuencia utilizando GenBank BLASTN del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI) y se procedió a un análisis filogenético utilizando el software MEGA5.0.

Resultados y Discusión

Remisión de la enfermedad de síntomas de la enfermedad

La severidad de la enfermedad en los frutos se observó durante 7 días, los síntomas se presentaron en el día 2, aparición de una mancha de color negro-café, en la epidermis.

Días 3 – 5, pérdida de turgencia celular y pudrición con micelio blanquecino ramificado, con halo clorótico café al inicio del tejido sano, a una temperatura ambiental de 23 ± 2 dentro de una cámara húmeda el desarrollo del patógeno fue notable.

Día 6, los frutos testigo no presentaron síntoma de enfermedad, se comprobó que el agente causal del “Moho blanco” del chayote (*S. edule*), al inducir el típico desarrollo de la enfermedad del 100% en los frutos.

Día 7 se volvió a hacer el reaislamiento del micelio en cajas Petri con medio PDA, con lo que se reprodujeron las mismas características de la colonia original.

Patometría de frutos de chayote

Para determinar la severidad y daño de frutos, se formuló una Patometría (Lavilla *et al.*, 2021), (Figura 2), cuya clasificación de acuerdo al nivel de severidad, es:

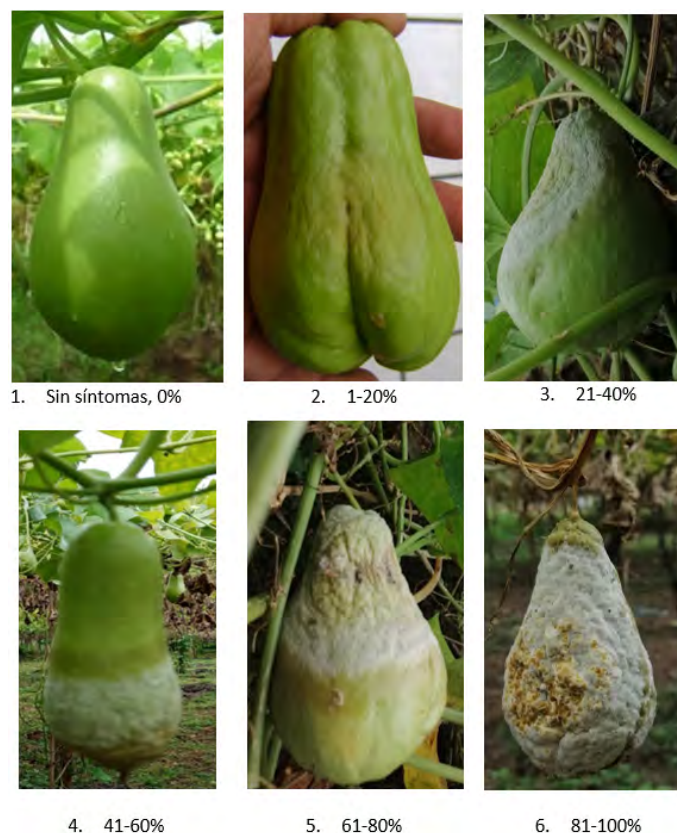


Figura 2. Patometría de frutos de chayote 2023. Escala visual para evaluar la severidad y daños de *Phytophthora* spp.

1. Sin síntomas, totalmente sano y limpio;
2. Inicia la infección por medio de una mancha clorótica, del 1-20% del daño del fruto;
3. Se presentan el micelio blanquecino en donde hay mayor actividad biotrófica del 21-40% de daño;
4. Presencia de micelio hialino y afectación entre el 41% y 60% de la superficie del fruto;
5. Micelio, y actividad necrotrófica con 61-80% de daño;
6. Fruto totalmente recubierto de micelio hialino en estado de descomposición total.

Medidas morfométricas de esporangios

El fitopatógeno del género *Phytophthora*, presenta esporangios papilados, ovoides y redondeados (Figura 3 a), algunos asimétricos con las siguientes medidas: Largo de $21.73 \text{ ES} \pm 0.79 \mu\text{m}$ y ancho $11.31 \text{ ES} \pm 0.26 \mu\text{m}$ (Figura 3 b).

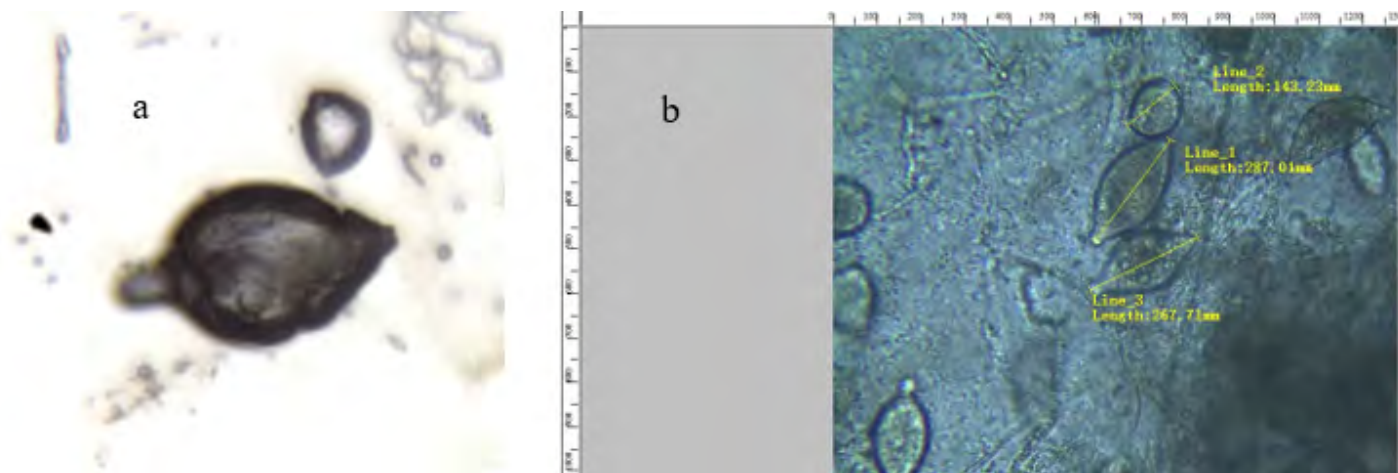


Figura 3. Fitopatógeno del género *Phytophthora* (a) Esporangio de *Phytophthora* con papila y (b) medidas longitudinales de esporangios.

Descripción de *Phytophthora capsici* por morfología clásica

La Figura 4 muestra las métricas morfológicas de esporangios aislados en siete localidades del municipio de Ixtaczoquitlán, con el propósito de confirmar la presencia del fitopatógeno que está generando afectaciones en huertas de chayote. Esta caracterización no solo permite verificar la identidad del agente causal, sino que es fundamental para comprender su distribución morfológica y posibles adaptaciones locales. En las localidades 1, 3, 5 y 7, los esporangios presentan formas elipsoides, globosas y simétricas (Abad *et al.*, 2023); en contraste, en las localidades 2 y 6 se observan estructuras con formas irregulares, lo que podría reflejar variabilidad intraespecífica. Esta información es de suma relevancia para definir estrategias de manejo fitosanitario más precisas, ya sea mediante el uso de productos convencionales (agroquímicos) ya que estos generan cáncer en jornaleros agrícolas (Ordoñez-Beltrán *et al.*, 2019) o bien, integrando alternativas orgánicas, especialmente en la etapa de postcosecha (Cota, 2021), donde se reportan las mayores mermas económicas en campo.

El promedio de tamaño de estructuras fue: Largo de $21.73 \text{ ES} \pm 0.79 \mu\text{m}$ y ancho $11.31 \text{ ES} \pm 0.26 \mu\text{m}$, proporción largo/ancho $1.92 \mu\text{m}$. Las estructuras y formas de los fitopatógenos concuerdan con las descripciones de los autores, que han estudiado previamente a la enfermedad. Para la identificación se utilizaron las claves morfológicas de Erwin y Ribeiro (1996) e Abad *et al.* (2023), del género *Phytophthora capsici* Leonian, en la descripción morfométrica de los esporangios resulta lo siguiente: Simétrico, alimonado, papilado, elipsoide, algunos globosos, simétricos y asimétricos, en menor cantidad amorfos, que coincide con lo reportado en chayote como causante de la "Marchitez" en frutos de chayote (*S. edule*) en Coscomatepec y Huatusco Ver., por: Olguín *et al.*, (2013) y Andrade-Luna *et al.*, (2017).

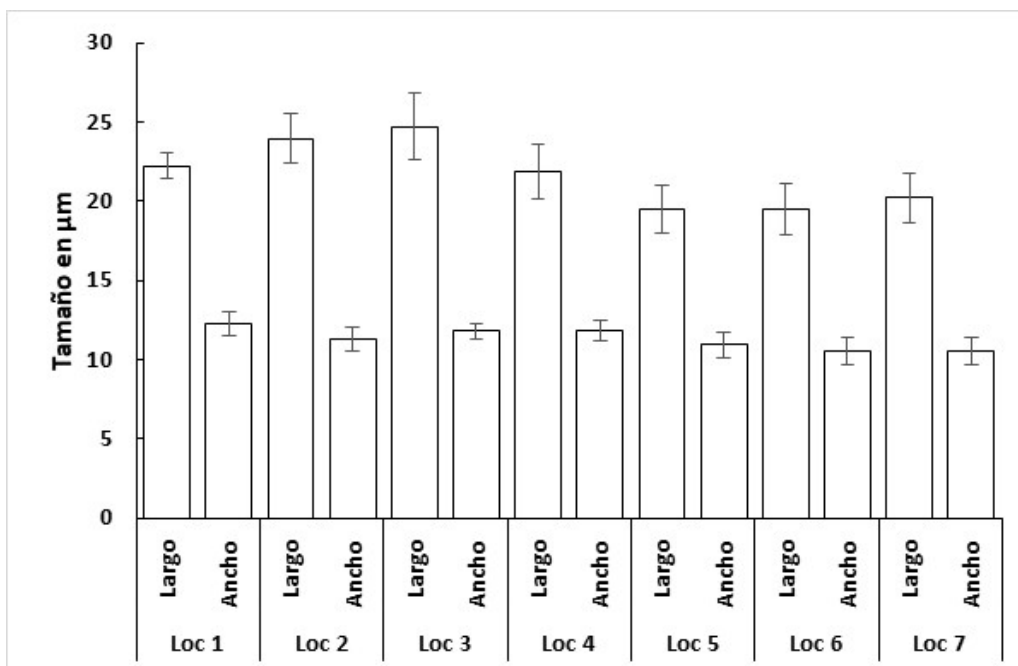


Figura 4. Gráfica de tamaños de esporangios por localidad.

Patogénesis

Una vez realizada la inoculación del fitopatógeno *P. capsici* en frutos de chayote, se llevó a cabo una prueba de patogenicidad; con el objetivo de evaluar la agresividad y verificar los postulados de Koch. Para ello, se utilizaron tres frutos por localidad, en los cuales se realizaron inoculaciones dirigidas en la zona del radio y la punta del fruto, empleando una cepa aislada específica de cada localidad. Además, se incluyó un fruto testigo (Totalmente sano) por localidad, que no fue inoculado, manteniéndose bajo las mismas condiciones de desarrollo de la enfermedad. En total se utilizaron 28 frutos (cuatro por cada una de las siete localidades evaluadas).

El fruto inoculado (Figura 5 a) presentaba inicialmente un nivel de severidad 1 según la escala patométrica de la Figura 1, expresándose su máxima infección al cuarto día, los más virulentos prosperaron a un nivel 5 al sexto día (Figura 5 b). Las cepas de *P. capsici* provenientes de las siete huertas mostraron un comportamiento patogénico progresivo y constante, lo que permitió confirmar la relación causal del microorganismo con los síntomas observados y se validaron los postulados de Koch bajo condiciones experimentales controladas.

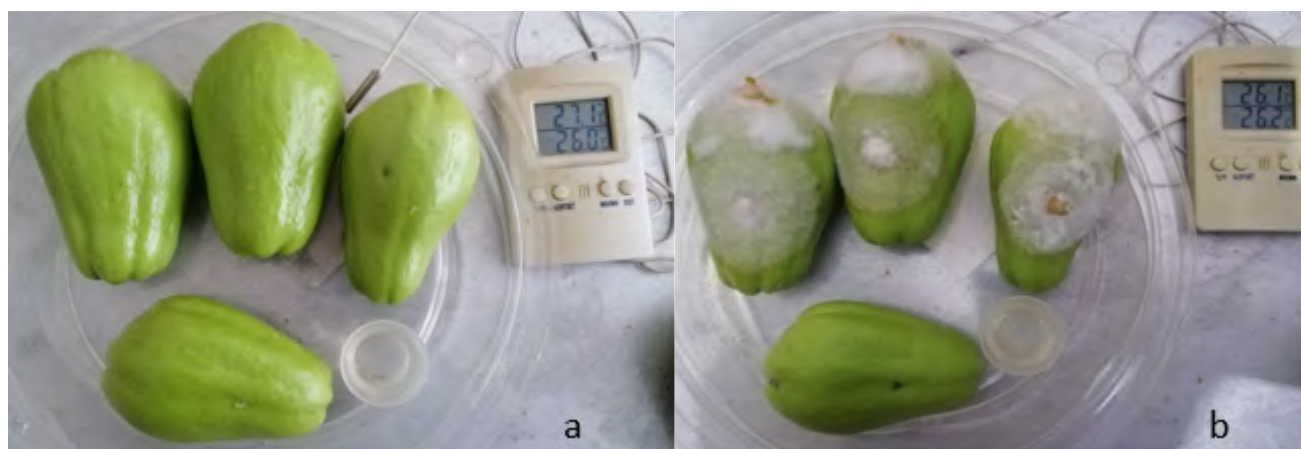


Figura 5. (a) frutos sanos inoculados con esporangios de *Phytophthora capsici* (b) frutos con 6 días de inoculación.

Se realizó un ANOVA de un solo factor en el programa, los datos obtenidos se procesaron en Minitab, LLC. (2018). Los resultados del análisis de comparación de medias utilizando el método LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95 % como se muestra en la Figura 6, mostrándose tres grupos significativamente diferentes.

Grupo A: Incluye los fitopatógenos *Ph 2*, *Ph 1*, *Ph 3*, y *Ph 5*, con medias que oscilan entre 3.167 y 3.625. Estos patógenos en su crecimiento no presentan diferencias significativas entre sí.

Grupo B: Comprende los fitopatógenos *Ph 7*, *Ph 4*, y *Ph 6*, con medias entre 1.750 y 2.0417. Aunque están separados del grupo A, entre ellos no se detectan diferencias significativas.

Grupo C: Representado únicamente por el testigo, con una media de 0.000, significativamente diferente de todos los demás grupos.

A partir del análisis de varianza (ANOVA), se identificó un grupo de cepas fitopatógenas con mayor nivel de agresividad en el crecimiento y poder de infección, clasificadas dentro del Grupo A, el cual comprende las cepas *Ph 2*, *Ph 1*, *Ph 3* y *Ph 5*, cuyas medias de severidad oscilaron entre 3.167 y 3.625 sin diferencias estadísticas significativas entre ellas. Dentro de este grupo, se seleccionó la cepa más virulenta (*Ph 1*) como representativa para continuar con las pruebas posteriores, dado su capacidad para desarrollar la enfermedad en frutos de chayote.

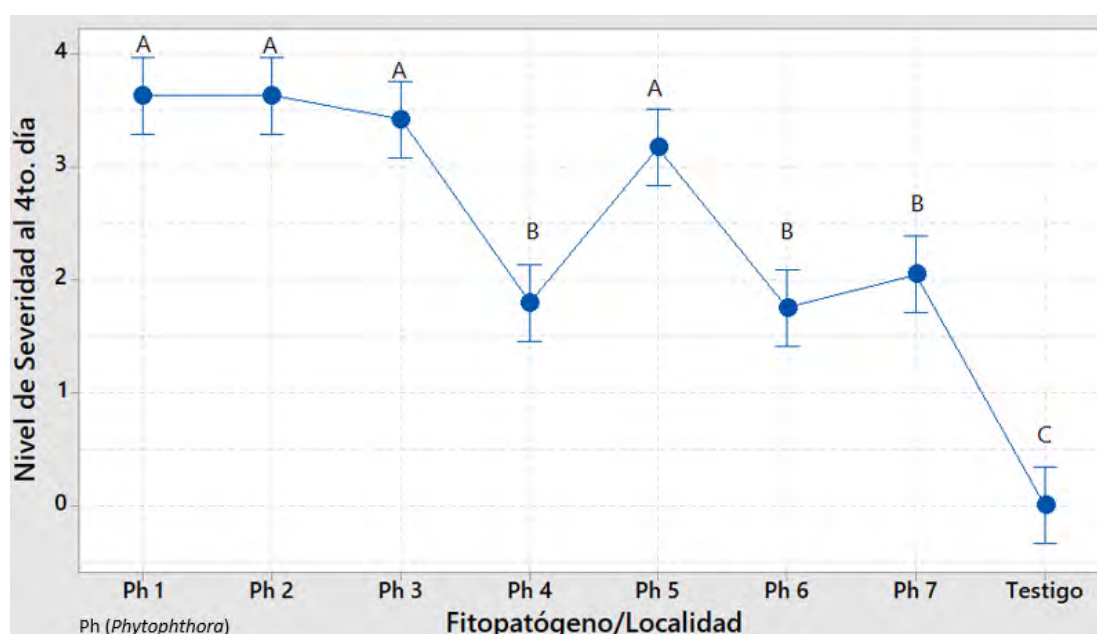


Figura 6. Comparación de medias por el método Tukey 95%.

Caracterización por Biología Molecular

La secuencia FASTA, fue alineada y comparada en la base de datos del *GenBank*, empleando el Blast NCBI, (2024) confirmando así la identidad del fitopatógeno con una cobertura de 99.75% (Tabla 2) de secuencia de nucleótidos, RID: 8MZ49CW0013, Query: lcl|Query_8288289.

Se identificó el género *Phytophthora*, especie: *capsici* Leonian, identificado como agente causal del “*Moho Blanco*” en frutos cosechados de *Sechium edule* (Jacq.) Sw. en la localidad de San Pablo (Ph 1), Loc. Cuautlapan Ixtaczoquitlán, Veracruz, coincidiendo con lo documentado por el GISem (2008; 2011a; 2011b) para las zonas productoras de Huatusco, Coscomatepec y Tuxpanguillo, así como por Olguín *et al.* (2013) y Andrade-Luna *et al.* (2017) en estudios realizados en Huatusco y Coscomatepec, Veracruz.

Tabla 2. PRIMERS usados y resultado de la secuenciación del Oomicete.

Nombre del cebador de secuenciación Secuencia del cebador						Nombre del cebador de PCR Secuencia del cebador			
ITS5 5' (GGA AGT AAA AGT CGT AAC AAG G) 3'						ITS5 5' (GGA AGT AAA AGT CGT AAC AAG G) 3'			
ITS4 5' (TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC) 3'						ITS4 5' (TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC) 3'			

Sujeto						Puntaje		Identidades	
Accesión	Descripción	Longitud	Inicio	Fin	Cobertura	Puntaje en Bits	Valor esperado	Total	Porcentaje
PV248646.1	Clase: <i>Oomycete</i>	1091	50	940	99.75	805	0.0	809/811	99.75

Reino	Familia	Género	Especie
Protista	Peronosporaceae	<i>Phytophthora</i>	<i>capsici</i> Leonian

Conclusiones

Se confirmó la presencia de *Phytophthora capsici* como agente causal del “Moho blanco” en frutos de *S. edule* en siete localidades del municipio de Ixtaczoquitlán, Veracruz. Las pruebas de patogenicidad demostraron alta severidad en los aislamientos provenientes de las localidades 1, 2, 3 y 5. El aislamiento Ph1, fue seleccionado para su caracterización molecular, al presentar mayor virulencia y velocidad de crecimiento en condiciones reproducibles. Los resultados permiten establecer una base para el diagnóstico oportuno del patógeno y el diseño de estrategias integradas de manejo postcosecha.

Esta investigación, permite establecer diferencia frente a otros Oomicetes, sentando la base a futuras investigaciones sobre variantes locales, resistencia genética en chayote, trabajos Interinstitucionales, y el desarrollo de bioinsumos específicos de origen orgánico, al identificar los fitopatógenos aislados más virulentos, se fortalece no solo el valor científico, sino que permitirá reducir costos económicos al implementar estrategias de control fitosanitario y evitar acciones ineficaces.

Bibliografía

- Abad, Z.G., Burgess, T.I., Redford, A.J., Bienapfl, J.C. (2023) IDphy: Molecular and morphological identification of *Phytophthora* based on the types. <https://idtools.org/phytophthora/>
- Álvarez, L. A. S., Robles, L. E. L., y Hernández, F. G. (2022). Manejo tradicional de enfermedades del agroecosistema chayote (*Sechium edule* Jacq. Sw.) de traspaso en Chiapas, México. *Magna Scientia UCEVA*, 2(2), 252-259. <https://doi.org/10.54502/msuceva.v2n2a10>
- Andrade-Luna, M. I., Espinosa-Victoria, D., Gómez-Rodríguez, O., Cadena-Iñiguez, J., Arévalo-Galarza, M. D. L., Trejo-Téllez, L. I., & Delgadillo-Martínez, J. (2017). Severity of a *Phytophthora capsici* isolate in chayote *Sechium edule* plants at growth chamber level. *Revista mexicana de fitopatología*, 35(1), 40-57. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1607-3>
- Cadena-Iñiguez, J. (2010). El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw., importante recurso fitogenético mesoamericano. *Agro Productividad*, 3(2). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/589>
- Cadena, I. J. (2005). Caracterización morfoestructural, fisiológica, química y genética de diferentes tipos de chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.). Tesis Doctoral Montecillo, Texcoco Edo. De México. Ed. Colegio de Postgraduados. 9-12 http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/3116/1/F1iguez_Luna_MI_MC_IMRN_2017.pdf.pdf?sequence=1
- Chávez, D. I. F. (2016). Expresión de respuestas de defensa en chile jalapeño inoculado con agentes de control biológico de *Phytophthora capsici* Leo. tesis doctoral Montecillo, Texcoco Edo. De México. Ed. Colegio de Postgraduados. 4-7 <http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/3676>
- Cota Ungson, D. (2021). Actividad biológica de extractos vegetales para el control de fusarium solani, *Rhizoctonia solani* y *Phytophthora capsici* en cultivo de chile. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. <https://repositorio.uaaan.mx/handle/123456789/47826>
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2023) <https://www.dof.gob.mx/#gsc.tab=0>

- Erwin, D. C. & Ribeiro, O. K. (1996). *Phytophthora*: A global perspective. United Kingdom CPI Group (UK) Ltd, Croydon, CR0 4 YY. 4 p. 96 Ed- FSC. ISBN 978-1-78064-093-8 (alk. Paper).
- Google Earth Pro. (2023) <https://earth.google.com/web/?hl=es-419>
- Grupo Interdisciplinario *Sechium edule* México [GISEM]. (2008). Identificación de enfermedades postcosecha en frutos de Chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) Texcoco Estado de México, Colegio de Posgraduados, 13. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/231857/El_chayote_volumen_1.pdf
- Grupo Interdisciplinario *Sechium edule* México [GISEM]. (2011a). Hongos asociados a síntomas de enfermedades en Chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) y estrategias de manejo. Montecillo, Estado de México Ed. Colegio de post graduados México 16-23 https://www.colpos.mx/wb_pdf/Agroproductividad/2011/AGROPRODUCTIVIDAD_III_2011.pdf
- Grupo Interdisciplinario *Sechium edule* México [GISEM]. (2011b). Volumen 3: El Chayote Manejo Postcosecha Rescatando y Aprovechando los Recursos Filogenéticos de Mesoamérica. México, Ed. Colegio de Postgraduados y GISEM 6-26 https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/231852/El_chayote_volumen_3.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2021) <https://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas [INPI]. (2022). Catálogo de municipios de alta y muy alta marginación de Veracruz. <https://www.gob.mx/bienestar/documentos/catalogo-de-localidades-indigenas-a-y-b-2020>
- Ivors, K. L., and Forsyth, C. J. (2008). CTAB extraction protocol for *Phytophthora* species. En *Laboratory Protocols for Phytophthora Species* (pp. 35–42). American Phytopathological Society. <https://doi.org/10.1094/9780890544969.06.03.1>
- Lavilla, M., Ivancovich, A., y Paleo, A. D. (2021). Evaluación del tizón foliar y la mancha púrpura en semilla de soja en Argentina. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 619-628. <https://rayenlab.com.ar/wp-content/uploads/2020/01/Boletin-Digital-17-FITOPATOLOGIA.pdf>
- National Center for Biotechnology Information [Blast NCBI]. (2024) <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>
- NMX-FF-047-SCFI-2003 (NORMA Oficial Mexicana, 2003) Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-hortaliza fresca-chayote (*sechium edule*)-especificaciones (cancela a la NMX-FF-047-1996-SCFI). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=695888&fecha=22/05/2003#gsc.tab=0
- NOM-210-SSAI-2014 (NORMA Oficial Mexicana, 2014) Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5398468&fecha=26/06/2015#gsc.tab=0
- Olguín, H. G., Valdovinos, P. G., Cadena, I., J., Arévalo, G. M. (2013). Etiología de la marchitez de plantas de chayote (*Sechium edule*) en el Estado de Veracruz. *Revista mexicana de fitopatología*, 31(2), 161-169. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092013000200007#:~:text=Con%20base%20en%20las%20pruebas,centro%20del%20estado%20de%20Veracruz.
- Ordoñez-Beltrán, V., Frías-Moreno, M. N., Parra-Acosta, H., Martínez-Tapia, M. E. (2019). Estudio sobre el uso de plaguicidas y su posible relación con daños a la salud. *Revista de Toxicología*, ISSN: 0212-7113 ISSN: 1697-0748 36(2), 148-153. <https://www.redalyc.org/journal/919/91967023011/91967023011.pdf>
- Sanogo, S., Lamour, K., Kousik, C. S., Lozada, D. N., Parada-Rojas, C. H., Quesada-Ocampo, L. M., ... & Miller, S. A. (2023). *Phytophthora capsici*, 100 years later: Research mile markers from 1922 to 2022. *Phytopathology*, 113(6), 921-930. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-22-0297-RVW>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2019). *EL CHAYOTE* http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenDelegacion.do
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [SENASICA]. (2022) <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/programa-de-sanidad-e-inocuidad-agroalimentaria-194083>
- Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura [SINAREFI]. (2011) https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/168845/El_Chayote_Volumen_2.pdf
- T4Oligo [T4Oligo]. (2023). *Información institucional* [Página web]. <https://t4oligo.com/t4oligo.com/pages/nosotros.html>
- Velázquez, J. N., Del Ángel, P. A. L., Megchún, G. J. V., Ramírez, H. E., Hernández, E. C. A., Meneses, M. I. (2021). Caracterización del cultivo de chayote (*Sechium edule* Jacq) (Swartz) en la zona de Altas Montañas del estado de Veracruz. *RINDERESU*, 5(1). <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/52>

Biodegradar para No Contaminar: El Futuro de los Plásticos

Zeltzin Danae Ruvalcaba-Aroche *, Isabel de la Luz Membrillo-Venegas, Gastón Martínez-de Jesús y Hugo Beatriz-Cuellar

Tecnológico Nacional de México: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Ecatepec, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: 202422230@tese.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de junio de 2025 Aceptado: 19 de julio de 2025 Publicado: 9 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.478>

Resumen: Hoy en día, la producción y acumulación de plásticos a nivel mundial constituye un problema ambiental de gran relevancia, con impactos negativos tanto en la salud humana como en los ecosistemas marinos. Además, la eliminación de los plásticos genera químicos tóxicos y microplásticos, entre otros efectos negativos. Por ello, este artículo de divulgación científica describe los principales tipos, características y aplicaciones de los plásticos más utilizados en la actualidad, los métodos tradicionales para su eliminación, y los aspectos más relevantes de la biodegradación de plásticos. En este contexto, un proceso de biodegradación de plásticos es un método prometedor mediante el cual hongos, bacterias o microalgas descomponen el plástico, transformándolo en sustancias más simples y menos perjudiciales para el medio ambiente. Finalmente, investigar nuevas metodologías para la degradación o eliminación de plásticos, que generen la menor cantidad posible de productos nocivos y contribuyan a reducir los niveles de contaminación, es fundamental para avanzar hacia una industria más sustentable y respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: biodegradación; plástico; microorganismos; contaminación; medio ambiente

Introducción

Actualmente, se producen a nivel mundial más de 400 millones de toneladas de plástico cada año (Maitlo *et al.*, 2022). Esto se debe a las diferentes propiedades del plástico, tales como durabilidad, resistencia, aislamiento eléctrico, baja conductividad térmica, peso ligero y bajo costo, así como a su amplia gama de aplicaciones en sectores como la salud, la vivienda, la construcción, la vestimenta, el transporte y el embalaje. Sin embargo, la producción y el uso de plásticos generan una serie de impactos negativos para el medio ambiente, entre ellos la contaminación del aire, daños a diversas especies marinas, emisiones de gases de efecto invernadero, microplásticos, acumulación en suelos y océanos, y riesgos para la salud humana. Adicionalmente, los plásticos pueden permanecer en el medio ambiente durante cientos o incluso miles de años, ya que no están diseñados para degradarse ni reciclarse fácilmente (Horton, 2022). Otra problemática importante relacionada con los plásticos es la presencia o formación de microplásticos, que son partículas de plástico de menos de 5 milímetros (Wei *et al.*, 2024). Estos pueden generarse a partir de la degradación de objetos plásticos más grandes (por ejemplo, botellas, bolsas o prendas de ropa sintética) y tienen el potencial de causar efectos nocivos en la salud humana, en los animales y en el medio ambiente (Bahl *et al.*, 2021; Amobonye *et al.*, 2021; Temporiti *et al.*, 2022).

Por otro lado, la eliminación de plásticos se lleva a cabo mediante su disposición final en vertederos, la incineración para la recuperación energética (eléctrica o térmica), el reciclaje mecánico o térmico, la degradación química o térmica, entre otros métodos. No obstante, estas prácticas pueden generar la acumulación de metales pesados en los ecosistemas, implican altos costos operativos, no eliminan completamente los plásticos, y requieren grandes cantidades de energía (Goel *et al.*, 2021). Por esta razón, es fundamental investigar, proponer e innovar nuevas metodologías para la eliminación y/o degradación de plásticos que contribuyan a reducir los niveles de contaminación del planeta, y que, a su vez, no generen residuos tóxicos que causen problemas en el medio ambiente. Además, dichos métodos deben tener un impacto mínimo en el medio ambiente, es decir, no deben generar productos finales nocivos o tóxicos. En este contexto, este artículo de divulgación científica describe las características de la biodegradación de plásticos, un proceso que emplea bacterias, hongos o microalgas para descomponer estos materiales y que genera compuestos finales menos tóxicos que los métodos convencionales (vertederos, incineración, etc.) (Andler *et al.*, 2022; Choe *et al.*, 2021); (Srikanth *et al.*, 2022). También, la biodegradación ayuda a disminuir la contaminación ambiental, tiene un menor impacto en los ecosistemas y no requiere el uso de productos químicos tóxicos. Asimismo, se abordan los principales factores que intervienen e influyen en el proceso de biodegradación de plásticos. También se mencionan los tipos de plásticos más utilizados en las actividades humanas, sus propiedades más relevantes, las problemáticas que generan, y los métodos empleados para su eliminación, entre otros aspectos.

Desarrollo

Actualmente, existe una gran variedad de plásticos; sin embargo, los más utilizados son el polietileno de alta densidad, el polietileno de baja densidad, el tereftalato de polietileno y el cloruro de polivinilo. Esto se debe a su bajo costo de producción, versatilidad de propiedades, amplia disponibilidad de materias primas, entre otros factores (Millican & Agarwal, 2021; Shams *et al.*, 2021). La Tabla 1 presenta las principales características de estos plásticos. Por otro lado, únicamente el 9 % de la producción anual de plásticos se recicla, lo cual resulta ineficaz para contrarrestar el impacto ambiental de su producción. En este sentido, los plásticos mencionados anteriormente pueden reciclarse para su recuperación y reutilizarse en la fabricación de nuevos productos. Sin embargo, las opciones de reciclaje suelen ser complejas, costosas y, en algunos casos, pueden generar contaminación. Además, cada tipo de plástico posee propiedades distintas, por lo que es necesario analizar sus características para determinar el enfoque adecuado para su reciclado (Singh & Walker, 2024; Shen & Worrell, 2024). También es importante considerar los problemas ambientales asociados al reciclaje, ya que el reciclado repetido de los plásticos puede alterar sus propiedades mecánicas, lo que limita o incluso impide su reutilización en ciertos casos (Zeenat *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2023; Kotova *et al.*, 2021).

Tabla 1. Características principales de los plásticos más utilizados en la actualidad.

Plástico	Propiedades	Aplicación	Contaminación
Polietileno de alta densidad	Resistencia química	Botellas	Desechos domiciliarios
	Resistencia térmica	Bolsas resistentes	Contaminación de suelos y aguas
	Resistencia al impacto	Tuberías	Daño a la fauna
	Ligero	Productos para el hogar	Liberación de sustancias tóxicas
Polietileno de baja densidad	Resistente al agua	Bolsas y empaques flexibles	Contaminación visual
	Resistencia química	Envases y contenedores	Microplásticos
	Flexibilidad y ligereza	Películas adhesivas	Daños a la fauna
	Resistencia a impactos		Contaminación por incineración
Cloruro de polivinilo	Resistencia química	Empaque y embalaje	Emisiones de compuestos tóxicos
	Durabilidad	Tuberías y conexiones	Liberación de gases tóxicos
	Aislante eléctrico	Aislamiento de cables	Acumulación en vertederos
	Económico	Elementos de automóviles	Microplásticos
Tereftalato de polietileno	Resistencia mecánica	Botellas de agua	Microplásticos
	Ligero	Envases de alimentos	Daño a la fauna
	Resistencia química	Ropa	Acumulación masiva
	Flexible		Liberación de químicos tóxicos

Otros métodos para la eliminación de plásticos son la incineración y colocación en vertederos (Nayanathara Thathsarani Pilapitiya & Ratnayake, 2024; Pathak *et al.*, 2023). En este contexto, la colocación de plásticos en vertederos requiere mucho espacio, genera contaminación ambiental debido a que los plásticos tardan cientos o incluso miles de años en degradarse, puede afectar a la flora y la fauna, y liberar gases tóxicos. Mientras que la incineración o quema de plásticos se puede utilizar para obtener energía térmica o eléctrica para su uso en diferentes aplicaciones; no obstante, se produce la liberación de gases tóxicos, se requiere infraestructura especializada para controlar la temperatura, tratar los gases y manejar la ceniza. Además, la incineración de plásticos tiene un elevado costo, especialmente por la instalación y los sistemas de control ambiental necesarios. En consecuencia, los métodos tradicionales como los vertederos, la incineración y el reciclaje han sido útiles para manejar grandes cantidades de residuos plásticos, pero no son soluciones perfectas debido a las diferentes consecuencias que conlleva su utilización (Manzoor *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

Otro problema asociado al uso y la eliminación de plásticos es la generación de microplásticos, los cuales se originan por la fragmentación de plásticos de mayor tamaño. Estos pueden provocar diversos efectos negativos, como alteraciones hormonales y daños al sistema inmunológico en los seres humanos; deterioro de suelos y cultivos,

incluyendo la pérdida de fertilidad y cambios en la estructura del suelo; así como impactos severos en la vida marina, como bloqueos intestinales, desnutrición e incluso la muerte de organismos (Stoett *et al.*, 2024; Cássio *et al.*, 2022; Maquart *et al.*, 2022).

Degradación de plásticos

Actualmente, es fundamental buscar y desarrollar opciones más sostenibles y amigables con el medio ambiente para reducir o eliminar el uso de plásticos. En este sentido, la degradación abiótica y la degradación biótica son procesos mediante los cuales los plásticos se descomponen en componentes más simples, a través de cambios en sus propiedades físicas y químicas. Estos procesos pueden considerarse métodos naturales: la degradación abiótica ocurre por acción de factores como la luz, la temperatura, el aire, el agua y las fuerzas mecánicas, mientras que la degradación biótica se lleva a cabo mediante la acción de microorganismos como bacterias, hongos o algas. La Figura 1 muestra un diagrama esquemático que describes los procesos comúnmente usados para la degradación de plásticos. La degradación abiótica produce cambios en la composición química, la textura, y las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los plásticos. Dentro de este tipo de degradación, se pueden emplear distintos procesos, como la degradación térmica, que implica la descomposición de los plásticos debido a su exposición a temperaturas elevadas; la degradación química, que ocurre cuando los plásticos entran en contacto con contaminantes atmosféricos como el ozono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles; y la degradación mecánica, que se produce por la acción de fuerzas externas, como la abrasión provocada por rocas y arena, el viento o el movimiento de las olas del mar. Los resultados de la degradación abiótica incluyen cambios en la apariencia y la textura de los plásticos; es decir, pueden observarse alteraciones en el color, el brillo, la amarillez, entre otros aspectos. Asimismo, las propiedades fisicoquímicas, como la cristalinidad, las propiedades térmicas y las propiedades superficiales, pueden modificarse durante el proceso de degradación. La caracterización del grado de degradación provocado por los distintos métodos abióticos puede realizarse mediante instrumentos como colorímetros, espectrofotómetros, brillómetros y medidores de opacidad (Tantawi *et al.*, 2025). Por otra parte, la degradación biótica de plásticos es el proceso por el cual organismos vivos descomponen o modifican los plásticos. Sin embargo, no siempre significa que el plástico desaparezca por completo. A veces solo se rompe en pedazos más pequeños o cambia su composición.

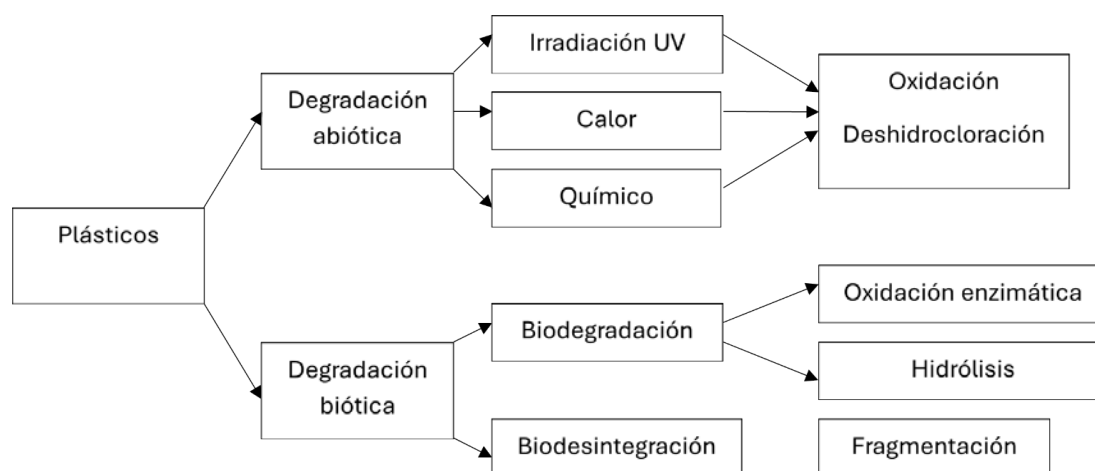


Figura 1. Procesos involucrados en la degradación de los plásticos.

Biodegradación de plásticos

La biodegradación es un proceso específico dentro de la degradación biótica que implica el uso de plásticos como sustrato para el crecimiento y desarrollo de microorganismos (hongos, bacterias o microalgas) y, en consecuencia, la descomposición de los plásticos en productos más simples para el medio ambiente, como CO₂, agua y biomasa (Puja Asiandu *et al.*, 2020; Lv *et al.*, 2024; Tania & Anand, 2025). La Figura 2 muestra una representación gráfica de la biodegradación de plásticos por la acción de microorganismos.

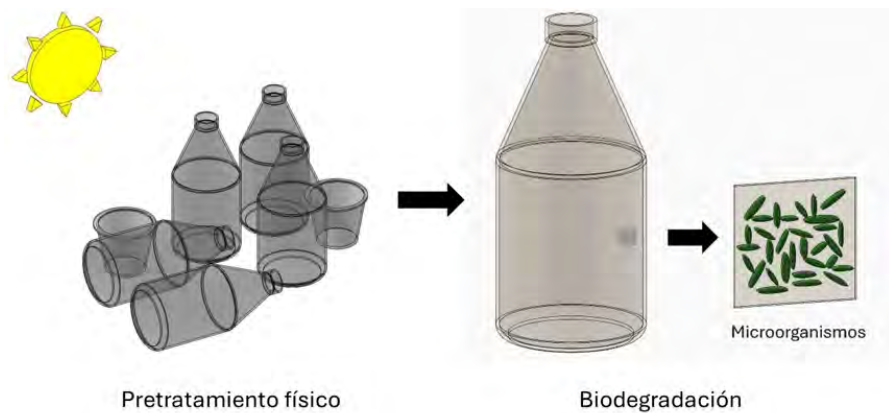


Figura 2. Representación gráfica de la biodegradación de plásticos.

Dentro de la biodegradación, los hongos son los microorganismos más utilizados para este proceso debido a sus propiedades. Por ejemplo, secretan enzimas que degradan materiales complejos, pueden adaptarse a diversos ambientes (como baja humedad o escasa disponibilidad de nutrientes), son capaces de penetrar materiales sólidos gracias a su micelio y producen compuestos finales menos tóxicos en comparación con los métodos tradicionales para la degradación de plásticos. Las enzimas más utilizadas para la degradación de plástico son cutinasas, lipasas, proteasas, lacasas, y peroxidasas (Cai *et al.*, 2023). Por otro lado, algunos plásticos son muy complejos para degradar únicamente por la acción de microorganismos. Por esta razón, se realizan pretratamientos físicos a los plásticos para mejorar el proceso de biodegradación. Algunos ejemplos de pretratamientos físicos son la radiación ultravioleta, la termo-oxidación, la trituración, entre otros (Ciuffi *et al.*, 2024). El objetivo principal de un pretratamiento físico es causar degradación, cambios de color, agrietamiento y reducción de las propiedades mecánicas de los plásticos. Esto facilita la adhesión y colonización de los microorganismos en la superficie de los plásticos, entre otros efectos beneficiosos. La Tabla 2 muestra las características de la biodegradación de plásticos mencionados en la Tabla 1 (Ekanayaka *et al.*, 2022; Evode *et al.*, 2021). Adicionalmente, medir la eficiencia de la biodegradación de plásticos mediante microorganismos implica evaluar qué tan bien y qué tan rápido estos pueden descomponer el plástico. Para ello, se pueden considerar distintos métodos, como medir el peso del plástico antes y después de la degradación, realizar análisis microscópicos de su superficie, cuantificar la cantidad de dióxido de carbono liberado, evaluar el crecimiento microbiano y analizar las propiedades fisicoquímicas del plástico, entre otros (Zhang *et al.*, 2021; Ali *et al.*, 2021; Matjašič *et al.*, 2021; Crystal Thew *et al.*, 2024; Mat Yasin *et al.*, 2022).

Tabla 2. Microorganismos utilizados para la degradación de plástico.

Tipo de plástico	Microorganismo	Enzimas	Pretratamiento
Poliétileno de alta densidad	<i>Aspergillus niger</i>	Lacasas	Irradiación UV
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	Peroxidasas	Termo oxidación
	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lipasas	Radiación ionizante
Poliétileno de baja densidad	<i>Aspergillus niger</i>	Lacasa	Irradiación UV
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	Manganeso peroxidasa	Termo oxidación
	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lignina peroxidasa	Radiación ionizante
Cloruro de polivinilo	<i>Fusarium solani</i>	Cutinasas	
	<i>Aspergillus niger</i>	Lacasas	Irradiación UV
	<i>Aspergillus flavus</i>	Lignina peroxidasa	Termo oxidación
Tereftalato de polietileno	<i>Cochliobolus sp.</i>	Manganeso peroxidasa	Radiación ionizante
	<i>Streptomyces scabies</i>	Cutinasas	
	<i>Streptomyces sp.</i>	Lipasas	Irradiación UV
	<i>Fusarium oxysporum</i>	Poliesterasas	Radiación ionizante
	<i>Aspergillus oryzae</i>		
	<i>Penicillium citrinum</i>		

Conclusiones

Los residuos plásticos constituyen un problema ambiental cada vez más urgente, lo que ha provocado que los investigadores se centren en el uso de microorganismos para su biodegradación. En este contexto, el uso de diferentes microorganismos como herramientas de biorremediación se estudia cada vez más. Por esto, este artículo de divulgación científica describe los aspectos más relevantes de la biodegradación de plásticos, tales como las propiedades de diferentes tipos de plásticos, los tipos de microorganismos más utilizados para la degradación y los principales factores que intervienen en este proceso. Además, se describen las diferentes problemáticas debidas al proceso de reciclado y al uso de los métodos tradicionales para la degradación de plásticos. En este sentido, la biodegradación es un proceso que contribuye a la reducción de la contaminación ambiental, produce una menor emisión de gases tóxicos, y reduce el impacto sobre la fauna provocado por la acumulación de microplásticos en el mar. Actualmente, la biodegradación de plásticos se lleva a cabo principalmente en instalaciones controladas, donde se estudian diferentes tipos de microorganismos, así como la eficiencia del proceso. No obstante, se busca extender su aplicación a ambientes naturales como lagos, suelos, océanos, ríos y vertederos, donde la acción microbiana pueda acelerar la descomposición de los plásticos y contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas y los animales afectados por esta problemática. Como sociedad, debemos apoyar este tipo de soluciones innovadoras y al mismo tiempo reducir nuestro consumo de plásticos, entendiendo que la tecnología sola no basta; el compromiso individual y colectivo es fundamental para proteger nuestro planeta.

Agradecimientos y financiamiento: Zeltzin Danae Ruvalcaba Aroche (CVU: 1059308, No. Apoyo: 4049885) y Hugo Beatriz Cuellar (CVU: 1007017) agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada.

Bibliografía

- Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A.-G., Koutra, E., Metwally, M. A., Kornaros, M., & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *Science of The Total Environment*, 780, 146590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2021). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of The Total Environment*, 759, 143536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>
- Andler, R., Tiso, T., Blank, L., Andreeßen, C., Zampolli, J., D'Afonseca, V., Guajardo, C., & Díaz-Barrera, A. (2022). Current progress on the biodegradation of synthetic plastics: from fundamentals to biotechnological applications. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21(4), 829–850. <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09631-2>
- Bahl, S., Dolma, J., Jyot Singh, J., & Sehgal, S. (2021). Biodegradation of plastics: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, 39, 31–34. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096>
- Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., Gong, H., & Yan, M. (2023). Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. *Microorganisms*, 11(7), 1661. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>
- Cássio, F., Batista, D., & Pradhan, A. (2022). Plastic Interactions with Pollutants and Consequences to Aquatic Ecosystems: What We Know and What We Do Not Know. *Biomolecules*, 12(6), 798. <https://doi.org/10.3390/biom12060798>
- Choe, S., Kim, Y., Won, Y., & Myung, J. (2021). Bridging Three Gaps in Biodegradable Plastics: Misconceptions and Truths About Biodegradation. *Frontiers in Chemistry*, 9, 671750. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.671750>
- Ciuffi, B., Frattini, E., & Rosi, L. (2024). Plastic pretreatment: The key for efficient enzymatic and biodegradation processes. *Polymer Degradation and Stability*, 222, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110698>
- Crystal Thew, X. E., Lo, S. C., Ramanan, R. N., Tey, B. T., Huy, N. D., & Chien Wei, O. (2024). Enhancing plastic biodegradation process: strategies and opportunities. *Critical Reviews in Biotechnology*, 44(3), 477–494. <https://doi.org/10.1080/07388551.2023.2170861>
- Ekanayaka, A. H., Tibpromma, S., Dai, D., Xu, R., Suwannarach, N., Stephenson, S. L., Dao, C., & Karunaratna, S. C. (2022). A Review of the Fungi That Degrade Plastic. *Journal of Fungi*, 8(8), 772. <https://doi.org/10.3390/jof8080772>
- Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100142>
- Goel, V., Luthra, P., Kapur, G. S., & Ramakumar, S. S. V. (2021). Biodegradable/Bio-plastics: Myths and Realities. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(10), 3079–3104. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02099-1>
- Horton, A. A. (2022). Plastic pollution: When do we know enough? *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126885. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126885>
- Kim, M. S., Chang, H., Zheng, L., Yan, Q., Pflieger, B. F., Klier, J., Nelson, K., Majumder, E. L.-W., & Huber, G. W. (2023). A Review of Biodegradable Plastics: Chemistry, Applications, Properties, and Future Research Needs. *Chemical Reviews*, 123(16), 9915–9939. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00876>
- Kotova, I. B., Taktarova, Yu. V., Tsavkelova, E. A., Egorova, M. A., Bubnov, I. A., Malakhova, D. V., Shirinkina, L. I., Sokolova, T. G., & Bonch-Osmolovskaya, E. A. (2021). Microbial Degradation of Plastics and Approaches to Make it More Efficient. *Microbiology*, 90(6), 671–701. <https://doi.org/10.1134/S0026261721060084>
- Lv, S., Li, Y., Zhao, S., & Shao, Z. (2024). Biodegradation of Typical Plastics: From Microbial Diversity to Metabolic Mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(1), 593. <https://doi.org/10.3390/ijms25010593>

- Maitlo, G., Ali, I., Maitlo, H. A., Ali, S., Unar, I. N., Ahmad, M. B., Bhutto, D. K., Karmani, R. K., Naich, S. ur R., Sajjad, R. U., Ali, S., & Afridi, M. N. (2022). Plastic Waste Recycling, Applications, and Future Prospects for a Sustainable Environment. *Sustainability*, 14(18), 11637. <https://doi.org/10.3390/su141811637>
- Manzoor, S., Naqash, N., Rashid, G., & Singh, R. (2022). Plastic Material Degradation and Formation of Microplastic in the Environment: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 3254–3260. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.379>
- Maquart, P. O., Froehlich, Y., & Boyer, S. (2022). Plastic pollution and infectious diseases. *The Lancet Planetary Health*, 6(10), e842–e845. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00198-X/ASSET/DF5BEA3E-C947-426C-BC3C-8B15670B2C72/MAIN.ASSETS/GR1.JPG](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00198-X/ASSET/DF5BEA3E-C947-426C-BC3C-8B15670B2C72/MAIN.ASSETS/GR1.JPG)
- Mat Yasin, N., Akkermans, S., & Van Impe, J. F. M. (2022). Enhancing the biodegradation of (bio)plastic through pretreatments: A critical review. *Waste Management*, 150, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.004>
- Matjašič, T., Simčič, T., Medvešček, N., Bajt, O., Dreo, T., & Mori, N. (2021). Critical evaluation of biodegradation studies on synthetic plastics through a systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 752, 141959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141959>
- Millican, J. M., & Agarwal, S. (2021). Plastic Pollution: A Material Problem? *Macromolecules*, 54(10), 4455–4469. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c02814>
- Nayanathara Thatthasrani Pilapitiya, P. G. C., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- Pathak, G., Nichter, M., Hardon, A., Moyer, E., Latkar, A., Simbaya, J., Pakasi, D., Taqueban, E., & Love, J. (2023). Plastic pollution and the open burning of plastic wastes. *Global Environmental Change*, 80, 102648. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102648>
- Puja Asiandu, A., Wahyudi, A., & Sari, S. W. (2020). A Review: Plastics Waste Biodegradation Using Plastics-Degrading Bacteria. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 9(1), 148–157. [https://doi.org/10.47277/JETT/9\(1\)157](https://doi.org/10.47277/JETT/9(1)157)
- Shams, M., Alam, I., & Mahbub, M. S. (2021). Plastic pollution during COVID-19: Plastic waste directives and its long-term impact on the environment. *Environmental Advances*, 5, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100119>
- Shen, L., & Worrell, E. (2024). Plastic recycling. In *Handbook of Recycling* (pp. 497–510). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85514-3.00014-2>
- Silva, R. R. A., Marques, C. S., Arruda, T. R., Teixeira, S. C., & de Oliveira, T. V. (2023). Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. *Macromol*, 3(2), 371–399. <https://doi.org/10.3390/macromol3020023>
- Singh, N., & Walker, T. R. (2024). Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem. *Npj Materials Sustainability*, 2(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00024-w>
- Srikanth, M., Sandeep, T. S. R. S., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>
- Stoett, P., Scrich, V. M., Elliff, C. I., Andrade, M. M., de M. Grilli, N., & Turra, A. (2024). Global plastic pollution, sustainable development, and plastic justice. *World Development*, 184, 106756. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106756>
- Tania, M., & Anand, V. (2025). The implementation of microbes in plastic biodegradation. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11(2), 208–218. <https://doi.org/10.1007/s43994-023-00077-y>
- Tantawi, O., Joo, W., Martin, E. E., Av-Ron, S. H. M., Bannister, K. R., Prather, K. L. J., Olsen, B. D., & Plata, D. L. (2025). Designing for degradation: the importance of considering biotic and abiotic polymer degradation. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 27(5), 1303–1316. <https://doi.org/10.1039/D5EM00079C>
- Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., & Tosi, S. (2022). Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *Microorganisms* 2022, 10(6), 1180. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10061180>
- Wei, X.-F., Yang, W., & Hedenqvist, M. S. (2024). Plastic pollution amplified by a warming climate. *Nature Communications*, 15(1), 2052. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46127-9>
- Zeenat, Elahi, A., Bukhari, D. A., Shamim, S., & Rehman, A. (2021). Plastics degradation by microbes: A sustainable approach. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101538. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101538>
- Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 116554. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>

De residuos a la innovación: revalorización de subproductos agroindustriales Mexicanos como estrategia de desarrollo sostenible

Gerardo Valles-Salas, Ana M. Avila-Galván, Orlando A. Manzanares-Meza, Berenice Garcia-Ríos, María Camila Carmona-Luna y Juliana Morales-Castro *

TECNM/Instituto Tecnológico de Durango. Unidad de Posgrado Investigación y Desarrollo Tecnológico, Laboratorio Nacional de Evaluación de Productos Bióticos, LANAEPI, Durango, México.

* Autor de correspondencia: jmorales@itdurango.edu.mx; Tel.: +52 (618) 818-5402 y 818-6936 ext. 116

Artículo de divulgación científica

Recibido: 5 de junio de 2025 Aceptado: 11 de julio de 2025 Publicado: 16 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.471>

Resumen: En nuestro país, diariamente se desperdician cientos de alimentos a lo largo de la cadena de suministro, desde la cosecha hasta el procesamiento convirtiéndose en residuos que, en su mayoría se consideran materiales sin valor. Los residuos suelen terminar en la basura, vertederos, rellenos sanitarios o como alimento para ganado sin recibir un tratamiento adecuado. Estas prácticas representan un problema para la sostenibilidad económica, medio ambiental y social en todo el país, lo que hace urgente encontrar alternativas para evitar este desperdicio de recursos. La comunidad académica y científica ha enfocado esfuerzos en agregar valor a estos alimentos descartados, incluyendo a los subproductos agroindustriales generados durante el procesamiento de los alimentos, para que se conviertan en materia prima de otro proceso, aplicando el concepto de bioeconomía circular. De esta manera, el presente artículo ofrece un panorama de alternativas sustentables para valorizar residuos agroindustriales desde la ciencia y la tecnología, provenientes del agave, jícama de descarte, granza de frijol y restos de la calabaza semillera, ejemplificando estrategias para transformar los residuos en recursos de valor, contribuyendo a reducir el impacto ambiental, disminuir el volumen de residuos y fomentar modelos de producción más responsables.

Palabras clave: residuos agroindustriales; bioeconomía; valorización; aprovechamiento de residuos

Introducción

En México, cada año se desperdician grandes cantidades de alimentos, ya sea porque no cumplen con los estándares de calidad requeridos para su venta y distribución (forma, tamaño), o porque al procesarlos, parte de estos alimentos no son comestibles y generan subproductos que no se aprovechan (Quintero-Herrera *et al.*, 2023). Pero ¿qué pasaría si estos residuos fueran en realidad materia prima para desarrollar múltiples productos con potencial aún sin descubrir? El modelo actual de producción y consumo de alimentos sigue la linealidad, tomar-hacer-usar-eliminar. Esto genera residuos y dejan de lado enormes cantidades de alimentos, incluso productos completos y subproductos, como cáscaras, fibras, pulpas, semillas, huesos y hojas. Por ejemplo, el procesamiento del agave genera más de 1.3 millones de toneladas de residuos; la producción de frijol produce alrededor de 57 mil ton de granza; la industria semillera de calabaza desperdicia más de 25 mil ton y se estima 46 mil ton de jícama son descartadas por no cumplir criterios comerciales. En este sentido, surge la necesidad de buscar alternativas para aprovechar al máximo estos recursos (Ubando *et al.*, 2020).

La bioeconomía circular, que integra conocimientos, ciencia, tecnología e innovación propone soluciones sostenibles al maximizar el valor de recursos biológicos y minimizar la generación de residuos (Venugopal, 2022). Este enfoque, reconoce el valor de los subproductos como biomasa, puesto que, de ser descartados, pueden convertirse en fuente de compuestos valiosos para los sectores, alimentario, farmacéutico y cosmético, aumentando de 3 a 10 veces su valor. Ejemplos de estas biomoléculas, son, celulosa, hemicelulosa, lignina, almidón, fibra dietaria, pectina, proteínas y pigmentos. Además, el aprovechamiento de este residuo contribuye a mitigar el impacto ambiental al reducir desechos orgánicos, cuya disposición, genera gases de efecto invernadero.

Desde 2018, se ha promovido una guía internacional para reducir el desperdicio de alimentos, jerarquizando acciones para su gestión, priorizando la prevención, redistribución para consumo humano (donaciones), uso como alimento animal y valorización mediante recuperación de compuestos como celulosa, hemicelulosa y lignina para desarrollar biomateriales (biopelículas, hidrogeles y biocombustibles), así como almidón, proteínas y pigmentos, útiles en el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos (WRAP, 2018).

El mal manejo de residuos genera problemas ambientales, además de pérdidas de recursos como agua, energía y dinero invertidos en su producción. Por ello, su aprovechamiento es una necesidad alineada con los Objetivos del Desarrollo Sostenible, en particular el número 12 y la meta 12.3, que busca reducir a la mitad las pérdidas y desperdicios de alimentos para 2030.

Desarrollo

Residuos de Agave: Del tequila y mezcal, el renacer del bagazo

El agave, también conocido como “Maguey”, es una planta suculenta de origen árido o semiárido con un vínculo importante con la cultura mexicana. Se usa tradicionalmente para producir diversos productos: bebidas destiladas y no destiladas, artesanías, fibras y alimentos, ha sido clave en el desarrollo económico y social de varias regiones en el país (Avila-Galván *et al.*, 2024). Presenta una composición química rica en compuestos como celulosa (20.7% de la composición total), hemicelulosa (11.3%) y lignina (12.2%), que lo convierten en materia prima de interés para la generación de diversos productos.

Entre los productos más destacados del procesamiento del agave están el tequila y mezcal, bebidas con denominación de origen que han impulsado el crecimiento en estados como: Jalisco, Tamaulipas, Nayarit y Guanajuato para el tequila; Oaxaca, Guerrero, San Luis Potosí, Zacatecas, Durango y Guanajuato para el mezcal. En 2024, su producción, distribución y venta generaron una derrama económica de cerca de 153 MDP y 36 MDP para el tequila y mezcal respectivamente (COMERCAM, 2024).

Sin embargo, la producción de estas bebidas genera grandes y diversas cantidades de residuo, como las hojas (pencas), bagazo y vinazas, que representan un serio problema medioambiental (Figura 1). Tradicionalmente considerados como “desechos” o “materiales sin valor”, hoy se reconocen por su potencial para el desarrollo de productos de valor agregado.

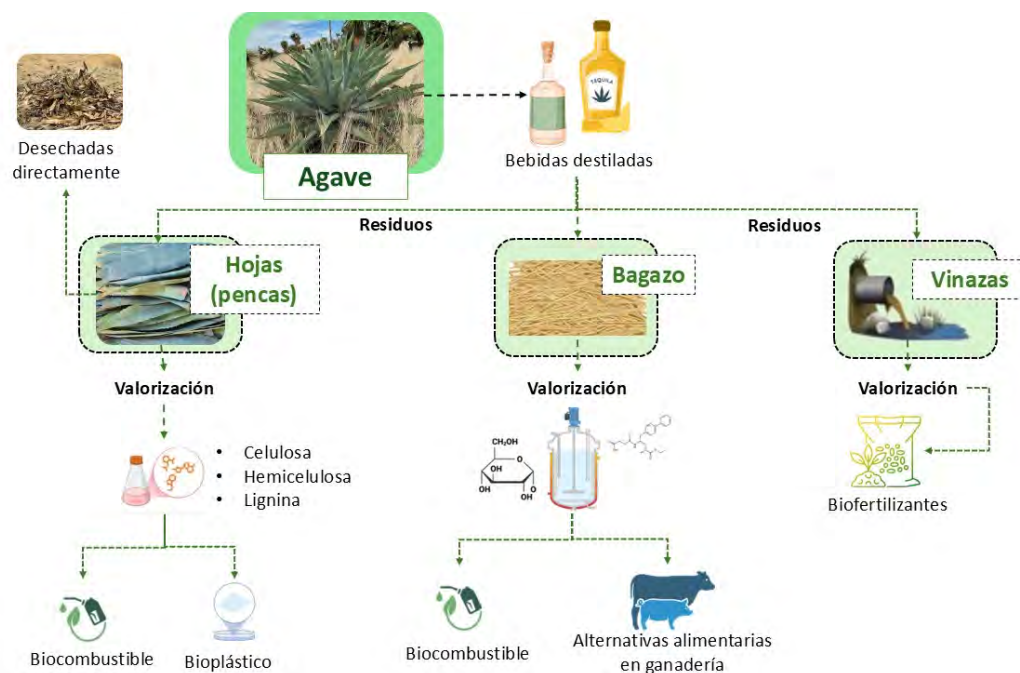


Figura 1. Residuos generados en la producción de bebidas derivadas del mezcal y su valorización.

Para la elaboración de estos destilados, se utilizan únicamente las piñas (corazón) de la planta, que se obtienen tras retirar las hojas del agave que representan hasta el 50% y suelen desecharse al aire libre, lo que permite la proliferación de plagas, patógenos y parásitos representando problemas medioambientales. Las tendencias actuales dirigidas hacia su valorización están enfocadas en utilizarlas como materia prima, para la producción de compuestos celulósicos (carboximetilcelulosa, acetatos de celulosa y celulosa nanocristalina) y derivados, incluyendo plásticos biodegradables y azúcares fermentables (Contreras-Hernandez *et al.*, 2018).

El bagazo de agave, un residuo fibroso generado tras la extracción de azúcares fermentables suele desecharse cerca de las plantas productoras, provocando emisiones de dióxido de carbono y la aparición de fauna nociva (Avendaño-Rito *et al.*, 2023). Su valorización incluye el uso como materia prima para producir bioetanol, alimento animal, fibras textiles, compostas, fertilizantes y papel y cartón reciclado (Shiva *et al.*, 2022).

Las vinazas de agave, residuos líquidos de alta carga orgánica están conformadas por agua, azúcares fermentables, ácidos orgánicos, ésteres y alcoholes. Presentan un pH bajo, elevadas concentraciones de lípidos, calcio, magnesio, potasio y compuestos fenólicos. Han sido investigadas para obtener biofertilizantes, metano como biocombustible y compuestos bioactivos como fibra dietaria, azúcares reductores y compuestos fenólicos (Álvarez-Chávez *et al.*, 2024).

La falta de aprovechamiento de estos residuos ha derivado en una problemática ambiental. Sin embargo, avances científicos y tecnológicos han abierto nuevas posibilidades para obtener productos de alto valor comercial, como hidrogeles, películas biodegradables y biomateriales. La valorización integral de los residuos de agave se perfila como una vía clave para impulsar la sustentabilidad y el crecimiento económico mediante su transformación en productos de valor agregado.

Jícama de Descarte: Transformando un producto no comerciable en un recurso de valor

La jícama (*Pachyrhizus erosus* L.) es un tubérculo cultivado en México pero subutilizado a nivel mundial (Huang *et al.*, 2023), consumido principalmente en fresco como botana o ensalada. Su bajo contenido calórico y presencia de 1.3g de proteína, 9.9 g de carbohidratos, 7.5g de almidón, 0.7g de fibra, 0.5g de cenizas y minerales como calcio, potasio, sodio, cobre y hierro por cada 100 g de jícama fresca, la convierten en un alimento nutritivo.

En México se producen cerca de 187.92 ton anuales, siendo Nayarit, Guanajuato, Veracruz y Morelos los principales estados productores (SENASICA, 2023). Sin embargo, alrededor del 25% de esta producción se descarta por defectos físicos como golpes, deformaciones, cuarteaduras o coloración anormal, lo que impide su comercialización y cosecha, generando un residuo conocido como jícama de descarte (García-Ríos *et al.*, 2024) (Figura 2).

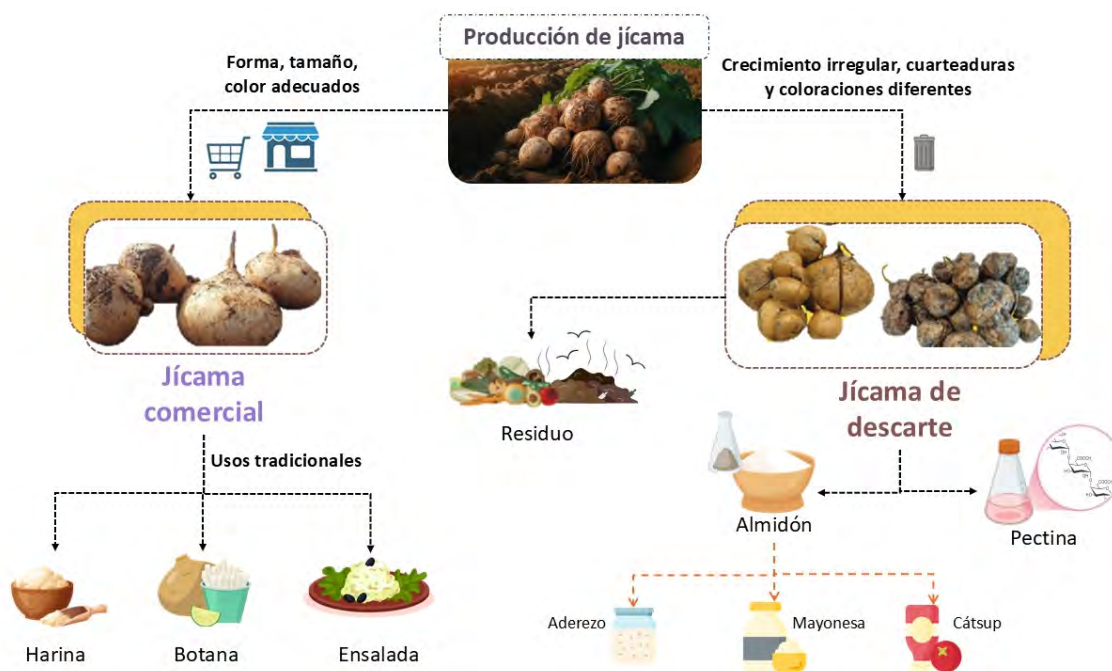


Figura 2. Valorización integral y sostenible de la jícama: consumo directo y valorización de residuos.

Estos residuos suelen abandonarse en el campo, causando impactos ambientales, y representando una pérdida de recursos nutricionales, ya que conserva su contenido de fibra, minerales y almidón (Ramírez-Balboa *et al.*, 2023). Si bien se han estudiado aplicaciones de la jícama comercial para la elaboración de harinas y extracción de almidón, el aprovechamiento de la jícama de descarte sigue siendo limitado.

Recientes investigaciones muestran que la jícama de descarte, posee una composición similar a la comercial, específicamente en contenido de cenizas (2.9% vs. 3.1%), proteína (3.2% vs. 8.7%), pectina (5.4% vs. 3.9%) y almidón (61% vs. 95%), siendo este último de gran interés industrial, pues se emplea como aditivo para mejorar la consistencia y textura de productos como aderezos, mayonesa y cátsup, además de su uso como espesante, estabilizante y gelificante, en la industria cosmética.

El almidón se obtiene convencionalmente de granos como trigo y maíz. En este sentido la jícama de descarte representa una fuente alternativa y sostenible, al reducir el uso de alimentos destinados a alimentación humana. Así puede transformarse en un recurso valioso, aportando valor económico y fortaleciendo modleos circulares, alineados con con ODS 1, 3 y 12. Así, en lugar de convertirse en residuo y terminar en la basura, la jícama de descarte puede transformarse en un recurso valioso, aportando valor económico y fortalecer modelos circulares.

Granza de frijol: La ruta sostenible y proteica del frijol

El frijol es una leguminosa importante en la alimentación humana por su alto contenido proteico (16 a 33 %), incluyendo principalmente globulina, albúmina y prolaminas, lo que representa el doble respecto a cereales como el maíz (Choudhury *et al.*, 2025). Además, es fuente de carbohidratos, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos como flavonoides, antocianinas, polifenoles, taninos y flavonas, los cuales han demostrado efectos positivos en la salud. (Fernández-Valenciano & Sánchez-Chávez, 2016).

En México, la producción de frijol en 2024 alcanzo 724 mil toneladas, (SENASICA, 2023) representando un cultivo clave para la seguridad alimentaria y economía nacional. Sin embargo, entre el 3 y el 8% de esta producción es desechada como “granza”, residuo generado durante el procesamiento comercial, compuesto por granos quebrados, pequeños o dañados, que no cumplen con los estándares de calidad comercial, pero conservan su valor nutricional (Rosas-Flores & Graciano-de la Cruz, 2020).

El aprovechamiento de la granza de frijol ha sido investigado con diversos enfoques de valorización, como su uso en enriquecidos con proteínas, fertilizantes o alimentos extruidos para ganado (Mali y Kumar, 2023). Entre las estrategias más actuales se encuentra la obtención de aislados proteicos con alto potencial gelificante y emulsionante (Figura 3). Estos aislados representan una alternativa sostenible, ya que mejoran la funcionalidad tecnológica en el desarrollo de alimentos, ofrecen beneficios nutricionales y amplían la diversidad de productos para el consumidor (Peña-Cháidez *et al.*, 2021). Una ventaja adicional de los aislados proteicos de frijol es que requieren menor concentración, tiempo y temperatura para formar geles en comparación con aislados proteicos de lenteja o guisante amarillo, lo cual favorece su eficiencia industrial.



Figura 3. Ruta de valorización de granza de frijol, compuestos de interés para la industria y aplicaciones.

Por otra parte, también se ha explorado la granza de frijol como fuente de almidón, componente que representa entre el 25% y 45% de la materia seca. El creciente consumo de alimentos procesados ha elevado la demanda de almidón, lo que impulsa la búsqueda de fuentes alternativas (Punia *et al.*, 2020). En este contexto, el almidón obtenido de granza de frijol presenta buena capacidad gelificante y alto contenido de almidón resistente, superior al de cereales y tubérculos.

Aunque este método de valorización muestra resultados prometedores, su implementación a escala industrial aún requiere investigación aplicada que garantice eficiencia y efectividad de los procesos.

Residuos de calabaza semillera: El tesoro olvidado de la industria semillera en México

La calabaza es una hortaliza originaria de América central, ampliamente cultivada por su valor económico en países como India, China, México y Estados Unidos. En México, forma parte de la cocina tradicional, la pulpa se consume en sopas, dulces, panadería y confitería, mientras que las semillas, conocidas como “pepita” se consumen como botana con o sin cáscara, saladas y tostadas o para la elaboración de pipián.

En los estados como Guerrero, Tabasco, Zacatecas y Campeche, la calabaza se cultiva exclusivamente por sus semillas debido a su contenido de proteína, fibra, vitaminas, Omega 3 y 6, y minerales (Hussain *et al.*, 2021). Esta demanda, sumada a bajos costos de producción, mínimas condiciones de cultivo y el competitivo costo de venta, ha impulsado una industria semillera enfocada exclusivamente en la obtención y comercialización de semillas.

Sin embargo, este proceso genera que el resto de la calabaza (cáscaras, pulpa y fibras) se descarten como residuo, dejándose en el campo o sea utilizado como alimento animal, representando una pérdida de biomasa con un alto potencial de valorización. Esta práctica genera impactos ambientales y desaprovecha compuestos de interés industrial, nutricional y funcional.

Actualmente, se exploran diversas estrategias para valorizar estos residuos, Figura 4. Destaca la extracción de compuestos funcionales como carotenoides (pigmentos responsables del color amarillo de la calabaza), que poseen actividad antioxidante y han sido utilizados para enriquecer aceites vegetales (Portillo-López *et al.*, 2021). Así mismo, se ha demostrado que estos residuos contienen altos niveles de compuestos fenólicos (Hussain *et al.*, 2021), con potencial para su extracción y desarrollo de alimentos funcionales, es decir, productos que además de nutrir pueden mejorar la salud.



Figura 4. Estrategia de valorización de residuos de calabaza semillera proveniente de la industria semillera en México.

Otra vía de valorización consiste, en la obtención de harinas de residuos de calabaza, las cuales pueden utilizarse en pastelería y derivados, como sustituto parcial de harina de trigo, aportando un color atractivo y aumentando el nivel de fibra, lo que mejora el perfil nutricional del alimento final.

El aprovechamiento de residuos generados por la industria semillera de calabaza, contribuye no solo a reducir el volumen de residuos, sino que convierte lo que antes se consideraba desecho en una fuente rica de compuestos funcionales, alineándose con los principios de la economía circular y la sostenibilidad agroalimentaria.

Desafíos y oportunidades para México en el aprovechamiento de residuos y subproductos

La generación masiva de residuos agroindustriales representa una oportunidad para reducir costos y desarrollar productos sostenibles con valor agregado (Velasco-Velasco *et al.*, 2017). Sin embargo, persisten problemáticas que limitan su aprovechamiento bajo el marco de bioeconomía circular.

Aunque existen tecnologías para transformar estos residuos en productos funcionales, muchas son complejas, costosas o utilizan sustancias contaminantes (Moncayo Luján *et al.*, 2018). Por ello la ciencia trabaja en el desarrollo de “tecnologías verdes”, que disminuyen el impacto ambiental. A esto se le suma la falta de políticas claras y actualizadas para regular el manejo y valoración de residuos (Ospina-Mateus *et al.*, 2023) lo que genera desigualdad entre productores.

En particular, los pequeños y medianos productores enfrentan mayores retos debido a la falta de financiamiento y a los altos costos de inversión, operación y mantenimiento. Esto limita su capacidad para procesar grandes volúmenes de residuos y aprovechar su potencial.

La Economía Circular y su brazo articulador, la Bioeconomía, son la base para avanzar hacia sistemas alimentarios sostenibles y reducir los residuos y subproductos agroindustriales. Chile, Argentina, Ecuador, Costa Rica, Paraguay, entre otros, ya cuentan con Planes Nacionales de EC o Bioeconomía. Estados Unidos, también estableció la Estrategia Nacional para Reducir las Pérdidas y el Desperdicio de Alimentos y los Orgánicos Reciclables EPA, USDA, 2024, lo que destaca la relevancia a nivel global del tema. En México, esta agenda aún está pendiente, con algunos avances, como la Estrategia de Bioeconomía Agrícola para México (ESBAM) (SADER, 2024).

Ante este panorama, es necesario fortalecer políticas públicas, fomentar la transferencia tecnológica y brindar apoyo a productores locales. Solo así se podrá avanzar hacia un modelo de aprovechamiento integral, sostenible y equitativo, donde los residuos sean fuente de desarrollo económico, social y ambiental.

Conclusiones

El aprovechamiento de residuos agroindustriales ofrece una oportunidad concreta para reducir pérdidas y desperdicios de alimentos, alineándose con los Objetivos del Desarrollo Sustentable impulsados por la ONU, FAO, PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). Ejemplos como residuos de agave, calabaza semillera, la jícama de descarte y la granza de frijol muestran que su valorización no solo disminuye el impacto ambiental, sino que impulsa la innovación y el desarrollo de productos con valor agregado. Transformar estos residuos en recursos útiles promueve una bioeconomía circular en el sector agroalimentario mexicano y representa un paso esencial hacia un futuro más sostenible y eficiente.

Bibliografía

- Álvarez-Chávez, J., Castrejón, A., Gaytán-Martínez, M., & Ramírez-Jiménez, A. K. (2024). Agave Bagasse from the Mezcal Industry Processed with Emerging Technologies: A Sustainable Source of Bioactive Compounds. *SSRN*. <https://doi.org/dx.doi.org/10.2139/ssrn.4778400>
- Avendaño-Rito, M. C., Aquino-Gonzalez, L. V., & Martínez-Vargas, A. (2023). FEASIBILITY OF USE OF AGAVE ANGUSTIFOLIA HAW BAGASSE PULP AS A FOOD ADDITIVE. *IPSUMTEC*, 6(6). https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5e1f5a3d41143.pdf
- Avila-Galván, A. M., Morales-Castro, J., Ruíz-Leza, H. A., Manzanares-Meza, O., Morales-Contreras, B. E., Guerra-Rosas, M. I., & Rosas-Flores, W. (2024). La segunda vida del agave: Nuevas aplicaciones para residuos agroindustriales de las industrias del tequila y mezcal. *Frontera Biotecnológica* (29). <https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol29/pdf/vol-29L-4.pdf>

- COMERCAM. (2024). Informe 2024. Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal. https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/PUBLICO_INFORME_2024.pdf
- Contreras-Hernandez, M. G., Ochoa-Martinez, L. A., Rutiaga-Quinones, J. G., Rocha-Guzman, N. E., Lara-Ceniceros, T. E., Contreras-Esquivel, J. C., Prado Barragan, L. A., & Rutiaga-Quinones, O. M. (2018). Effect of ultrasound pre-treatment on the physicochemical composition of Agave durangensis leaves and potential enzyme production. *Bioresour Technol*, 249, 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.009>
- Fernández-Valenciano, A. F., & Sánchez-Chávez, E. (2016). Study of physicochemical properties and nutritional quality in different varieties of beans consumed in Mexico. *Nova Scientia*, 9(18), 133-148.
- Choudhury, D. B., Gul, K., Sehrawat, R., Mir, N. A., & Ali, A. (2025). Unveiling the potential of bean proteins: Extraction methods, functional and structural properties, modification techniques, physiological benefits, and diverse food applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139578. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139578>
- García-Ríos, B. A., Morales-Contreras, B. E., Peña-Cháidez, J. E., Fonseca-Florido, H. A., Morales-Castro, J., Wicker, L., & Rosas-Flores, W. (2024). Low Amylose Starch from Discarded Jicama Tubers (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urb.) and Its Techno-Functional Characterization. *Waste and Biomass Valorization*, 15(2), 743-753. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02191-8>
- Huang, J., Yu, M., Wang, S., & Shi, X. (2023). Effects of jicama (*Pachyrhizus erosus* L.) non-starch polysaccharides with different molecular weights on structural and physicochemical properties of jicama starch. *Food Hydrocolloids*, 139, 108502. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108502>
- Hussain, A., Kausar, T., Din, A., Murtaza, M. A., Jamil, M. A., Noreen, S., Rehman, H. U., Shabbir, H., & Ramzan, M. A. (2021). Determination of total phenolic, flavonoid, carotenoid, and mineral contents in peel, flesh, and seeds of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15542>
- Mali, P. S., & Kumar, P. (2023). Optimization of microwave assisted extraction of bioactive compounds from black bean waste and evaluation of its antioxidant and antidiabetic potential in vitro. *Food Chemistry Advances*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100543>
- Moncayo Luján, M. D. R., Reyes Munguía, A., & Carrillo Inungaray, M. L. (2018). Aprovechamiento de subproductos agronómicos. *Tlatemoani: Revista Académica de Investigación*, 9(29), 115–127. <http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/index.html>
- Ospina-Mateus, H., Marrugo-Salas, L., Castilla Castilla, L., Castellón, L., Cantillo, A., Bolívar, L. M., Salas-Navarro, K., & Zamora-Musa, R. (2023). Analysis in circular economy research in Latin America: A bibliometric review. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19999>
- Peña-Cháidez, J. E., Rosas-Flores, W., Salazar-Montoya, J. A., Morales-Contreras, B. E., Gallegos-Infante, J. A., Morales-Castro, J., & Medrano-Roldán, H. (2021). Rheological and thermal characterization of pinto saltito bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolates/sodium alginate gels. *Lwt*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111419>
- Portillo-López, R., Morales-Contreras, B. E., Lozano-Guzmán, E., Basilio-Heredia, J., Muy-Rangel, M. D., Ochoa-Martínez, L. A., Rosas-Flores, W., & Morales-Castro, J. (2021). Vegetable oils as green solvents for carotenoid extraction from pumpkin (*Cucurbita argyrosperma* Huber) byproducts: Optimization of extraction parameters. *Journal of Food Science*, 86(7), 3122-3136. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15815>
- Punia, S., Dhull, S. B., Sandhu, K. S., Kaur, M., & Purewal, S. S. (2020). Kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) starch: A review. *Legume Science*, 2(3), e52. <https://doi.org/10.1002/leg3.52>
- Quintero-Herrera, S., Zwolinski, P., Evrard, D., Cano-Gómez, J. J., & Rivas-García, P. (2023). Turning food loss and waste into animal feed: A Mexican spatial inventory of potential generation of agro-industrial wastes for livestock feed. *Sustainable Production and Consumption*, 41, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.023>
- Ramírez-Balboa, G., Balois-Morales, R., León-Fernández, A. E., Bautista-Rosales, P. U., Jiménez-Zurita, J. O., & Montalvo-González, E. (2023). Caracterización físicoquímica y proximal de almidón y harina de jícama (*Pachyrhizus erosus* L.). *Revista Bio Ciencias*, 10. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1427>
- Rosas Flores, W., & Graciano de la Cruz, V. G. (2020). Granza de frijol: ¿Un subproducto con valor comercial? *Revista Sapiens*, 1(3), 24–25. Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCyTED). <https://cocytcd.mx/REVISTASAPIENS/ejemplares/a1/n3/RevistaSapiens.pdf>
- SADER, S. de A. y D. R. (2024). Propuesta de Estrategia Sectorial de Bioeconomía Agrícola para México. <https://www.gob.mx/agricultura/documentos/propuesta-de-estrategia-sectorial-de-bioeconomia-agricola-para-mexico>
- SENASICA. (2023). Panorama del Sector Agrícola. <https://di.senasica.gob.mx/SIAS/Statistics/Transversal/PanoramaAgricola>
- Shiva, Rodríguez-Jasso, R. M., Rosero-Chasoy, G., López-Sandín, I., Morais, A. R. C., & Ruiz, H. A. (2022). Enzymatic Hydrolysis, Kinetic Modeling of Hemicellulose Fraction, and Energy Efficiency of Autohydrolysis Pretreatment Using Agave Bagasse. *BioEnergy Research*, 16(1), 75-87. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10442-0>
- Ubando, A. T., Felix, C. B., & Chen, W.-H. (2020). Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresour Technol*, 299, 122585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>
- Velasco-Velasco, J., Gómez-Merino, F. C., Hernández-Cázares, A. S., Salinas-Ruiz, J., & Guerrero-Peña, A. (2017). Residuos orgánicos de la agroindustria azucarera: Retos y oportunidades. *Agro Productividad*, 10(11), 99–104
- Venugopal, V. (2022). Green processing of seafood waste biomass towards blue economy. *Current Research in Environmental Sustainability*, 4, 100164. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100164>
- WRAP. (2019). WRAP ANNUAL REVIEW April 2018 March 2019. <https://www.wrap.ngo/resources/report/wrap-annual-review-2018-19>

Evaluación económica de vehículos eléctricos para incentivar el cambio tecnológico

Juan A. Jimenez-García ^{1,*}, Rigoberto Torres Tovar ¹, Noé Gaspar Sanchez ¹, Víctor M. Durán López ², Hugo A. Hernández Hernández ² y Giselle López Mendoza ³

¹ Licenciatura en Ingeniería en Transporte, Centro Universitario de Nezahualcóyotl, Universidad Autónoma del Estado de México, Edo Mex., Estado de México, México.

² Licenciatura en Comercio Internacional, Centro Universitario de Nezahualcóyotl, Universidad Autónoma del Estado de México, Edo Mex., Estado de México, México.

³ Estudiante de la licenciatura en Ingeniería en Transporte Centro Universitario de Nezahualcóyotl, Universidad Autónoma del Estado de México, Edo Mex., Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: juan.jimenez.uaem@gmail.com; Tel.: +525540107202

Artículo de divulgación científica

Recibido: 6 de junio de 2025 Aceptado: 19 de julio de 2025 Publicado: 17 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.477>

Resumen: En este trabajo se presenta una evaluación económica de la adopción de vehículos eléctricos (VE), dirigida a usuarios o propietarios de flotas o vehículos particulares que desean tomar decisiones informadas sobre el cambio tecnológico. Se compara el costo anual equivalente de dos alternativas: vehículos diésel de combustión interna (VCI) y vehículos 100% eléctricos, considerando que ambas unidades realizan el mismo recorrido anual y no generan ingresos diferenciados. El análisis incluye variables como la inversión inicial, incentivos o apoyos gubernamentales, costos de operación y mantenimiento, y costos de combustible. Se asume una vida útil de ocho años y se considera el valor de reventa de cada una de las alternativas. Los resultados muestran que el vehículo eléctrico resulta económicamente más atractivo, con un valor anual equivalente 21.9% menor que el vehículo Diesel. Se cuantifican las emisiones de bióxido de carbono para ambas opciones considerando los kilómetros recorridos por ambas unidades durante su vida útil. Para el caso del VE dependiendo del origen de la energía eléctrica de recarga (convencional o renovable) se encontró que las emisiones de CO₂ son 97.02% y 99.18% menores a las emitidas por la opción del VCI a Diesel. Finalmente se presenta una estimación de la reducción de emisiones de CO₂ totales directas que se reducirían al elegir la opción eléctrica.

Palabras clave: valor anual equivalente; electromovilidad; cuantificación de emisiones de CO₂

Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos globales del siglo XXI, con impactos cada vez más visibles en los ecosistemas, la salud pública y la economía. En respuesta, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por las Naciones Unidas, establece una hoja de ruta global que incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), dentro de los cuales el ODS 13: Acción por el clima y el ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles llaman explícitamente a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover sistemas de transporte más limpios, accesibles y eficientes (Naciones Unidas, 2023).

En este contexto, la movilidad eléctrica (Salgado *et al.*, 2024), emerge como una solución clave para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar las emisiones del sector transporte (ICCT, 2018), uno de los principales contribuyentes al calentamiento global. Sin embargo, su adopción masiva aún enfrenta barreras significativas, entre ellas la percepción de altos costos iniciales, la limitada infraestructura de carga y la falta de incentivos adecuados (Afridi, 2022).

Este proyecto tiene como objetivo plantear la evaluación económica integral de los vehículos eléctricos (EEA, 2020), comparando sus costos y beneficios frente a los vehículos de combustión interna diésel, tanto desde una perspectiva individual (usuarios particulares o empresariales) e indirectamente en forma colectiva (impacto ambiental y ahorro en salud pública). El análisis buscará identificar las condiciones económicas necesarias y los mecanismos de incentivo más efectivos para acelerar el cambio tecnológico hacia una movilidad sostenible, alineada con los principios de la Agenda 2030. Se considera para el estudio que las unidades analizadas prestan el mismo servicio y que no generan ingresos por los viajes, empleando el método de valor anual equivalente (VAE) a ocho años de vida útil.

Al fundamentar esta evaluación en datos reales y criterios de sostenibilidad, se pretende ofrecer insumos útiles para la formulación de políticas públicas, programas de incentivo y estrategias privadas que promuevan una transición energética justa e inclusiva en el sector transporte.

Desarrollo

En la presente sección se describen los principales costos asociados a la adquisición de vehículos de diferentes tecnologías, se desarrolla la metodología para calcular el VAE (Coss Bu, 2005; Sapag Chain 2014; Baca Urbina, 2013) se presenta la sección de resultados.

Costos asociados a la adquisición de un vehículo

Para evaluar económicamente la adquisición de un vehículo eléctrico (VE) frente a uno de combustión interna (VCI) implica considerar varios factores. Aquí te detallo los principales elementos para tener en cuenta:

- Inversión Inicial. Valor factura de la unidad.
- Gastos administrativos y/o incentivos fiscales. Es importante considerar los gastos administrativos que la adquisición de una unidad conlleva entre ellos: costo de la emisión de placas, tarjetón de circulación, engomado y tenencia, así como verificación vehicular y pago de primas de seguros, en nuestro caso práctico se presentan como gastos anuales fijos durante la vida útil de las unidades.
- Costos de operación y mantenimiento. Son todos aquellos costos asociados al uso, operación y mantenimientos de la unidad. En los VCI: servicios de mantenimiento programados (cambio de fluidos, aceite, piezas de desgaste). Para los VE, sus costos de mantenimiento son relativamente más bajos, ya que poseen una cantidad menor de piezas de desgaste, no hay cambios de aceite y menor desgaste de frenos gracias a la frenada regenerativa.
- Costos de la Energía o combustibles (IEA, 2023). En el caso del VCI el costo de combustible considerado para el estudio fue de \$24.175/ lt de Diesel y para la recarga de los VE se consideró una tarifa eléctrica estándar residencia de \$1.071/KWh.
- Vida útil y depreciación. Se considera que el VE: Depreciación rápida inicialmente, pero con baterías modernas, se ha reducido el temor a la obsolescencia. VCI: Depreciación estándar, aunque pueden verse afectados por regulaciones ambientales futuras.

Método de valor anual equivalente

La selección de alternativas mutuamente excluyentes en proyectos de inversión implica elegir la opción más favorable entre varias propuestas de inversión que compiten entre sí, es decir, solo se puede seleccionar una de las alternativas disponibles. La metodología para llevar a cabo esta selección generalmente sigue los siguientes pasos:

Identificación de Alternativas: En esta etapa, se recopilan y describen todas las alternativas posibles de inversión. Cada alternativa debe ser claramente definida en términos de su alcance, duración y flujos de efectivo asociados.

Estimación de Flujos de Efectivo: Para cada alternativa, se proyectan los flujos de efectivo netos que se espera generar durante la vida útil del proyecto. Esto incluye costos iniciales de inversión, ingresos operativos, costos de mantenimiento y posibles flujos de efectivo de desinversión al final del proyecto (Baca Urbina, 2013). Según Coss Bu, para el cálculo del valor anual equivalente de proyectos de inversión de dos alternativas mutuamente exclusivas, se emplea la siguiente expresión (Coss Bu, 2005):

$$A = -p(A | p, i\%, n) + \left[\sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1-i)^t} \right] (A | p, i\%, n) + F(A | F, i\%, n) \quad (1)$$

Donde, A = Anualidad equivalente, p = Inversión inicial, S_t es el flujo de efectivo neto del año t , F es el valor de rescate o de reventa de la unidad al final de la vida útil considerada para el análisis, F es el valor de rescate, n es el número de años de vida del proyecto, i es la tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA). Si se supone que los flujos de efectivo netos al año son iguales, entonces la ecuación anterior se simplifica (Coss Bu, 2005):

$$A = S - [(p - F)(A | p, i\%, n) + F(i\%)] \quad (2)$$

La metodología descrita permite una evaluación integral y sistemática de las alternativas mutuamente excluyentes, facilitando la toma de decisiones informadas y alineadas con los objetivos estratégicos de la organización. El valor que resulte con la anualidad equivalente menor representa la opción desde el punto de vista económico, sin embargo, existen otros beneficios indirectos como la reducción de emisiones contaminantes directas en las zonas urbanas, mejora de la imagen de la marca o empresa al apreciarse como una industria limpia, acorde al objetivo de desarrollo ciudades y comunidades más sostenibles al reducir las emisiones de efecto invernadero.

Para el presente caso de estudio se tomó en consideración una unidad diésel tradicional y otra unidad eléctrica, para una empresa de reparto de pan, en la que, ambas unidades son capaces de transportar el mismo volumen de carga, realizar la misma ruta y visitar los mismos puntos de venta en el mismo recorrido diario, por lo que se considera que no existen ingresos diferenciados entre ambas alternativas y que la selección de la opción se tomará en función de los gastos o erogaciones que cada proyecto realizó a lo largo de su vida útil. Se consideraron unidades diésel para la evaluación económica debido a que son las unidades con las que cuenta la empresa y se deseaba compararlas con la opción de unidades eléctrica, no obstante, la presente metodología puede aplicarse para comparar otras tecnologías como vehículos a gasolina o híbridos, con sus respectivas particularidades de cálculo.

En la Tabla 1, se describen las características de las dos alternativas de inversión mutuamente excluyentes, que se evaluaron para determinar su viabilidad económica: la opción de una unidad diésel versus la propuesta de implementar unidades 100% eléctrica.

Tabla 1. Características de las opciones mutuamente excluyentes.

Tipo	Vehículo eléctrico	Diesel	Unidad De Medida
Inversión Inicial	\$603,635.0	\$750,000.0	\$
Recorrido Diario	35	35	Km
Capacidad De Carga	1	1.5	ton
Velocidad Máxima	80	220	Km/hr
Tipo de batería	41	-	KWh (ion litio con freno regenerativo)
Tiempo estimado De Carga (15%-100%)	7	-	hr
Tiempo estimado De Carga rápida (30-80%)	54	-	min
Autonomía	400	-	Km
Rendimiento De Combustible	10.3	7.5 KM/LT	KWh/100 Km, Km/hr
Equivalencia Entre KWh Y Diesel	9.9	1	KWh/lt
Recorrido Diario	35	35	Km
Recorrido Mensual	1050	1050	Km/mes
Costo Unitario De Combustible	1.071	24.175	\$/KWh tarifa alta, \$/lt
Costo De Combustible Mensual	\$115.27	\$3,384.50	\$
Prima De Seguro Anual	\$8,610.05	\$10,697.75	\$/ Anual
Refrendo Anual	\$2,173.00	\$3,806.00	\$
*Verificación Vehicular Anual	\$0.00	\$1,256.00	\$
Costo Del Servicio De Mantenimiento	\$5,973.00	\$9,146.00	\$
Gastos Totales Anuales	\$16,871.31	\$28,290.25	\$
Vida Útil	8	8	años
Valor De Reventa	\$94,167.06	\$112,500.0	\$

Resultados

En la Tabla 2, se muestran las principales variables de la ecuación 2.0 para calcular el VAE, el resultado muestra la que la alternativa con un VAE menor es la opción del vehículo eléctrico con un VAE de \$193,456.49 en comparación con la opción del VCI con un VAE de \$247,919.30, esto debido a dos grandes factores: el primero de ellos, la inversión inicial del VE es menor a la inversión inicial del vehículo de VCI, seguido a que el vehículo eléctrico tiene menores costos de operación anual, lo que convierte al VE en la mejor opción considerando la información presentada en la Tabla 2.

Tabla 2 Valores económicos y valor anual equivalente calculado.

Concepto	Vehículo eléctrico	Vehículo Diesel
Inversión inicial (\$)	\$603,635.00 (130 km de autonomía)	\$750,000.00 (2.5 lt turbo Diesel)
Gastos anuales calculados (\$)	\$16,871.31	\$28,290.25
Valor de rescate o reventa estimado de las unidades	\$94,167.06	\$112,500.000
Vida útil (n)	8.0	8.0
Factor i (considerando una *TREMA=25%)	0.25	0.25
Factor (A/P,%,n)	0.30040	0.30040
Valor Anual Equivalente Calculado	\$193,456.49	\$247,919.30

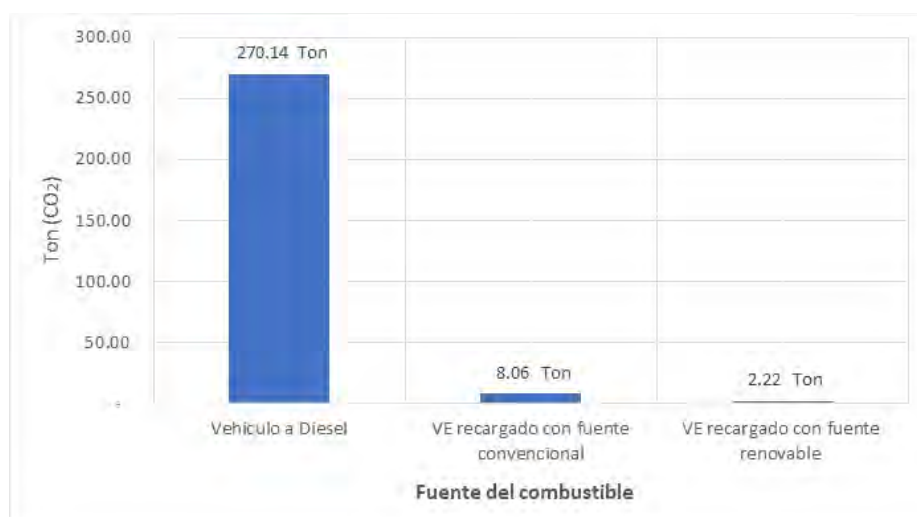
*TREMA: Tasa de recuperación mínima atractiva; tasa que es siempre mayor a suma de la inflación y la ganancia esperada por el inversionista del proyecto.

Emisiones contaminantes

Si bien, desde el punto de vista económico se justifica la adquisición de un vehículo eléctrico en comparación con un vehículo de combustión a Diesel, es importante resaltar la reducción estimada de emisiones contaminantes al realizar la adopción de nuevas tecnologías. En la Figura 1, se muestran las emisiones contaminantes de ambas opciones considerando un recorrido diario de 35 km, 1050 mensuales, 12600 Km anuales y 100,800 Km recorridos por la vida útil de las unidades.

Para el cálculo de las emisiones directas de CO₂ del VCI se consideró que cada litro de Diesel quemado emite 2.68 Kg de CO₂ (Gouveia *et al.*, 2025) a la atmósfera y para el cálculo de las emisiones totales de CO₂ del VE, se consideraron las emisiones indirectas por el tipo de fuente de suministro de energía eléctrica (renovable o convencional) considerando la emisión de 22 gr de CO₂ (Neugebauer *et al.*, 2022), cuando la fuente de alimentación de recarga del VE proviene de energías limpias y de 80 gr de CO₂ (Neugebauer *et al.*, 2022), cuante proviene de fuentes de energía convencional. Finalmente, en la figura 1, se presentan las emisiones totales por la vida útil del VCI y del VE considerando para este último dos tipos de fuentes de energía (de origen renovable y de origen fósil o convencional).

Se observa en la Figura 1, que, las emisiones contaminantes del vehículo diésel emite durante su vida útil fueron calculadas de 270.14 toneladas de CO₂. En comparación, el vehículo eléctrico que suponiendo que recargue sus baterías a partir de una fuente de energía fósil emite 8.06 toneladas de CO₂. Además, si la infraestructura de carga eléctrica permite el uso de energía de origen renovable, la emisión indirecta de CO₂ del vehículo eléctrico se reduce a 2.22 toneladas de CO₂ a lo largo de los ocho años de vida útil del proyecto.

Figura 1. Emisiones de CO₂ de las alternativas comparadas.

Conclusiones

El análisis económico presentado en este estudio demuestra que, se pueden evaluar las opciones que se encuentran en el mercado conociendo las variables económicas. En el caso presentado, los vehículos eléctricos (VE) ofrecen una alternativa más económica y ambientalmente sostenible frente a los vehículos diésel de combustión interna (VCI). Con un costo anual equivalente 21.9% menor, los VE no solo representan ahorros significativos para usuarios y propietarios de flotillas, sino que también contribuyen de manera decisiva a la reducción de emisiones de bióxido de carbono, con disminuciones de hasta el 99.18% si la energía utilizada para la recarga de unidades eléctricas proviene de fuentes renovables. Estos hallazgos refuerzan la importancia de impulsar políticas públicas y programas de incentivos que faciliten la adopción de la movilidad eléctrica. Al integrar criterios económicos, ambientales y de sostenibilidad, el estudio ofrece una base sólida para la toma de decisiones informadas y para acelerar la transición energética en el sector transporte, en línea con los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Es importante profundizar en técnicas que permitan evaluar las variaciones económicas a lo largo del proyecto y mejorar el nivel de certidumbre en la toma de decisiones para adquirir un vehículo.

Bibliografía

- Afridi, K. (2022). The future of electric vehicle charging infrastructure. *Nature Electronics*, 5(2), 62–64. <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00726-w>
- Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). (2020). *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle>
- Baca Urbina, G. (2013). *Evaluación de proyectos* (7ª ed.). México: McGraw-Hill.
- Neugebauer, M., Żebrowski, A., & Esmer, O. (2022). Cumulative emissions of CO2 for electric and combustion cars: a case study on specific models. *Energies*, 15(7), 2703. <https://doi.org/10.3390/en15072703>
- Coss Bu, R. (2005). *Análisis y evaluación de proyectos de inversión* (2ª ed.). México: Editorial Limusa.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Global EV Outlook 2023*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- International Council on Clean Transportation (ICCT). (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. ICCT. <https://theicct.org/publication/ghg-emissions-from-manufacturing-a-battery-electric-vehicle-jul18/>
- Gouveia, S., de la Iglesia, D. H., Abrantes, J. L., López Rivero, A. J., Silva, E., Gouveia, E., & Santos, V. (2025). Creating Value Through Strategic Management: Sustainable Mobility for Family-Owned Small-and Medium-Sized Enterprises with Electric Vehicles in the Digital Era. *Sustainability*, 17(5), 1785. <https://doi.org/10.3390/su17051785>
- Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles y ODS 13: Acción por el clima*. <https://sdgs.un.org/goals>
- Salgado, L., Álvarez-Macías, C., Loera-Palomo, R., & García-Contreras, C. P. (2024). Progress, Challenges and Opportunities of Electromobility in Mexico. *Sustainability*, 16(9), 3754. <https://doi.org/10.3390/su16093754>
- Sapag Chain, N. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (6ª ed.). Santiago, Chile: McGraw-Hill.

Rumbo al Centenario de la Microscopía Electrónica de Transmisión

César Leyva-Porras *, Luis E. Domínguez-Gutiérrez, Raúl I. García-Torresdey

Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (CIMAV). Miguel de Cervantes No. 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chih. México. 31136.

* Autor de correspondencia: cesar.leyva@cimav.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 12 de junio de 2025 Aceptado: 12 de julio de 2025 Publicado: 22 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.479>

Resumen: A casi un siglo de su invención, el microscopio electrónico de transmisión (MET) continúa siendo una de las herramientas más poderosas para explorar el mundo invisible. Este artículo presenta un recorrido histórico por los principales hitos que dieron origen a esta tecnología, desde los descubrimientos fundamentales sobre el comportamiento de los electrones hasta la construcción del primer prototipo por Ernst Ruska y Max Knoll en 1931. Se explican también los principios básicos de funcionamiento del MET y se destacan algunos de sus aportes más trascendentes a la ciencia, como la observación de virus, la elucidación de la estructura del ADN, el análisis de ultraestructuras celulares, y los avances en nanotecnología. A través de una narrativa clara y accesible, el texto busca acercar al lector al impacto que ha tenido esta tecnología en disciplinas como la biología, la medicina y la ciencia de materiales, en vísperas de su primer centenario.

Palabras clave: microscopía electrónica, historia de la microscopía electrónica, microscopía electrónica de transmisión (TEM), Avances en TEM.

Introducción

¿Qué tan pequeño es lo más pequeño que podemos ver? A finales del siglo XIX, la comunidad científica comenzaba a mirar más allá de lo visible, interesándose en los avances relacionados con las partículas subatómicas, como el electrón. Estos descubrimientos, fundamentales para la física moderna, dieron paso a nuevas teorías como el comportamiento dual del electrón propuesto por Louis de Broglie y el control de su trayectoria mediante campos magnéticos, demostrado por Hans Busch. Al mismo tiempo, la microscopía óptica —herramienta esencial en la exploración del mundo microscópico— alcanzaba sus límites de resolución, determinados por la naturaleza ondulatoria de la luz, tal como anticipó Ernest Abbe en 1878.

En este escenario nace, en 1906 en Heidelberg, Alemania, Ernst Ruska, quien desde joven mostró un profundo interés por la electricidad y las ondas electromagnéticas. Mientras realizaba su doctorado en la Universidad de Berlín, bajo la dirección del físico Max Knoll, Ruska se propuso superar las barreras de la microscopía óptica. En 1931, sus esfuerzos se materializaron con la invención del primer prototipo del Microscopio Electrónico de Transmisión (MET), un instrumento capaz de alcanzar resoluciones hasta entonces inimaginables.

Desde entonces, el MET ha transformado la forma en que exploramos la materia, haciendo posible el estudio de virus, estructuras atómicas y nanomateriales con una precisión extraordinaria. En campos como la medicina, la ciencia de materiales y la nanotecnología, sigue siendo una herramienta esencial para el descubrimiento científico. A casi un siglo de su invención, este artículo tiene como propósito acercar al público general al fascinante mundo del MET: su historia, su funcionamiento y algunos de los logros más notables alcanzados gracias a esta poderosa ventana hacia lo invisible.

Desarrollo

El inicio de la historia de la microscopía electrónica

El espectro electromagnético incluye desde ondas de radio ($\lambda = 10^3$ m) hasta rayos gamma ($\lambda = 10^{-13}$ m), siendo la luz visible solo una pequeña porción, entre 400 y 700 nm. A finales del siglo XIX, los microscopistas enfrentaban una limitación fundamental: la resolución máxima estaba restringida por la longitud de onda de la luz visible. En 1878, Ernest Abbe reconoció este límite y anticipó el desarrollo de nuevas técnicas que lo superarían (Abbe, 1878).

Durante ese periodo, se estudiaron los rayos catódicos (Figura 1A). Schuster y Crookes demostraron que podían desviarse con campos eléctricos y magnéticos. En 1897, J. J. Thomson confirmó que estaban compuestos por partículas

negativas —los electrones— y calculó su relación carga/masa (Thomson, 1897), lo que transformó el entendimiento de la estructura atómica y dio inicio a la era electrónica.

En 1924, Louis de Broglie propuso que los electrones también podían comportarse como ondas, con una longitud de onda $\lambda = h/p$ (donde λ es la longitud de la onda asociada a la partícula de cantidad de movimiento p y h es la constante de Planck), suficiente para generar difracción (de Broglie, 1924). Esto abrió la posibilidad de usarlos como fuente para observar objetos diminutos. El siguiente paso fue encontrar cómo enfocarlos: en 1927, Hans Busch demostró que un campo magnético cilíndrico podía actuar como lente electrónica (Busch, 1927), sentando así las bases del microscopio electrónico.

Este desarrollo sentó las bases de la microscopía electrónica como una tecnología óptica completamente nueva, basada en lentes magnéticas. En 1931, Ernst Ruska y Max Knoll construyeron el primer prototipo de microscopio electrónico de transmisión (MET), demostrando que era posible formar imágenes con campos electromagnéticos (Figura 1B). La Figura 1C muestra el esquema original anotado por Ruska y la Figura 1D un diagrama detallado del diseño, el cual aún conservaba elementos de la microscopía óptica, como aperturas y lentes objetivas.

En 1932, publicaron los primeros resultados, incluyendo imágenes de una rejilla de molibdeno y del haz de electrones, con ampliaciones de hasta 400x. Aunque enfrentaron problemas técnicos como vibraciones e inestabilidad del haz, estimaron que el MET podía superar mil veces la resolución de los microscopios ópticos (Knoll & Ruska, 1932). Este avance marcó un punto de inflexión en la exploración del mundo microscópico.

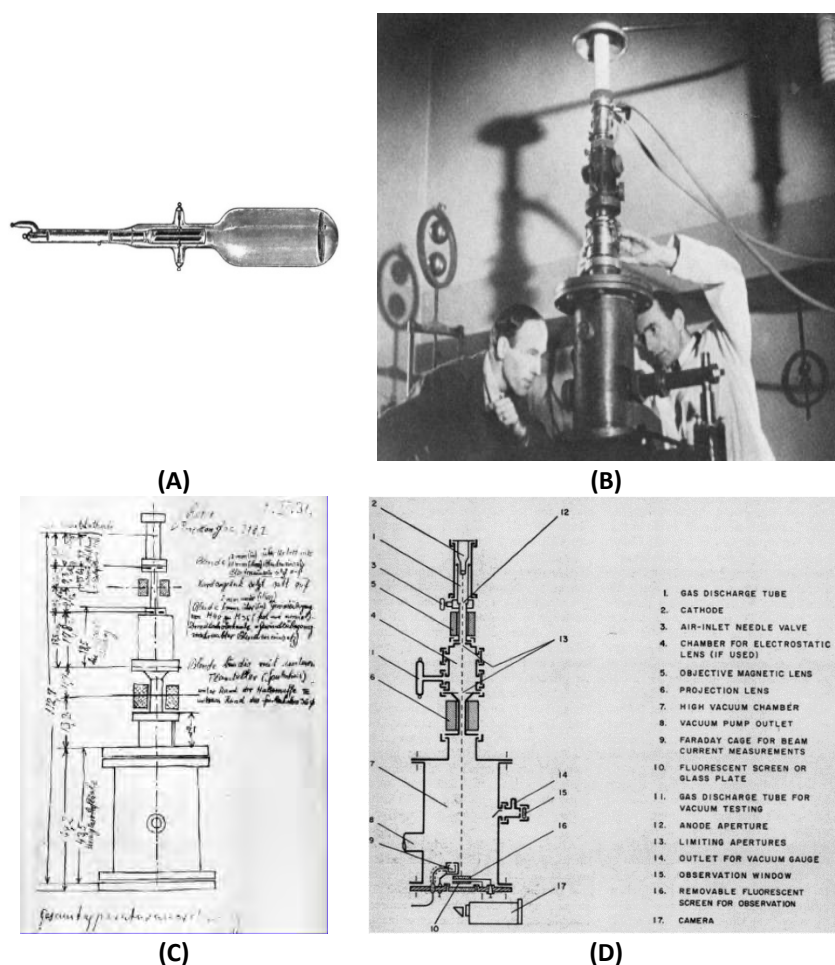


Figura 1. (A) Representación esquemática de un tubo de rayos catódicos, tecnología precursora de la microscopía electrónica; (B) fotografía histórica del primer prototipo de microscopio electrónico junto a sus inventores, Max Knoll y Ernst Ruska. Imagen cortesía del archivo histórico de la Max Planck Gesellschaft; (C) esquema dibujado a mano por Ernst Ruska, que muestra la configuración general del primer prototipo del MET; y (D) Diagrama detallado de las partes internas del prototipo, incluyendo

lentes magnéticas, aperturas y disposición vertical del haz de electrones. Publicadas por el Dr. Joachim Frank en su sitio web académico. Se incluyen con fines educativos y de análisis histórico.

En 1933, Ernst Ruska desarrolló un segundo prototipo de MET con mejoras notables (Figura 2A), alcanzando ampliaciones de hasta 50,000x. Incorporó tres lentes (condensadora, objetiva y proyectora) y operaba a 100 kV (Ruska, 1934). Las primeras pruebas con fibras y metales mostraron el potencial del instrumento. Su hermano Helmut Ruska aplicó el MET en biología, observando bacterias y virus como *E. coli* y Vaccinia a 20,000x sin tinción, demostrando su utilidad biomédica (von Borries, Ruska & Ruska, 1938).

En 1937, Ruska se unió a Siemens para desarrollar el primer MET comercial, el Siemens ÜM100 (Figura 2C), con resolución cercana a 10 nm (Figura 2B) (Ruska, 1986). Más de 30 equipos fueron distribuidos a centros de investigación hasta 1950. Tras la guerra, Ruska retomó su carrera académica en Berlín y en el Instituto Max Planck, dejando un legado clave en la estandarización y expansión del MET en la ciencia moderna.

A partir de entonces, la microscopía electrónica de transmisión (MET) se expandió con técnicas como Microscopía Electrónica de Transmisión por Barrido (STEM, por sus siglas en inglés), imagen en campo oscuro, espectroscopía de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) y espectroscopía de pérdida de energía de electrones (EELS, por sus siglas en inglés), ampliando su aplicación en materiales, biología, nanotecnología y medicina. Gracias al trabajo de científicos e ingenieros, el MET se transformó en una herramienta analítica de alta resolución. Para una visión histórica más detallada, véanse Haguenau *et al.* (2003), Williams y Carter (2009) y el discurso de Ruska (1986).

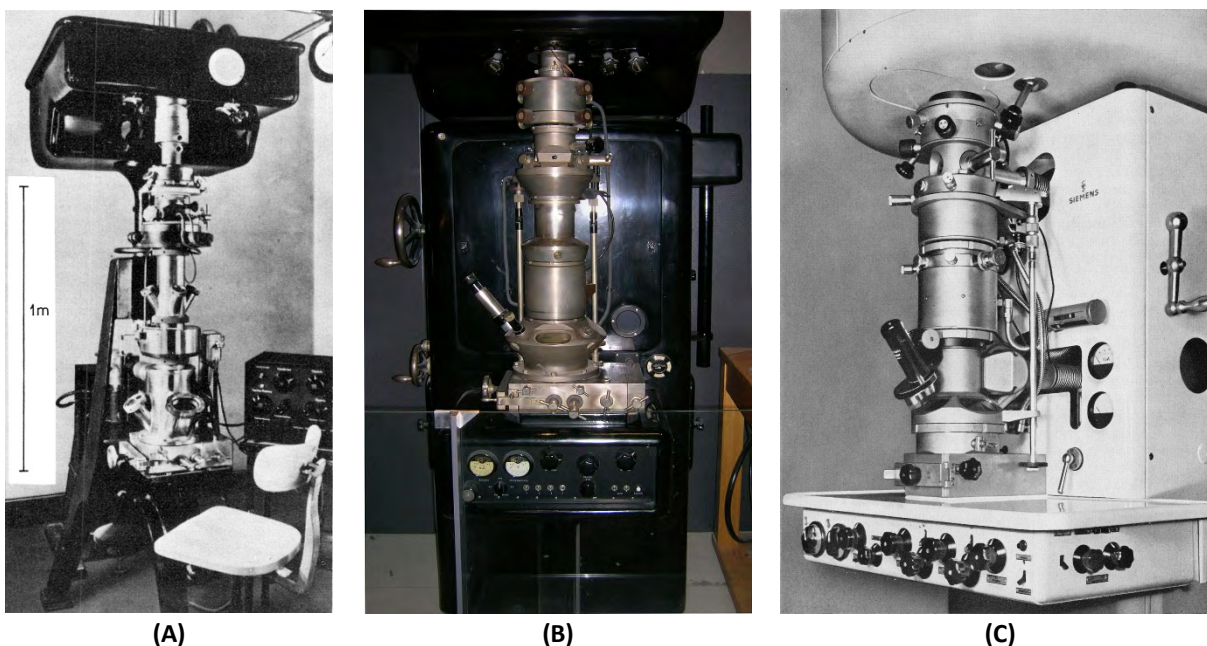


Figura 2. Evolución de los primeros modelos del MET: (A) Segundo prototipo construido por Ernst Ruska en 1933; (B) modelo Siemens Übermikroskop, desarrollado en colaboración con Bodo von Borries; y (C) Modelo Siemens ÜM100, el primer MET comercial distribuido internacionalmente. (Imágenes tomadas de: wiki.em-museum.org/index.php/Siemens).

Funcionamiento del MET

Hoy en día, los MET están compuestos por diversos subsistemas de alta tecnología, y su costo puede variar desde cientos de miles hasta varios millones de dólares. La tabla 1 da a conocer los principales componentes de un MET y su descripción o función dentro del equipo. Los microscopios de alta resolución suelen instalarse en salas especialmente acondicionadas para minimizar vibraciones electromagnéticas, mecánicas y variaciones de temperatura, lo cual es indispensable cuando se buscan observar estructuras del orden de unos pocos átomos y con una buena resolución de imagen.

Tabla 1. Partes principales de un MET y breve descripción del papel que desempeñan.

Componente	Descripción
Columna	Es una estructura metálica sellada al vacío por donde viaja el haz de electrones y contiene algunos de los componentes electrónicos del microscopio.
Cañón de electrones	Parte donde se genera el haz de electrones, utilizado como fuente de iluminación de la muestra. Aquí se localiza el cátodo.
Haz de electrones	Conjunto de electrones que son emitidos desde el cañón y viajan verticalmente por el espacio vacío de la columna.
Cátodo	Es un filamento delgado por el que se emite el haz de electrones. Puede estar hecho de tungsteno, monocristal de hexaboruro de lantano (LaB ₆) o de emisión de campo (FEG) de tipo Schotky o cátodo frío (CFEG).
Ánodo	Se encarga de extraer los electrones del filamento mediante un campo eléctrico para formar un haz acelerado.
Lente condensadora	Condensa el haz de electrones acelerado, es decir, reduce su diámetro a un tamaño micrométrico, además de alinearlos al eje vertical de la columna.
Lente objetiva	Esta lente se encarga de enfocar el haz sobre la muestra para obtener una primera imagen, así como el patrón de difracción.
Muestra	Debe ser sólida y delgada, de 100 nm o menos para que el haz pueda atravesar o “transmitirse”. Está depositada sobre una membrana de carbono amorfo sostenida en una rejilla metálica (Cu, Ni, Mo) de 3 mm de diámetro.
Lentes intermedias y proyectoras	Las intermedias magnifican y corrigen la rotación de la imagen con los aumentos, mientras que las proyectoras dan la amplificación final de la imagen en la pantalla de fósforo o cámara de alta resolución (Coupled-Charge Device, CCD).
Captura de imagen	Puede ser por una cámara CCD, que adquiere la imagen en archivos de datos, o en una pantalla de fosforo o película fotográfica (método antiguo).
Sistema de vacío	Para tener un vacío óptimo se utiliza una combinación de tipos de bombas como mecánicas, difusoras, turbomoleculares o iónicas, según el modelo del equipo.

Avances científicos impulsados por la microscopía electrónica de transmisión

Descubrimiento y visualización de virus

Durante décadas, los virus fueron invisibles a la observación directa por su diminuto tamaño. En 1892, Dmitri Ivanovsky estudió una enfermedad del tabaco y descubrió que el agente infeccioso atravesaba filtros diseñados para retener bacterias, lo que indicaba que no se trataba de una bacteria común. En 1898, Martinus Beijerinck retomó el trabajo y propuso el término “virus”, del latín *veneno*, consolidando así el concepto moderno de estos agentes ultramicroscópicos. Varios descubrimientos marcaron hitos en la virología: el virus del mosaico del tabaco (TMV) fue el primero en caracterizarse en plantas; en 1898, Loeffler y Frosch identificaron el virus de la fiebre aftosa en animales; y en humanos, Carlos Juan Finlay demostró en 1901 que la fiebre amarilla se transmitía por mosquitos.

En 1935, Wendell M. Stanley logró cristalizar el TMV, mostrando que los virus conservaban su infectividad incluso en estado cristalino, lo que reveló su naturaleza tanto biológica como química (Stanley. & Anderson, 1941). Este trabajo le valió el Premio Nobel de Química en 1946. En 1939, Ernst y Helmut Ruska, junto con Bodo von Borries, capturaron las primeras imágenes del TMV con un MET (Figura 3A), confirmando que esta herramienta podía revelar estructuras virales invisibles al microscopio óptico. Aunque no fueron premiados por este hallazgo específico, Ernst Ruska recibiría el Nobel en 1986 por su papel en el desarrollo del microscopio electrónico.

Estructura del ADN

En la década de 1950 se descubrió que los virus también contenían ácidos nucleicos como el ADN o ARN, los cuales actúan como material hereditario y son esenciales para la reproducción y funcionamiento de todos los seres vivos. El ADN, en particular, organiza y transmite la información genética necesaria para la vida (Watson, 2018).

Uno de los avances más significativos del siglo XX fue el modelo de la doble hélice del ADN, propuesto en 1953 por James Watson y Francis Crick. Este modelo explicaba cómo el ADN podía replicarse y almacenar información biológica, lo que les valió el Premio Nobel de Medicina en 1962 junto a Maurice Wilkins. Rosalind Franklin también hizo una contribución clave al obtener imágenes de difracción de rayos X que confirmaron la estructura helicoidal, aunque no fue incluida en el Nobel debido a su fallecimiento en 1958 (Klug, 1968). En 2012, un equipo liderado por Francesco Gentile en el Instituto de Tecnología de Italia desarrolló una técnica para observar ADN con el MET sin que la muestra se degradara. Utilizaron cadenas de ADN del bacteriófago λ depositadas sobre pilares de silicio hidrofóbicos. En la Figura 3 se muestran imágenes obtenidas con microscopía electrónica de barrido (3B-D) y de transmisión (3E), donde se aprecia una cadena de ADN aislada con su estructura helicoidal visible y una separación entre hélices de 2.7 nm. El conocimiento estructural del ADN ha permitido identificar enfermedades genéticas, estudiar mutaciones y avanzar en el desarrollo de terapias personalizadas.

Observación de estructuras subcelulares

La célula es la unidad estructural y funcional más pequeña de todos los seres vivos. Nuestro cuerpo está compuesto por miles de millones de células que no se pueden ver a simple vista. Cada célula alberga en su interior estructuras aún más diminutas, llamadas estructuras subcelulares u orgánulos, que desempeñan funciones vitales para el funcionamiento celular. Un ejemplo cotidiano es la insulina, una hormona producida por células del páncreas, que regula los niveles de azúcar en la sangre. Uno de los primeros estudios con MET en biología celular fue realizado en la década de 1940 por Keith Porter, Albert Claude y Ernest Fullam, del Instituto Rockefeller de Investigación Médica. Utilizando células del embrión de pollo, lograron obtener imágenes detalladas del núcleo, la membrana celular y las mitocondrias. La Figura 3F muestra una micrografía electrónica del núcleo de una de las células. (Porter, Claude & Fullam, 1945).

En 1955, el investigador George E. Palade obtuvo una de las primeras imágenes de ribosomas (encargados de producir proteínas) a partir de tejidos de ratas y pollos (Palade, 1955). En la Figura 3G, se muestra la micrografía de una célula pancreática de *Rattus rattus*, mostrando ribosomas asociados al retículo endoplásmico.

Los lisosomas se encargan de la digestión intracelular. En 1956, los científicos Alex B. Novikoff, Henri Beaufay y Christian de Duve presentaron imágenes de lisosomas obtenidas a partir de tejido hepático de ratas, donde se distinguen como cuerpos circulares o elípticos dentro de la célula (Novikoff *et al.*, 1956). La Figura 3H muestra una fracción lisosomal obtenida de hígado de rata, con estructuras densas similares (Yamane, Moriya & Kokuba, 2017).

La implementación del MET revolucionó el estudio de la célula y sus componentes. Hoy en día, permite desarrollar nuevas aplicaciones médicas, lo que resalta la importancia de conocer y aprovechar las ventajas analíticas de esta poderosa tecnología.

Cristalografía de proteínas y complejos macromoleculares

Comprender la estructura tridimensional de las proteínas y su función requiere técnicas de alta resolución como la cristalografía de proteínas y la microscopía electrónica de transmisión. La cristalografía permite formar cristales ordenados de proteínas mediante la modificación química de la solución, usando sales o polietilenglicol, facilitando así un análisis estructural detallado (Deller & Rupp, 2014), sin embargo, el uso del MET en muestras biológicas presenta el reto de que el haz de electrones puede dañarlas, especialmente por la presencia de agua, que al congelarse forma cristales que distorsionan la muestra. Este problema fue superado con la crio-microscopía electrónica (crio-EM), una técnica galardonada con el Premio Nobel de Química en 2017 (Dubochet, Frank & Henderson, 2017). La crio-EM congela rápidamente las biomoléculas en hielo vitrificado, evitando la formación de cristales y conservando su estructura nativa, permitiendo su observación sin daño (Bingham *et al.*, 2023).

Los científicos premiados realizaron aportes esenciales (Bedolla, 2018): Dubochet desarrolló la vitrificación del agua; Frank, los métodos computacionales para reconstrucción tridimensional; y Henderson, detectores digitales ultrasensibles que mejoraron la resolución y velocidad. La crio-EM ha transformado el estudio de proteínas, virus y complejos celulares, con gran impacto en biomedicina, nutrición y desarrollo de fármacos, ampliando nuestra comprensión del funcionamiento molecular de la vida.

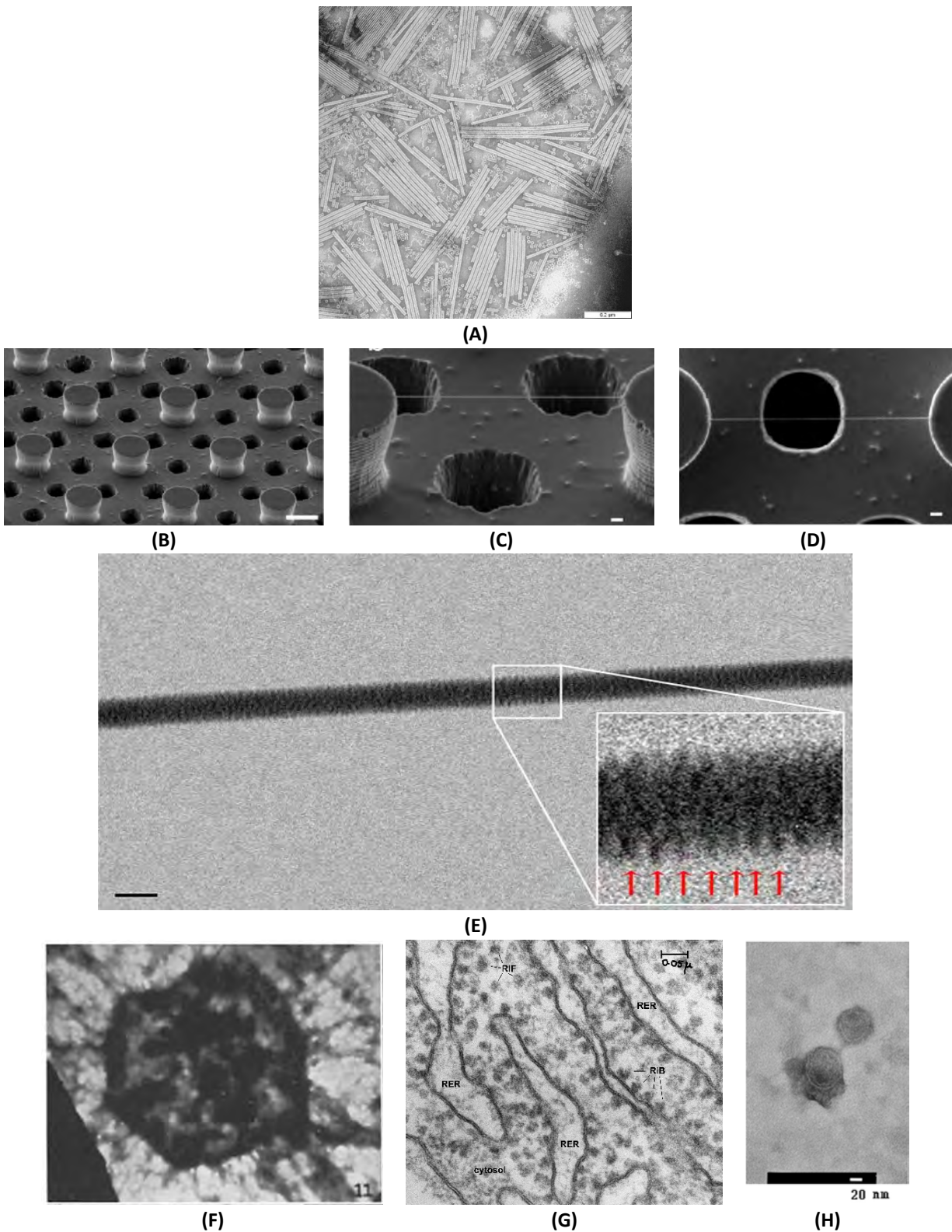


Figura 3. (A) Imagen del virus del mosaico del tabaco (TMV) obtenida mediante un MET a una magnificación de 20,000x (Ruska, 1938) Fuente: Max Planck Gesellschaft; (B) vista general del arreglo de múltiples cadenas, (C) acercamiento a una sola cadena suspendida, y (D) vista superior del orificio por donde pasará el haz de electrones en el MET; (E) Imagen obtenida por un MET donde se observa, por primera vez, la estructura de doble hélice del ADN con una resolución nanométrica (Gentile *et al.*, 2012); (F) Micrografía electrónica del núcleo de una célula de embrión de pollo, obtenida con MET a una magnificación de 4,100x (Porter *et al.*, 1945); (G) Campo de ribosomas distribuidos en el citoplasma, cortesía de The Cell Image Library (CIL:7607), utilizada con fines educativos bajo licencia de atribución; y (H) Fracción rica en lisosomas obtenida de hígado de rata (Yamane, Moriya & Kokuba, 2017).

Avances en la ciencia de materiales y nanotecnología

La ciencia de materiales combina física, química e ingeniería para estudiar cómo la estructura interna influye en las propiedades de los materiales. De ella surge la nanotecnología, enfocada en manipular la materia entre 1 y 100 nm. A esta escala, los materiales pueden adquirir propiedades inusuales como mayor dureza, mejor conductividad o comportamientos ópticos únicos (Guadalupe & Rodríguez-López, 2007). Se consideran nanomateriales aquellos en los que al menos el 50% de las partículas tienen dimensiones en ese rango, ya sea aisladas, agregadas o aglomeradas (Ema *et al.*, 2017).

Uno de los nanomateriales más representativos son los nanotubos de carbono (NTC), descubiertos por Sumio Iijima en 1991 (Figura 4A). Observados mediante el MET, estos tubos de hojas de grafeno enrolladas presentan estructuras concéntricas. Se sintetizaron mediante descarga de arco, técnica similar a la empleada en la obtención de fullerenos (Iijima, 1991). Gracias a sus enlaces carbono-carbono, poseen alta resistencia mecánica, flexibilidad y gran conductividad, con aplicaciones en electrónica, energía, biomateriales y aeroespacial (Zhang *et al.*, 2019). Otro avance clave es el grafeno, una capa de átomos de carbono dispuestos con simetría hexagonal, aislada por Geim y Novoselov en 2004 mediante exfoliación mecánica (Figura 4B). Su trabajo les valió el Premio Nobel de Física en 2010 (Novoselov *et al.*, 2004; Novoselov, 2011). La MET permitió observar su estructura atómica y el número de capas, lo que impulsó su aplicación en sensores, recubrimientos, compuestos conductores y dispositivos electrónicos flexibles (Casciardi, Sisto & Diociaiuti, 2013). Un caso paradigmático es el de los cuasicristales. En 1982, Dan Shechtman observó mediante el MET un patrón de difracción con simetría pentagonal en una aleación de aluminio y manganeso, lo que desafiaba los principios clásicos de la cristalografía (Figura 4C) (Shechtman & Blech, 1985). Aunque inicialmente cuestionado, el hallazgo fue validado y le valió el Premio Nobel de Química en 2011. A diferencia de los cristales convencionales, los cuasicristales son estructuras ordenadas pero no periódicas, con simetrías prohibidas en la cristalografía tradicional. Este descubrimiento amplió el concepto de orden en la materia sólida, abriendo nuevas posibilidades en recubrimientos, materiales resistentes a la fricción y diseño estructural avanzado.

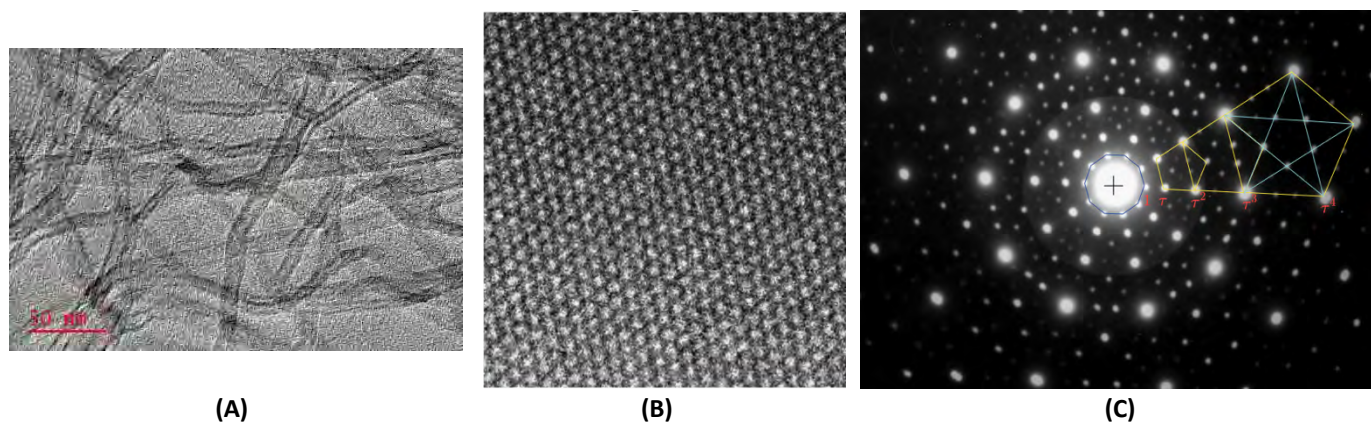


Figura 4. (A) Nanotubos de carbono de 2 capas, con diámetro de 5.5 nm (Babarinde & Madyira, 2023); (B) Grafeno monocapa obtenido con microscopía electrónica de alta resolución. Imagen publicada por Gatan, Inc., utilizada con fines educativos; (C) Patrón de difracción de electrones correspondiente a la fase icosadédrica de una aleación de Al_6Mn (Gratias & Quiquandon, 2019). El patrón muestra puntos de difracción bien definidos, comparables a los de un cristal de alta calidad, pero organizados con una simetría pentagonal que excluye la posibilidad de una estructura periódica. Esta evidencia fue clave para confirmar la existencia de los cuasicristales.

Perspectivas futuras de la microscopía electrónica de transmisión

A casi cien años de su invención, la microscopía electrónica de transmisión continúa posicionándose como una herramienta central en la caracterización estructural de materiales y sistemas biológicos a escala atómica. Los avances recientes en crio-microscopía electrónica (Cryo-EM), ópticas mejoradas por corrección de aberraciones, detectores de alto rendimiento, y análisis automatizado mediante inteligencia artificial han ampliado significativamente las capacidades del MET, permitiendo no solo la observación de estructuras estáticas con resolución sub-ångström, sino también el estudio de procesos dinámicos *in situ* y *operando*. En el contexto actual, marcado por la demanda de materiales funcionales avanzados, terapias biomoleculares específicas y tecnologías cuánticas, se espera que el MET

desempeñe un papel estratégico en la elucidación de mecanismos fundamentales que sustenten estos desarrollos. Además, nuevas tendencias están ampliando los horizontes de esta técnica. La criomicroscopía electrónica ha logrado visualizar canales iónicos como el TRPC5 a resoluciones de 2.8 Å, revelando detalles clave para la regulación funcional de proteínas (Duan *et al.*, 2019). Por su parte, la MET ultrarrápida (Ultrafast TEM) ha alcanzado escalas temporales del orden de los femtosegundos, permitiendo observar la dinámica de átomos durante reacciones químicas (Feist *et al.*, 2017; Verhoeven *et al.*, 2018). La criomicroscopía tomográfica (cryo-ET) facilita el análisis tridimensional de *estructuras in situ*, dentro del contexto celular (Turk & Baumeister, 2020), mientras que los algoritmos de inteligencia artificial ya permiten limpiar, segmentar y reconstruir imágenes complejas con rapidez y precisión (Bepler *et al.*, 2020). Esta convergencia de innovaciones instrumentales y metodológicas sugiere que el MET mantendrá, y posiblemente ampliará, su relevancia en la frontera del conocimiento científico durante las próximas décadas. Particularmente, la MET ha sido fundamental en la caracterización de perovskitas híbridas orgánico-inorgánicas para celdas solares, revelando defectos estructurales que afectan la eficiencia fotovoltaica (Kim *et al.*, 2019). También se ha empleado para analizar el ordenamiento atómico de nanopartículas de Au y Cu como electrocatalizador selectivo para la reducción de CO₂ (Kim *et al.*, 2017). Además, su aplicación en biopolímeros reforzados con nanocelulosa ha permitido visualizar la dispersión de fibras y su interacción con matrices biodegradables, contribuyendo al desarrollo de materiales sustentables de alto desempeño (Wang *et al.*, 2022).

Conclusiones

Desde su origen en los laboratorios de Berlín en la década de 1930, el microscopio electrónico de transmisión ha transformado la forma en que la humanidad observa el mundo. Su capacidad para revelar detalles a escalas atómicas ha posibilitado descubrimientos fundamentales en múltiples disciplinas, desde la biología molecular hasta la ciencia de materiales. La evolución técnica del MET —impulsada por mentes visionarias como la de Ernst Ruska— ha dado lugar a instrumentos cada vez más precisos y versátiles, expandiendo enormemente el horizonte de la investigación científica.

Como señaló Ruska en su discurso al recibir el Premio Nobel en 1986, el desarrollo de esta tecnología fue, en gran medida, una batalla contra las consecuencias indeseadas de las propiedades de los electrones: su alta energía, que puede dañar las muestras; su sensibilidad a interferencias externas, que requiere entornos altamente controlados; y su comportamiento ondulatorio, que, aunque permite alta resolución, exige un diseño óptico sumamente complejo. A pesar de estos desafíos, los avances logrados han sido tan extraordinarios que hoy resulta difícil imaginar el progreso de muchas disciplinas sin el MET.

La historia de la microscopía electrónica no solo es un testimonio del ingenio humano, sino también una muestra de cómo la perseverancia, la innovación y la colaboración interdisciplinaria pueden transformar radicalmente nuestra comprensión de la vida y la materia. En la antesala de su centenario, el MET se mantiene vigente como una herramienta clave para enfrentar los desafíos científicos del presente y del futuro.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen al Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (CIMAV) por el apoyo institucional brindado para la realización de este trabajo. Asimismo, L.E. D.-G. y R.I. G.-T. agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el respaldo otorgado a través de las becas de posgrado (No. 4004496 y 4047320, respectivamente) para cursar la Maestría en Ciencia de Materiales.

Bibliografía

- Abbe, E. (1878). Bericht über die wissenschaftlichen Apparate auf der Londoner internationalen Ausstellung im Jahre 1876 (Vol. 1). Vieweg. <https://archive.org/details/berichtberdiewi00appagoog>
- Babarinde, T., & Madyira, D. (2023). Images of Carbon Nanotubes (CNTs) from Transmission Electron Microscopy (TEM) [Micrografías]. Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/k8c2bnspxy.1>
- Bedolla, C. A. (2018). El premio Nobel de Química 2017: microscopía crio-electrónica. *Educación Química*, 29(1), 3. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2018.1.63678>
- Bepler, T., Kelley, K., Noble, A. J., & Berger, B. (2020). Topaz-Denoise: general deep denoising models for cryoEM and cryoET. *Nature communications*, 11(1), 5208. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18952-1>
- Bingham, M., Pesnot, T., & Scott, A. D. (2023). Biophysical screening and characterization in medicinal chemistry. *Progress in Medicinal Chemistry*, 61–104. <https://doi.org/10.1016/bs.pmch.2023.10.002>

- Busch, H. (1927). Über die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre. *Arch. Elektrotech.* 18, 583–594. <https://doi.org/10.1007/BF01656203>
- Casciardi, S., Sisto, R., & Diociaiuti, M. (2013). The Analytical Transmission Electron Microscopy: A Powerful Tool for the Investigation of Low-Dimensional Carbon Nanomaterials. *Journal of nanomaterials*, 2013(1), 506815. <https://doi.org/10.1155/2013/506815>
- De Broglie, L. (2021). Research on the theory of quanta (p. L). Montreal: Minkowski Institute Press. <https://minkowskiinstitute.org/mip/books/LdeB.html>
- Deller, M. C., & Rupp, B. (2014). Approaches to automated protein crystal harvesting. *Structural Biology and Crystallization Communications*, 70(2), 133–155. <https://doi.org/10.1107/S2053230X14000387>
- Duan, J., Li, J., Chen, G. L., Ge, Y., Liu, J., Xie, K., Peng, X., Zhou, W., Zhong, J., Zhang, Y., Xu, J., Xue, C., Liang, B., Zhu, L., Liu, W., Zhang, C., Tian, X.L., Wang, J., Clapham, Zeng, B., Li, Z., & Zhang, J. (2019). Cryo-EM structure of TRPC5 at 2.8-Å resolution reveals unique and conserved structural elements essential for channel function. *Science advances*, 5(7), eaaw7935. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaw7935>
- Dubochet, J., Frank, J., & Henderson, R. (2017). The nobel prize in chemistry 2017. Nobel Media AB. <https://www.kva.se/app/uploads/2017/10/presskeen17.pdf>
- Ema, M., Okuda, H., Gamo, M., & Honda, K. (2017). A review of reproductive and developmental toxicity of silver nanoparticles in laboratory animals. *Reproductive Toxicology*, 67, 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2017.01.005>
- Frank, J. (n.d.). The electron microscope: From a sketch in 1931 to reality [Fotografía]. Joachim Frank Lab. Recuperado de <https://joachimfranklab.org/the-electron-microscope-from-a-sketch-in-1931-to-reality/>
- Gatan, Inc. (n.d.). HRTEM images of graphene [Micrografía electrónica]. <https://www.gatan.com/resources/media-library/hrtem-images-graphene>
- Gentile, F., Moretti, M., Limongi, T., Falqui, A., Bertoni, G., Scarpellini, A., Santoriello, S., Maragliano, L., Proietti Zaccaria, R., & di Fabrizio, E. (2012). Direct imaging of DNA fibers: The visage of double helix. *Nano Letters*, 12(12), 6453–6458. <https://doi.org/10.1021/nl3039162>
- Gratias, D., & Quiquandon, M. (2019). Discovery of quasicrystals: The early days. *Comptes Rendus Physique*, 20(7–8), 803–816. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.05.009>
- Guadalupe, M. U., & Rodríguez-López, J. L. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles latinoamericanos*, 14(29), 161–186. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-76532007000100006&script=sci_arttext
- Haguenau, F., Hawkes, P. W., Hutchison, J. L., Satiat-Jeunemaître, B., Simon, G. T., & Williams, D. B. (2003). Key events in the history of electron microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 9(2), 96–138. <https://doi.org/10.1017/S1431927603030113>
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 354, 56–58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- Kim, D., Xie, C., Becknell, N., Yu, Y., Karamad, M., Chan, K., Crumlin, E., Norskov, J., & Yang, P. (2017). Electrochemical activation of CO₂ through atomic ordering transformations of AuCu nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*, 139(24), 8329–8336. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b03516>
- Kim, M., Kim, G. H., Lee, T. K., Choi, I. W., Choi, H. W., Jo, Y., Yoon, Y.J., Kim, J.W., Lee, J. Huh, D., Lee, H., Kwak, S.K., Kim, J.Y., & Kim, D. S. (2019). Methylammonium chloride induces intermediate phase stabilization for efficient perovskite solar cells. *Joule*, 3(9), 2179–2192. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.014>
- Klug, A. (1968). Rosalind Franklin and the discovery of the structure of DNA. *Nature*, 219(5156), 808–810. <https://doi.org/10.1038/219808a0>
- Knoll, M. and Ruska, E. (1932). Das Elektronenmikroskop. *Z. Physik*, 78, 318–339. <https://doi.org/10.1007/BF01342199>
- Max Planck Gesellschaft. (n.d.). Images of the Invisible: Max Knoll and Ernst Ruska, 1932 [Fotografía]. Recuperado de <https://www.nobel.mpg.de/en/images-of-the-invisible>
- Novikoff, A. B., Beaufay, H., & de Duve, C. (1956). Electron microscopy of lysosome-rich fractions from rat liver. *The Journal of biophysical and biochemical cytology*, 2(4), 179. <https://www.jstor.org/stable/1603006>
- Novoselov, K. S. (2011). Graphene: materials in the flatland (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition*, 50(31), 6986–7002. <https://doi.org/10.1002/anie.201101502>
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D. E., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V. & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1102896>
- Palade, G. E. (1955). A small particulate component of the cytoplasm. *The Journal of biophysical and biochemical cytology*, 1(1), 59. <https://doi.org/10.1083/jcb.1.1.59>
- Porter, K. R., Claude, A., & Fullam, E. F. (1945). A study of tissue culture cells by electron microscopy: methods and preliminary observations. *The Journal of experimental medicine*, 81(3), 233. <https://doi.org/10.1084/jem.81.3.233>
- Ruska, E. (1934). Über Fortschritte im Bau und in der Leistung des magnetischen Elektronenmikroskops. *Z. Physik*, 87, 580–602. <https://doi.org/10.1007/BF01333326>
- Ruska, E. (1986). The development of the electron microscope and of electron microscopy. *Nobel Lecture*, The Nobel Foundation. <https://doi.org/10.1007/BF01127674>
- Shechtman, D., & Blech, I. A. (1985). The microstructure of rapidly solidified Al 6 Mn. *Metallurgical Transactions A*, 16, 1005–1012. <https://doi.org/10.1007/BF02811670>
- Stanley, W. M. & Anderson, T. F. (1941). A Study of Purified Viruses with the Electron Microscope. *Biological Chemistry*, 139, 325–339. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)51389-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)51389-8)
- The Cell Image Library. (n.d.). CIL:7607 – Transmission electron micrograph of rat pancreatic cell showing ribosomes on rough endoplasmic reticulum [Micrografía electrónica]. The Cell Image Library. Recuperado de <https://www.cellimagelibrary.org/images/7607>
- Thomson, J. J. (1897). XL. Cathode rays. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 44(269), 293–316. <https://doi.org/10.1080/14786449708621070>
- Turk, M., & Baumeister, W. (2020). The promise and the challenges of cryo-electron tomography. *FEBS letters*, 594(20), 3243–3261. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.13948>
- Verhoeven, W., Van Rens, J. F. M., Kieft, E. R., Mutsaers, P. H. A., & Luiten, O. J. (2018). High quality ultrafast transmission electron microscopy using resonant microwave cavities. *Ultramicroscopy*, 188, 85–89. <https://doi.org/10.1016/j.ultramicro.2018.03.012>
- Von Borries, B., Ruska, E., & Ruska, H. (1938). Bakterien und Virus in Übermikroskopischer Aufnahme: Mit einer Einführung in die Technik des Übermikroskops. *Klinische Wochenschrift*, 17, 921–925. <https://doi.org/10.1007/BF01775798>

- Wang, J., Liang, Y., Huang, S., Jin, W., Li, Z., Zhang, Z., Ye, C., Chen, Y., Wei, P., Wang, Y., & Xia, Y. (2022). Conductive graphene coated carboxymethyl cellulose hybrid fibers with polymeric ionic liquids as intermediate. *Carbohydrate Polymers*, 280, 119009. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119009>
- Watson, J. D. (2018). ADN. El secreto de la vida (M. Serrano Giménez & I. Cifuentes de Castro, Trad.). Taurus. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=nshQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT23&dq=ADN.+El+secreto+de+la+vida&ots=2J6SQ8rs_P&sig=WfnN1XSg2wl7RDQEIE73yWnZ_qI#v=onepage&q=ADN.%20El%20secreto%20de%20la%20vida&f=false
- Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science. Springer. <https://doi.org/10.1017/S1431927699990529>
- Yamane, M., Moriya, S., & Kokuba, H. (2017). Visualization of ceramide channels in lysosomes following endogenous palmitoyl-ceramide accumulation as an initial step in the induction of necrosis. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 11, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.02.010>
- Zhang, C., Song, Y., Zhang, H., Lv, B., Qiao, J., Yu, N., Zhang, Y., Di, J., & Li, Q. (2019). Mechanical properties of carbon nanotube fibers at extreme temperatures. *Nanoscale*, 11(10), 4585–4590. <https://doi.org/10.1039/C8NR09637F>

Reconversión hospitalaria sustentable: cómo la inteligencia artificial y la simulación mejoran la gestión de suministros médicos

Ramiro Meza-Palacios ^{1,*}, Alberto A. Aguilar Lasserre ¹, Alina Evelyn Badillo Márquez ¹, German Domínguez Carrillo ²

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México TecNM, Campus Orizaba, Veracruz, México.

² TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Subdirección de posgrado e investigación. Álamo Temapache, Veracruz.

* Autor de correspondencia: ramiro.mepa@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 3 de septiembre de 2025

Publicado: 6 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.513>

Resumen: La reconversión hospitalaria es el proceso de adaptar rápidamente las infraestructuras y recursos de los hospitales ante situaciones de emergencia sanitaria, como las pandemias, los desastres naturales, etc. Este proceso es crucial para asegurar una respuesta eficiente a los picos de demanda de atención médica. En este contexto, las tecnologías emergentes como la Inteligencia Artificial (IA) y la simulación juegan un papel vital en la optimización de la gestión de suministros médicos y la logística hospitalaria. La IA permite predecir las necesidades de recursos médicos esenciales, como respiradores y medicamentos, utilizando datos históricos y patrones de consumo. Esto ayuda a anticiparse a la posible escasez y a reducir el desperdicio. Por otro lado, la simulación puede modelar escenarios logísticos en tiempo real, optimizando las rutas de distribución y mejorando la eficiencia en la entrega de suministros médicos. Además, la integración de estas tecnologías contribuye a la sustentabilidad, al minimizar el desperdicio de recursos y mejorar la eficiencia operativa. Este enfoque no solo ayuda a los hospitales a adaptarse mejor a situaciones de crisis, sino que también prepara los sistemas de salud para desafíos futuros, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible de los recursos médicos.

Palabras clave: inteligencia artificial; simulación; reconversión hospitalaria; emergencias sanitarias.

Introducción

La gestión eficiente de los suministros médicos y la logística de recursos es fundamental para el buen funcionamiento de los hospitales, especialmente durante situaciones de emergencias sanitarias. El rápido aumento de la demanda de recursos médicos críticos, como respiradores, mascarillas y medicamentos, expuso vulnerabilidades en los sistemas tradicionales de gestión de inventarios, como se observa en la Figura 1. Sin embargo, la integración de tecnologías avanzadas como la Inteligencia Artificial (IA) y la simulación han emergido como una solución clave para optimizar estos sistemas, mejorar la eficiencia y reducir el desperdicio. Además, dentro de este contexto, la reconversión hospitalaria juega un papel crucial. Este concepto se refiere al proceso de transformar la infraestructura, los recursos y la organización de un hospital para poder adaptarse a una situación de emergencia sanitaria (Arji *et al.*, 2023).

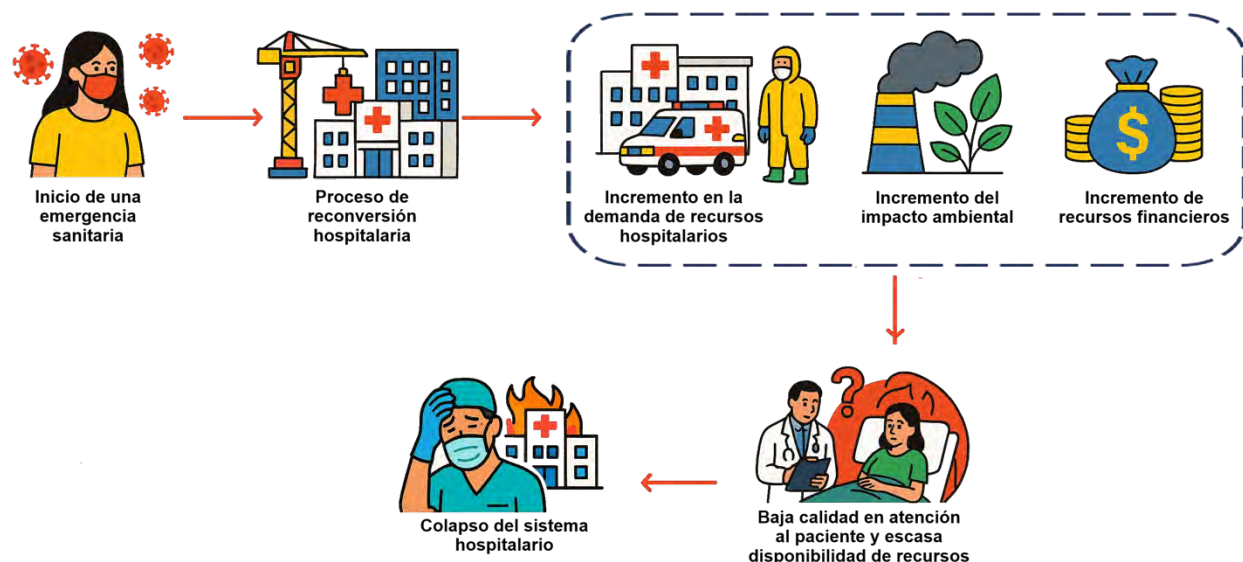


Figura 1. Consecuencias de un proceso de reconversión hospitalaria ineficiente.

Desarrollo

Inteligencia artificial para la predicción y gestión de inventarios

Uno de los mayores desafíos enfrentados por los hospitales durante emergencias sanitarias ha sido la escasez de suministros críticos. La IA ha demostrado ser una herramienta poderosa para prever las necesidades de suministros médicos y anticipar posibles desabastecimientos. A través del análisis de datos históricos, patrones de consumo y posibles brotes de enfermedades, los algoritmos de IA, como las Redes Neuronales Artificiales (RNAs), Lógica Difusa (LD) o los algoritmos de Machine Learning (ML) pueden predecir con alta precisión las demandas futuras de productos médicos esenciales. Esto permite que los hospitales se anticipen a las necesidades, mejoren la planificación de compras y gestionen mejor sus inventarios. Al predecir y gestionar mejor los inventarios, la IA contribuye a la sustentabilidad en el sector hospitalario. Optimizar la gestión de recursos asegura la disponibilidad de suministros y reduce el desperdicio (Ugwu *et al.*, 2024). Esto impacta positivamente en el medio ambiente, al minimizar la generación de recursos adicionales, como embalajes y transporte innecesarios. Además, la previsión precisa de suministros disminuye las compras excesivas, reduciendo la huella de carbono asociada con la fabricación y el transporte de productos médicos. Un ejemplo claro, es utilizar modelos predictivos de ML para que los hospitales puedan calcular las cantidades necesarias de equipos médicos según el número de pacientes previstos y la duración de sus tratamientos, minimizando tanto el riesgo de desabastecimiento como el exceso de inventario. Este enfoque ayuda a reducir costos, mejora la disponibilidad de productos críticos y, a largo plazo, optimiza los recursos materiales, financieros y humanos en los hospitales (Allahham *et al.*, 2023).

Simulación para la optimización de la cadena de suministro

La simulación ofrece un enfoque innovador para optimizar la distribución de suministros médicos en tiempo real, especialmente en situaciones donde las demandas varían rápidamente, como en una crisis sanitaria. A través de modelos complejos que integran varios métodos. Por ejemplo, el software AnyLogic puede modelar relaciones en diferentes niveles de complejidad al integrar tres tipos de simulación en un solo modelo (simulación de eventos discretos, simulación de agentes, y simulación dinámica). Con esta herramienta, los hospitales pueden anticipar y gestionar las fluctuaciones de la demanda y las interrupciones en la cadena de suministro. Una de las aplicaciones más eficaces de las simulaciones es el análisis de rutas de distribución utilizando software como anyLogistix. Los modelos de simulación permiten prever cómo las diferentes variables (como el transporte, la ubicación geográfica de los hospitales y la disponibilidad de personal) afectan la distribución de suministros, ayudando a optimizar la logística y garantizar que los recursos lleguen a donde se necesiten de la manera más eficiente posible (Aldrighetti *et al.*, 2019) (Camur *et al.*, 2023). Además, al mejorar la planificación de rutas y la asignación de recursos, se minimiza el uso innecesario de vehículos y energía, lo que contribuye a una reducción de la huella de carbono. Este enfoque también permite evitar el transporte excesivo de productos, lo que disminuye la contaminación ambiental generada por las emisiones de CO₂. Así, la simulación favorece la sustentabilidad al optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental asociado con la cadena de suministro. Un hospital en una región con limitados recursos de transporte utilizó simulación para analizar cómo se podían reducir los tiempos de entrega de suministros médicos esenciales, considerando las restricciones de tráfico y las variaciones en la demanda. Como resultado, el sistema propuso una nueva configuración de rutas, reduciendo significativamente los tiempos de espera y mejorando la disponibilidad de suministros para las unidades más críticas (Hu *et al.*, 2024).

Beneficios y futuro de la IA y la simulación en la gestión de recursos médicos

La integración de la IA y la simulación no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la sustentabilidad. Al prever y gestionar mejor los inventarios, los hospitales pueden reducir el desperdicio de suministros y minimizar el impacto ambiental de las compras excesivas o el desecho de productos médicos no utilizados. Además, estas tecnologías permiten una mejor toma de decisiones a nivel estratégico, tanto en la planificación de recursos como en la respuesta a emergencias (Qu & Kim, 2024).

El futuro de la gestión de suministros médicos y la logística de recursos estará marcado por una mayor automatización y precisión gracias al uso de tecnologías como la IA. La constante mejora en los algoritmos predictivos y la simulación hará posible un sistema hospitalario más eficiente, resiliente y adaptado a las necesidades cambiantes de los hospitales

y las comunidades a nivel mundial (Ortiz-Barrios *et al.*, 2020). La Figura 2 describe el proceso de intervención de la IA y la simulación en la reconversión hospitalaria. En esta figura se describe como ambas tecnologías pueden optimizar inventarios y los recursos hospitalarios. Además, facilitan una toma de decisiones más informada y estratégica. La automatización y los algoritmos predictivos aumentan la eficiencia y resiliencia de los hospitales, adaptándolos a situaciones cambiantes.

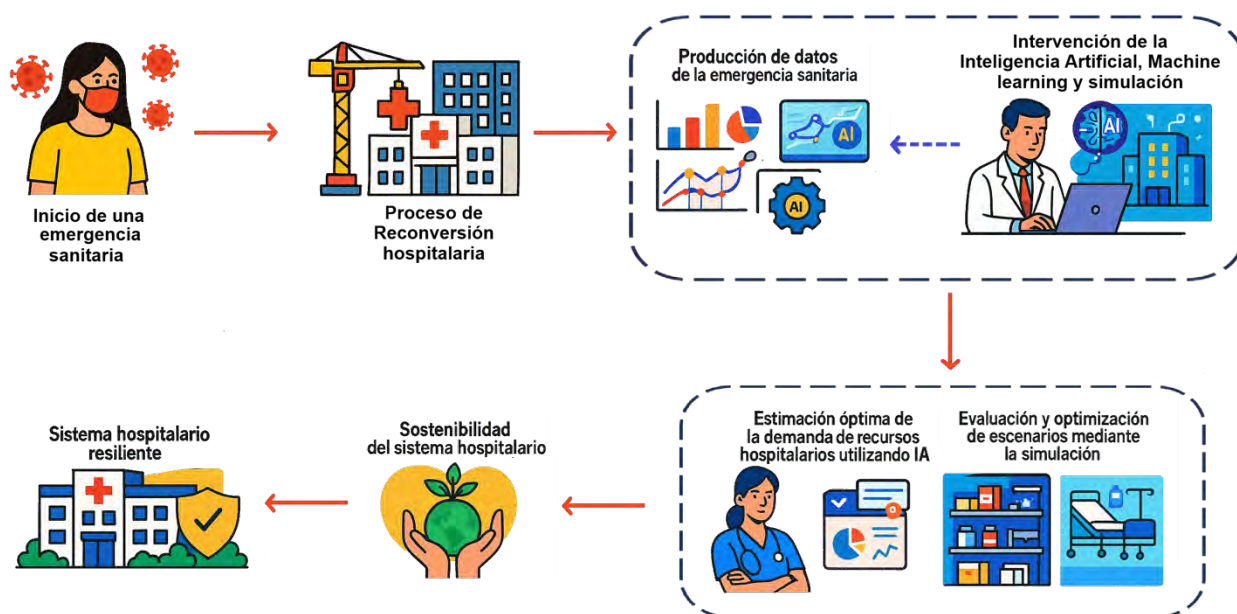


Figura 2. Intervención de la IA y la simulación en la reconversión hospitalar.

Limitaciones consideradas para un uso efectivo y eficiente de la IA y la simulación

La implementación de IA y simulación en hospitales enfrenta varias limitaciones. En primer lugar, la calidad y disponibilidad de los datos es crucial para la efectividad de estas tecnologías, pero muchos hospitales carecen de datos completos e integrados, lo que puede afectar las predicciones y decisiones operativas (Ahmed *et al.*, 2023). Además, la capacitación del personal es un desafío, ya que la falta de formación especializada puede generar resistencia al cambio y errores operativos, afectando la eficiencia del sistema (Wei *et al.*, 2025).

Otro obstáculo importante son los costos asociados, como la adquisición de software, hardware y la capacitación del personal, que pueden ser prohibitivos para hospitales con presupuestos limitados (Senvisky *et al.*, 2023). Finalmente, la integración con sistemas existentes es compleja y costosa, ya que muchos hospitales operan con infraestructuras tecnológicas anticuadas (Borges do Nascimento *et al.*, 2023).

Reconversión hospitalaria: un enfoque crítico en situaciones de emergencia

La reconversión hospitalaria es un proceso clave cuando los sistemas de salud deben adaptarse rápidamente a situaciones excepcionales, como una pandemia. Durante la crisis sanitaria global provocada por el COVID-19, los hospitales tuvieron que reorganizar sus capacidades, modificar sus instalaciones y redistribuir sus recursos para poder hacer frente al aumento de la demanda de atención médica. Este proceso incluye la reconversión de espacios físicos, la reconfiguración de las áreas de atención y la reorientación de los recursos médicos para poder responder de manera más eficiente a la emergencia. La reconversión hospitalaria no solo implica el ajuste en las infraestructuras, sino también en la forma en que los hospitales gestionan sus suministros y recursos humanos. La IA y la simulación optimizan la gestión de recursos, mejorando la eficiencia y reduciendo el desperdicio al predecir las demandas de suministros médicos mediante el análisis de datos históricos y patrones de consumo, ayuda a los hospitales a evitar tanto el desabastecimiento como el exceso de inventario.

Esto tiene un impacto positivo en el medio ambiente, al minimizar la necesidad de nuevos recursos y transportes, lo que disminuye la huella de carbono. Estas tecnologías apoyan una reconversión más sustentable, permitiendo una respuesta rápida sin comprometer el entorno. Además, favorecen una gestión eficiente y adaptativa ante futuras emergencias sanitarias (Perez-Tezoco *et al.*, 2023).

Conclusiones

La IA y la simulación han transformado la manera en que los hospitales gestionan sus suministros médicos y recursos logísticos. Estas tecnologías no solo optimizan la eficiencia y la disponibilidad de recursos, sino que también reducen el desperdicio y permiten una respuesta más rápida y adaptativa a situaciones de emergencia. A medida que estas tecnologías continúan evolucionando, es probable que jueguen un papel aún más crucial en la creación de sistemas hospitalarios más sostenibles y preparados para afrontar futuros desafíos sanitarios globales. La reconversión hospitalaria, facilitada por estas herramientas, es esencial para mejorar la resiliencia del sistema de salud frente a emergencias sanitarias.

Bibliografía

- Ahmed, M. I., Spooner, B., Isherwood, J., Lane, M., Orrock, E., & Dennison, A. (2023). A Systematic Review of the Barriers to the Implementation of Artificial Intelligence in Healthcare. *Cureus*, 15(10). <https://doi.org/10.7759/cureus.46454>
- Aldrighetti, R., Zennaro, I., Finco, S., & Battini, D. (2019). Healthcare Supply Chain Simulation with Disruption Considerations: A Case Study from Northern Italy. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 20(s1), 81–102. <https://doi.org/10.1007/s40171-019-00223-8>
- Allahham, M., Sharabati, A. A., Hatamlah, H., Ahmad, A. Y. B., Sabra, S., & Daoud, M. K. (2023). Big Data Analytics and AI for Green Supply Chain Integration and Sustainability in Hospitals. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 19, 1218–1230. <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.111>
- Arji, G., Ahmadi, H., Avazpoor, P., & Hemmat, M. (2023). Identifying resilience strategies for disruption management in the healthcare supply chain during COVID-19 by digital innovations: A systematic literature review. *Informatics in Medicine Unlocked*, 38(November 2022), 101199. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2023.101199>
- Borges do Nascimento, I. J., Abdulazeem, H., Vasanthan, L. T., Martinez, E. Z., Zucoloto, M. L., Østengaard, L., Azzopardi-Muscat, N., Zapata, T., & Novillo-Ortiz, D. (2023). Barriers and facilitators to utilizing digital health technologies by healthcare professionals. *Npj Digital Medicine*, 6(1), 1–28. <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00899-4>
- Camur, M., Thanos, A., Yund, W., Tseng, C., White, C., & Iakovou, E. (2023). An integrated system dynamics and discrete event supply chain simulation framework for supply chain resilience with non-stationary pandemic. *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference*, IEEE Access, 1617–1628. <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407779>
- Hu, J., Zhang, Y., Liu, Y., Hou, J., & Zhang, A. (2024). Optimization of household medical waste recycling logistics routes : Considering contamination risks. *PLoS ONE*, 19(10), 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311582>
- Ortiz-Barrios, M., Arias-Fonseca, A., Ishizaka, A., Barbat, M., Avendaño-Collante, B., & Navarro-Jiménez, E. (2020). Artificial intelligence and discrete-event simulation for capacity management of intensive care units during the Covid-19 pandemic : A case study. *Journal of Business Research Journal*, 160(113806). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113806>
- Perez-Tezoco, J. Y., Aguilar-Lasserre, A. A., Moras-Sánchez, C. G., Vázquez-Rodríguez, C. F., & Azzaro-Pantel, C. (2023). Hospital reconversion in response to the COVID-19 pandemic using simulation and multi-objective genetic algorithms. *Computers and Industrial Engineering*, 182(June). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109408>
- Qu, C., & Kim, E. (2024). Reviewing the Roles of AI-Integrated Technologies in Sustainable Supply Chain Management : Research Propositions and a Framework for Future Directions. *Sustainability*, 16(6168), 2–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16146186>
- Senvisky, J., McKenna, R., & Okuda, Y. (2023). *Financing And Funding A Simulation Center*. StatPearls. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK568786/>
- Ugwu, O., Omolola, H. F., Sanusi, M., Onasanya, T., Ugwu, O. I., Peay, A., & Adetoun Sanusi, M. (2024). Artificial Intelligence in Healthcare Supply Chains: Enhancing Resilience and Reducing Waste. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 10(3), 203–217. <https://www.ijariit.com>
- Wei, Q., Pan, S., Liu, X., Hong, M., Nong, C., & Zhang, W. (2025). The integration of AI in nursing: addressing current applications, challenges, and future directions. *Frontiers in Medicine*, 12(4). <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1545420>

Estado actual y futuro de las medidas para la mitigación del cambio climático

Juan Francisco Cedano Lezcano *

Sistemas Mecánicos Tabasco, CIATEQ A.C, Tabasco, México.

* Autor de correspondencia: juan.cedano@ciateq.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 15 de agosto de 2025

Publicado: 6 de octubre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.516>

Resumen: En este estudio se presenta un recuento general del estado actual y futuro para mitigar el calentamiento global del planeta, y se plantean acciones para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero y la captura y secuestro de CO₂. La contribución actual del uso de fuentes renovables tales como la energía solar, eólica, geotermia, bioenergía y soluciones de electromovilidad es baja, y las medidas hasta ahora establecidas para prevenir el incremento de la temperatura en 1.5 °C para 2030, no han tenido el impacto esperado. Aun cuando existen compromisos de los países, la mayoría de ellas solo son en el discurso. Se plantean acciones de gran alcance para la reducción de CO₂ en la atmósfera, desde la captura y secuestro hasta acciones más lentas en actividad agropecuarias y forestales para el secuestro de grandes cantidades de carbono. Acciones de mayor impacto, aun con riesgos no dimensionados incluyen la manipulación del medio ambiente a través de proyectos de geoingeniería para lograr el enfriamiento del planeta y la captura y secuestro del carbono. En conclusión, con las medidas actuales y las previstas a corto plazo, no se provee reducir el calentamiento global del planeta, menos aún si se sigue manteniendo el mismo nivel de vida de alto consumo energético de la población, asociado al crecimiento poblacional; y buscando solamente la eficiencia energética de los procesos.

Palabras clave: cambio climático, renovable, medio ambiente, calentamiento global.

Introducción

El cambio climático reconocido formalmente desde 1992, se refiere al incremento gradual de la temperatura del planeta y a la modificación de los patrones de comportamiento del clima. Aunque este cambio se puede asociar a fenómenos naturales, se ha concluido que el incremento de la temperatura se promueve de forma importante por la actividad antropogénica en general y un caso particular por el uso de combustibles fósiles en la actividad humana; estos combustibles emiten diversos contaminantes que provocan gases efecto invernadero (GEI) y calientan la atmósfera terrestre. Dadas las consecuencias que puede originar esta modificación de los patrones climáticos y los consecuentes desastres, hoy en día existe una alarma generalizada por la contención del incremento de la temperatura, que a saber no deberá superar 1.5 °C para 2030; por esta razón diversos países, desde 1992 se han comprometido de forma voluntaria u obligatoria a mitigar las emisiones contaminantes, siendo una opción el cambio de fuentes de energía de origen fósil por aquellas renovables. La necesidad de mantener el mismo ritmo de desarrollo económico y nivel de vida, eficientizando procesos y manteniendo casi el mismo nivel de consumo energético, han impedido un impacto notorio en la reducción de emisiones, razón por la cual el incremento de temperatura sigue al alza y se pronostica que antes de 2060, se lleguen a valores que superen los 2 °C. La contribución de las energías renovables a la transición de energías contaminantes a no contaminantes es notoriamente baja, y su participación en el mercado se debe más a factores de tipo comercial y económico, que a razones consientes del cuidado del medio ambiente. Mas aún porque un alto porcentaje de las fuentes de energía utilizadas en la actividad humana provienen de combustibles fósiles tales como el petróleo, el carbón y el gas. Por lo anterior, en este trabajo se presenta un recuento del estado actual y futuro de las acciones para la mitigación del cambio climático, en este trabajo se analizan las mediadas actuales, las proyecciones a 2030 y las tecnologías emergentes con el que se pretende mostrar las acciones que se llevan a cabo y futuras encaminadas a eliminar las emisiones contaminantes.

Este trabajo realizó mediante la recopilación y análisis de información de fuentes bibliográficas recientes no menores a 5 años, provenientes de trabajos de investigación, revistas de divulgación científica, artículos de prensa, trabajos de tesis, e informes de instituciones públicas y privadas a nivel mundial. El objetivo, fue conjuntar información que permitan bosquejar un panorama general del estado actual del uso de las fuentes de energía convencionales y no convencionales, las emisiones de GEI generadas por ellas y las acciones presentes para su mitigación, así como las posibles acciones que se están proyectando en el corto plazo para reducir las emisiones, contener la temperatura global del planeta y mitigar el cambio climático.

Desarrollo

Al término de segunda guerra mundial en 1945, el crecimiento poblacional y económico se aceleró, requiriendo más energía para los procesos productivos. A partir de ese año y hasta inicios de los años 70s, las fuentes principales de energía provinieron de la biomasa como fuente primaria para la combustión, seguida del carbón mineral, el petróleo y el gas, y empieza a figurar la hidroelectricidad, (Figura 1) (Martín de la Plaza, 2021). El consumo de energéticos para 1945 fue del orden de 26 TWh y para 2019, 74 años después, el consumo ya fue de 148 TWh. El uso de fuentes renovables de energía fue visible a partir de los años 90s, cuando se reconoce que el planeta registra un incremento de su temperatura, debido a la acumulación de GEI. Para 2022, la contribución de las energías renovables fue de orden de 14.4% con energía solar, eólica y otras menores como geotermia y mareomotriz (Arenales, J.V., 2023). Asociado al crecimiento poblacional y económico después de 1945 y al incremento en el uso de combustibles fósiles, se incrementa de forma alarmante las emisiones contaminantes que en 1945 estuvieron en el orden de 5,000 Millones de toneladas de CO₂e, y para 2023, las emisiones llegaron a 37,400 millones de toneladas (FORBES, 2023), siendo que el mayor incremento ha sucedido en los últimos 30 años con el 52.7% (BBC News Mundo, 2021). Este crecimiento en emisiones se asocia directamente al crecimiento poblacional, para 1980 la población fue de aproximadamente 4,500 millones, y para 2023 superó los 8,000 millones (Naciones Unidas México, 2023). Las cifras actuales indican que el 82 % del consumo mundial de energía se basa combustibles de origen fósil tales como el petróleo, el carbón y el gas natural, lo cuales son los promotores fundamentales de las emisiones de GEI, y que además el 80% de dicha energía se utiliza para el transporte, que significa la movilidad tanto de personas como de mercancías (Radar Energético, 2023). Basado en este escenario, se percibe inalcanzable la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera en el corto tiempo considerando que se tiene una meta definida para el año 2030.

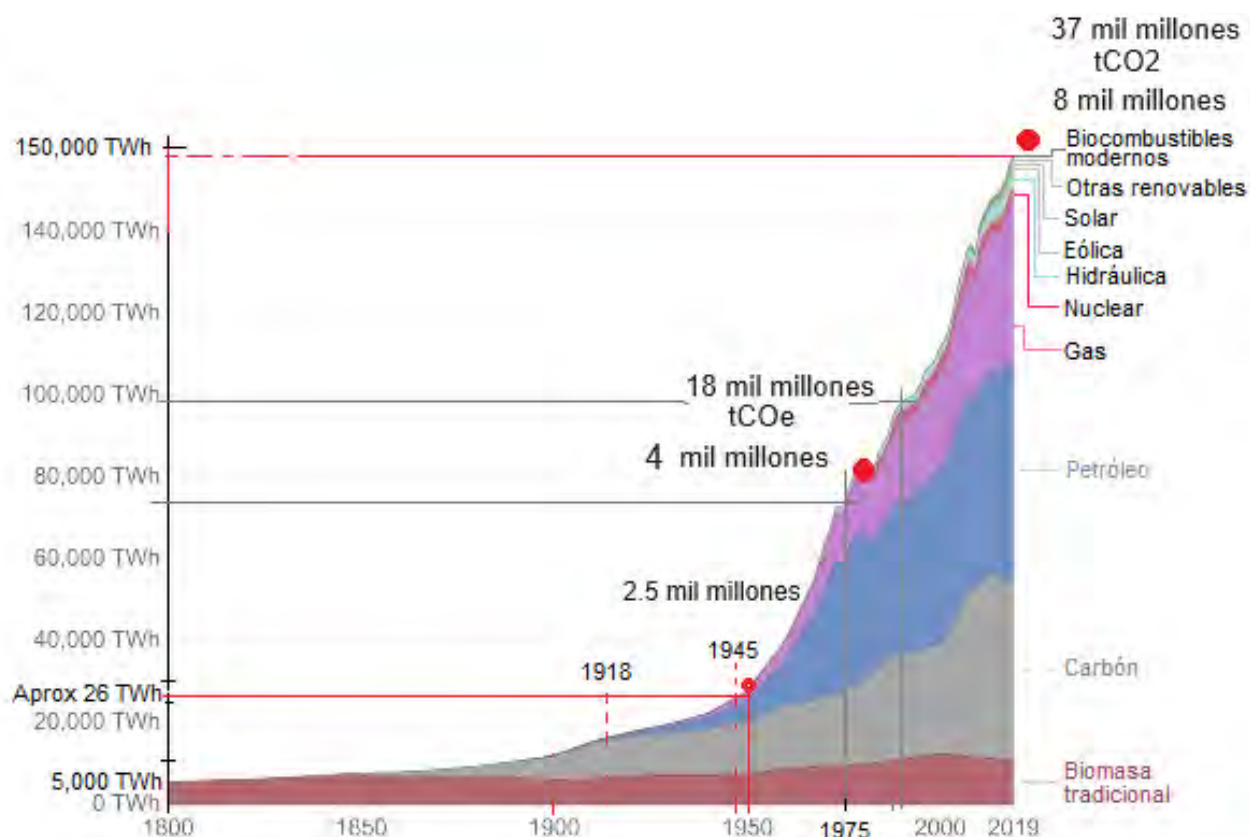


Figura. 1. Aportación energética de las diferentes fuentes a través del tiempo (adaptado de Martín de la Plaza, I., 2021 y datos de Global Carbón Project, 2023).

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía citado por FORBES, en 2022 las emisiones contaminantes tuvieron un crecimiento de 1.3%, las cuales disminuyeron para 2023 a 1.1 %, lo que se atribuyó al uso de energías alternas. Se menciona que esta disminución pudo ser mayor, pero se vio afectada por la reapertura de la economía china, el

aumento del uso de combustibles fósiles en países con escasa producción hidroeléctrica y la recuperación del sector de la aviación.

Acuerdos de las COPs

El reconocimiento del problema del calentamiento global del planeta se inició en 1988 con la creación del Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC), dentro del programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y la Organización Meteorológica Mundial (OMM). El primer informe de evaluación de 1992 (Global Carbon Project, 2021), reconoce la existencia del efecto invernadero y que las emisiones producidas por la actividad antropogénica aumentan las concentraciones atmosféricas de gases que potencian el efecto invernadero. A través del tiempo, de los estudios del IPCC y de la creación de la Conferencia de las Partes (COP), se identifican tres procesos biofísicos de alto riesgo que contribuyen al deterioro del planeta: la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, todos ellos dependientes, relacionados y asociados al crecimiento poblacional y al desarrollo económico. A la fecha se han llevado 28 reuniones, la última se realizó en Dubái, lográndose uno los mayores acuerdos, y en vísperas de pronósticos de grandes catástrofes. Se logra, en el discurso, el conceso de los países miembros que señala “...el principio del fin de los combustibles fósiles, lo cual se considera inevitable” (Pacto Mundial Red España, 2023). De igual forma se establece que para limitar el calentamiento global a 1,5°C, se deben reducir las emisiones mundiales de GEI un 43% hasta 2030 y un 60% hasta 2035 en relación con los niveles de 2019, y alcanzar las emisiones netas de dióxido de carbono cero para 2050. Se establece como objetivo para 2030 triplicar la capacidad global de energías renovables y duplicar la tasa media anual mundial de mejora de la eficiencia energética. De esta lógica, y considerando que la producción promedio per cápita de CO₂ actual es de 4.3 ton (Banco Mundial, 2023), se tendría que limitar la actividad antropogénica de aproximadamente 3,400 millones de personas para lograr la meta de 2030 para dejar de producir 14,800 millones de toneladas de CO₂, o aproximadamente 5,100 millones de personas para 2035. Dado que es imposible limitar la actividad humana, será necesario suplir el consumo de energía contaminante por renovable para sostener el mismo ritmo de crecimiento, o desarrollar formas masivas de captura de CO₂.

En la figura 2 se muestran cuatro escenarios que pueden suceder para la mitigación del calentamiento global. El primero y con las políticas actuales, muestra cambios poco significativos que tan solo reducirían el 11% de emisiones de aquí a 2030; el escenario para lograr mantener 1.5 °C, solo permitiría generar un máximo de 380 GtCO₂ e a⁻¹ (gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año) de gases de aquí a 2040, que es el escenario ideal, pero es difícil de contener.

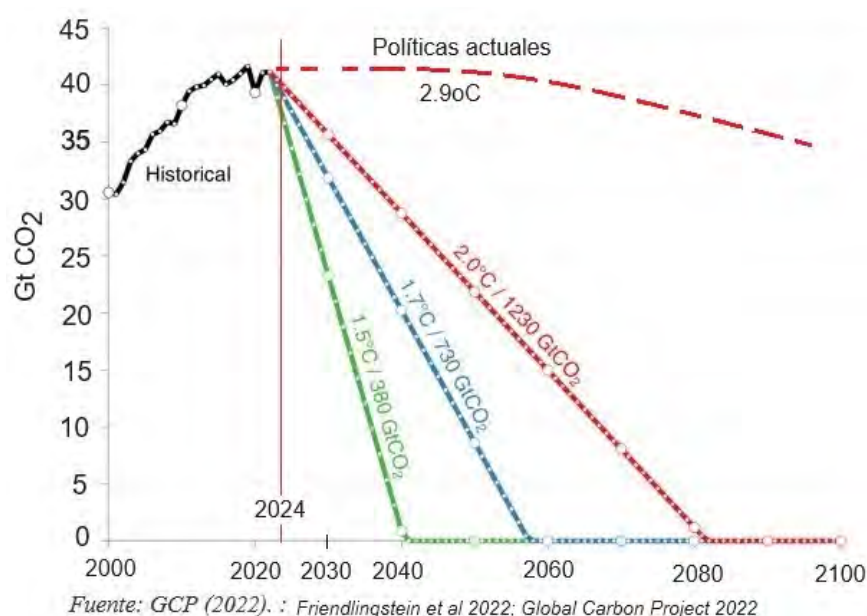


Figura. 2. Escenario para limitar el incremento global de la temperatura para CO₂e nulo (adaptado de Antonio Serrano, 2022).

El cambio climático monitoreado principalmente por el incremento de la temperatura promedio del planeta se acerca los límites que pueden provocar grandes catástrofes; de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (2023) citado por ONU-Mex (2023), existe un 66 % de probabilidades de que la temperatura media anual cercana a la superficie, entre 2023 y 2027, supere, en más de 1.5 °C, los niveles preindustriales durante al menos un año. Existe la probabilidad de un 98 % de que, al menos uno de los próximos cinco años, sea el más cálido jamás registrado (World Meteorological Organization. 2023). Aun cuando el tema se ha venido atendiendo desde las cumbres climáticas, los resultados no han tenido el impacto esperado, teniendo un crecimiento lento; los esfuerzos se han orientado a tres líneas fundamentales: eficiencia energética, uso de fuentes renovables de energía y captura de carbono, y en los últimos años, se concibe la idea de la manipulación del clima, y la captura y secuestro de CO₂, así como el uso de fuentes de energías promisorias como el hidrógeno.

De acuerdo con estos antecedentes, se revisan las acciones generales que se realizan para mitigar el cambio climático y las acciones presentes y futuras para lograr una transición energética a combustibles más limpios, o reducir la presencia de CO₂ o de alguna forma enfriar al planeta, o secuestrar el CO₂ para detener el incremento de la temperatura global del planeta (Figura 3).



Figura 3. Línea de tiempo de principales fuentes de generación de gases contaminantes Vs energías alternas.

Metas climáticas internacionales a 2030 y 2050

Para lograr esto, el IPCC de la ONU ha considerado tres categorías de acciones: (1) reducir las emisiones, (2) adaptarse a los impactos climáticos y (3) financiar los ajustes necesarios. Aun cuando diversos países se han comprometido a alcanzar cero emisiones para 2050, se debe prever que al menos la mitad de la reducción deberá suceder antes de 2030 para mantener los niveles de temperatura por debajo de 1.5 °C. Para lograr esto, se requiere grandes reducciones en el uso de carbón, petróleo y gas; se debe reducir en más de dos tercios la extracción de las reservas actuales confirmadas de combustibles fósiles, lo cual parece imposible. Lograr estas metas globales, exige medidas en tres frentes: políticas firmes para alcanzar emisiones netas cero de aquí a 2050, medidas decididas para adaptarse al calentamiento global que ya es permanente, y respaldo financiero sólido para ayudar a los países vulnerables a costear estos esfuerzos (Kristalina Georgieva, 2022). A la fecha, aproximadamente 140 países como China, Estados Unidos, la India, la unión europea, Rusia, Japón, Australia y Brasil que representan el 91% de las emisiones de GEI, dentro de sus políticas, acciones y concepciones globales han implantado y planteado como meta emisiones netas cero para mediados de siglo; sin embargo, aún no se perciben avances notables en la reducción de emisiones. Lograr emisiones

netas cero requiere de acciones contundentes de la mayoría de los países, sobre todo de las grandes economías, que son las más contaminantes.

Acciones presentes y futuras

Las acciones ya implementadas para transitar de energías contaminantes a limpias muestran un futuro prometedor tales como la eólica, solar, geo, mareomotriz y bioenergía, al existir instalaciones que en mayor o menor grado han contribuido a la generación de energías limpias, y que fundamentalmente obedecen a su factibilidad técnica y económica cuyo éxito les ha permitido mantenerse en el mercado. Sin embargo, existen otras acciones que están promoviendo la tan urgente transición energética. Dentro de las políticas, acciones y concepciones globales que están implementando y planteando algunos países, se pueden citar: la educación para el cambio climático, el concepto de economía verde y bonos de carbono, impuestos ambientales, programas y planes de transición energética, el secuestro de carbono, y la geoingeniería, entre otras (Figura 4).

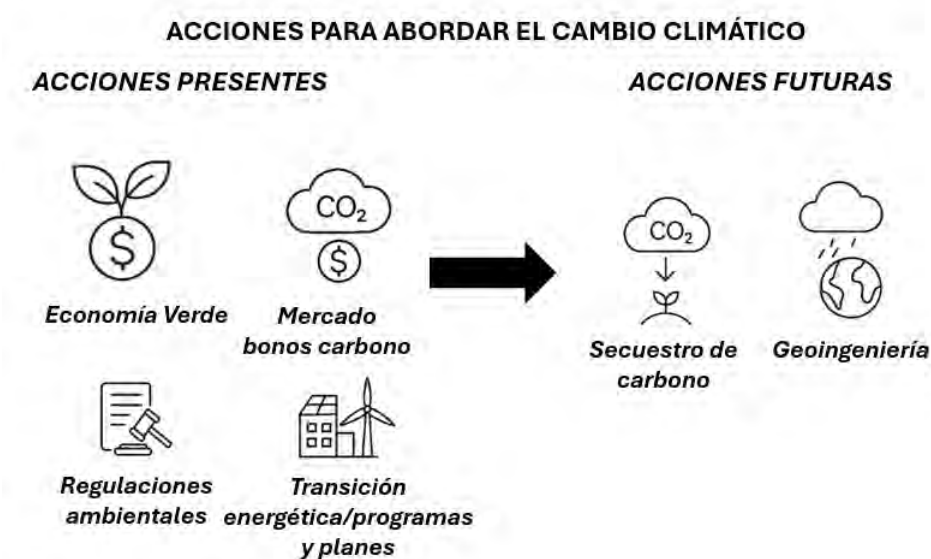


Figura. 4 Acciones presentes y futuras para abordar el cambio climático. Elaboración propia.

Educación para el cambio climático. Como medida para la concientización del problema de las nuevas generaciones, y también como resultado de las reuniones del grupo IPCC (Protocolo de Kioto, 1997; Acuerdo de París 2015; UNESCO y UNFCCC, 2016), se establece la importancia de la educación para modificar los hábitos a largo plazo y el fomento de una mejor comprensión y capacitación para tratar este fenómeno y sus efectos asociados; se explica que la educación es una herramienta fundamental para la reducción de los efectos del cambio climático. Marote & Olcina (2023) en un estudio sobre cambio climático y educación concluye que se ha podido comprobar que, con el paso de los años, la enseñanza de este fenómeno ha ido cobrando protagonismo, con un mayor detalle de medidas concretas en el ámbito español y en las actuaciones de las administraciones regionales. Acciones particulares se ha realizado en Uruguay a través de Dirección Nacional de Educación que ha desarrollado un programa de Educación para el Cambio Climático para alumnos de secundaria; los resultados mostraron que las actitudes hacia la problemática mejoraron y los alumnos desarrollan más hábitos de mitigación y mayor conciencia e interés en aplicarlos a futuro (Garbarino Mendiondo, P. A., 2023). Argentina de igual forma ha implementado acciones para la educación ambiental; a través del Ministerio de Educación y el Consejo Federal de Educación fundamentados en la Ley de Educación Ambiental Integral (Argentina.gov.ar. 2022). En México desde 1992, se instituyeron diversas acciones tales como la creación del Sistema Nacional de Cambio Climático como consecuencia de la Ley General de Cambio Climático del 2012. De aquí se derivan diversos lineamientos para comisiones y secretarías de estado, incluidas la secretaria de Educación Pública. Se instituye el Consejo Nacional de Fomento Educativo, Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, emprendiendo acciones para promover la cultura de reforestación; se promueve la creación de Centros de Capacitación para el Desarrollo Sustentable (1994), asimismo en 2012 se crea el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Lara Arzate, J., 2021). Ya en la última década se implementaron programas de educación superior y de posgrado en energías

limpias y renovables en universidades tales como la UNAM, y diversas Universidades Tecnológicas y universidades privadas.

Economía verde y mercado de bonos de carbono

De acuerdo con el PNUMA, la economía verde se refiere a una economía baja en carbono, eficiente en recursos y socialmente inclusiva, en el contexto de desarrollo sostenible y erradicación de la pobreza, que cubre los sectores de turismo, agricultura, transporte, vivienda, pesca, energía, agua, residuos y uso de la tierra. No es nada nuevo, simplemente se trata de un modelo económico para despertar conciencia para lograr el bienestar de todos y respetando el medio ambiente (Markandia, A., Barbier, E. 1989). Países como Barbados, Colombia, Haití, Jamaica, México, Perú, Santa Lucía, y Uruguay realizan estudios para la implementación de acciones. Los temas que incluye son: Economía circular, Cultura empresarial, compras responsables, infraestructura verde, agricultura sostenible, economía colaborativa, captura y reciclaje de carbono y revolución de las energías renovables locales. (ONU Programa para el Medio Ambiente, 2019). Este concepto, no parece ser una solución de gran impacto a corto plazo debido a la lentitud del proceso; la inversión de capital es alta para lograr que los productos sean respetuosos con el medio ambiente; es un tema de conciencia ecológica, que es superado por la necesidad de incrementar la riqueza y que puede ser abordado desde la perspectiva de educación ambiental.

Por su parte el tema de bonos de carbono, que se puede asociar a la línea de economía verde, surge desde el marco del Protocolo de Kioto, como mecanismo para el intercambio emisiones de GEI basada en la compra y venta de permisos para emitir CO₂. Es un sistema de comercio a través del cual los gobiernos, las empresas o bien los individuos pueden adquirir o vender unidades de reducción de emisiones para cumplir con sus obligaciones actuales y futuras. Existen dos vertientes de este mercado, de cumplimiento regulado y voluntario, el primero mueve anualmente más de \$ 875,000 millones de dólares (MDD) y el segundo sobre \$ 2,000 MDD. En México existe 259 proyectos activos, de los cuales 146 finalizaron el registro y hay 113 listados (Avila, J. 20024). Actualmente 42 gobiernos nacionales y 25 gobiernos subnacionales han fijado un precio al carbono. También se ha determinado que se requieren otros \$ 7000 millones de dólares al año para 2030 para financiar la transición hacia económicas de bajos niveles de carbono (Grupo Banco Mundial, 2017). Para 2021, los proyectos con mayor demanda de transacciones fueron los proyectos forestales y de uso de la tierra, que en montos representaron el 67% del mercado de los bonos de carbono en 2021; también los proyectos de energías renovables tuvieron un incremento y en contraste, los proyectos de eficiencia energética y de proyectos domésticos y comunitarios tuvieron baja demanda (Climate Trade, 2022).

Programas de transición energética

La implementación de los programas y acciones para la transición energética y la mitigación del cambio climático dependen de las políticas y decisiones de los países (IRENA, 2021). El análisis de IRENA, indica que más del 90% de las soluciones que darán resultados exitosos para 2050 estarán relacionados con las energías renovables a través del suministro directo, la electrificación, la eficiencia energética, el hidrógeno verde y la bioenergía combinada con la captura y el almacenamiento de carbón. Sin embargo, llevar las tecnologías de transición energética a la velocidad y niveles necesarios, para tener resultados en 2030 y luego en 2050 se requiere políticas y medidas específicas, siendo una de ellas y de las más importantes la inversión de recursos financieros, que tendrá que aumentar en un 30% con respecto a la inversión planificada (un total de 131 billones de dólares estadounidenses) de aquí a 2050.

Para cumplir con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C, los niveles de despliegue de las energías renovables deben aumentar de los 3,000 gigavatios (GW) se tiene hoy en día a más de 10,000 gigavatios (GW) para el año 2030, lo que supone un promedio de 1,000 gigavatios (GW) anuales. Este despliegue está limitado a ciertas regiones del mundo, las más contaminantes que saber son China, Estados Unidos y la Unión Europea, las cuales representaron dos tercios de toda la nueva potencia instalada en el año 2022, lo que supone una gran diferencia con los demás países en materia de desarrollo (Ambientum, 2023).

Impuestos ambientales

Los impuestos ambientales son aquellos destinados a gravar los comportamientos nocivos para la salud del planeta, esto es, quien contamina debe pagar. Se trata de una de las medidas más sencillas en política pública para contribuir a

las metas de reducciones de emisiones, al establecer un costo por cada tonelada de CO₂e a⁻¹ contenida en los combustibles fósiles o directamente emitida hacia la atmósfera. El FMI ha propuesto que los países más contaminantes establezcan un impuesto sobre las emisiones de CO₂, y tendría que ser de 75 dólares por tonelada en 2030 para los países más ricos (Ámbito, 2021). En México, a partir de 2021 se iniciaron acciones para el cobro de impuestos por emisión de cada tonelada CO₂, a la fecha 14 entidades están sujetas a esta disposición amparada en la Ley General de Equilibrio y Protección del Medio Ambiente, fuentes fijas, móviles, de área y naturales. Ahora el tema no es económico, el tema es ambiental y se debe reducir emisiones para no pagar impuestos (Economics, 2024). Por su parte, a partir de 2018 Argentina implementó impuestos ambientales a emisiones, definiendo dos cuotas, una para combustibles, una para combustibles líquidos (gasóleo, kerosene, diésel, otros) y otra para combustibles fósiles (combustóleo, coque de petróleo, carbón mineral, otros). Para 2022, Argentina tuvo una recaudación anual de \$ 2,368.2 MDD.

Aunque diversos países tienen impuestos ambientales, los más relevantes son Alemania y Australia que lideran con 6 tipo de ellos, seguido de Chile con cinco, Estados Unidos con cuatro y México con tres. Los tipos de impuestos son por emisiones de CO₂ por actividades industriales, transporte y consumo energético, impuestos sobre automóviles nuevos, impuestos al carbono, impuestos sobre plaguicidas y manejo por tierra y recursos naturales.

Geoingeniería

En las últimas décadas se ha fortalecido la idea de mitigar el cambio climático a través de la manipulación y control de clima, lo que se conoce como geoingeniería. Este concepto debe cumplir al menos dos características fundamentales: deben ser intencionales y tener un impacto global o de gran escala (Bala, 2009); Delgado-Ramos, J.A. 2012). Los impulsores de este concepto la consideran una solución técnica a la crisis climática, para cumplir los objetivos del acuerdo de París de 2015 y a la vez mantener un estilo de vida de alto consumo, sin bajar los consumos de energía. La concepción de la geoingeniería, aun con riegos no dimensionados, desvía los esfuerzos que se realizan para reducir las emisiones de carbono, por método probado tales como el uso de las energías renovables. El concepto considera tres tecnologías, el manejo de la radiación solar (SMR) y la captura y almacenamiento de carbono (CDR), y la fertilización oceánica.

Las tecnologías SRM tienen como objetivo reducir la cantidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre (Gailhofer et al., 2023), lo que se puede hacer a través de diversos enfoques, tales como la inyección de partículas reflectantes en la atmósfera superior o el despliegue de espejos o superficies reflectantes en el espacio. El objetivo es reducir la cantidad de energía solar cautivada por la Tierra y potencialmente enfriar el planeta (National Academic of Sciences & Medicine, 2021).

Por su parte, las Tecnologías de eliminación de captura y almacenamiento de carbono (CDR), aspiran a extraer dióxido de carbono de la atmósfera y secuestrarla en diversos yacimientos, como formaciones geológicas, océanos o bosques. CDR se puede lograr a través de una serie de métodos, incluyendo la aforestación que no es más que crear bosques en tierras donde históricamente no ha habido, y la captura directa de CO₂ contenido en el aire, la cual puede ser por Captura Directa de Carbono, DAC; o por Captura de Carbono, Uso y Almacenaje, CCUS.

El método es la captura directa del CO₂ del aire (DAC) consiste en utilizar grandes ventiladores para succionar el aire ambiente, que se hace pasar por un disolvente líquido o sorbente sólido para separar el CO₂ de otros gases. El CO₂ capturado se puede utilizar directamente para el sector de las bebidas o para producir agregados o combustibles sintéticos, o bien almacenarse geológicamente (Do Better by ESADE, 2020). DAC es diferente de CCUS, dado que éste último toma aire contaminado directamente de fuentes fijas de emisiones a gran escala.

El otro método es fertilización oceánica, o alcalinización que consiste en agregar materiales alcalinos al océano, como rocas de silicato o carbonato, para aumentar la cantidad de CO₂ que absorbe. De manera similar, la fertilización del océano implicaría estimular el crecimiento de fitoplancton para mejorar el secuestro de carbono. Estas técnicas cuyas validaciones técnicas y económicas están en estudio, pueden resultar arriesgadas, pero es una necesidad urgente remover CO₂ del aire.

La Bioenergía con Captura y Almacenamiento de Carbono (BECCS por sus siglas en inglés), es otra de las tecnologías de la geoingeniería, que consiste básicamente en quemar biomasa para generar energía, con la posterior captura de las

emisiones de carbono resultantes, las cuales se bombean a gran profundidad, almacenándose permanentemente en depósitos naturales. Debido a que las especies vegetales absorben CO₂ a medida que crecen, esta es una forma de eliminar el CO₂ de la atmósfera. La idea toma sus bases en propuesta viejas de siembra de árboles de rápido crecimiento, y que ahora pueden ser genéticamente modificados para lograr mayor absorción de CO₂ que pueden derivar en la producción de combustibles de segunda y tercera generación.

Sumideros de CO₂ y tecnologías de emisiones negativas

En términos simples, un sumidero es un almacén de carbono procedente de la atmósfera. Se trata de sistemas naturales que absorben (emisiones negativas) y almacena permanentemente más carbón de la atmósfera, del que se está emitiendo (emisión positiva). Un caso de estudio es la degradación de suelos agrícolas, pecuarios, forestales y pastoriles que pierden carbono por la actividad intensiva de explotación, bajando su fertilidad. Entonces para recupera el carbono perdido, se realizan actividades de reconversión lo que se hace a través prácticas agrícolas de conservación del suelo que reducen las pérdidas y almaceno carbón la biomasa de las plantas y el suelo. Con esto se logran dos objetivos, secuestrar el carbono y recuperar la fertilidad de los suelos. También se utilizan prácticas como la aforestación y reforestación, cuyos suelos son los mayores sumideros de carbono; aplica también a los océanos (FAO Portal Suelo, SF). Asociado a los sumideros, están las Tecnologías de Emisiones Negativas, NET, donde la de mayor potencial es la Bioenergía con Captura y Almacenamiento de Carbono (BECCS) ya descrito. Otra tecnología NET es la captura directa de aire (DAC), donde un proceso químico extrae CO₂ del aire (Comisión Europea. 2020).

El concepto de sumidero de CO₂ y las tecnologías de emisiones negativas también se asocian al concepto de neutralidad climática, donde se elimina el CO₂ mediante absorción natural del planeta logrando que las emisiones sean iguales o menores a las que se eliminan; también denominado huella cero de carbono. Este concepto es más amplio que la eliminación del CO₂, y considera la eliminación de gases como el óxido nitroso, el metano, los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre (Crespo Garay, C. 2024).

Electromovilidad.

El 23 % de las emisiones globales contaminantes corresponde al transporte para movimiento de personas y transporte de mercancías (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2023). Según las Naciones Unidas, para el año 2050 el transporte será el mayor responsable del crecimiento de emisiones de carbono, que representa el 70% de estas. Ante esta situación, existen soluciones factibles frente a una problemática real y se ha propuesto a la electromovilidad como una alternativa amigable y sostenible de transporte, además de las bicicletas y otros medios que no requieren combustibles fósiles (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. 2024). La perspectiva es que para 2030, el 50% de los vehículos sean eléctricos, la meta se replantea para 2035; la oferta de vehículos ha avanzado más rápido que la demanda. El futuro de la electromovilidad se ve prometedor siempre y cuando se cumplan las siguientes premisas: Bajar costos de fabricación, incrementar la autonomía, y desarrollar suficientes redes de carga.

Según The World Transitions Outlook 2022 elaborado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), estima que el despliegue de automóviles eléctricos generará una reducción de 1.6 millones de barriles de crudo por día (mb/d) para 2025 y 4.6 mb/d para 2030. En términos de cambio climático, los automóviles eléctricos lograrán una reducción neta de emisiones de GEI de casi 580 Mton CO₂e (Murrieta Cummnings, C. 2023).

Tecnologías para hidrógeno verde.

En los últimos años se ha retomado el principio básico de electrolisis para producir hidrógeno a partir de energía proveniente de fuentes renovables. El concepto es simple, generar energía eléctrica por electrolisis de una solución de agua, obteniendo H y O₂; el hidrógeno se almacena y puede ser utilizando posteriormente; a este combustible, se la llama hidrógeno verde. Esto resuelve la problemática de almacenaje de energía eléctrica en baterías o en depósitos térmicos; la única problemática por ahora es el almacenaje seguro, dado que se trata del elemento químico con el menor número atómico y con alto poder calorífico. El hidrógeno se difunde gradualmente en cualquier material de construcción, es altamente volátil. Una forma de almacenajes es por sorción, donde el hidrogeno queda donde se fija químicamente tales como zeolitas o líquidos iónicos.

De acuerdo con la proyección de IRENA (2023) en 2050, el 94 % del hidrógeno procedería de fuentes renovables en el escenario de 1.5 °C. El hidrógeno desempeñaría un papel clave en la descarbonización de los usos finales y la flexibilidad del sistema eléctrico.

Discusión

La tendencia de crecimiento poblacional a nivel mundial muestra que seguirá creciendo y para 2050 habrá sobre 9,500 millones de personas en el planeta que representarían sobre 40,850 millones de toneladas de CO₂e en base a 4.3 ton per cápita. El concepto de mantener el mismo ritmo de crecimiento económico y nivel de bienestar humano, a consta del uso de energía convencional no modificará los patrones de generación de emisiones contaminantes el cual está directamente ligado al consumo energético per cápita. El ritmo de sustitución de energía fósil por energía limpia es alarmantemente bajo, por lo que lograr las metas de reducción de emisiones para evitar superar el incremento 1.5 °C para 2030 es casi imposible. Para lograr una reducción substancial de emisiones contaminantes a estos momentos, se tendría que suprimir la actividad humana de al menos 4,500 millones de personas. El nivel de presencia de las fuentes renovables es bajo, y su contrapeso es la existencia probada de reservas mundiales de combustibles fósiles que le dan una esperanza de vida de 50 años y lo que contrapone en todo sentido a las metas de reducción de uso de estos combustibles. Diversos países tienen su economía basada en los combustibles fósiles, por lo que la transición no será factible a menos que se creen mecanismos de presión internacional para la transición.

Conclusiones

En este momento no existe una evidencia clara de acciones concretas para detener los efectos del cambio climático, por la sustitución de energías contaminantes por no contaminantes. Los resultados que se han tenido desde 1992 cuando se reconoció el tema de contaminación por la actividad antropogénica, solamente ha permitido probar la viabilidad económica de las fuentes limpias de energías, pero no ha logrado superar las barreras de beneficios ambientales soportado esto por el escaso interés de los gobiernos para subsidiar estas tecnologías o soportar desarrollos tecnológicos locales. Las acciones y nuevas tecnologías en conceptualización en etapas de desarrollo aun tendrán un tiempo de espera con resultados de mediano y largo plazo; mientras tanto el destino nos alcanzara después de 2030 cuando se tendrán que implementar medidas desesperadas. Mientras tanto los cambios en el clima seguirán acrecentando los periodos de sequía, los huracanes, los incrementos de temperaturas y otros desastres asociados.

Bibliografía

- Ambientum Portal Ambiental. (2023). Perspectivas de la transición energética mundial en 2023. Ambientum. <https://www.ambientum.com/ambientum/energia/perspectivas-transicion-energetica-mundial-en-2023.asp>
- Ámbito. (2021). El FMI insta a los países más contaminantes a fijar un precio mínimo al carbono. Ámbito. <https://www.ambito.com/informacion-general/fmi/el-insta-los-paises-mas-contaminantes-fijar-un-precio-minimo-al-carbonon5204467>
- Arenales, J. V. (2023, 18 de enero). Estos fueron los recursos que necesitó el planeta para generar la energía en 2022. La República Energía Colombia. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/fuentes-de-energia-en-el-planeta-3717776>
- Arenales, J. V. (2023). Estos fueron los recursos que necesitó el planeta para generar la energía en 2022. La República Energía Colombia. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/fuentes-de-energia-en-el-planeta-3717776>
- Argentina.gob.ar. (2022). Ley de educación ambiental integral. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/educacion-ambiental/ley-de-educacionambiental>
- Argentina.gob.ar. (2022). Ley de educación ambiental integral. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/educacion-ambiental/ley-de-educacionambiental>
- Avila, J. (2024, 25 de abril). México tiene oportunidad de atraer inversiones mediante mercado de carbono. Expansión. <https://expansion.mx/mercados/2024/04/25/que-es-mercado-carbono-mexico>
- Avila, J. (2024). México tiene oportunidad de atraer inversiones mediante mercado de carbono. Expansión. <https://expansion.mx/mercados/2024/04/25/que-es-mercado-carbono-mexico>
- Bala, G. (2009). Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*, 96(1), 41–48. <https://www.jstor.org/stable/24104726>
- Bala, G. (2009). Problems with geoengineering schemes to combat climate change. *Current Science*, 96(1), 41–48. <https://www.jstor.org/stable/24104726>
- Barbier, E. B., & Markandya, A. (2013). *A new blueprint for a green economy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203097298>
- Barbier, E. B., & Markandya, A. (2013). *A new blueprint for a green economy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203097298>
- BBC News Mundo. (2021, 17 de mayo). Los gráficos que muestran que más del 50% de las emisiones de CO₂ ocurrieron en los últimos 30 años. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57125710>
- BBC News Mundo. (2021). Los gráficos que muestran que más del 50% de las emisiones de CO₂ ocurrieron en los últimos 30 años. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57125710>

- ClimateTrade. (2022, 14 de diciembre). El valor del mercado voluntario de carbono supera los 2 mil millones de dólares. ClimateTrade. <https://climatetrade.com/es/el-valor-del-mercado-voluntario-de-carbono-supera-los-2-mil-millones-de-dolares/>
- ClimateTrade. (2022). El valor del mercado voluntario de carbono supera los 2 mil millones de dólares. ClimateTrade. <https://climatetrade.com/es/el-valor-del-mercado-voluntario-de-carbono-supera-los-2-mil-millones-de-dolares/>
- Comisión Europea. (2020, 9 de noviembre). Tecnologías y prácticas de emisiones negativas: El camino a seguir. CORDIS. <https://cordis.europa.eu/article/id/448423-negative-emissions-technologies-and-practices-the-way-forward/es>
- Comisión Europea. (2020). Tecnologías y prácticas de emisiones negativas: El camino a seguir. CORDIS. <https://cordis.europa.eu/article/id/448423-negative-emissions-technologies-and-practices-the-way-forward/es>
- Crespo Garay, C. (2024, 12 de abril). Rumbo a la neutralidad climática en 2050: ¿Qué es la huella cero de carbono? National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/rumbo-neutralidad-climatica-2050-que-es-huella-cero-carbono_20392
- Crespo Garay, C. (2024). Rumbo a la neutralidad climática en 2050: ¿Qué es la huella cero de carbono? National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/rumbo-neutralidad-climatica-2050-que-es-huella-cero-carbono_20392
- Delgado Ramos, G. C. (2012). Geoingeniería, apuesta incierta frente al cambio climático. *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, 20(40), 213–236. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572012000200008
- Delgado Ramos, G. C. (2012). Geoingeniería, apuesta incierta frente al cambio climático. *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, 20(40), 213–236. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572012000200008
- Do Better by Esade. (2020, 30 de septiembre). Tecnologías para la transición energética: Captura directa de aire. Esade. <https://dobetter.esade.edu/es/capturadirecta-aire>
- Do Better by Esade. (2020). Tecnologías para la transición energética: Captura directa de aire. Esade. <https://dobetter.esade.edu/es/capturadirecta-aire>
- Economis. (2024). Cómo se aplica el impuesto al carbono en Argentina y para qué se utiliza. *Economis*. <https://economis.com.ar/como-se-aplica-el-impuesto-al-carbono-en-argentina-y-para-que-se-utiliza/>
- FAO. (s. f.). Secuestro de carbono en el suelo. Portal de Suelos de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/>
- Forbes Staff. (2023). Así es como las energías limpias ayudaron a frenar el crecimiento de emisiones de CO₂ en 2023. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx>
- Gailhofer, P., Krebs, D., Proelss, A., Schmalenbach, K., & Verheyen, R. (2023). Corporate liability for transboundary environmental harm: An international and transnational perspective (p. 640). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-13264-3>
- Garbarino Mendiondo, P. A. (2022). La educación para el cambio climático como herramienta de mitigación. *MLS Educational Research (MLSER)*. <https://www.mlsjournals.com/Educational-Research-Journal/article/view/1015/1627>
- Georgieva, K. (2022). Retomar la senda de las emisiones netas cero: Tres prioridades fundamentales para la COP27. IMF Blog. <https://www.imf.org/es/Blogs/Articles/2022/11/04/getting-back-on-track-to-net-zero-three-critical-priorities-for-cop27>
- Global Carbon Project. (2021). Resumen general. IPCC. https://archive.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/Spanish/ipcc_90_92_assessments_far_overview_sp.pdf
- Grupo Banco Mundial. (2017). Fijación del precio del carbono. Informe: Situación y tendencias de la fijación del precio al carbono. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2022/05/24/global-carbon-pricing-generates-record-84-billion-in-revenue>
- IRENA. (2021). Perspectivas de la transición energética mundial: Camino de 1.5 °C. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_WETO_Summary_2021_ES.pdf
- Lara Arzate, J. (2021). Los retos de la educación ambiental en México. SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat%7Ceducacionambiental/articulos/los-retos-de-la-educacion-ambiental-en-mexico>
- Martín de la Plaza, I. (2021). Energía y desigualdad, un matrimonio muy bien avenido. BBVA OpenMind. <https://www.bbvaopenmind.com/economia/economia-global/energia-y-desigualdad/>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2023). Perspectivas del transporte del ITF 2023. *Latitud 435 Noticias*. <https://latitud435.com/2020/12/infografiaemisiones-globales-de-gases-de-efecto-invernadero-por-sector/>
- Morote, A. F., & Olcina, J. (2023). Cambio climático y educación. Una revisión de la documentación oficial. *Documents d'anàlisi geogràfica*, 69(1), 107–134. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.749>
- Murrieta Cummnings, C. (2023). Transición energética hacia 2023. *Energía Hoy*. <https://energiahoy.com>
- Naciones Unidas México. (2023). Estado de la población mundial 2023: 8.000 millones de vidas, infinitas posibilidades. Naciones Unidas. <https://mexico.un.org>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Reflecting sunlight: Recommendations for solar geoengineering research and research governance. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25762>
- ONU Programa para el Medio Ambiente. (2019). Economía verde. UNEP. <https://www.unep.org/es/regiones/americ-latina-y-el-caribe/iniciativas-regionales/promoviendo-la-eficiencia-de-recursos-1>
- Pacto Mundial Red España. (2023). COP28: El inicio del fin de los combustibles fósiles. Principales conclusiones. Pacto Mundial de la ONU. <https://www.pactomundial.org/noticia/cop28-el-inicio-del-fin-de-los-combustiblesfosiles>
- Radar Energético. (2023). Los combustibles fósiles aún representan el 82% del consumo mundial de energía primaria. Radar Energético. <https://www.radarenergetico.com/los-combustibles-fosiles-aun-representan-el-82-del-consumo-mundial-de-energia-primaria>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2024). CO₂ emissions: How much CO₂ does the world emit? Which countries emit the most? *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/team/hannah-ritchie>
- Serrano, A. (2022). COP27 y ciudades: La urgencia de la adaptación frente al cambio climático. Sistema Digital, Políticas de la Tierra.
- Serrano, A. (2022). COP27 y ciudades: La urgencia de la adaptación frente al cambio climático. Sistema Digital, Políticas de la Tierra.
- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2024). La electromovilidad, una oportunidad para hacer frente al cambio climático. Desde Adentro. <https://www.desdeadentro.pe/2021/10/la-electromovilidad-una-oportunidad-para-hacer-frente-al-cambio-climatico>
- World Bank. (2023). Emisiones de CO₂ (toneladas métricas per cápita). World Bank Data. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>
- World Meteorological Organization. (2023). WMO global annual to decadal climate update. WMO. <https://public.wmo.int>

Producción de Hidrógeno por reformado de bio-etanol utilizando un catalizador de Ni-Co/Al₂O₃-SiO₂

Iván Ramos Martínez ¹, José Luis Contreras L. ^{1,*}, Jennipher Pérez ¹, Beatriz Zeifert ², Ricardo López Medina ¹ y José Salmones ²

¹ Laboratorio del Área de Procesos de la Industria Química, Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Ciudad de México, México

² ESIQIE. Instituto Politécnico Nacional, U.P. López Mateos Zacatenco, México City C.P. 07738, México;

* Autor de correspondencia: jicl@azc.uam.mx; Tel.: +52-55591911047

Artículo de divulgación científica

Recibido: 11 de junio de 2025

Aceptado: 14 de agosto de 2025

Publicado: 28 de octubre de 2025

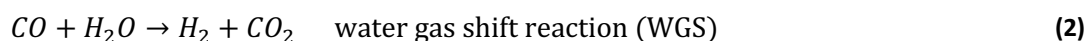
DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.497>

Resumen: Se investigó la producción de H₂ por reformado de etanol con vapor de agua en un reactor catalítico de lecho fijo integral (30 g, d_{partícula} = 1/8 pulg), utilizando un catalizador de Ni-Co/Al₂O₃-SiO₂, se usó una relación molar 4/1: moles H₂O/mol etanol. Se encontró que la conversión a 480°C fue cercana a 90% mientras que la selectividad de H₂ fue de 81%, la de CO₂ fue de 6% y la del CH₄ fue de 12% respectivamente y no se observó CO. Las técnicas de caracterización del catalizador incluyeron: resistencia mecánica, área y textura BET, adsorción de agua, microscopia electrónica de barrido (MEB, EDS), análisis térmico gravimétrico (TGA) y acidez por espectroscopia infrarrojo de piridina adsorbida. Las esferas mostraron alta resistencia a la compresión y se observó que a medida que aumenta el contenido de silicio, tanto el área superficial como la resistencia mecánica aumentaban.

Palabras clave: Hidrógeno; Ni-Co/Al₂O₃-SiO₂; alta resistencia; reformado; bioetanol.

Introducción

El bioetanol tiene varias ventajas como combustible y puede almacenarse más fácilmente y sin riesgo significativo de manipulación y puede obtenerse en grandes cantidades a partir de la biomasa (Cortright, et al., 2022; Jordi Llorca, et al., 2002). Para producir H₂ por reformado de etanol con vapor de agua (ESR) a altas temperaturas, se requiere que los catalizadores deben mostrar una alta estabilidad térmica y mecánica, además deben mostrar una alta selectividad hacia la producción de H₂. Las tres reacciones más importantes de entre 14 (Rosas M.D., et al., 2024) que se pueden llevar a cabo son:



La reacción de reformado de etanol con agua (reacción 1) se favorece a altas temperaturas. Varios estudios termodinámicos han demostrado que a temperaturas mayores de 350°C la conversión del etanol es completa [Contreras, et al., 2014] además a temperaturas de 650°C solo se obtienen como productos: H₂, CO, CO₂, CH₄ y H₂O. Se ha observado que al aumentar la relación H₂O/etanol a valores mayores de 3 es recomendable. Así mismo es conveniente presiones bajas, cercanas a 1 atm. La reacción de WGS (reacción 2) es importante tanto en el reformado de etanol como en el de glicerol.

Varios estudios han demostrado que los metales nobles soportados tales como: Ir, Pt, Pd, Ru o Rh (Contreras et al., 2008; Barroso et al., 2006) o metales de bajo costo como Co (Jordi Llorca, et al., 2002; Sing et al., 1985; Gelb, et al., 1999). Ni (Lowell, et al., 2004) o materiales bimetalicos (M del Arco et al., 2004; Basile, et al., 2000) son buenas opciones para catalizar la reacción de reformado de etanol (ESR). De este modo, soportes tales como: MgO, ZnO, SiO₂, Al₂O₃, La₂O₃ o CeO₂, entre otros, son los más comúnmente utilizados para soportar dichos metales activos (Contreras et al., 2014).

En este estudio, se prepararon catalizadores bimetalicos de Ni, Co soportados en un soporte conformado por Al₂O₃-SiO₂ en forma de esferas y luego se evaluaron en la reacción de reformado de etanol con vapor de agua (ESR) en un reactor catalítico de lecho fijo integral.

Desarrollo

Síntesis de catalizadores

Para la síntesis de los catalizadores, se prepararon dos geles de aluminio (Bohemita: $\text{AlO}(\text{OH})$) y de silicio (ácido metasilícico: H_2SiO_3) como precursores del soporte del catalizador, ver Tabla 1. En un estudio previo (Pérez Cabrera J. y Contreras J.L., 2021) estudiaron el efecto de la adición de SiO_2 a la Al_2O_3 sobre la resistencia mecánica de esferas. El gel de boehmita se preparó por precipitación de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (SAISA) con NH_4OH (J.T. Baker) en agua a 58°C a un pH de 8-9 y se dejó en reposo durante 72 h. Después de varios lavados se neutralizó a pH de 7. Por otra parte, se preparó el gel de silicio o ácido metasilícico a partir de la precipitación de Na_2SiO_3 con HCl concentrado (30%p) (J.T. Baker) a un pH de 2.5 y se dejó reposar el gel durante 48 h.

Una vez que se tuvieron los dos geles, se mezclaron en un agitador mecánico orbital sencillo en proporciones definidas en peso (Tabla 1) y se nombraron como sigue: M0 fue el gel de boehmita $\text{AlO}(\text{OH})$ equivalente al 100% de Al_2O_3 , M1: 5% SiO_2 + 95% Al_2O_3 , M2: 10% SiO_2 + 90% Al_2O_3 , M3: 15% SiO_2 + 85% Al_2O_3 , M4: 20% SiO_2 + 80% Al_2O_3 , M5: 25% SiO_2 + 75% Al_2O_3 y M6 fue el gel con 100% de H_2SiO_3 .

Cada mezcla de geles se mantuvo en agitación orbital durante 1 hora a 120 rpm a 25°C . Para las muestras M0 y M6 solo se pesó la cantidad requerida de gel de boehmita y de ácido metasilícico. Las mezclas de geles se les dieron forma esférica colocando cantidades definidas de material colocando 500 g de geles más 50 g de almidón más 5 g de solución acuosa con HNO_3 al 2% y en un granulador tipo tambor mecánico rotatorio de 30.5 cm de diámetro por 101 cm de largo con una velocidad de rotación de 42 rpm, con calentamiento a fuego directo, quemando gas LP por la parte inferior con una temperatura promedio externa de 110°C e interior de $62\text{--}72^\circ\text{C}$ para obtener esferas de 1/8 de pulgada. Una vez formadas las esferas se extrajeron y se secaron a 110°C en una estufa durante 48 h y posteriormente fueron calcinadas en una mufla hasta alcanzar 600°C durante 2 h, con el fin de aumentar la resistencia mecánica, el área específica y llevar a cabo la transformación térmica de geles a la formación de los óxidos de Al y de Si, como se muestra en las siguientes reacciones:



Preparación del Catalizador

El catalizador de Ni-Co soportado se preparó utilizando la mejor esfera en términos de la resistencia mecánica y sus propiedades de textura (M5: 25% SiO_2 + 75% Al_2O_3). Una vez seleccionado el mejor soporte, se le impregnaron las soluciones de $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ y de $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ (SAISA, Mexico) en agua en cantidades tales para obtener un 10% peso de Ni y un 4.5% de Co (Contreras, et al. 2014). Las muestras se secaron a 110°C por 24 h y se calcinaron a 500°C por 2 h., finalmente fueron reducidas en flujo de H_2 (20ml/min) hasta 500°C por 2 h.

Caracterización de materiales

La resistencia a la ruptura de las esferas preparadas fue evaluada en una máquina para medir la compresión a la ruptura UNITED Modelo SSTM-1. La cual posee una celda de carga de 10 kN. La velocidad de carga fue de 0.02 in/min. Las isothermas de adsorción de agua de las esferas, se llevaron a cabo en un equipo volumétrico de vidrio a diferentes presiones parciales de vapor de agua.

La acidez superficial, se efectuó por espectroscopia infrarrojo (IR) de Piridina adsorbida usando un equipo FTIR Nicolet Model 170-SX. El estudio térmico (TGA) se realizó en un equipo SDT Q600 V20.9 Build 20, con flujo de 10.0 ml/min con un intervalo de temperaturas desde 25°C hasta 1000°C .

Los sólidos obtenidos se caracterizaron por difracción de rayos X (XRD) en un instrumento Phillips X'Pert. La fisisorción de N_2 a 77 K se realizó en un instrumento Micromeritics 2000. Cada muestra se pre trató a 200°C bajo vacío (1×10^{-4} torr) durante 1 h. Las muestras se analizaron por microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un microscopio Jeol

modelo JFM 6701 F de alta resolución, utilizando electrones secundarios. El análisis químico se obtuvo mediante el acoplamiento de una sonda SEM y EDS (espectroscopia de dispersión de energía de rayos X).

Evaluación del Catalizador

La reacción catalítica se realizó en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ pulg por 30 cm de longitud compuesto de 5 puertos de muestreo tanto de composición como de temperatura. La mezcla gaseosa de alimentación estuvo compuesta de vapores de H_2O y $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ (relación molar de 4/1) en presencia de un flujo de N_2 . La temperatura del reactor se controló entre 450 y 550°C. El análisis de los reactivos y todos los productos de reacción se llevó a cabo en línea por cromatografía de gases (cromatógrafo Gow Mac 550) usando una columna de sílica gel malla 60/80 (18'x 1/8") con un detector de conductividad térmica (Gow-Mac). Se identificaron los productos: H_2 , CO , CO_2 y CH_4 . Para el análisis del etanol, acetaldehído y etileno se utilizó un cromatógrafo de gases (Varian 3380) con un detector tipo FID con una columna capilar Varian, VF-1ms, (15 m, 0.25 mm, 0.25 μm).

Resultados y discusión

Se encontró un tipo de isoterma de adsorción de N_2 que corresponde al tipo IV (Figura 1) donde se observa un ciclo de histéresis y que corresponde a materiales mesoporosos (2 a 500 Å). En este caso se forma a baja presión una monomulticapa de N_2 hasta un punto en que la capa adsorbida llega a un valor de espesor crítico en el cual ocurre la condensación capilar (ciclo de histéresis).

El tipo de ciclo de histéresis de estas muestras, corresponde al H2(a) formado por el comportamiento del fluido en el interior de los poros, en específico por los estados meta-estables asociados con la adsorción, así como por el efecto denominado bloqueo de poros con la existencia de redes de poros interconectados donde se observa un punto de percolación en el cual todo el N_2 adsorbido logra desorberse (caída súbita en la rama de desorción).

La adición de la SiO_2 a la Al_2O_3 produce un aumento en el volumen de poro, como se puede observar comparativamente en la Figura 1 cuando vamos de la muestra M0 a la M5.

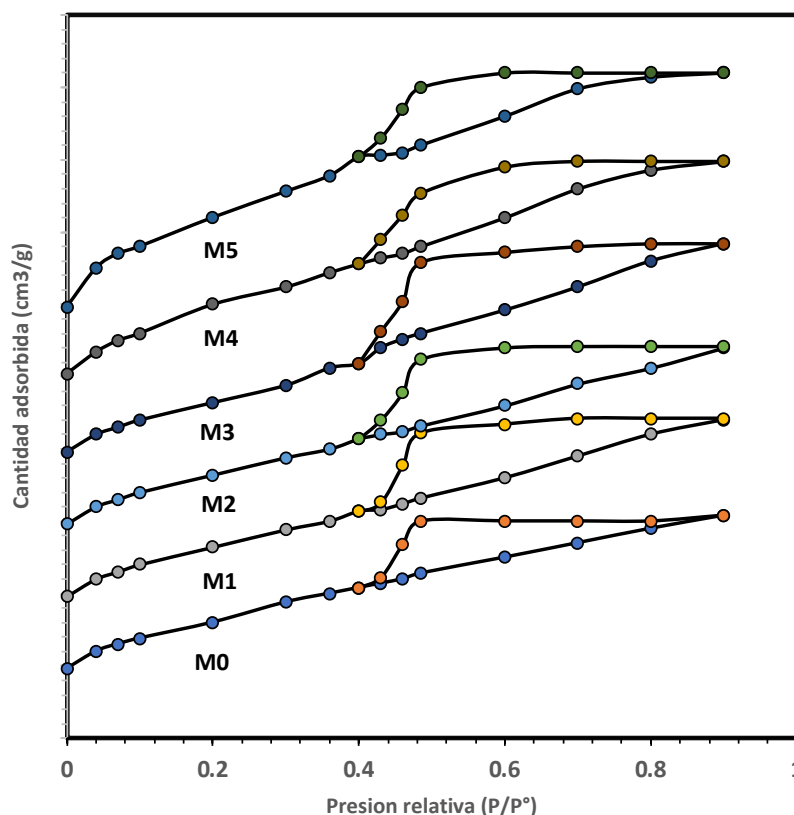


Figura 1. Isotermas de adsorción de N_2 de las muestras M0 a M5.

En la Tabla 1 se observa un aumento del área BET de las muestras conforme aumenta la concentración de SiO_2 , lo cual es debido a que la SiO_2 tiene la mayor área. No se observó un cambio notable en el diámetro de poro. Sin embargo, podemos observar que si hay un cambio tanto en el diámetro como en el volumen de poro y su comportamiento es opuesto. En la Tabla 1, se observa que al aumentar la concentración de SiO_2 hay un ligero aumento de diámetro de poro de 32 a 36 Å y se mantiene hasta el 20% SiO_2 para caer en 25% SiO_2 . Como podrá deducirse la adición de SiO_2 estará disminuyendo el diámetro de poro del sólido ya que cuando se llega al 100% de SiO_2 tenemos un diámetro de poro de 20 Å. Por otra parte, en el caso del volumen de poro, se observa un pequeño aumento de $0.24 \text{ cm}^3/\text{g}$ hasta $0.33 \text{ cm}^3/\text{g}$ cuando aumenta la concentración de SiO_2 , hasta 25% de SiO_2 . Sin embargo, se observa una disminución del volumen de poro cuando aumenta la concentración del SiO_2 hasta 100%.

Tabla 1. Composición de las muestras, así como el área BET y textura de las muestras.

Muestra	SiO_2 % (óxido)	H_2SiO_3 % (Gel)	Al_2O_3 % (óxido)	$\text{AlO}(\text{OH})$ % (Gel)	Área (m^2/g)	Vp (cm^3/g)	Dp (Å)
M0	0	0	100	117.6	298	0.24	32
M1	5	6.6	95	111.7	286	0.26	36
M2	10	13.2	90	105.8	302	0.27	36
M3	15	19.8	85	99.9	327	0.29	36
M4	20	26.44	80	94.1	358	0.31	35
M5	25	33.0	75	88.2	404	0.33	32
M6	100	132.2	0	0	522	0.26	20

Por difracción de rayos-X (Figura 2) se pueden observar las reflexiones característica tanto de la gamma Al_2O_3 (muestra M0, carta: JCPDS-029-0063n) como de SiO_2 (muestra M6, carta: JCPDS-029-0085). Conforme aumenta la concentración de Al_2O_3 sus reflexiones ($66.5^\circ, 46^\circ, 39.6^\circ, 37.9^\circ$) van aumentando mientras que disminuye la reflexión en 22.2° de la SiO_2 .

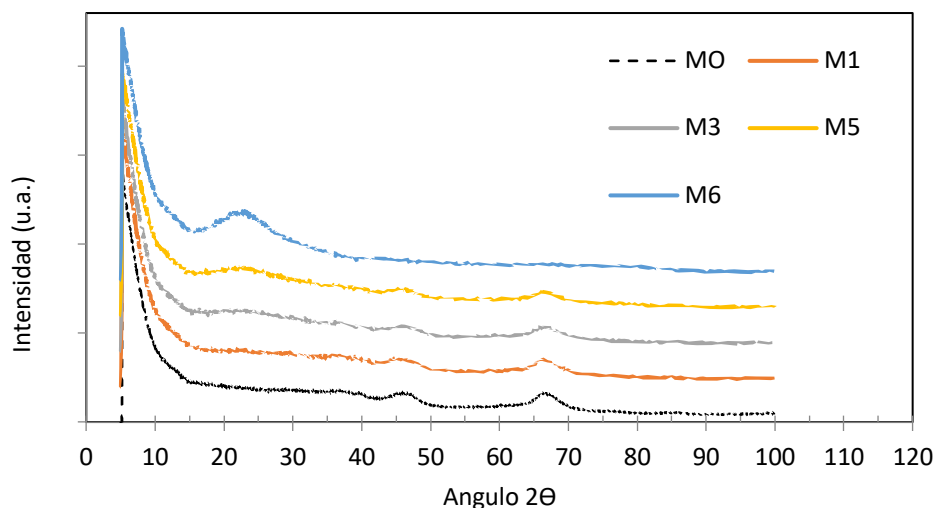


Figura 2. Difracción de rayos-X de las mezclas de Al_2O_3 - SiO_2

Las isoterma de adsorción de agua mostraron una isoterma tipo Langmuir simple que al aumentar el contenido de SiO_2 la capacidad de adsorción de agua a 1000 min (16.66 h y 25°C) aumenta, siguiendo el siguiente orden: $\text{M6} > \text{M5} > \text{M4} > \text{M2} > \text{M1} > \text{M3} > \text{M0} > \text{Al}_2\text{O}_3$ comercial. La muestra conteniendo 25% de SiO_2 y 75% de alúmina, (muestra M5) mostro tener la mayor capacidad de adsorción de agua de 0.43 g de $\text{H}_2\text{O}/\text{g}$ de sólido.

Por microscopía electrónica de barrido (SEM) se obtuvieron las muestras de la Figura 3(a-e). Desde la muestra M0 a la muestra M5 se observan partículas con morfologías de diferentes tamaños y aglomerados que conforme aumenta la

cantidad de SiO_2 disminuyen los espacios entre las multicapas. En el caso de la muestra M6 (Figura 3(f)) la micrografía muestra una superficie con rugosidad en la que no se observan multicapas.

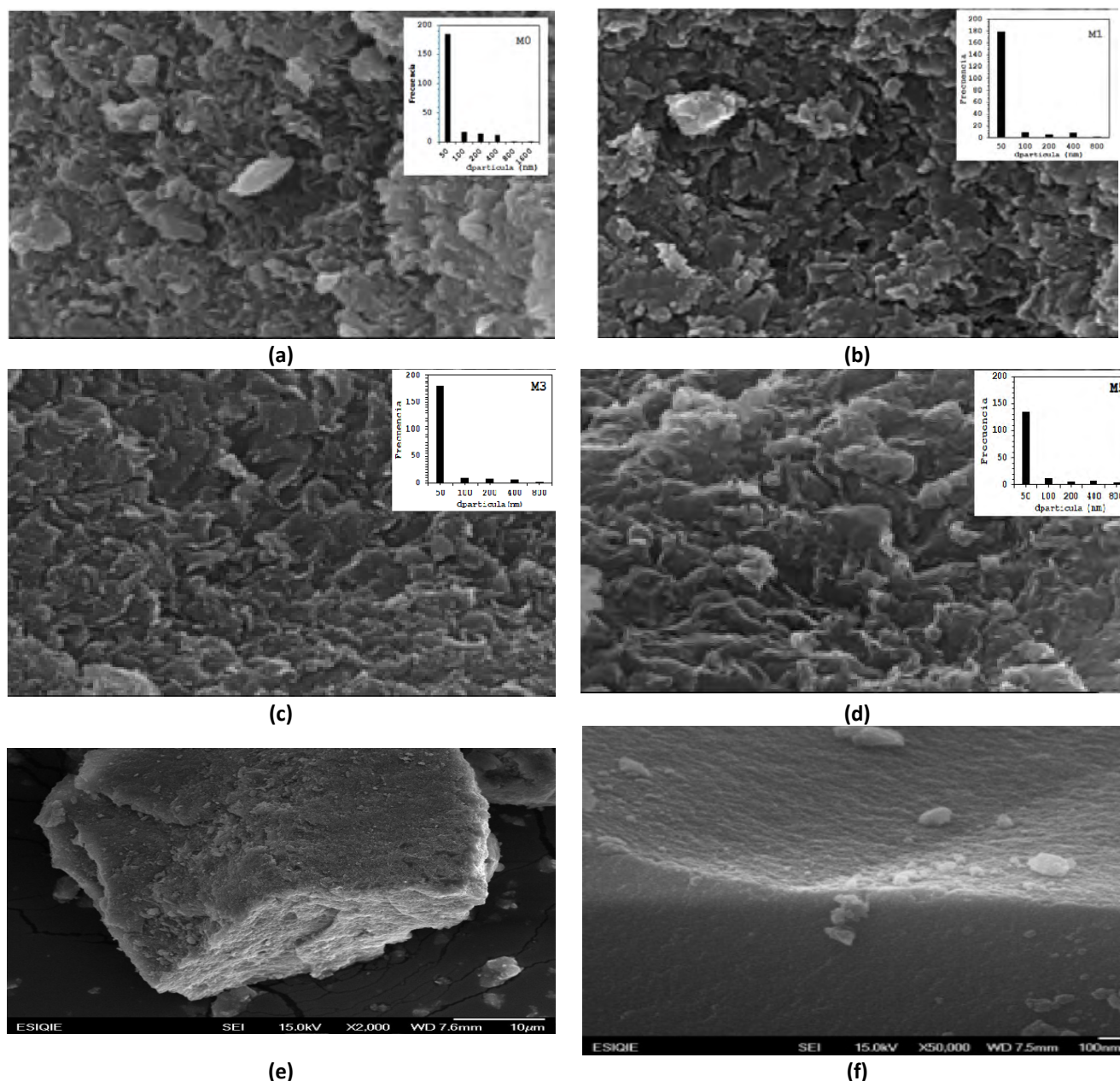


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido (SEM) de las muestras de Al_2O_3 - SiO_2 (a) es muestra M0, (b) M1, (c) M3, (d) M5 y (e) M6.

El tamaño (o diámetro) de partícula en cada micrografía, es preponderantemente de 50 nm mientras que los demás tamaños (100 a 800 nm) se encuentran en menor proporción (Figura 3(a) - (e)). Se observa que las muestras M0, M1 y M3 tienen una cantidad aproximadamente igual de partículas de 50 nm (185, 180 y 180 respectivamente), sin embargo, la muestra M5 tiene 135 partículas. El aumento en la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ da como resultado menor número de partículas de 50 nm.

En la síntesis de Al_2O_3 calcinadas, nosotros (Contreras et al., 2015) hemos estudiado la síntesis de bohemita y la Al_2O_3 calcinada, agregando un surfactante llamado Bromuro de cetil trimetil amonio (CTAB). En ese estudio observamos que las morfologías de partículas cambiaron gradualmente cuando cambia la concentración de surfactante CTAB. En las muestras preparadas con y sin surfactante (C1-0 y C1-0.01) se observaron numerosos cúmulos hemisféricos unidos

entre sí para formar una estructura similar a una coliflor. Se observaron partículas esféricas con diámetros entre 30 y 54 nm que formaban una estructura sólida. En el caso de las alúminas preparadas con una mayor concentración de CTAB (muestras C1-0.05 y C1-0.075), también se observaron cúmulos hemisféricos de partículas unidos a estructuras cilíndricas, donde estos cúmulos de cilindros o varillas estuvieron conectados con las semiesferas.

En la Al_2O_3 preparada con la mayor concentración de CTAB (muestra C1-0.1) se observó una densa red de partículas con forma de gusano. Para la misma muestra se obtiene una imagen de mayor resolución, la cual muestra la presencia de estructuras adheridas a las formaciones vermiformes, agrupadas y separadas entre sí. Estas partículas vermiformes también se han observado en alúminas preparadas por el método sol-gel utilizando el surfactante catiónico bromuro de hexadecil trimetil amonio. Estas estructuras probablemente se originaron por la coalescencia incontrolada de las especies de aluminio que forman las paredes de los poros durante la calcinación.

En el caso de nuestras muestras se observan también algunas de estas estructuras que posiblemente tengan relación con la presencia de precursores del SiO_2 , sin embargo, es difícil atribuir la morfología a la sola presencia del ácido metasilícico.

Las muestras tuvieron acidez Brønsted (Tabla 2) y acidez Lewis (Tabla 3) solo la alúmina comercial (no se incluyó) mostró acidez Lewis. Al aumentar el contenido de SiO_2 en las muestras M1 a M5 la acidez Brønsted fue disminuyendo y la acidez Lewis también parece disminuir.

Tabla 2. Acidez Brønsted ($\mu\text{mol-Py/gc}$) en función de la temperatura de desorción de piridina del soporte $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

Temperatura (°C)	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
50	282	153	220	186	168	151	0
100	193	126	196	163	148	133	0
200	155	86	110	91	88	85	0
300	60	35	45	74	54	34	0
400	30	17	3	5	6	8	0

La muestra M2 presentó la mayor acidez Brønsted y también la mayor acidez Lewis.

Tabla 3. Acidez Lewis ($\mu\text{mol-Py/gc}$) en función de la temperatura de desorción de piridina del soporte $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

Temperatura (°C)	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
50	649	602	1324	490	413	337	668
100	181	244	267	110	117	125	24
200	130	114	133	69	65	61	0
300	90	73	96	52	51	50	0
400	57	44	53	40	25	11	0

Todas las muestras mostraron un perfil de pérdida de peso por análisis ATG al aumentar la concentración de SiO_2 la cantidad de peso también disminuyó en el siguiente orden: $\text{M5} > \text{M0} > \text{M1} > \text{M2} > \text{M3} > \text{M4}$. Se observaron tres zonas de pérdida de peso, la zona-I, fue debida a pérdida de H_2O de los geles, la zona II, debida a descomposición de la bohemia a Al_2O_3 y posible descomposición de los grupos NH_4^+ y H_2O y la zona-III estuvo relacionada con la pérdida de agua por cambio de la fase $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ a las fases θ y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. La resistencia a la fractura de las esferas se muestra en la Figura 4. Las muestras M4 y M5 demostraron tener una resistencia a la fractura mayor que la de la Al_2O_3 comercial. Por lo que se eligió la muestra M5 como soporte para la preparación del catalizador.

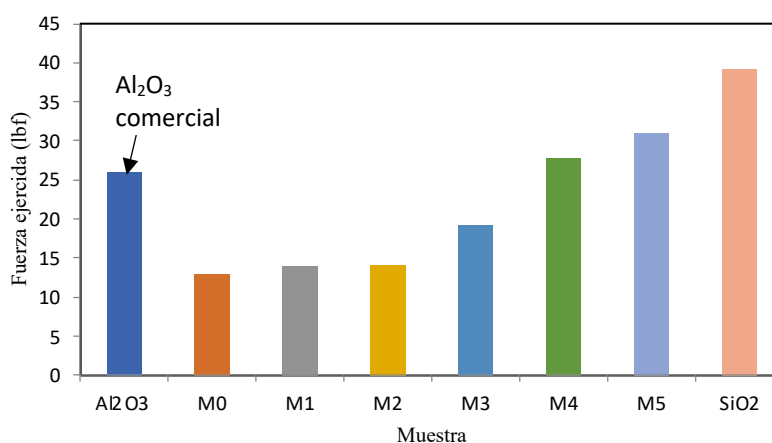


Figura 4. Resistencia a la fractura de las muestras en forma de esferas respecto de la Al₂O₃ comercial.

La conversión (X) y selectividad de los productos de reacción (Si) en función de la longitud del reactor de lecho fijo conteniendo el catalizador de 10%Ni-4.5%Co/M5 a 480°C se aprecia en la Figura 5. La conversión fue cercana a 90% mientras que la selectividad a H₂ fue cercana a 80%. A esta temperatura no se observó CO y la selectividad a CH₄ fue mayor que la selectividad a CO₂. El perfil de temperaturas a lo largo del reactor se mantuvo prácticamente constante.

Cuando aumentamos la temperatura a 510°C (Figura 6) se han obtenido mayores conversiones (X) y selectividades de H₂. Las selectividades de CH₄ y CO₂ se mantuvieron casi las mismas en función de la longitud del reactor.

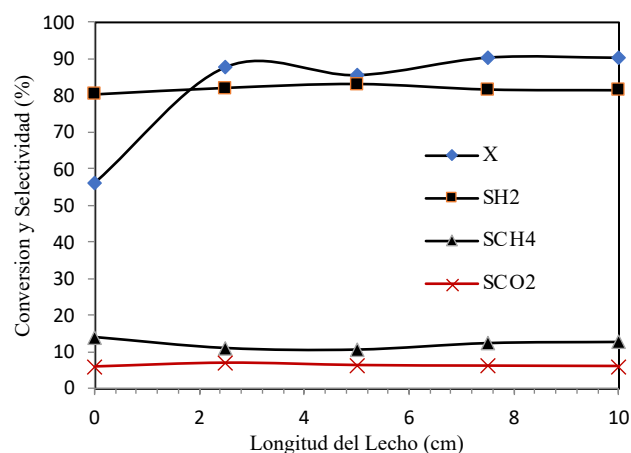


Figura 5. Conversión (X) y selectividad(S) del catalizador de 10%Ni-4.5%Co/M5 evaluado a 480°C.

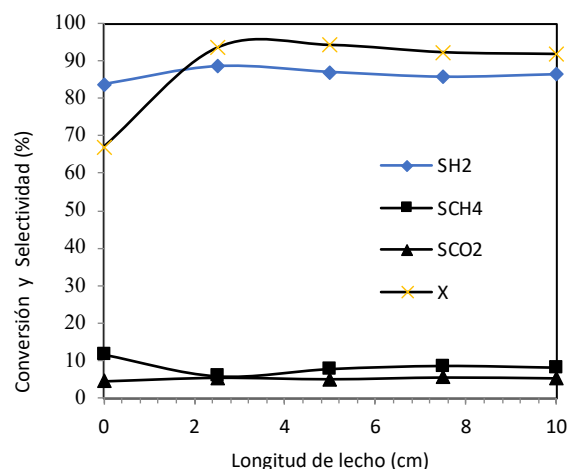


Figura 6. Conversión(X) y selectividad(S) del catalizador de 10%Ni-4.5%Co/M5, en función de la longitud del lecho evaluado a 510°C.

Conclusiones

Se preparó un soporte compuesto de Al₂O₃-SiO₂ con una resistencia mecánica superior a la que muestra una Al₂O₃ comercial. Se demostró que con la adición de SiO₂ a la Al₂O₃ se forman sitios ácidos Brønsted que aparecen junto con los ya conocidos sitios ácidos Lewis de la Al₂O₃. Se observó en los micro cristales de Al₂O₃- SiO₂ que conforme aumenta la concentración de SiO₂, disminuye la presencia de huecos o espacios en las multicapas y en el caso del SiO₂ se observan cristales con superficies sin rugosidad en donde se supone existen micro-poros. La evaluación del catalizador compuesto por 10% de Ni-4.5% de Co soportados en la muestra M5 demostró que se alcanzan altas conversiones en reactor integral cercanas al 95% a 510°C. La selectividad a hidrógeno aumento con el aumento en la temperatura de reacción, mientras que las selectividades a CH₄ y CO₂ prácticamente no cambiaron entre 480 y 510°C.

Agradecimientos: Se agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, a la ESIQIE del Instituto Politécnico Nacional y a la empresa Síntesis y Aplicaciones Industriales, S.A., por los apoyos recibidos.

Bibliografía

- Barroso M. N, M. F.Gómez, L.A.Arrúa, M. C. Abello, (2006), Hydrogen production by ethanol reforming over NiZnAl catalysts, *Appl. Catal. A: General* 304, 116-123. <https://10.1016/j.apcata.2006.02.033>
- Basile, F., G. Fornasari, M. Gazzano, A. Vaccari, (2000), Synthesis and thermal evolution of hydrotalcite-type compounds containing noble metals, *Appl. Clay. Sci.* 16, 185. [https://10.1016/S0169-1317\(99\)00053-8](https://10.1016/S0169-1317(99)00053-8)
- Contreras J.L., G. Gómez, B. Zeifert, J. Salmones, T. Vázquez, G.A. Fuentes, J. Navarrete, L. Nuño. (2015), Synthesis of Pt/Al₂O₃ catalyst using mesoporous alumina prepared with a cationic surfactant, *Catalysis Today* 250 72–86
- Contreras, J. L., J. Salmones, L. A. García, A. Ponce, B. Zeifert and G.A. Fuentes, (2008), Effect of WO_x Over Ni/Hydrotalcite Catalysts to Produce Hydrogen from Ethanol J. of New Materials for Electrochemical Systems 11, 109-117. <https://10.14447/jnmes.v15i3.60>
- Contreras, J. L., Anabel Figueroa, Beatriz Zeifert, Jose Salmones, Gustavo A. Fuentes, Tamara Vázquez, Deyanira Angeles, Leticia Nuño. (2021) Production of hydrogen by ethanol steam reforming using Ni-Co-ex-hydrotalcite catalysts stabilized with tungsten oxides., *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 6474-6493. <https://10.1016/j.ijhydene.2020.11.143>
- Contreras, J.L., J. Salmones, J.A. Colín-Luna, L. Nuño, B. Quintana, I. Córdova, B. Zeifert, C. Tapia and G.A. Fuentes. (2014), Catalysts for H₂ production using the ethanol steam reforming (A review). *Inter. J. of Hyd. Ene.*, 39 (33), 18835-18853. <https://10.1016/j.ijhydene.2014.08.072>
- Cortright, R.D., R.R. Davda, J.A. Dumesic, Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water, *Nature* 418 (2002) 964. <https://10.1038/nature01009>
- Jordi Llorca, N., Homs, J. Sales, J. L. G. Fierro and P. Ramírez de la Piscina, (2004), Hydrogen production by ethanol reforming over NiZnAl catalysts *J. Catal.* 222, 470-480. <https://10.1016/j.apcata.2006.02.033>
- Jordi Llorca, N. Homs, J. Sales, and P. Ramírez de la Piscina, (2002), Efficient Production of Hydrogen over Supported Cobalt Catalysts from Ethanol Steam Reforming, *J. Catal.* 209, 306-317. <https://10.1006/jcat.2002.3643>
- Lev Gelb, K. E. Gubbins, R. Radhakrishnan, and M. Sliwinski-Bartkowiak, (1999), Phase Separation in Confined Systems *Reports on Progress in Physics* 62, 1573. <https://10.1088/0034-4885/62/12/201>
- Lowell, S., J. E. Shields, M. A. Thomas, and M. Thommes, (2004), *Characterization of Porous Solid and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*, Kluwer Academic Publishers.
- M. del Arco, D. Carriazo, S. Gutiérrez, C. Martín and V. Rives, (2004), Synthesis and Characterization of New Mg₂Al-Paratungstate Layered Double Hydroxides, *Inorg. Chem.* 43, 1, 375–384. <https://10.1021/ic0347790>
- Pérez Cabrera J y Contreas J.L., (2021) Efecto del silicio sobre la resistencia mecánica a la compresión de esferas de gamma-alúmina, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Rosas, M. D, Figueroa A., Contreras J.L., Pala Rosas I, López M. R y Tapia Medina Carlos. (2024), Estudio termodinámico de la producción de Hidrogeno a partir de la reformación de Glicerol con agua usando el software Aspen Plus *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad (TERYS)*, Vol. 3, No. 1, 272-277.
- Sing K.S.W., Everett, D.H., R. Haul, L. Moscou, R. Pierotti, J. Rouquerol, and T. Siemieniewska, (1985) Reporting physisorption data for gas/solid systems. *Pure Applied Chemistry*, 57, 603-619. <https://10.1351/pac198557040603>