



RedICA



Ambiens Techné et Scientia México

Vol. 13

No. 1

Enero - Junio / January - June 2025

Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México, A.C.,

RACAM

ISSN 2954-3622

Directiva / Directorate**Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México, RACAM**

María del Carmen Durán-Domínguez,
Facultad de Química, Universidad
Nacional Autónoma de México, UNAM
Presidente / *President*

Julio Alberto Solís-Fuentes, Instituto de
Ciencias Básicas, Universidad
Veracruzana Xalapa, México
Vice-Presidente / *Vice-President*

María Irene Cano-Rodríguez,
Universidad de Guanajuato, México
Tesorera / *Treasurer*

Red Internacional de Ciencias Ambientales

Beatriz Espinosa-Aquino
Instituto de Ciencias, Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla,
México
Secretaria Ejecutiva / *Executive Secretary*

Stanley E. Manahan†
University of Missouri, Prof. Emérito,
EE.UU.
Miembro Emérito / *Emeritus Member*

Comité Editorial / Editorial Committee**Editores / Editors**

Marisela Bernal-González
Directora (Editora-en-Jefe) / *Director*
(*Editor-in-Chief*)

Beatriz Espinosa-Aquino
Directora adjunta (Editora -en-Jefe
adjunta) / *Deputy Director* (*Deputy*
Editor-in-Chief)

Rolando Salvador García-Gómez
Director administrativo (Editor técnico) /
Administrative Director (*Technical*
Editor)

Samuel Mendoza-Pérez
Director administrativo adjunto (Editor
técnico adjunto) / *Deputy Administrative*
Director (*Deputy Technical Editor*)

CINTILLA LEGAL DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS / Legal data, copyright and related rights

Revista electrónica de trabajos selectos: *Ambiens, Techné et Scientia México*, Año 13, No. 1, enero-junio 2025, es una Publicación semestral editada por la Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México, A.C., Av. Churubusco 480, Col. El Retoño, Alcaldía Iztapalapa, 09440 Ciudad de México, Tel. (55) 5622-5300, www.ambiental.unam.mx/albunimagenes/Revista.pdf (temporal), atsmexico.org/atsm (definitiva). Editor responsable: Marisela Bernal-González. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-061617442800-102, ISSN 2954-3622, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Rolando Salvador García-Gómez, Av. Churubusco 480, Col. El Retoño, Alcaldía Iztapalapa, 09440 Ciudad de México, fecha de última modificación, 30 de diciembre de 2024.

Los artículos han sido arbitrados por pares -modalidad doble ciego- y reflejan opiniones de la exclusiva responsabilidad del(a) o de los(as) autores(as). Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización por escrito. Publicación indexada en Latindex (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal) / *The articles have been reviewed by peers -double blind modality- and reflect opinions of the exclusive responsibility of the author(s). The total or partial reproduction of the contents and images of the publication without prior written authorization is prohibited. Publication indexed in Latindex (Regional Online Information System for Scientific Journals of Latin America, the Caribbean, Spain, and Portugal).*

Consejo Editorial por líneas temáticas (orden alfabético) / Editorial Board by subject lines (alphabetical order)**CIENCIAS AMBIENTALES / Environmental Sciences**

Telma Gloria Castro-Romero, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México
Georgina Fernández-Villagómez, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México
Peter Kusch†, Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Germany
Luisa T. Molina, Founder, Molina Center for Energy and the Environment (MCE2), EE.UU.

CIENCIAS DE LA SALUD / Health Sciences

Ruth Bustamante-García, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México
E. Martha Pérez-Armendáriz, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México

CIENCIAS EXACTAS / Exact Sciences

Ronny Adrián Flores-Ortega, Departamento de Química, Universidad Central del Ecuador, Ecuador
Stanley E. Manahan†, Emeritus Professor, University of Missouri, EE.UU.
Amado Enrique Navarro-Frómata, Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, México
Tania M. Tavares, Universidade Federal da Bahia, Brasil

CIENCIAS NATURALES / Natural Sciences

Andreas Loibner, Bodenkultur Universität Vienna, BOKU, Austria
Irina Salgado-Bernal, Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba

CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES / Social Sciences and Humanities

Ann Cyphers†, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México
Antonio Francisco Díaz-García, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México
Evguenia Roubina Milner, Facultad de Música, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México

INNOVACIÓN EDUCATIVA / Innovative Education

Octavio García-Madán, M.A., Universidad Autónoma de Yucatán, México, jubilado
Andoni Garriz-Ruiz†, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México
Armando Rugarcía-Torres, Universidad Iberoamericana, México

USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA / Efficient Use of Energy

Enrique Rodolfo Bazúa-Rueda, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, jubilado
John M. Prausnitz, Emeritus Professor, Chemical and Biochemical Engineering Department, University of California, Berkeley, Estados Unidos
Juan H. Vera, Emeritus Professor, Chemical Engineering Department, McGill University, Canadá

TECNOLOGÍAS VERDES / Green Technologies

Alberto Florentino Aguilera-Alvarado†, Departamento de Ingeniería Química. División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México
Prof. Dr. Francisco José Barnés-de-Castro, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México, jubilado
Dra. Marianela de los Ángeles Cordovés-Herrera†, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de La Caña de Azúcar, ICIDCA, La Habana, Cuba
Manuel Enríquez-Poy, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Grupo Machado, Ingenio Central Motzorongo, México
Antonio Esteban Jiménez-González, Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México
Luis Eduardo Zedillo-Ponce-de-León†, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, IPN, Director General del Consejo para la Acreditación de la Educación Superior (Copaes), México

Presentación

Este nuevo año 2025 parece presentar retos a la humanidad en su conjunto con las votaciones que se dieron en uno de los países que más impactan el ambiente a pesar de que su población es una proporción relativamente pequeña de la del resto de la Tierra. Esto es especialmente por su impacto en el cambio climático ya que no se vislumbra un cambio en las políticas de consumo energético ni de protección para los recursos. El resto de los países del orbe tendrán que ser extraordinariamente cuidadosos para poder preservar a las futuras generaciones un hogar seguro donde vivir y hasta el momento el Planeta Tierra es el único lugar.

A este respecto, afortunadamente, la revista sigue recibiendo contribuciones interesantes y las de este número están todas relacionadas justamente con la protección del ambiente: Aire, agua, suelo, aprovechamiento de los residuos o subproductos y la problemática de la obtención de fuentes de energía para las actividades humanas considerando la producción de biodiésel y su efecto sobre la pérdida de biodiversidad en la mayor parte de los países del planeta. Nuestra Presidente(a) es siempre bienvenida como co-autora de dos de ellas.

Se continúa con el apoyo fraterno a los eventos de celebración del Día Mundial de los Humedales del 2 de febrero de cada año ya que son justamente los que protegen a las comunidades humanas y otros seres vivos de los estragos de la naturaleza ahora exacerbada por el cambio climático. Un triste ejemplo fue el de la Bahía de Acapulco, México, donde al desaparecer los manglares que la protegían hubo cuantiosos daños materiales por los ciclones causados por el cambio climático.

Bienvenidos a este foro de las redes fraternas y sororales:

Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México

y

Red Internacional de Ciencias Ambientales

desde la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

La editora-en-jefe

Presentation

This new year 2025 seems to present challenges to humanity as a whole with the votes that took place in one of the countries that has the greatest impact on the environment despite the fact that its population is a relatively small proportion of that of the rest of the Earth. This is so especially because of its impact on climate change since it does not foresee a change in energy consumption policies or protection of resources. The rest of the countries of the world will have to be extraordinarily careful in order to preserve a safe home for future generations to live in and so far Planet Earth is the only place.

In this regard, fortunately, the journal continues to receive interesting contributions and those in this issue are all related precisely to the protection of the environment: Air, water, soil, use of waste or by-products, and the problem of obtaining energy sources for human activities considering the production of biodiesel and its effect on the loss of biodiversity in most countries on the planet. Our president of the RACAM is always welcome as co-author.

The fraternal support for the events celebrating World Wetlands Day on February 2 of each year continues since they are precisely the ones that protect human communities and other living beings from the ravages of nature, now exacerbated by climate change. A sad example was that of Acapulco Bay, Mexico, where the disappearance of the mangroves that protected it caused considerable material damage due to cyclones caused by climate change.

Welcome to this forum of fraternal and sororal networks:

Network for Environmental Quality Analysis in Mexico

and

International Network of Environmental Sciences

from the Faculty of Chemistry of the National Autonomous University of Mexico.

The editor-in-chief

<u>Contenido / Contents</u>	<u>Página / Page</u>
Presentación / <i>Presentation</i>	3
Fe de erratas / <i>Errata</i>	6
Evaluación de riesgos a la salud por emisiones de una industria minera en la Sierra Norte de Puebla, México: Análisis basado en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México, RETC 2018 / <i>Health Risk Assessment of Emissions from a Mining Industry in the Sierra Norte of Puebla, Mexico: Analysis Based on the 2018 RETC, acronym in Spanish for Registry of Emissions and Transfer of Pollutants of Mexico, RETP</i> Agustín García-Reynoso, Lisset Vázquez-Bautista	7
Una revisión bibliográfica: Algunos aspectos a considerar para definir si el biodiésel es una alternativa de energía más limpia y sostenible en países de escaso desarrollo / <i>A bibliographic review: Some aspects to consider to define if biodiesel is a cleaner and more sustainable energy alternative in poorly developed countries</i> Julio Alberto Solís-Fuentes, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa	15
Bioadsorbentes activados a partir de subproductos de mango y su aplicación para el postratamiento de agua residual tratada. Estudios preliminares / <i>Bioadsorbents activated from mango byproducts and their application for post-treatment of treated wastewater Preliminary studies</i> Aylin Carrillo-Juárez, Sayra Lissette Orozco-Cerros, Bernardo López, E. Montiel, Mario Morales-Máximo, Roberto Guerra-González, Michel Rivero	33
Evaluación del efecto de ultrasonido con catalizador químico en la producción de biodiésel a partir de aceite usado / <i>Evaluation of the effect of ultrasound with chemical catalyst in the production of biodiesel from used oil</i> Perla Margarita Meza-Inostroza, Laura Y. Sicairos-Medina, Leonel Ernesto Amabilis-Sosa, Edgar Ledezma-Zavala, Ricardo Roé-Sosa, Adriana Roé-Sosa	49
Modelación de trayectorias y estimación de dosis en la Ciudad de México por una emisión no intencionada de material radioactivo desde la Planta Nucleoeléctrica Laguna Verde, México / <i>Trajectory modeling and dose estimation in Mexico City due to an unintentional release of radioactive material from the Laguna Nuclear Power Plant, Mexico</i> Agustín García-Reynoso, Lina Merino-Salgado, Mayra Vera-Sanchez, Iván Hernandez-Paniagua	65
Quitosana-calcita derivada de residuos de camarón como una alternativa verde y ecológica para la extracción en fase sólida de contaminantes orgánicos en agua / <i>Chitosan-calcite derived from shrimp waste as a green and ecological alternative for solid phase extraction of organic contaminants in water</i> Aranys-del-Carmen-Borja-Urzola, Laura Paez-Daniels, Ronny Adrián Flores-Ortega, María-de-Carmen-Durán-Domínguez-de-Bazúa	75
Instructivo para autores / <i>Authors instructions</i>	89

Fe de erratas / *Errata*

Ninguna / *None*

Evaluación de riesgos a la salud por emisiones de una industria minera en la Sierra Norte de Puebla, México: Análisis basado en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México RETC 2018

Health risk assessment of emissions from a mining industry in the Sierra Norte of Puebla, Mexico: Analysis based on the 2018 RETC, acronym in Spanish for Registry of Emissions and Transfer of Pollutants of Mexico, RETP

Agustín García-Reynoso*¹, Lisset Vázquez-Bautista¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmosfera o Atmósfera y Cambio Climático. Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México.

*Correo-e (*e-mail*): agustin@atmosfera.unam.mx

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

Resumen

En esta investigación se presenta la identificación del riesgo asociado con las emisiones de elementos y compuestos tóxicos atmosféricos reportadas en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) para el año 2018, provenientes de una industria minera en Teziutlán, Puebla, México. Estas emisiones se consideran como parte de la operación normal de los procesos de la empresa. Los compuestos químicos liberados al aire, aunque estén en bajas concentraciones, pueden inducir efectos adversos tanto a los ecosistemas como a la salud humana a largo plazo. Hasta el momento, no se han evaluado los impactos agudos ni crónicos en la salud generados por las emisiones durante la actividad normal de las industrias en el área de Teziutlán. En este estudio, se calcula el riesgo utilizando la metodología de evaluación de riesgos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la información de la Oficina de Evaluación de Riesgos para la Salud de California. Los valores de riesgo identificados sugieren que estas emisiones podrían tener efectos negativos en la salud de la población aledaña. Los resultados obtenidos en este estudio pueden ser útiles para la toma de decisiones tanto de la población como de las autoridades locales.

Palabras clave: Exposición crónica, toxicidad, mercurio, cromo, níquel, cáncer

Abstract

This study presents the risk assessment associated with atmospheric toxic emissions reported in the Registry of Emissions and Transfer of Pollutant of Mexico (RETC) for the year 2018, originating from a mining industry in Teziutlán, Puebla, Mexico. These emissions are considered part of the normal operational processes of the company. Chemical compounds released into the air, even at low concentrations, can induce adverse effects on both ecosystems and human health over the long term. To date, the acute and chronic health impacts generated by emissions during the normal activity of industries in the Teziutlán area have not been evaluated. In this study, risk is calculated using the risk assessment methodology of the United States Environmental Protection Agency (EPA) and information from the California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). The identified risk values suggest that these emissions could have negative effects on the health of the surrounding population. The results obtained from this study can be useful for decision-making by both the local population and authorities.

Keywords: *Chronic exposure, toxicity, mercury, chromium, nickel, cancer*

Introducción

Actualmente en México la legislación se aboca a las emisiones de contaminantes criterio como el dióxido de azufre, partículas, plomo, dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono, pero no existe una legislación sobre los compuestos y elementos tóxicos atmosféricos que también poseen efectos sobre la salud que pueden ser crónicos o agudos. Son emitidos durante la operación normal de procesos industriales y, por ello, es importante conocer y cuantificar su impacto a través de la evaluación del riesgo ambiental. Para esta investigación se empleó el análisis de riesgo de acuerdo con la metodología descrita por Gratt (1996) y con la información de la Oficina de Evaluación de Riesgos a la Salud de California en los Estados Unidos (OEHHA, 2015).

El municipio de Teziutlán se localiza en la parte noroeste del estado de Puebla, México. Contaba con una población de 97,590 habitantes (SEDESOL, 2015) que probablemente sea mayor en la actualidad. Su economía depende principalmente de la industria maquiladora, textil, agrícola, ganadera y minera. En esta última rama industrial se cuenta con una planta activa de mineral no metálico con un sistema de operación para obtener caliza y una unidad minero-metalúrgica de fundición activa para ferroaleaciones que cuenta con hornos eléctricos para la producción de silicio-manganeso con ubicación geográfica 19.808N, -97.370W. Actualmente no se conocen los efectos, tanto agudos como crónicos, generados por las emisiones durante la actividad normal de las industrias en el área y de esta en particular. Lo anterior ha producido un incremento en la preocupación relacionada con el riesgo a la afectación de la salud humana y del ambiente.

Por lo anterior los objetivos de este estudio fueron dos: Emplear el análisis de riesgos para la identificación de las emisiones evaluando si son aceptables o no, así como conocer los posibles efectos agudos o crónicos por las emisiones industriales de esa empresa minera y, en particular, en este caso el riesgo del potencial de ocurrencia de consecuencias adversas, indeseables para la vida humana, salud, propiedad o para el ambiente.

Para cuantificarlo, como se verá en la metodología seguida, se emplearon procedimientos desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*EPA* en inglés) donde, a través del uso de las emisiones y consideraciones aplicables a la planta de estudio, se podría determinar el nivel de riesgo o un puntaje donde sea posible indicar si tendría efectos o no sobre la salud. Con ello, sería posible realizar a futuro trabajos de reducción de emisiones y estudios más detallados para conocer las áreas de afectación.

Dentro del plan municipal de desarrollo no se toman en cuenta, dentro de la manifestación de impacto ambiental (MIA), los riesgos para la salud de las emisiones industriales por su actividad normal. Si bien para ciertas actividades en la MIA se solicita un análisis de riesgo, esta evaluación de riesgo es solamente para el caso de explosión, fuga o derrame de sustancias peligrosas.

El Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) es un reporte anual donde se difunde la información sobre las emisiones y transferencias de las sustancias enlistadas en la NOM-165-SEMARNAT-2013, elaborado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT, 2014) con el objeto de informar a las comunidades sobre las emisiones al aire, al agua o al suelo por las actividades industriales. Este registro es de acceso público y puede obtenerse del sitio electrónico de la SEMARNAT.

Así, en esta investigación se realizó la identificación de la industria minera seleccionada en particular, las emisiones de elementos y compuestos tóxicos mediante la revisión de este Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), la presentación del método de análisis de riesgo y la

identificación cuantitativa de riesgos que puedan servir de base para la gestión ambiental en el municipio de Teziutlán, Puebla, México.

Materiales y métodos

En esta parte se describe la selección del sitio, el origen de la información sobre el riesgo de las sustancias tóxicas a estudiar, así como el método para identificar el riesgo, así como los supuestos empleados para la evaluación considerando la exposición por inhalación. En esta etapa no se evaluará la exposición multi-ruta (ingestión de agua y consumo en alimentos, entre otros). El período de estudio correspondió a las emisiones del año 2018, para los compuestos reportados en el RETC y de éstos solamente se consideraron para el cálculo de riesgo a aquéllos de los que se contaban con el factor unitario de riesgo por inhalación y para una exposición crónica a las emisiones.

La selección del sitio se basó en la identificación de un lugar donde hubiera una población cercana a una industria que fuera la principal emisora de la zona, con registro en el RECT. Así, se consideró como caso de estudio a la comunidad de Teziutlán en el estado de Puebla, México. La industria minera en estudio posee emisiones a la atmósfera y presenta información dentro del RETC. En este sitio la población vive a una distancia menor a 100 m de la barda perimetral de la empresa seleccionada.

La información empleada se obtuvo de ese sitio del RETC (SEMARNAT, 2014) para el año 2018. Es la información más reciente disponible a la fecha de la realización de este estudio. La información de las emisiones se presenta en la Tabla 1. Todas las emisiones provienen de la empresa en estudio (Compañía Minera Autlán, S.A. de C.V.) del sector metalúrgico en donde se incluye la siderúrgica.

Tabla 1. Emisiones a la atmósfera reportadas para el municipio de Teziutlán, 2018 (SEMARNAT, 2020)

Substancia	Aire (kg/año)
Arsénico	5.94
Cromo (polvos respirables, humos o vapores)	36.85
Mercurio	1.31
Níquel (polvos respirables, humos o vapores)	34.75
Plomo (polvos respirables, humos o vapores)	16.42

El método empleado para la identificación del riesgo consideró los siguientes pasos (EPA, 1991a,b):

- 1) Identificación del peligro
- 2) Identificación de puntajes cancerígenos y no cancerígenos para exposición crónica
- 3) Riesgo por inhalación
- 4) Evaluación del peligro

La identificación del peligro se refirió a las sustancias que poseen un efecto adverso para la salud y estas correspondieron a las emisiones reportadas en el RECT y presentadas en la Tabla 1. Para la evaluación de la exposición por inhalación se emplearon las siguientes ecuaciones de puntaje para efectos cancerígenos (Gratt, 1996):

$$S_{CÁNCER} = \sum(Q_C * URF_C)RP * 1.7 \times 10^3 \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

$S_{CÁNCER}$ es el puntaje para cáncer de la substancia c

Q_C es la emisión de la substancia c en kg/año (lb/año)

URF_C es el factor de riesgo unitario de la substancia c por sus siglas en inglés (ver Glosario al final)

RP es el factor de ajuste de proximidad (adimensional) por sus siglas en inglés (ver Glosario al final)

A partir de los resultados de la ecuación 1 (Gratt, 1996) se consideró que un puntaje mayor a 100 representa a una empresa o proceso como candidato para análisis detallado, en el intervalo 10 a 100 a un candidato potencial y puntajes menores a 10 indica la probabilidad de no requerir un análisis posterior. El factor de ajuste de proximidad se consideró $RP = 1$ ya que toma en cuenta que la población vive a una distancia menor a los 100 m de la barda de la empresa (Gratt, 1996).

Para el caso del puntaje no cancerígeno ($S_{NO\ CÁNCER}$) éste se obtuvo mediante la siguiente ecuación (Gratt, 1996):

$$S_{NO\ CÁNCER} = \sum \left(\frac{Q_c}{REL_c} \right) RP * 150 \text{ ó } 1500 \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

$S_{no\ cáncer}$ es el puntaje de efectos no cancerígenos para la sustancia c
 Q_c es la emisión del compuesto químico c kg/h agudo y kg/año crónico (lb/hr agudo y lb/año crónico)
 REL_c nivel de exposición de referencia por sus siglas en inglés, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 RP es el factor de ajuste de proximidad (adimensional) también por sus siglas en inglés. Se emplea el valor de 150 para exposición crónica y 1500 para aguda (Gratt, 1996)

En general, las puntuaciones mayores a 10 en la industria o proceso estudiado representaron a los candidatos a realizar una evaluación del riesgo más detallada y los puntajes menores a 1 indicarían que no se requeriría un análisis posterior (Gratt, 1996).

La estimación del peligro (Rc) para la salud de los compuestos que inducen cáncer puede calcularse mediante el uso de la metodología proveída por la EPA descrita por Gratt (1996), en donde el riesgo se calculó a partir de la ecuación 3.

$$Rc = Q_c * \left(\frac{x}{Q} \right) * URF_c * MP_c \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

Rc - probabilidad de cáncer en el tiempo de vida por sus siglas en inglés (ver Glosario al final)
 Q_c - emisión, kg/d (lb/d), por sus siglas en inglés (ver Glosario al final)
 (x/Q) - factor de dilución que convierte la emisión (Q_c [kg/d o lb/día]) en concentración (x [mg/m^3])
 URF_c - riesgo unitario por inhalación usado para convertir concentración (x [mg/m^3]) a riesgo en el tiempo de vida, LCP , por sus siglas en inglés (ver Glosario al final)
 MP_c - factor multi-ruta usado para considerar las otras rutas al órgano blanco en adición a la inhalación directa. Cuando es para inhalación su valor es de 1 y en el caso de considerar otras rutas es mayor a 1 (Gratt, 1996) por sus siglas en inglés (ver Glosario al final)

El factor de dilución se obtuvo de Gratt (1996) para una chimenea con altura de 15 metros y como la distancia a la barda es de 100 m, su valor sería de $0.52 (\text{mg}/\text{m}^3)/(\text{lb}/\text{d})$. Este factor consideró una operación continua y el valor del factor multi-ruta empleado se consideró como 1 ya que solamente era para inhalación.

El riesgo unitario por inhalación (URF por sus siglas en inglés, ver Glosario al final) es el estimado del límite superior de la probabilidad de generar cáncer en el tiempo de vida, el cual puede resultar de una exposición a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se consideró que un riesgo aceptable era de 1 caso por millón (equivalente a una probabilidad de $1\text{E}-06$), el cual correspondería a la probabilidad de que un individuo muera por causas naturales (Gratt, 1996).

El nivel de referencia de concentraciones a exposición crónica *REL* (mg/m^3) – de sus siglas en inglés *Reference Exposure Level* – indicaría la concentración sobre la cual se pueden obtener efectos adversos a la salud y estos valores se encuentran en la Tabla Consolidada de Valores de Salud aprobados por la OEHHA/ARB (ARB, 2019). Se muestran en el Tabla 2.

Tabla 2. Factores de riesgo unitario por inhalación (*URF* en inglés) y niveles de referencia por exposición crónica a inhalación (*REL* en inglés) (ARB, 2019)

Sustancia	<i>URF</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	<i>REL</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Arsénico	3.30E-03	1.50E-02
Cromo (polvos respirables, humos o vapores)	1.50E-01	2.00E-01
Níquel (polvos respirables, humos o vapores)	2.60E-04	1.40E-02
Plomo (polvos respirables, humos o vapores)	1.20E-05	--
Mercurio	--	3.00E-02

Resultados y discusión

A partir de los datos de la Tabla 1, la ecuación 1 y de los valores de riesgo de la Tabla 2 se obtuvieron los puntajes de la empresa para las diferentes sustancias tóxicas emitidas que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Puntaje para cáncer de las emisiones de sustancias tóxicas

Sustancia	<i>S</i> _{CÁNCER}
Arsénico	73
Cromo (polvos respirables, humos o vapores)	20,716
Níquel (polvos respirables, humos o vapores)	34
Plomo (polvos respirables, humos o vapores)	0.7

En el caso de efectos no cancerígenos para las diferentes sustancias los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Puntaje para no cáncer para emisiones de sustancias tóxicas

Substancia	<i>S</i> _{NO CÁNCER}
Arsénico	130,954
Cromo (polvos respirables, humos o vapores)	60,930
Mercurio	14,440
Níquel (polvos respirables, humos o vapores)	820,827

El peligro debido a las sustancias emitidas como la probabilidad de cáncer en el tiempo de vida, así como el número de casos de cáncer por millón de habitantes se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Probabilidad de cáncer en el tiempo de vida y número de casos por millón

Substancia	Exceso de probabilidad de cáncer	Casos por millón
Arsénico	8.99E-05	90
Cromo (polvos respirables, humos o vapores)	2.53E-02	25,347
Níquel (polvos respirables, humos o vapores)	4.14E-05	41
Plomo (polvos respirables, humos o vapores)	9.04E-07	1

Discusión final

De la información obtenida a partir del RETC donde las empresas reportan sus emisiones se obtuvo que los compuestos que se emiten en la región de Teziutlán, Puebla, México, por la empresa minera seleccionada son principalmente metales pesados y otros elementos potencialmente tóxicos (EPT). Así se tiene que se emiten arsénico, níquel, cromo, plomo y mercurio. Se aplicó el método propuesto por la EPA descrito por Gratt (1996) para obtener los puntajes de la empresa a efectos cancerígenos y no cancerígenos para exposición crónica, así como el exceso de riesgo de cáncer por la exposición vía inhalación de las emisiones. De esto se calculó que el puntaje total, considerando la suma de los individuales para cáncer, era mayor que 100 por lo que debería hacerse un estudio más detallado de riesgo.

Por otra parte, para el puntaje de efectos no-cáncer se obtuvo que poseyeron valores superiores a 10, lo que también indica que se requeriría de un estudio detallado de riesgo. Con referencia al exceso de riesgo por la emisión mediante el factor de riesgo unitario por inhalación, el número de casos por millón supera el umbral de 1 caso por lo cual también indicaría la necesidad de realizar un estudio más detallado.

El procedimiento de puntaje, como lo señala Gratt (1996), es una estimación conservadora, indicando que los puntajes y peligros calculados se encuentran en el límite superior, ya que se considera que la población se ha encontrado expuesta durante 70 años a las concentraciones ambientales publicadas y que las emisiones se están generando todo el tiempo a la misma concentración a la cual la población se encontraría expuesta.

A partir de estos resultados sería justificable la realización de un estudio más detallado que implique el empleo de modelos de dispersión, mediciones en el área, así como considerar que las emisiones de los metales pesados y el arsénico se dan como partículas incluyendo, además de la dispersión, la sedimentación de esas partículas. Otro aspecto también a incluir son las otras rutas de exposición como la ingestión de alimentos, la re-suspensión de polvos y el consumo de agua, ya que estos vectores podrían verse impactados por las emisiones e infiltraciones de la actividad minera en el sitio.

Conclusiones

Se realizó una determinación de análisis de riesgo para la afectación a la salud de las emisiones a la atmósfera de una empresa minera ubicada en el municipio de Teziutlán, Puebla, México, para el año 2018, donde las sustancias tóxicas emitidas podrían estar induciendo efectos sobre la salud tanto cancerígenos como no cancerígenos. Esta información se obtuvo a partir del RETC (DOF, 2013). Entre las sustancias que se emiten están los elementos potencialmente tóxicos, EPT, arsénico, cromo, plomo, níquel y mercurio.

Con esta información se aplicó la metodología propuesta por la EPA y se empleó la información de dosis-respuesta de la Oficina de Evaluación de Riesgos para la Salud de California para las sustancias tóxicas emitidas para cuantificar el puntaje de la empresa.

Los puntajes obtenidos sobrepasan el valor de 100 para el caso de cancerígenos y de 10 para el caso de los no cancerígenos. De igual manera el exceso de cáncer en el tiempo de vida sobrepasa 1 caso por millón, justificando que se debe realizar un estudio más detallado para cuantificar el riesgo, así como iniciar trabajos para el control de emisiones de las sustancias tóxicas enviadas por la empresa minera a la atmósfera, ya que los valores obtenidos indican que se puede tener afectación a la salud de los pobladores y trabajadores expuestos a esas emisiones.

Esta evaluación teórica es el primer trabajo de este tipo donde se determina el riesgo por la operación normal de una planta industrial seleccionada de esta zona, por lo que puede servir de base a otros estudios similares para otras regiones y con ello poder demostrar el beneficio o la obligatoriedad de implementar medidas de control y reducción de emisiones en procesos industriales que, aunque cumplan con la normatividad actual de humos y polvos, no implica que las emisiones de sustancias tóxicas de sus procesos no lleguen a inducir efectos sobre la salud que actualmente no están considerados en la normativa vigente.

Glosario

Término o siglas	Significado
ARB	Siglas en inglés para Junta de Recursos del Aire de California (<i>Air Resources Board</i>)
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos por sus siglas en inglés (<i>Environmental Protection Agency</i>)
LCP	Siglas en inglés para Probabilidad de Cáncer en el Tiempo de Vida (<i>Life Cancer Probability</i>) (Gratt, 1996)
MPC	Siglas en inglés para la probabilidad multi-ruta usado para considerar las otras rutas al órgano blanco en adición a la inhalación directa (<i>Multiroute Probability</i>). Cuando es para inhalación su valor es de 1 y en el caso de considerar otras rutas es mayor a 1 (Gratt, 1996)
OEHHA	Oficina de Evaluación de Riesgos para la Salud Ambiental de California por sus siglas en inglés (<i>California Office of Environmental Health Hazard Assessment</i>) (https://oehha.ca.gov/)
Qc	Emisión de la sustancia <i>c</i> en kg/año (lb/año) (<i>quantity/year</i>) (Gratt, 1996)
Rc	Estimación del peligro (<i>risk</i> en inglés) para la salud de los compuestos <i>c</i> que inducen cáncer en el tiempo de vida
RELC	Nivel de referencia de concentraciones a exposición crónica de la sustancia <i>c</i> REL ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, mg/m^3) – de sus siglas en inglés <i>Reference Exposure Level to substance c</i>
RETC	Siglas para el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México
RP	Factor de ajuste de proximidad (adimensional) (<i>Region Proximity</i>). Se emplea el valor de 150 para crónico y 1500 para agudo (Gratt, 1996)
S _{CÁNCER}	Puntaje para cáncer de la sustancia <i>c</i>
S _{NO CÁNCER}	Puntaje de efectos no cancerígenos para la sustancia <i>c</i>
URFC	Factor de riesgo unitario por inhalación de la sustancia <i>c</i> (por sus siglas en inglés <i>unit risk factor of substance c</i>) para convertir concentración (χ [mg/m^3]) a riesgo en el tiempo de vida (LCP)
X/Q	Factor de dilución que convierte la emisión Qc [kg/día, lb/día] en concentración χ [mg/m^3] (Gratt, 1996)

Reconocimientos

El autor y la autora reconocen a los evaluadores por su valiosa contribución a mejorar el manuscrito y cualquier error es responsabilidad del autor y la autora.

Bibliografía

ARB. 2019. Air Resources Board. Consolidated Table of OEHHA/ARB Approved Risk Assessment Health Values. The purpose of this reference table is to provide a quick list of all health values that have been approved by the Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) and the Air Resources Board (ARB) for use in facility health risk assessments conducted for the AB 2588 Air Toxics "Hot Spots" Program. The OEHHA has developed and adopted new risk assessment

guidelines that update and replace the California Air Pollution Control Officers Association's (CAPCOA) Air Toxics "Hot Spots" Program Revised 1992 Risk Assessment Guidelines, October 1993. The OEHHA has adopted three technical support documents for these guidelines, which can be found on their website (http://www.oehha.ca.gov/air/hot_spots/index.html). This table lists the OEHHA adopted inhalation and oral cancer slope factors, noncancer acute Reference Exposure Levels (RELs), and inhalation and oral noncancer chronic RELs. OEHHA is still in the process of adopting new health values. Therefore, new health values will periodically be added to, or deleted from, this table. Users of this table are advised to monitor the OEHHA website (www.oehha.ca.gov) for any updates to the health values. (Tabla consolidada de valores de salud de evaluación de riesgos aprobados por la OEHHA/ARB. El propósito de esta tabla de referencia es proporcionar una lista rápida de todos los valores para la salud que han sido aprobados por la Oficina de Evaluación de Riesgos para la Salud Ambiental (OEHHA) y la Junta de Recursos del Aire, ARB, para su uso en instalaciones de riesgo para la salud. Evaluaciones realizadas para el programa AB 2588 Air Toxics "Hot Spots". La OEHHA ha desarrollado y adoptado nuevas pautas de evaluación de riesgos que actualizan y reemplazan las directrices de la Asociación de Oficiales de Control de la Contaminación del Aire de California (CAPCOA). Programa de "puntos calientes" de sustancias tóxicas, Directrices de evaluación de riesgos revisadas en 1992, octubre de 1993. La OEHHA ha adoptado tres documentos de apoyo técnico para estas directrices, que se pueden encontrar en su sitio web: http://www.oehha.ca.gov/air/hot_spots/index.html. Esta tabla enumera los factores dependientes de inhalación y de cáncer oral adoptados por la OEHHA, los niveles de exposición de referencia agudos (REL) no cancerosos y los REL crónicos de inhalación y orales no cancerosos. OEHHA está todavía en el proceso de adopción de nuevos valores de salud. Por lo tanto, periódicamente se agregarán o eliminarán nuevos valores de salud de esta tabla. Se recomienda a los usuarios de esta tabla que controlen el sitio web de la OEHHA (www.oehha.ca.gov) para detectar cualquier actualización de los valores de salud.

<https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/toxics/healthval/contable.pdf>

- DOF. 2013. Norma Oficial Mexicana NOM-165-SEMARNAT-2013, Que establece la lista de sustancias sujetas a reporte para el registro de emisiones y transferencia de contaminantes. Ciudad de México. México. 24 de enero de 2014. Diario Oficial de la Federación, Poder Ejecutivo Federal.
- EPA. 1991a. Evaluación de exposiciones de contaminantes tóxicos del aire: Guía del ciudadano. EPA 450/3-90. https://www3.epa.gov/ttn/atw/3_90_023sp.html
- EPA. 1991b. Evaluación de riesgo para contaminantes tóxicos del aire: Guía del ciudadano. EPA 450/3-90-024. https://www3.epa.gov/ttn/atw/3_90_024sp.html
- Gratt, L.B. 1996. Air toxic risk assessment and management: Public health risk from normal operations. John Wiley & Sons. New York, Estados Unidos.
- OEHHA. 2015. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. <https://oehha.ca.gov/air/crn/notice-adoption-air-toxics-hot-spots-program-guidance-manual-preparation-health-risk-0#download>
- SEDESOL. 2015. Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2015. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/39396/Puebla_174.pdf
- SEMARNAT. 2020. Reportes del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), con información sobre la ubicación de los establecimientos que liberan al ambiente sustancias contaminantes RETC. http://sinat.semarnat.gob.mx/retc/tema/index.html_02/02/2022
- SEMARNAT. 2014. Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de enero de 2014. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5330750&fecha=24/01/2014#gsc.tab=0

Una revisión bibliográfica: Algunos aspectos a considerar para definir si el biodiésel es una alternativa de energía más limpia y sostenible en países de escaso desarrollo¹

A bibliographic review: Some aspects to consider to define if biodiesel is a cleaner and more sustainable energy alternative in poorly developed countries²

**Julio Alberto Solís-Fuentes*¹,
María del Carmen Duran-Domínguez-de-Bazúa²**

¹Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas,
Av. Dos Vistas s/n carretera Xalapa-Las Trancas, 91000 Xalapa, Ver., México
Fax (+52) 22- 8841-8931. Correo-e (e-mail): jsolis@uv.mx

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

Resumen

En este trabajo se hizo una breve revisión de la producción y consumo energético desde diferentes fuentes de obtención y del estado del arte de una de las opciones energéticas, -el biodiésel-, que junto con otras, han sido identificadas como más limpias y con posibilidad de ser renovables. Todo ello desde considerar las tendencias del estilo de desarrollo global actual del mundo que, en su dimensión territorial, parece haber agudizado las desigualdades regionales y el deterioro ambiental en países de menor desarrollo relativo como México y otros del área latinoamericana. Hay otros países y territorios de escaso desarrollo con enormes disparidades socioeconómicas en sus sectores poblacionales, mayoritariamente de bajos ingresos y consumos de energía/cápita, escasez de capital productivo y financiero. Paradójicamente, son poseedores de ecosistemas con la mayor biodiversidad del planeta y, por tanto, altos niveles de capital natural, como es el caso de la región latinoamericana donde se alberga más de un tercio de la biodiversidad vegetal global del planeta. Puede concluirse que debe seguirse trabajando sobre la minimización de los costos de fabricación del biodiesel considerando materias primas e insumos y tecnologías que no afecten la biodiversidad el capital natural de los ecosistemas donde se producen.

Palabras clave: Biodiésel, energías renovables, aceites vegetales, biodiversidad

Abstract

In this research a brief review is made concerning energy production and consumption from different sources and the state of the art of one of the energy options - biodiesel - which, along with others, have been identified as cleaner and potentially renewable. All of this from the perspective of the trends in the current global development style of the world, which, in its

¹ Esta contribución fue presentada como conferencia por el primer autor y publicada en el Libro electrónico de contribuciones selectas 2024 X Minisimposio Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Aguas Atmósfera y Suelos. ISSN 2448-6116. RACAM, Abril-April 01-06, 2024. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México

² This contribution was presented as a lecture by the first author and published in the Electronic Book of Selected Papers 2024 Tenth International Minisymposium on Removal of Pollutants from Water, Atmosphere, and Soils. ISSN 2448-6116. RACAM, April-April 01-06, 2024. University City, Mexico City, Mexico

territorial dimension, seems to have exacerbated regional inequalities and environmental deterioration in countries with lower relative development such as Mexico and others in Latin America. There are also other countries and territories with little development with enormous socioeconomic disparities in their population sectors, mostly with low incomes and energy consumption/capita, and a shortage of productive and financial capital. Paradoxically, they are the owners of ecosystems with the greatest biodiversity on the planet and, therefore, high levels of natural capital, as is the case of the Latin American region, which is home to more than a third of the planet's global plant biodiversity. It can be concluded that work must continue on minimizing biodiesel manufacturing costs, considering raw materials and inputs and technologies that do not affect the biodiversity and natural capital of the ecosystems where they are produced.

Keywords: *Biodiesel, renewable energies, vegetable oils, biodiversity*

Introducción

Desde siempre, pero en la actualidad de un modo más claro, es evidente que la energía es uno de los factores más importantes para lograr el sostén, desarrollo y bienestar de la humanidad. Los acuerdos mundiales a este respecto, destacan un conjunto de rutas de acción a abordar desde ahora, que posibilite mejores estadios para la convivencia humana y la vida en el planeta intentando la corrección del rumbo del mundo, caracterizado hoy en día por una enorme desigualdad económica y social, entre individuos, grupos sociales y naciones; altos índices de pobreza y marginación de la población y un progresivo y casi generalizado deterioro ambiental. En estos acuerdos para hacer sostenible el futuro del planeta, como es el caso de la Agenda 2030, lograr la disponibilidad de energía suficiente desde fuentes no contaminantes, renovables y limpias para todas las actividades humanas es un objetivo prioritario.

Dado su origen biológico, alta bio-degradabilidad y mínima toxicidad el biodiésel ha venido siendo considerado un combustible alternativo factible (Banković-Ilić et al., 2012).

Como es sabido los combustibles fósiles, no obstante su progresivo cuestionamiento por sus efectos ambientales negativos, son todavía preferentemente utilizados como principal fuente de energía en diversos dispositivos y motores dentro de las variadas actividades industriales, domésticas y de transporte. Los llamados motores diésel son, por lo general, favorecidos objetos de selección, con respecto de los motores encendidos por chispa en aplicaciones de servicio pesado como el transporte y plantas de generación debido a su mayor eficiencia durabilidad y productividad (Tabatabaei et al., 2019). Sin embargo, solamente un ejemplo, los vehículos que circulan largas distancias contribuyen con cerca de las tres cuartas partes de las emisiones de CO₂ del transporte. De éstos, los motores diésel son alrededor del 80% de toda la flota de transporte en el mundo (Mamtani et al., 2021). Además, según el Banco Mundial, cerca de 2300 millones de personas en el planeta aún usan combustibles y tecnologías tradicionales contaminantes como la leña para cocinar sus alimentos (Banco Mundial, 2023), combustible con posibilidad de ser sustituido, bajo ciertas condiciones, por otros biocombustibles más limpios.

La búsqueda de combustibles líquidos con características técnicas que substituyan eficazmente en sus principales aplicaciones al petro-diésel ha llevado a considerar a diferentes combustibles de origen biológico -los biocombustibles- como el biodiésel. Sin embargo, su producción y uso ampliado está sujeto a diferentes condiciones ambientales, sociales, económicas, culturales y tecnológicas que posibiliten salvar hoy y en el futuro diversas restricciones para su obtención a diferentes escalas, domésticas, industriales y comerciales a costos que le permitan competitividad, disponibilidad y uso ampliado, con respecto del diésel de petróleo, sin menoscabo de sus atributos y características técnicas requeridas.

Igualmente, algunos impactos negativos asociados todavía con el biodiésel están correlacionados con los modos en que se produce y utiliza, tales como el efecto negativo en la biodiversidad de los ecosistemas durante la producción de oleaginosas proveedoras de aceites vegetales, la materia prima

esencial para su elaboración. Esto ocurre, por lo general, en plantaciones a gran escala. Por otro lado, la competencia indeseable desde una perspectiva humanista y no solamente economicista, que representa la utilización de plantas y semillas comestibles como fuente de aceites para la producción del biocombustible ante realidades, en contextos concretos, de escasez u ofertas limitadas de alimentos para consumo humano. Un tercer impacto negativo es el referente al ambiente debido a la generación de gases de efecto invernadero que, a pesar de muchas de sus cualidades, implica todavía la producción y el uso del biodiésel.

En este documento se hace un breve análisis sobre la producción y consumo energético desde diferentes rutas de obtención, dado el carácter limitado de algunas fuentes de energía actualmente predominantes en el mundo y a su carácter determinante para el desarrollo económico de los pueblos. En ese marco se realiza una breve revisión del estado del arte de una de las alternativas energéticas, el biodiésel, que junto con otras ha sido identificada como más limpia y con posibilidad de ser renovable. Todo ello desde el contexto de considerar las tendencias del estilo de desarrollo global actual del mundo que, en su dimensión territorial, parece haber agudizado las desigualdades regionales y el deterioro ambiental en países de menor desarrollo relativo, como México y otros del área latinoamericana. Países y territorios de escaso desarrollo, esto es, con enormes disparidades socioeconómicas en sus poblaciones, mayoritariamente de bajos ingresos y bajos consumos de energía per cápita, así como de escasez de capital productivo y financiero. Paradójicamente, algunos de ellos son poseedores de ecosistemas con la mayor biodiversidad del planeta y, por tanto, con altos niveles de capital natural, como es el caso de la región latinoamericana donde se alberga más de un tercio de la biodiversidad global del planeta (Raven et al., 2020).

La energía recurso escaso e indispensable para el desarrollo

La cuestión energética es un aspecto fundamental para las sociedades humanas desde siempre y para siempre. Es posible que la energía sea algo que acompaña al ser humano en sus posibilidades de supervivencia, seguridad, comodidad y progreso individual y colectivo desde los primeros tiempos del *Homo sapiens* cuando éste se percató que necesitaba protegerse de las inclemencias del tiempo y procurarse una fuente de calor tanto para, por ejemplo, mitigar las bajas temperaturas como para rudimentariamente procesar sus alimentos. El proceso histórico y social ha ido acompañado de un progresivo y acumulativo conocimiento y conciencia de la naturaleza, formas, fuentes, mecanismos de obtención, transferencia, transmisión, riesgos, etc., así como usos de la energía para hacerla asequible, -se piensa idealmente- a todos los seres humanos en sus diferentes contextos.

El progreso y desarrollo social, al igual que el mantenimiento de los procesos naturales, es impensable sin la participación efectiva de la energía como impulsor de los cambios para el sostén de la vida humana en el planeta.

Desde las incipientes preocupaciones por el desarrollo económico y social, principalmente posteriores a la Revolución industrial, los estudiosos y teóricos del Desarrollo, mostraron la relevancia de la energía en los esfuerzos de lograr y aumentar la producción material, tanto de la naturaleza como de los procesos industriales, para dotar de los bienes y servicios requeridos por las sociedades, haciendo evidente, posteriormente, que en el contexto global del mundo las diferencias del desarrollo entre los países y regiones está fuertemente correlacionado con las diferencias en la disponibilidad y uso de la energía. Así, los países altamente industrializados y con los niveles de desarrollo económico relativamente más altos en el contexto mundial, se caracterizan por una disponibilidad amplia y uso intensivo de la energía en todos los ámbitos de la vida de sus poblaciones, mientras que los países con menores niveles de desarrollo se caracterizan por una dotación, disponibilidad y uso de cantidades menores de energía y, por tanto, con mayores restricciones para que sus poblaciones logren formas de vida más igualitarias y mejores.

La eliminación de esta importante disparidad que afecta negativamente a enormes contingentes de la población mundial más desfavorecida económicamente es un aspecto abordado a lo largo del último siglo sin lograr hasta ahora cambios importantes, entre otras muchas cosas por el hecho de que, con frecuencia, se deja de lado que el desarrollo y su contraparte el subdesarrollo en los países del mundo, están históricamente relacionados en su esencia, mostrando que el desarrollo de unos ha sido logrado a expensas del subdesarrollo de otros. Por ello, el desarrollo del modelo dominante capitalista en las regiones más atrasadas necesitaría de grandes cantidades de energía actualmente no disponibles en el conjunto del planeta, puesto que los países altamente desarrollados consumen la mayoría de la energía disponible para sostener sus estilos de vida y altos ritmos de crecimiento económico en detrimento, con frecuencia, de una limitada disponibilidad energética en los países y regiones con menor desarrollo. Es conocido, además, el hecho de que en muchos de los casos el alto nivel de desarrollo económico se ha logrado aplicando la lógica del máximo beneficio en el corto plazo. Esto, históricamente, ha llevado a un uso altamente intensivo e irracional de los recursos naturales con el consecuente deterioro ambiental del mundo actual (Solís-Fuentes y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022; Sunkel y Paz, 1980).

La agenda 2030 refiere en su Objetivo 7 que uno de los aspectos de mayor importancia para los individuos, familias y diversas entidades sociales y económicas es asegurar el acceso suficiente a la energía, un factor de primera necesidad e indispensable para el sostén de sus vidas y actividades, con las mínimas repercusiones negativas para el ambiente.

Las diferentes fuentes de energía y el balance global Producción-Consumo

La situación mundial

Según el Balance Mundial de Energía (IEA, 2024; SENER, 2023) la producción mundial de ésta en el año de 2021, llegó a 614 318.52 petajoules (PJ) que incluyó un crecimiento de 3.41% con respecto del año anterior. Esta producción correspondió a las siguientes fuentes primarias de energía: 29.21% al petróleo crudo, el 27.30% a carbón y sus derivados, 23.82% al gas natural, el 4.99% al uranio y el 14.68% provino de fuentes renovables.

Como es sabido, las fuentes de energía primaria son los recursos naturales disponibles en forma directa o indirecta que no sufren ninguna modificación química o física para su uso energético. Éstas son el petróleo y gas natural, el carbón mineral, la hidroelectricidad, la leña y sus subproductos, así como el biogás, y las energías geotérmica, eólica, nuclear y solar, además de las generadas por el bagazo de plantas terrestres especialmente la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y los residuos agropecuarios en general o los urbanos (CEPAL, 2003).

Cifras del año 2021 para la oferta bruta interna de energía mundial y consumo mundial de energía (que para el caso de los países es la oferta total menos la exportación y las operaciones de maquila-intercambio neto y representa la disponibilidad, en el territorio nacional o mundial de la energía que puede ser destinada a los procesos de transformación, distribución y consumo) mostró que China fue el país con mayor oferta bruta interna con 157 034 PJ, lo equivalente al 25.41% de la oferta total mundial y Estados Unidos el 14.49% (considerando que la población estadounidense es cinco veces menor que la de China, este último es el mayor ofertante del mundo). India ofertó el 6.40% y Rusia el 5.65% del total. Esto hace que estos 4 países posean poco más de la mitad de la oferta bruta de energía a nivel mundial (SENER, 2023).

En cuanto al consumo mundial de energía para 2022, el Reporte Mundial consigna que fue de poco más de 604 mil PJ, mostrándose como los mayores consumidores los países más poblados del planeta y los de mayor dinamismo económico: China (26.38%) y Estados Unidos (15.87%) aumentaron su oferta con respecto de su consumo. India con 6.03% y Rusia con 4.78%, tuvieron menos consumo que oferta y aparece Japón con 2.95%. Entre los dos primeros y Japón, países de alta

industrialización, suman poco más del 45% del consumo total mundial. México se sitúa en el 13^o lugar en el consumo mundial de energía con el 1.44% del total (IEA, 2023; SENER, 2023). Este consumo mundial de energía sectorialmente tuvo en 2021 la siguiente distribución: Industria 34.1%, Transporte 30.2%, Residencial 22.43%, Comercial y Servicio 9.0%, Agropecuario 2.5% (SENER, 2023).

De acuerdo con el último reporte del Instituto de Energía (EI, 2023) el consumo energético promedio por persona en el mundo fue en 2022 de 75.7 GJ/cápita. Este importante indicador mostró una tendencia creciente a lo largo de la última década mismo que desagregado en grandes regiones del mundo, permite vislumbrar la disparidad en los niveles de consumo promedio de energía, por individuo en las poblaciones que habitan las regiones con los países caracterizados como de mayor y de menor desarrollo. Así, mientras en la región de América del Norte (que incluye a México en este dato) el consumo per cápita fue de 235.6 GJ/cápita, en los países de Centro y Sudamérica fue de solamente 56.5 GJ/cápita en promedio. De la misma forma, la población europea tuvo para ese mismo año consumos de 118.0 GJ/cápita, mientras que en la población africana fue de solamente 14.2 GJ/cápita.

La Tabla 1 muestra los valores en algunos países seleccionados para los años 2016-2022 del consumo promedio por individuo, la tasa de crecimiento de este indicador y la población total. Esto permite apreciar los enormes consumos energéticos de los países de mayor desarrollo, como es el caso de Singapur y EEUU. Los de mayor población del mundo, como China, en comparación con otros de menor nivel socioeconómico, como los países de África Central, Latinoamérica e India, entre otros, no llegan a acercarse a estos dos. En México con una población aproximada de 129 millones de personas el consumo promedio de energía se situó en 2022 en 68.4 GJ/persona (EI, 2023).

Tabla 1. Consumo per cápita de energía primaria (GJ/habitante) 2016-2022 de países y regiones seleccionadas (elaboración propia con datos de EI, 2023)

País	Año							Tasa (%) 2022	Población	
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022		Total*	%**
	Consumo per cápita, GJ/habitante									
Canadá	396.7	397.8	396.2	388.7	361.8	362.7	367.8	1.4	38.7	81
EEUU	283.0	281.8	290.1	286.2	263.7	277.2	283.5	2.3	341	83
México	66.7	67.3	65.8	64.5	59.0	63.1	68.4	8.5	129	88
Venezuela	98.9	100.2	86.7	76.4	63.8	74.5	78.1	4.8	28.8	-
Argentina	81.8	81.0	79.8	74.6	69.5	76.8	79.2	3.1	45.7	94
Chile	86.4	88.3	90.1	89.6	82.5	88.1	91.2	3.6	19.6	85
Brasil	59.7	59.8	59.5	60.1	57.3	60.0	62.3	3.8	217	88
Colombia	41.2	40.9	40.8	40.4	36.2	40.1	42.3	5.4	52	81
Ecuador	41.0	42.0	43.6	43.8	37.3	42.9	43.7	1.9	18.2	64
Perú	34.6	34.6	35.6	35.8	30.1	33.9	35.4	4.5	34.3	79
Qatar	803.7	744.8	729.3	748.9	662.7	717.9	699.2	-2.6	2.7	-
Singapur	584.1	593.3	588.7	571.2	555.3	551.9	529.5	-4.1	6	-
Noruega	382.3	381.2	372.8	347.0	374.0	379.2	348.9	-8.0	5.5	86
Japón	148.2	150.4	150.1	147.1	136.9	144.0	143.9	0.0	123	94
China	90.6	93.6	97.6	101.8	104.9	110.8	111.8	0.9	1425	65
India	22.3	22.8	23.9	24.2	22.7	24.5	25.7	4.9	1436	36
África Central	5.7	5.4	5.5	5.4	5.1	5.1	4.8	-7.5	184	40

*En millones de habitantes; **Porcentaje de la población urbana (Worldometer, 2024)

La situación regional y nacional

Los datos mencionados líneas arriba dan una idea global del tamaño de las necesidades energéticas del mundo y de la dimensión de la tarea para disminuir las disparidades en disponibilidad de energía. También demuestran que los factores que afectan la salud ambiental y la sostenibilidad del planeta son debidos a la producción de energía desde aquellas fuentes plenamente identificadas como altamente contaminantes, mismas que además es sabido tienen un carácter no renovable.

A nivel intra-nacional, como ha sido ampliamente reconocido, las desigualdades regionales en el desarrollo de los territorios se correlacionan con las situaciones asimétricas entre medios rurales y urbanos con respecto de las diferencias en disponibilidad de ciertos factores relevantes para el desarrollo como el capital y la energía.

Algunos de los datos e indicadores mencionados líneas arriba, obviamente no reflejan las diferencias en las ofertas y consumos de energía en espacios nacionales, intrarregionales y/o subnacionales.

Para el caso de México se considera importante mencionar que, acorde con los datos de la SENER, la producción de energía primaria en 2022, fue de 7469 PJ y provino principalmente del petróleo crudo y del gas natural y, en menor medida de las fuentes renovables, los condensados petrolíferos y la energía nuclear. La Figura 1 muestra las aportaciones porcentuales de cada una de estas fuentes primarias de energía en México, para el año 2022. El consumo final energético en el país para ese año fue de 5622 PJ y se dirigió en mayor cantidad al sector Transporte (47.50%), seguido del Industrial (26.27%) y Residencial, comercial y público (17.61%). El sector Agropecuario consumió el 3.35% y otros destinos no clasificados están con 5.26% del consumo final energético en México (SENER, 2023). Es interesante destacar, al ser el biodiésel un sustituto factible del diésel de petróleo, que este último representó el 27.31% del consumo del transporte, el 69.16% de los energéticos utilizados en el las actividades del sector agropecuario y el 4.21% en el sector industrial de México en ese año (SENER, 2023). La Figura 1 indica la evolución de la cantidad de energía generada por las fuentes renovables en PJ, mismas que observaron importantes crecimientos en los últimos años debido fundamentalmente a mayores producciones de energía hidráulica, eólica y solar (un 10.28%, al pasar de 1042.97 PJ en 2021 a 1150.13 PJ en 2022; SENER, 2023).

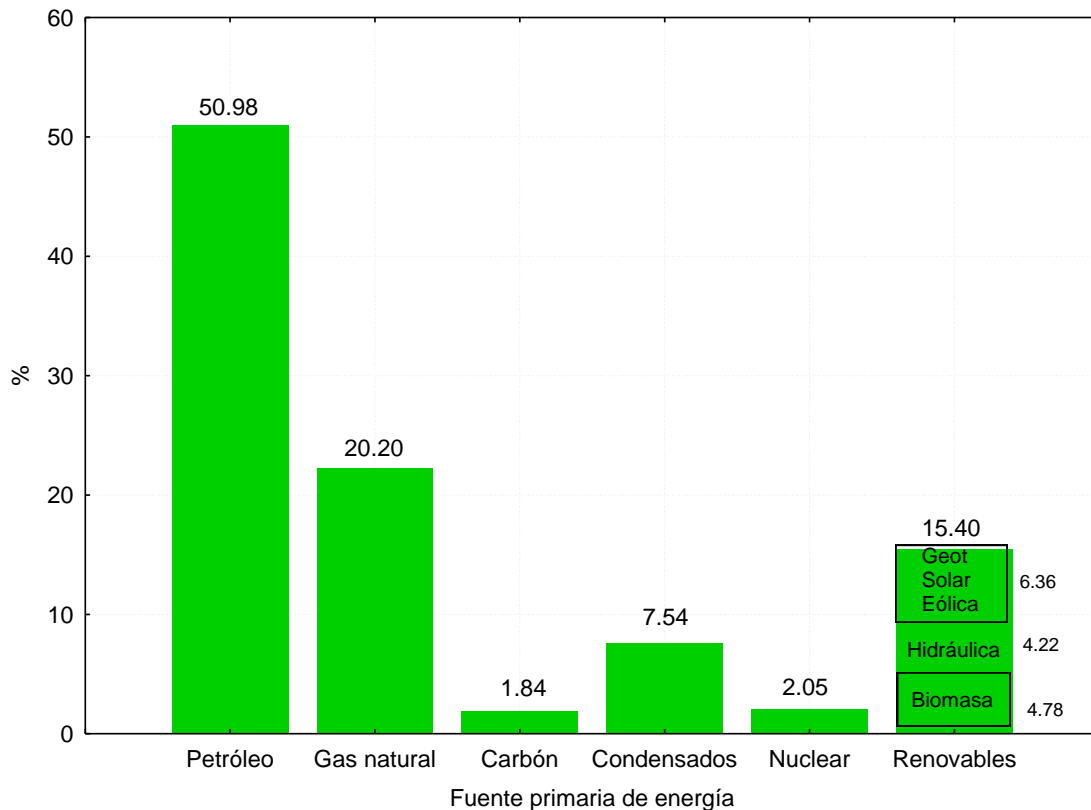


Figura 1. Estructura de la producción de energía primaria en México, año 2022 (elaborada con datos de SENER, 2023)

Producción y consumo de energía renovable en México

Las fuentes renovables de energía en su conjunto son la principal opción para enfrentar la amenaza de agotamiento o aumento de precios de las fuentes energéticas predominantes como las basadas en los combustibles fósiles y para disminuir significativamente en el futuro las huellas de carbono que generan las producciones y consumos energéticos (Highina et al., 2014). Estas energías renovables y más limpias, son principalmente las derivadas del sol, viento, recursos hídricos y biomasa. Estas fuentes representaron en el año 2022 en México, el 15.40% de la producción de energía primaria en México y la proveniente de la biomasa alcanzaron 4.78%. A pesar de que una importante porción del territorio mexicano se caracteriza por sus altas producciones de biomasa presentando una alta biodiversidad vegetal, la obtención de energía a partir de este importante recurso se mantuvo, a lo largo de la última década, alrededor de los 400 PJ.

La Figura 2 presenta las diferentes tendencias de crecimiento y contribución de los diferentes tipos de energía renovable: Hidroenergía, geoenergía, eólica, solar, biogás, biomasa, bagazo y leña en México durante la última década.

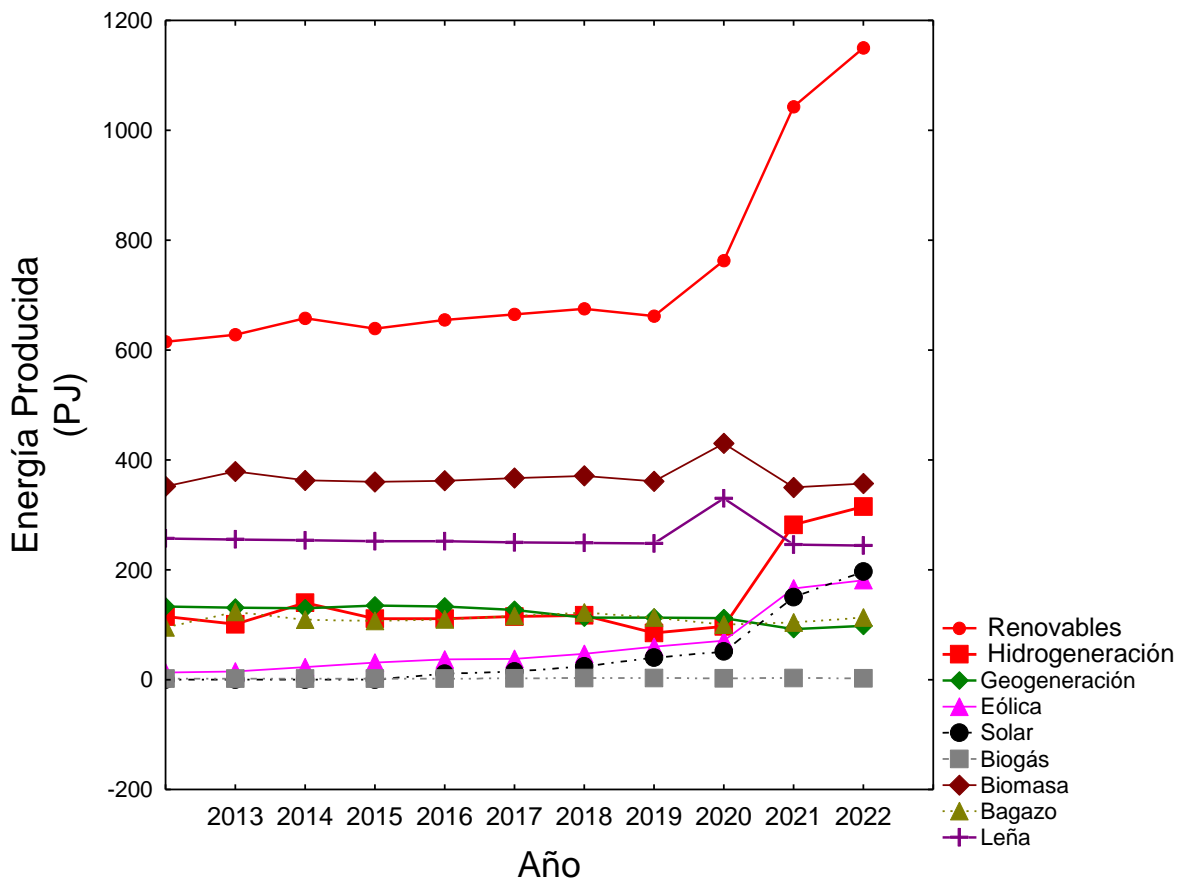


Figura 2. Evolución de la producción de energía renovable por tipos en México 2012-2022 (elaborada con datos de SENER, 2023)

El biodiésel es un combustible derivado de la biomasa y, al igual que en el caso del etanol, biogás, bagazo de caña y leña, la obtención de energía se logra mediante su combustión, lo que implica que durante ese proceso se generen diversos productos de reacción, sustancias que impactan en diversos

órdenes el ambiente (gases de efecto invernadero, óxidos de nitrógeno, azufre, etc.). Sin embargo, el biodiésel y el etanol se clasifican como fuentes de energía más limpia, al compararlas con derivadas de combustibles fósiles e incluso con el bagazo de caña y otros esquilmos agrícolas y la leña.

En México, no obstante su diversidad vegetal y su potencialidad agrícola, la escasa información disponible da cuenta de que la producción de biodiésel es notoriamente limitada, si se toma en consideración que en 2019 su producción en el mundo fue de alrededor de 50 millones de m³, siendo los principales productores Indonesia, EE.UU. y Brasil, con el 16, 13 y 11% del total, respectivamente (Torroba, 2020). De acuerdo con Riegelhaupt et al. (2016) la capacidad instalada en el país para la elaboración de este biocombustible era hasta 2016 de solamente 41182 m³/año en 9 instalaciones localizadas en varios estados de la República, de las cuales 3, las más grandes, permanecían sin operar y las 6 restantes procesaron aceite usado, grasas animales y aceite de higuera. La Tabla 2 muestra algunos detalles de estas plantas procesadoras de producción de biodiésel en México.

Tabla 2. Localización, capacidad instalada, materia prima y situación de las plantas de biodiésel, en México hasta 2016 (Riegelhaupt et al., 2016)

Localización*	Plantas**	Capacidad***	Materia prima****	Situación, 2016
Nuevo León	1	18000	--	Sin operar
Chiapas	1	10000	--	Sin operar
Michoacán	1	9000	--	Sin operar
Puebla	2	1040	Aceite usado, grasa animal	Operando
Baja California	1	74	Higuera	Operando
Oaxaca	1	1000	Higuera	Operando
Durango	1	1440	Grasa animal	Operando
Estado de México	1	628	Grasa animal	Operando
Total	9	41182		

*Entidad federativa; **Número de plantas; **Capacidad en m³/año; ****Fuente de lípidos

El biodiésel, su proceso de obtención y viabilidad técnica y económica actual y futura

Una de las alternativas mencionadas para el uso ampliado de energías más limpias y amigables con el ambiente en el corto plazo es evidentemente el biodiésel. Su proceso de obtención ha sido sujeto de amplia investigación y desarrollo, teniéndose en la actualidad opciones diferentes desde el punto de vista de las etapas tecnológicas que requiere para lograr las especificaciones normativas establecidas para su uso energético eficiente y ambientalmente más limpio. Este proceso se puede lograr mediante diferentes métodos: No-catalíticos (proceso BIOX, fluido supercrítico) o los mayormente empleados, catalíticos, mediante transesterificación homogénea o heterogénea (Marwaha et al., 2018). En este último caso, cuando se emplea alcohol metílico, se lleva a cabo la reacción de síntesis de ésteres metílicos de los ácidos grasos (Figura 3) constituyentes del aceite o grasa utilizada.

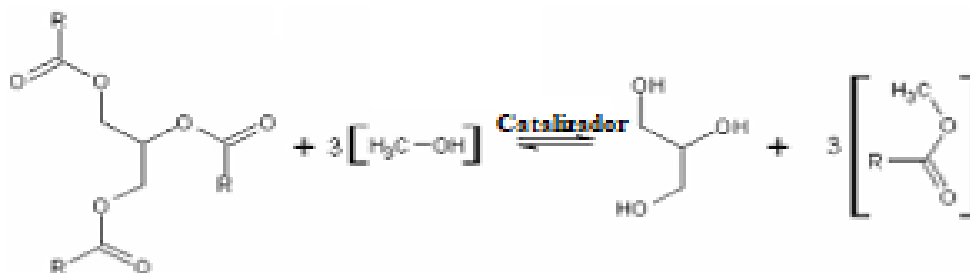


Figura 3. Reacción catalítica de transesterificación

El procedimiento típico considera una relación molar de, por lo menos, 6:1 (metanol/aceite vegetal), con un catalizador (básico, ácido o enzimático), agitación constante y temperaturas entre 45 y 50°C

por tiempos de alrededor de 1 h, generándose dos fases separables por gravedad, una rica en glicerina y la otra en ésteres metílicos constituyentes del biodiésel (Mamtani et al., 2021)

La Tabla 3 presenta algunas de las diferentes alternativas de tipos de materias primas, catalizadores, reactores, procesos de separación y purificación del biodiésel. Las variantes tecnológicas para la producción de este combustible dependen de la combinación de esas diferentes opciones utilizadas en cada una de las etapas de elaboración y han sido reportadas por diferentes autores (Atabani y César, 2014; Bazargan et al., 2015; Mamtani et al., 2021; Tabatabaei et al., 2019).

Tabla 3. Alternativas de tipos de materias primas, catalizadores, reactores y procesos de purificación del biodiésel

Fuentes de GyA ^a	Pretratamiento ^b	Alcohol ^c	Catalizadores ^d	Reactores ^e	Purificación
-Plantas: Comestibles	-Transesterificación ácida de AGL	Metanol	Homogéneos	Intermitentes	-Lavado con agua
No- comestibles Silvestres	-Transesterificación con <i>DES</i> de AGL	Etanol	--Ácidos	Continuos	-Lavado seco
-Residuos		Alcoholes de 1-8	--Básicos	-empacados	-Extracción con
-Ganado		átomos de carbono	Heterogéneos	-de membrana	-Enzima
-Aves			--Ácidos	-Enzima	membranas
-Peces			--Básicos Enzimas	inmovilizada	-Uso de <i>DES</i>
-Algas			Uso de <i>DES</i>	-Multifuncional*	
-Microorgs.					

a) GyA: Grasas y aceites, extraídos por diversos métodos: Prensado, disolventes orgánicos, fluido supercrítico

b) En sustratos con altos contenidos de ácidos grasos libres, AGL (>3%) y *DES*: Siglas en inglés para disolventes eutécticos profundos, *deep eutectic solvents* (Shahbaz et al., 2011a,b)

c) Alcoholes alifáticos de 1 a 8 átomos de carbono

d) Homogéneos: Ácidos, incluyen ácidos sulfúrico, clorhídrico y fosfórico; básicos, hidróxidos y alcóxidos de metales alcalinos así como carbonatos de sodio y potasio. Heterogéneos: Ácidos, zirconia sulfatada, catalizadores heteropoliaácidos (HPA) (polianiones de boro, silicio o germanio); básicos, cáscara de huevo, calcita, caliza, huesos, dolomita, hidroxiapatita (Aransiola et al., 2014). Enzimas: Lipasas extracelulares e intracelulares, solubles o inmovilizadas, células completas

e) *Tanque agitado intermitente, tanque agitado continuo, flujo pistón, fluidificado, de destilación reactiva (Kiss, 2010; Tabatabaei et al., 2019)

Sin embargo, hasta ahora la producción y utilización del biodiésel es todavía limitada. Está importantemente acotada por diversos factores que dependen de las condiciones que inciden sobre el mercado, oferta y demanda, así como las variables que los determinan. Ejemplos de ellas son disponibilidad de materias primas, insumos y tecnologías, preferencias y condiciones técnicas para su uso en motores, accesibilidad, confiabilidad y precios. Las políticas públicas que inciden en el fomento de su producción, con base en sus ventajas ambientales y características favorables para fortalecer el desarrollo regional sostenible, son sus posibles impactos en el autotransporte y la mecanización agrícola. En todo ello destaca el efecto de la estructura de costos de la cadena de valor de la producción de biodiésel, que posibilite precios a niveles competitivos con respecto de los fluctuantes precios de los combustibles derivados del petróleo, ya que en ocasiones hacen que el costo de producción de este biocombustible esté por encima del precio final del diésel derivado del petróleo.

Desde un punto de vista meramente económico, la estructura de costos del biocombustible está determinada por los costos que adquiere cada uno de los eslabones de la cadena productiva del biodiésel en un contexto concreto: Cultivo (o recolección) de la materia prima y/o extracción del aceite, refinado o acondicionamiento del material graso, etapas de procesamiento (transesterificación, separación de fases, purificación del biodiésel), almacenamiento y transporte, etc. Hay aspectos superables por la vía de mejorar los rendimientos mediante las tecnologías empleadas, reduciendo los costos de inversión de capital y, primordialmente, reduciendo los costos de la materia prima principal. Sin embargo, un aspecto todavía no analizado completa y profundamente es el que se refiere a determinar si en ese contexto concreto el balance energético global de la cadena es positivo para el

biodiésel, lo cual está relacionado con la sostenibilidad de su producción. Esto es, si la energía que produce una unidad de masa de biocombustible es mayor que la requerida para su elaboración, considerando toda la cadena productiva, desde el cultivo y obtención de la materia prima hasta, -en el transcurso de todas las etapas-, su uso (Barón et al., 2013). Hay, además, otros costos ambientales importantes, como lo son no únicamente las huellas de carbono e hídricas implicadas en todas las etapas del ciclo de vida del biodiésel, sino también, algo escasamente señalado, ligado a los costos económicos y ambientales y de gran importancia: El efecto negativo de mediano y largo plazos sobre el capital natural que está representado por la biodiversidad natural local (Dasgupta, 2021). La afectación se da, entre otras, por los cambios de uso de la tierra para destinar grandes extensiones para el cultivo intensivo de especies oleaginosas de alto rendimiento en detrimento de especies vegetales nativas en los ecosistemas donde se producen las materias primas para la obtención de aceites vegetales en la producción del biocombustible. Un ejemplo es la desaparición de la Selva Atlántica en el Paraguay entre 1920-1980 por la siembra de la soya (*Glycine max*) (Placci y Di Bitetti, 2005).

Factores relevantes en la investigación y desarrollo de biodiésel hacia el logro de bajos costos y minimización de impactos ambientales

Los costos de producción de biodiésel, mencionados por muchos de los estudiosos de estos aspectos, son coincidentes en términos de que el costo del aceite vegetal es el mayor contribuyente en la estructura de costos total en la elaboración del biocombustible (Gebremariam y Marchetti, 2018; Pasha et al., 2021). Gebremariam y Marchetti,(2018), por ejemplo, reportan que la materia prima principal representa hasta un 77% del costo total de operación, con un 9% en otros materiales, insumos y servicios y el resto (14%) representado por la mano de obra, mantenimiento, depreciación, etc. Obviamente, tales porcentajes en otros casos, dependerán de la escala de producción, ruta tecnológica de elaboración y otras condicionantes socioeconómicas particulares.

Los cultivos vegetales mayormente utilizados, como fuente de aceites para la elaboración de biodiésel en el mundo se apoyan actualmente en grandes plantaciones de *Elaeis guineensis* (Palma aceitera 29%), *Glycine max* (Soya 25%) y *Brassica napus* (Colza 17%), cultivos agrícolas de amplio uso en otras aplicaciones industriales, entre ellas la alimentaria (Torroba, 2020). Es importante señalar que la creciente demanda por estas semillas oleaginosas en diversas regiones del mundo ha llevado a que grandes extensiones de suelo agrícola se destine a su cultivo en grandes plantaciones favoreciendo el monocultivo en detrimento de la biodiversidad natural local y las consecuencias propias de la economía de plantación consolidando estructuras socioeconómicas subdesarrolladas, importantes conflictos sociales y diversos efectos ambientales (Girvan, 2008; Solís-Fuentes y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022).

En una muy completa revisión sobre el biodiésel, Tabatabaei et al. (2019) apuntan que hoy en día los cultivos de palma y de soya se ubican principalmente en zonas con grandes afectaciones a la biodiversidad de los ecosistemas naturales de algunos de los bosques tropicales. Las huellas de carbono reportadas de los aceites mayormente utilizados en la elaboración de biodiésel, cuyo destino comparten con la elaboración de productos alimenticios, palma, colza y soya están entre los valores de 51.5 y 58.9 g CO₂-eq/MJ y su capacidad de mitigación, relativo al petro-diesel se sitúa entre 29.7 y 45.4%.

Este modelo productivo basado en el biodiésel de primera generación para producciones a gran escala no ha resuelto el problema de la competitividad de éste con respecto del diésel de petróleo, el conflicto entre combustible/alimento, los negativos efectos ambientales, antes apuntados y aún menos su disponibilidad y uso ampliado como las circunstancias actuales y futuras requieren. Menos aún en las regiones de escaso desarrollo socioeconómico, para las que se necesitan cambios sustanciales en la

escasa disponibilidad energética actual, el cuidado de su capital natural hoy y en el futuro, para la debida explotación sostenible de los recursos naturales y el desarrollo.

Son muchos los aspectos a considerar para lograr un cambio de paradigma en el desarrollo de las zonas económicamente más desfavorecidas que considere al biodiésel como una opción energética de alta disponibilidad, amigable ambientalmente y sostenible en el futuro. Sin embargo, los datos asequibles en la literatura científica sobre los diferentes temas relacionados con este biocombustible permiten destacar tres elementos de impacto:

- 1) La preferencia de materias primas relativas a especies vegetales nativas y/o residuos (agroindustriales vegetales, pecuarios y marinos), no comestibles,
- 2) La utilización de otros materiales requeridos para la elaboración, abundantes y amigables ambientalmente como catalizadores heterogéneos (con base en CaO, de yacimientos y residuos orgánicos) y el uso del etanol en preferencia al metanol (y no necesariamente absoluto sino hidratado, antes de su punto azeotrópico, en Kiss, 2010) y
- 3) La integración, en diferentes etapas del proceso de elaboración, de los disolventes eutécticos profundos (*DES* en inglés) no contaminantes en sustitución de los tradicionales disolventes orgánicos (Janssen, 2019).

La Tabla 4 contiene algunos ejemplos de especies vegetales autóctonas de Latinoamérica y México y de otras regiones.

Tabla 4. Ejemplo de plantas y residuos no comestibles cuyos aceites han sido investigados para la elaboración de biodiésel

Nombre común	Nombre científico	Origen	% aceite*	Referencia
Autóctonas de México y Latinoamérica				
Algodón	<i>Gossypium sp</i>	México	17-25	Banković-Ilić et al., 2012
Árbol de ayoyote	<i>Thevatia peruviana</i>	México	60-65	Deka y Basumatary, 2011
Babasú	<i>Attalea speciosa</i>	Brasil	49	Moreira et al., 2020
Bardana común	<i>Xanthium strumarium</i> L.**	México	35-42	Cesur et al., 2018
Chicalote amarillo	<i>Argemona Mexicana</i>	México	22-36	Nayak y Vyas, 2022
Guanábana	<i>Annona muricata</i>	México	17-37	Su et al., 2018
Hule	<i>Hevea brasiliensis</i>	Brasil	35-50	Onoji et al., 2016
Ilama	<i>Annona diversifolia</i>	América Central	21	Meira et al., 2015
Jojoba	<i>Simmondsia chinensis</i>	México	44-59	Tabatabaei et al., 2019
Mamey	<i>Pouteria sapota</i>	Mesoamérica	40-66	Tacias-Pascacio et al., 2021
Piñón manso	<i>Jatropha curcas</i>	Mesoamérica	27-40	Kamel et al., 2018
Tabaco	<i>Nicotiana tabaccum</i>	Sudamérica	17-25	Banković-Ilić et al., 2012
Originarias de otros continentes				
Árbol de aceite	<i>Pongamia pinnata</i>	Sur de Asia	20-42	Gandhe et al., 2022
Árbol del paraíso	<i>Melia azedarach</i>	Sureste asiático	52	Awais et al., 2020
Árbol de tamano	<i>Calophyllum inophyllum</i> L.	África y Sudasia	40-73	Atabani y Cesar, 2014
Cardo mariano	<i>Silybum marianum</i>	Europa y Asia	46	Takase et al., 2014
Higuerilla	<i>Ricinus communis</i> L.	África	39-59	Awais et al., 2020
Karanja	<i>P. pinnata</i>	Sur de Asia	35	Meira et al., 2015
Lino	<i>Linum usitatissimum</i>	África del norte	38-44	Tabatabaei et al., 2019
Mlalai, Muhande	<i>Croton megalocarpus</i>	África subsahariana	30-45	Meira et al., 2015
Sea mango	<i>Cerbera odollam</i>	Sur de Asia	43-64	Khairil et al., 2018
Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i> L.	África subsahariana	16-20	Kumbhar et al., 2020

*Porcentaje de aceite extraído de la semilla, **Algunos autores insisten es que es originaria de Europa y Asia

Estas presentan rendimientos de extracción importantes de aceites vegetales y que han sido estudiadas en su pertinencia para la elaboración de biodiésel. Tales especies por diferentes razones,

no son aptas para consumo alimentario humano y pueden encontrarse en ecosistemas naturales o cultivadas posiblemente con menores impactos sobre la biodiversidad natural local para niveles de producción medianos y pequeños de biodiésel. Las huellas de carbono y la capacidad de mitigación de los gases de efecto invernadero reportados, para cuando se emplean los aceites de, por ejemplo, *Ricinus communis* L., *Jatropha curcas* L. y *Hevea brasiliensis* son de 22.14, 23.5 y 15 g CO₂/MJ y de 75.9, 61.6 y 70.8%, respectivamente, evidentemente más favorables desde el punto de vista ambiental que los reportados para cuando se utilizan los aceites de palma, colza y soya (Tabatabaei et al., 2019).

Por el lado de los catalizadores, la Tabla 5 muestra ejemplos de fuentes de catalizadores con base en CaO desde diferentes residuos y fuentes naturales que, por su naturaleza, abundancia y casi ubicuidad, pueden ser tanto económica como ambientalmente favorables y que han sido reportadas como eficaces para realizar la etapa de transesterificación en la elaboración del biodiésel.

Tabla 5. Fuentes reportadas de catalizadores en base a CaO provenientes de diferentes residuos (Solís-Fuentes y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2022)

Residuo	Catalizador base	Condiciones	Referencia
Cáscara de semilla de palma	Óxidos de Ca, Si, Al y Fe	Gasificación a 750°C y calcinación	Bazargan et al., 2015
Caparazón de cangrejo y jaiba	CaO	Activación a 700°C	Boey et al., 2009
Escamas de pescado	Hidroxiapatita	Calcinación a 997°C	Chakraborty et al., 2011
Lodos de pulpeo de celulosa	CaO	Calcinación a 800°C	Li et al., 2014
Cenizas de gasificación de biomasa	CaO	Gasificación de biomasa entre 400 y 800°C	Luquea et al., 2012
Concha de ostión	CaO	Combustión a más de 700°C	Nakatani et al., 2009
Cal viva	CaO	Calcinación a 900°C de piedra caliza	Santamaría-Hernández et al., 2019
Cascarón de huevo	CaO	Calcinación a 1000°C	Wei et al., 2009
Exoesqueleto de camarón	Glúcidos derivados de quitina	Combustión incompleta, impregnación con KF y activación	Yang et al., 2009

Los disolventes tipo *DES* en la producción de biodiésel

Un aspecto de gran importancia en el procesamiento para la elaboración de biodiésel lo constituye el conocimiento generado sobre la aplicación de los disolventes eutécticos profundos (*DES*, por sus siglas en inglés, *deep eutectic solvents*) de bajo costo propuestos por primera vez por Abbott a principios de este siglo (Abbott et al., 2003) y que han sido investigados y desarrollados desde entonces para ser sustitutos con amplias ventajas, sobre todo desde la perspectiva ambiental, de los disolventes orgánicos tradicionales en diferentes ámbitos como la extracción, valorización de biomasa, biotecnología y bioingeniería, entre otros campos (Amesho et al., 2023).

Estos compuestos destacan por poseer interesantes propiedades físicas y químicas: Baja presión de vapor y volatilidad, estabilidad térmica, gran capacidad para interaccionar y disolver diversos solutos,

así como participar como catalizadores y co-solventes en reacciones y mezclas a temperaturas moderadas, una aparente baja toxicidad y posibilidad de ser reciclados (Janssen, 2019). Estos compuestos son la asociación, mediante enlaces no covalentes, principalmente puentes de hidrógeno de al menos dos componentes, a una proporción molar determinada, formando mezclas eutécticas (con disminución del punto de fusión) líquidas estables en un amplio intervalo de temperatura cercanas a la temperatura ambiente (Figura 4). La mezcla formada suele estar constituida por un catión poliatómico (de fósforo, nitrógeno o azufre) y un anión, generalmente un haluro de un ácido de Lewis o una amida o un alcohol. Una de las sustancias actúa como un aceptor y la otra como un donador de enlaces de hidrógeno (*HBA* y *HBD*, por sus siglas en inglés) (Mamtani et al., 2021; Ruesgas-Ramón et al., 2023).

Los enlaces de hidrógeno se forman cuando un átomo "donador" enlaza el átomo de hidrógeno unido covalentemente a él (-OH, >NH) a un átomo electronegativo "aceptor" (O=, N=, O<) de otra molécula.

La Tabla 6 presenta algunos de los compuestos, *HBA* y *HBD*, utilizados para elaborar *DES* y la Figura 4 muestra un diagrama de equilibrio sólido-líquido con la representación de las curvas de comportamiento simple ideal y cuando la conducta de la mezcla corresponde a un eutéctico profundo haciendo evidentes los intervalos de temperatura donde se mantiene líquida la mezcla muy por debajo de los puntos de fusión de los constituyentes puros y que es aprovechable para usarse como disolvente.

Tabla 6. Algunos constituyente de *DES* donadores y aceptores de enlaces de hidrógeno (Mamtani et al., 2021)

Donadores de enlaces de hidrógeno	Aceptores de enlaces de hidrógeno
Ácido oxálico	Cloruro de tetra butil amonio
Benzamida	Cloruro de colina
Glicerol	Cloruro de treta etil amonio
Glucosa	Bromuro de metil trifenil fosfonio
Urea	Cloruro de bencil trimetil amonio

La Figura 5 muestra los principales tratamientos requeridos para la elaboración de biodiésel en un proceso típico donde se señalan opciones de tratamientos que podrían incidir en una mejor economía y limpieza ambiental del proceso debido a la utilización de materias primas no comestibles, como las descritas anteriormente, el uso de catalizadores de bajo costo provenientes de residuos agroindustriales y la utilización de disolventes eutécticos profundos como catalizador, promotor de solvatación o co-disolvente en las etapas de pretratamiento y/o transesterificación directa de AGL del aceite crudo (Hayyan et al., 2014; Mamtani et al., 2021; Troter et al., 2016) así como para la remoción de glicerol, agua y catalizador, residuales (Shahbaz et al., 2011a,b; Troter et al., 2016) del biodiésel durante su purificación.

Conclusiones

Al ser un biocombustible líquido y poseer características técnicas especiales y además un amigable efecto sobre el ambiente, el biodiésel podrá ser considerado tal vez el más importante sustituto del diésel derivado del petróleo que, actualmente, domina el mercado mundial de energéticos dirigido a los principales medios de transportación terrestre y marítima y usado también en otras maquinarias pesadas empleadas en diferentes campos productivos.

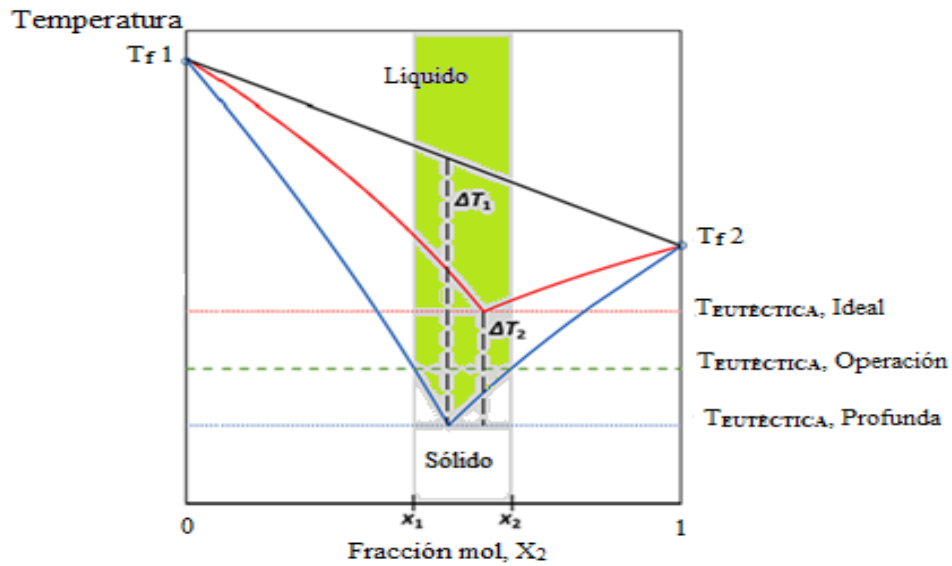


Figura 4. Representación de un diagrama eutéctico simple ideal y uno profundo (*DES*) (Adaptado de Contreras-Gómez et al., 2023)

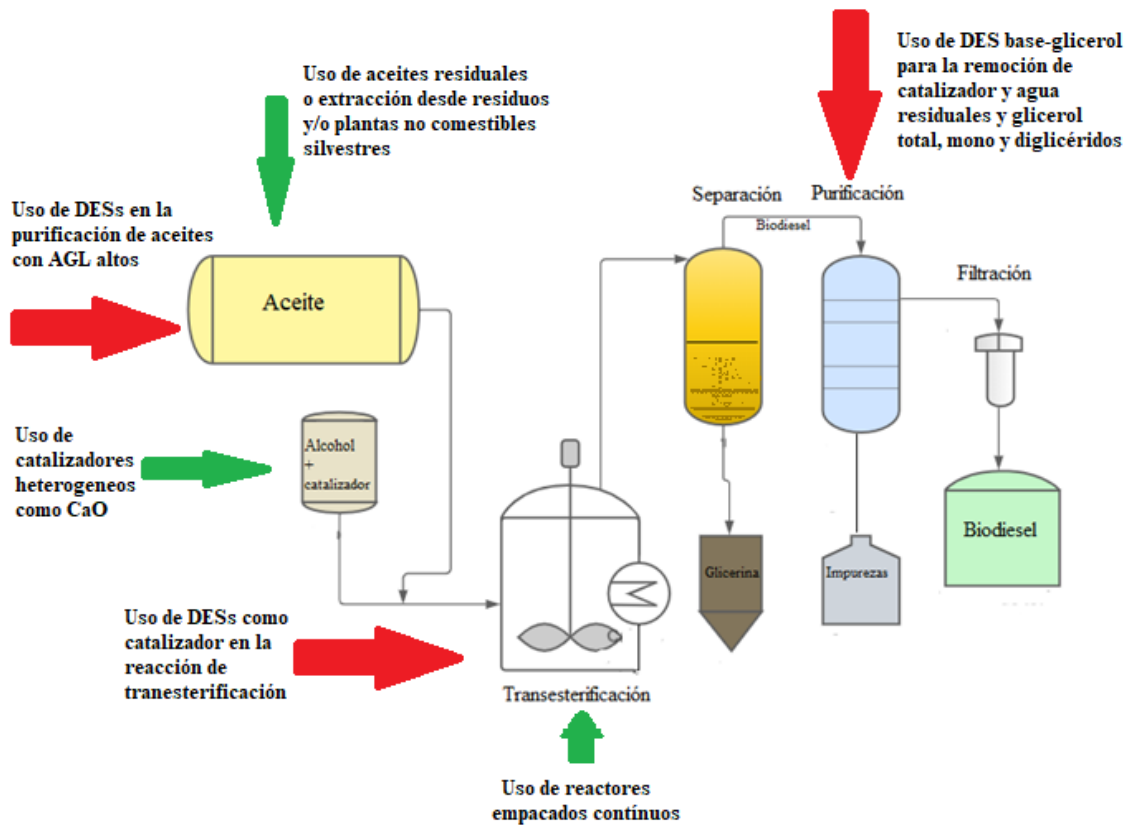


Figura 5. Esquema de proceso básico para la elaboración de biodiésel mostrando posible incidencia de alternativas de impacto favorable en el costo económico y ambiental (Adaptado de Günay et al., 2019)

Sin embargo, mucho está por hacerse en el sentido de lograr minimizar los costos actuales del biodiésel orientando la mirada y las acciones hacia materias primas e insumos y tecnologías cuya producción y uso no afecten la biodiversidad y el capital natural de los ecosistemas donde se producen.

Esta es una cuestión de la mayor importancia en los espacios y territorios que históricamente han sido y son económica y socialmente subdesarrollados puesto que, paradójicamente, son algunos de estos ámbitos los que todavía poseen la mayor riqueza y variedad vegetal del mundo.

Abreviaturas

Siglas	Significado
AGL	Ácidos grasos libres
BIOX	Nombre del proceso patentado para biodiésel con uso de co-solventes
CaO	Óxido de calcio
DES	Siglas en inglés de disolvente eutéctico profundo, <i>deep eutectic solvent</i>
GJ	Gigajoules
GyA	Grasas y aceites
HBA	Siglas en inglés de aceptor de enlaces de hidrógeno, <i>hydrogen bond acceptor</i>
HBD	Siglas en inglés de donador de enlaces de hidrógeno, <i>hydrogen bond donor</i>
KF	Fluoruro de potasio
PJ	Petajoules

Reconocimientos

El autor y la autora reconocen al Comité Organizador del 10^o Minisimposio Internacional por la aceptación para que la contribución presentada como conferencia con su texto escrito incluido en el libro de memorias pudiera ser presentada para su segunda evaluación y publicación en esta prestigiada revista.

Referencias bibliográficas

- Abbott, A.P., Capper, G., Davies, D.L., Rasheed, R.K., Tambyrajah, V. 2003. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical Communications*.1:70-71.
- Amesho, K.T., Lin, Y.C., Mohan, S.V., Halder, S., Ponnusamy, V.K., Jhang, S.R. 2023. Deep eutectic solvents in the transformation of biomass into biofuels and fine chemicals: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 21:183-230.
- Aransiola, E.F., Ojumu, T.V., Oyekola, O.O., Madzimbamuto, T.F., Ikhu-Omoregbe, D.I.O. 2014. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy*. 61:276-297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.014>
- Atabani, A.E., César, A.S. 2014. *Calophyllum inophyllum* L. A prospective non edible biodiésel feedstock. Study of biodiesel production, properties, fatty acid composition, blending, and engine performance. *Renew. Sust. Energy. Rev.* 37:644-655.
- Awais, M., Musmar, S.E.A., Kabir, F., Batool, I., Rasheed, M.A., Jamil, F., Tlili, I. 2020. Biodiesel production from *Melia azedarach* and *Ricinus communis* oil by transesterification process. *Catalysts*. 10(4):427. doi:10.3390/catal10040427
- Banco Mundial. 2023. Energía. Panorama general. Consultado el 5/01/2024. [Energía \(bancomundial.org\)](https://www.bancomundial.org)
- Banković-Ilić, I.B., Stamenković, O.S., Veljković, V.B. 2012. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16:3621-3647.
- Barón, M., Huertas, I. Orjuela, J. 2013. Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: Una revisión de la literatura. *Ingeniería*. 18:84-117.
- Bazargan, A., Kostić, M.D., Stamenković, O.S., Veljković, V.B., McKay, G. 2015. A calcium oxide-based catalyst derived from palm kernel shell gasification residues for biodiesel production. *Fuel*. 150:519-525.
- Boey, P.L., Maniam, G.P., Hamid, S.A. 2009. Biodiesel production via transesterification of palm olein using waste mud crab (*Scylla serrata*) shell as a heterogeneous catalyst. *Bioresource Technology*. 100:6362-6368.
- CEPAL. 2003. Sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe: El aporte de las fuentes renovables. CEPAL. Chile.
- Cesur, C., Eryilmaz, T., Uskutoğlu, T., Doğan, H., Senkal, B.C. 2018. Cocklebur (*Xanthium strumarium* L.) seed oil and its properties as an alternative biodiesel source. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 42(1):29-37.

- Chakraborty, R., Bepari, S., Banerjee, A. 2011. Application of calcined waste fish (*Labeo rohita*) scale as low-cost heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis. *Bioresource Technology*. 102:3610-3618.
- Contreras-Gómez, M., Galán-Martín, Á., Seixas, N., da Costa Lopes, A. M., Silvestre, A., Castro, E. 2023. Deep eutectic solvents for improved biomass pretreatment: Current status and future prospective towards sustainable processes. *Bioresource Technology*. 369:128396. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128396>
- Dasgupta, P. 2021. *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. HM Treasury. London, United Kingdom.
- Deka, D. C., Basumatary, S. 2011. High quality biodiesel from yellow oleander (*Thevetia peruviana*) seed oil. *Biomass and Bioenergy*. 35:1797-1803.
- EI. 2023. *Statistical Review of World Energy*. 72nd Edition. Energy Institute. London, United Kingdom.
- Gandhe, R.R., Sekhar, A., Muthu, R. 2022. Evaluation trials and carbon sequestration potential of *Jatropha curcas* and *Pongamia pinnata*: Technologies and Way Forward. En *Advanced Biodiesel - Technological Advances, Challenges, and Sustainability Considerations*. Fattah, I.M.R., ed. Cap. 8. DOI: 105772/interchopen.108793.
- Gebremariam, S.N., Marchetti, J.M. 2018. Economics of biodiesel production. *Energy Conversion and Management*. 168:74-84.
- Girvan, N. 2008. La economía de plantación en la era de la globalización. En *Teoría de la economía de plantación*. Best, L., Polanyi-Levitt, K., eds. Casa de las Américas. La Habana, Cuba.
- Günay, M.E., Türker, L., Tapan, N.A. 2019. Significant parameters and technological advancements in biodiesel production systems. *Fuel*. 250:27-41.
- Hayyan, A., Hashim, M.A., Hayyan, M., Mjalli, F.S., Nashef, I.M. 2014. A new processing route for cleaner production of biodiesel fuel using a choline chloride based deep eutectic solvent. *Journal of Cleaner Production*. 65:246-251.
- Highina, B.K., Bugaje, I.M., Umar, B. 2014. A review on second generation biofuel: A comparison of its carbon footprints. *European Journal of Engineering and Technology*. 2:117-125.
- IEA. 2023. *World Energy Outlook 2023*. IEA. 355 pp. París, Francia.
- IEA. 2024. *World Energy Balances*. International Energy Agency. Consultado el 05/02/2024. [World Energy Balances - Data product - IEA](#)
- Janssen, C.H.C. 2019. Solvents engineering for the removal of metals in aqueous phases / *Ingeniería de solventes para la remoción de metales desde fases acuosas*. In First Round Table with the subject of Goal 6, Clean water and sanitation (UNO/ONU 2030) of the Tenth International DAAD Alumni-Alumnae Seminar on Green Engineering and Applications to Water Management (Quality and Availability) in Honor of Dr. Peter Kuschik and Dr. Hanns Sylvester. June 07, 2019. University City, Mexico City, Mexico.
- Kamel, D.A., Farag, H.A., Amin, N.K., Zatout, A.A., Ali, R.M. 2018. Smart utilization of jatropha (*Jatropha curcas* L.) seeds for biodiesel production: Optimization and mechanism. *Industrial Crops and Products*. 111:407-413.
- Khairil, Rizki, A., Silitonga, A.S., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I. 2018. The potential biodiesel production from *Cerbera odollam* oil (Bintaro) in Aceh. In *MATEC Web of Conferences*. Vol. 159, p. 01049. EDP Sciences.
- Kiss, A.A. 2010. Separative reactors for integrated production of bioethanol and biodiesel. *Computers & Chemical Engineering*. 34(5):812-820. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.09.005>
- Kumbhar, V., Pandey, A., Varghese, A., Wanjari, S. 2020. An overview of production, properties and prospects of tamarind seed oil biodiesel as an engine fuel. *International Journal of Ambient Energy*. 1-9. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1824946>.
- Li, H., Niu, S., Lu, C., Liu, M., Huo, M. 2014. Use of lime mud from paper mill as a heterogeneous catalyst for transesterification. *Sci. China Technol. Sci*. 57:438-444.
- Luquea, R., Pineda, A., Colmenares, J.C., Campelo, J.M., Romero, A.A., Serrano Riza, J.C. 2012. Carbonaceous residues from biomass gasification as catalysts for biodiesel production. *J. Nat. Gas Chem*. 21:246-250.
- Mamtani, K., Shahbaz, K., Farid, M.M. 2021. Deep eutectic solvents–Versatile chemicals in biodiesel production. *Fuel*. 295:1-16.
- Marwaha, A., Dhir, A., Mahla, S.K., Mohapatra, S.K. 2018. An overview of solid base heterogeneous catalysts for biodiesel production. *Catalysis Reviews*. 60:594-628.
- Meira, M., Quintella, C.M., Ribeiro, E.M.O., Silva, H.R.G., Guimarães, A.K. 2015. Overview of the challenges in the production of biodiesel. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 5(3):321-329.
- Moreira, K.S., MouraJunior, L.S., Monteiro, R.R., de-Oliveira, A.L., Valle, C.P., Freire, T.M., dos-Santos, J.C. 2020. Optimization of the production of enzymatic biodiesel from residual babassu oil (*Orbignya* sp.) via RSM. *Catalysts*. 10:1-20.
- Nakatani, N., Takamori, H., Takeda, K., Sakugawa, H. 2009. Transesterification of soybean oil using combusted oyster shell waste as a catalyst. *Bioresource Technology*. 100:1510-1513.
- Nayak, M.G., Vyas, A.P. 2022. Parametric study and optimization of microwave assisted biodiesel synthesis from *Argemone mexicana* oil using response surface methodology. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 170:1-17.
- Onoji, S.E., Iyuke, S.E., Igbafe, A.I., Nkazi, D.B. 2016. Rubber seed oil: A potential renewable source of biodiesel for sustainable development in sub-Saharan Africa. *Energy Conversion and Management*. 110:125-134.
- Pasha, M.K., Dai, L., Liu, D., Guo, M., Du, W. 2021. An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnol. Biofuels*. 14:129. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01977-z>
- Placci, G., Di Bitetti, M. 2005. Situación ambiental en la ecorregión del bosque Atlántico del Alto Paraná (selva paranaense). *La Situación Ambiental Argentina* (Corcuera editores. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires, Argentina). 2005:195-225.
- Raven, P.H., Gereau, R.E., Phillipson, P.B., Chatelain, C., Jenkins, C.N., Ulloa-Ulloa, C. 2020. The distribution of biodiversity richness in the tropics. *Science Advances*. 6:1-5.
- Riegelhaupt, E., Odenthal, J., Janeiro, L. 2016. Diagnóstico de la situación actual del biodiesel en México y escenarios para su aprovechamiento. *Red Mexicana de Bioenergía*. 129 pp. Ciudad de México, México.
- Ruesgas-Ramón, M., García-Sosa, K., Peña-Rodríguez, L.M. 2023. Solventes eutécticos profundos naturales (NaDES) y su probable función en las plantas. *BioTecnología*. 27:49-55.

-
- Santamaría-Hernández, D., Galán-Méndez, F., Hernández-Medel, M.R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Solís-Fuentes, J.A. 2019. La cal viva como catalizador heterogéneo de alta disponibilidad y bajo costo para la producción de biodiésel. *Ambiens Techné et Scientia México*. 7:87-94.
- SENER, 2023. Balance de energía 2022. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética Dirección General de Planeación e Información Energéticas. Secretaría de Energía. Ciudad de México. México.
- Shahbaz, K., Mjalli, F.S., Hashim, M.A., Nashef, I.M. 2011a. Using deep eutectic solvents based on methyl triphenyl phosphonium bromide for the removal of glycerol from palm-oil-based biodiesel. *Energy & Fuels*. 25:2671-2678.
- Shahbaz, K., Mjalli, F.S., Hashim, M.A., Nashef, I.M. 2011b. Eutectic solvents for the removal of residual palm oil-based biodiesel catalyst. *Separation and Purification Technology*. 81:216-222.
- Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Investigación de materiales para la producción sostenible de biodiésel a costos más bajos en contextos subdesarrollados. En *Sustainability and Development: II. Socioeconomical Aspects*. Durán-Domínguez de Bazúa, M.d.C., ed. Ch. 13, pp. 271-287. AM Editores, Ciudad de México, México.
- Su, C.H., Nguyen, H.C., Pham, U.K., Nguyen, M.L., Juan, H.Y. 2018. Biodiesel production from a novel nonedible feedstock, soursop (*Annona muricata* L.) seed oil. *Energies*. 11:2562. doi:10.3390/en11102562
- Sunkel, O., Paz, P. 1980. El subdesarrollo latinoamericano y la teoría del desarrollo. Siglo XXI Editores, Ciudad de México, DF, México.
- Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Dehghani, M., Panahi, H.K.S., Mollahosseini, A., Hosseini, M., Soufiyan, M.M. 2019. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 74:239-303.
- Tacias-Pascacio, V.G., Rosales-Quintero, A., Rodrigues, R.C., Castañeda-Valbuena, D., Díaz-Suárez, P.F., Torrestiana-Sánchez, B., Fernández-Lafuente, R. 2021. Aqueous extraction of seed oil from mamey sapote (*Pouteria sapota*) after Viscozyme L treatment. *Catalysts*. 11:2-15.
- Takase, M., Feng, W., Wang, W., Gu, X., Zhu, Y., Li, T., Yang, L., Wu, X. 2014. *Silybum marianum* oil as a new potential non-edible feedstock for biodiesel: A comparison of its production using conventional and ultrasonic assisted method. *Fuel Process. Technol.* 23:19-26.
- Torroba, A. 2020. Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020. IICA. San José, Costa Rica.
- Troter, D.Z., Todorović, Z.B., Đokić-Stojanović, D.R., Stamenković, O.S., Veljković, V.B. 2016. Application of ionic liquids and deep eutectic solvents in biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 61:473-500.
- Wei, Z., Xu, C., Li, B. 2009. Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresource Technology*. 100:2883-2885.
- Worldometer. 2024. Population by country. Consultado el 5/01/2024. [Population by Country \(2024\) - Worldometer \(worldometers.info\)](https://www.worldometers.info/population/)
- Yang, L., Zhang, A., Zheng, X. 2009. Shrimp shell catalyst for biodiesel production. *Energy Fuel*. 23:3859-3865.

Hoja en blanco / *Intentionally blank page*

Bioadsorbentes activados a partir de subproductos de mango y su aplicación para el postratamiento de agua residual tratada. Estudios preliminares

Activated bioadsorbents from mango byproducts and their application for post-treatment of treated wastewater. Preliminary studies

Aylin Carrillo-Juárez¹, Sayra Lissette Orozco-Cerros*¹, Bernardo López², E. Montiel³, Mario Morales-Máximo², Roberto Guerra-González¹, Michel Rivero⁴

¹Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, 58060 Michoacán, México

²Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carr. Pátzcuaro-Erongaricuaro Km. 3 (Quinta Tzipecua), 61613 Huecorio, Michoacán, México

³Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, UAEM, Ayala, 62715 Morelos, México

⁴Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta Morelia, 58190 Michoacán, México
Correo-e (*e-mail*): sorozcocerros@gmail.com

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

Resumen

La agro-industrialización del mango (*Mangifera indica*) es uno de los procesos más rentables en el estado de Michoacán, México. Esto representa un gran reto en relación con el manejo integral de sus subproductos, como piel y semilla, debido a la gran cantidad generada y a sus características. Estos subproductos, hasta el momento, carecen de manejo integral para la industria a pesar de haberse encontrado usos valiosos, especialmente para la semilla y sus grasas que son similares a las del cacao. De acuerdo con el marco regulatorio en manejo de subproductos y residuos en México, el desarrollo de metodologías que permitan aprovechar y valorizar los residuos es importante para generar modelos económicos circulares que conduzcan a procesos sostenibles. Para esta fase de la investigación se recolectaron, reciclaron y valorizaron residuos de piel de mango, para el desarrollo de carbón estructurado con excelentes propiedades para su aplicación en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual tratada en una planta de tratamiento de agua de la comunidad purépecha de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México. La metodología de la investigación consistió en: i) Recolectar la piel de mango, ii) Sintetizar con ella carbón estructurado mediante procesos de combustión y pirolíticos, bajo condiciones idóneas, y iii) Aplicar el carbón estructurado para mejorar la calidad del agua residual ya tratada como una etapa terciaria. La calidad del agua residual tratada y post-tratada se analizó mediante algunos de los parámetros considerados en el índice de calidad de agua (ICA), usado en la década de los setentas del siglo XX, ya que el laboratorio de la comunidad no cuenta todavía con la infraestructura para medir lo señalado por la norma oficial mexicana correspondiente, así como su equivalente estadounidense (NOM, APHA). Los resultados de algunos de esos parámetros considerados en el ICA mostraron un material con buenas propiedades fisicoquímicas, porosidad, estabilidad térmica y química y la presencia de grupos funcionales para su uso en la remoción de contaminantes.

Palabras clave: Bioadsorbentes activados, subproductos de mango (*Mangifera indica*), postratamiento de agua residual tratada

Abstract

The agro-industrialization of mango (Mangifera indica) is one of the most profitable processes in the state of Michoacán, Mexico. This represents a great challenge in relation to the integral management of its by-products, such as peel and seed, due to the

large quantity generated and its characteristics. These by-products, to date, lack integral management for the industry despite having found valuable uses, especially for the seed and its fats that are similar to those of cocoa. According to the regulatory framework for the management of by-products and waste in Mexico, the development of methodologies that allow the use and valorization of waste is important to generate circular economic models that lead to sustainable processes. For this phase of the research, mango peel waste was collected, recycled and valorized, for the development of structured carbon with excellent properties for its application in the removal of contaminants present in treated wastewater in a water treatment plant in the Purépecha community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. The research methodology consisted of: i) Collecting mango peel, ii) Synthesizing structured carbon with it through combustion and pyrolytic processes under ideal conditions, and iii) Apply structured carbon to improve the quality of treated wastewater as a tertiary stage. The quality of treated and post-treated wastewater was analyzed using some of the parameters considered in the water quality index (WQI), used in the 1970s, since the community laboratory does not yet have the infrastructure to measure what is indicated by the corresponding Mexican official standard, as well as its American equivalent (NOM, APHA). The results of some of these parameters considered in the WQI showed a material with good physicochemical properties, porosity, thermal and chemical stability and the presence of functional groups for use in removing contaminants.

Keywords: Activated bioadsorbents, mango (*Mangifera indica*) byproducts, application for post-treatment of treated wastewater

Introducción

Michoacán destaca por ser el principal estado exportador y uno de los más importantes productores de mango a nivel nacional; especialmente la región de Tierra Caliente. Michoacán contribuye con el 7.8% de la producción total a nivel mundial (GVR-4-68039-929-5, 2024). En 2017 se produjeron 153,214 toneladas de mango, haciendo que ocupara el quinto lugar como estado productor de mango. Se ha derivado una patente y un artículo para su tratamiento cuarentenario con objeto de conservarlo antes de llegar a los Estados Unidos, principal país al que México exporta este delicioso fruto (Espinosa-Aquino et al., 1999, 2011; Martínez-y-Moreno et al., 1995). La alta producción, la presencia de plagas y la baja oportunidad en los mercados nacionales e internacionales, causan una gran cantidad de desechos postcosecha (Lorenzo-Santiago et al., 2018). A pesar de que desde hace más de 30 años se publicaron trabajos sobre el aprovechamiento de la semilla de mango por el valor de su grasa que es similar a la del cacao pudiendo emplearse en absorción de medicamentos (supositorios), cosméticos (lápices labiales), etc. (Jiménez-Bermúdez et al., 1995; Solís-Fuentes, 1998, 2003; Solís-Fuentes et al., 2004, 2006, 2007a,b; Solís-Fuentes y Durán-de-Bazúa, 2003, 2004, 2006, 2011, 2020). Estos subproductos no han sido aprovechados teniendo un valor comercial, social y ambiental. Por esta razón, es importante su aprovechamiento y valorización en la generación de energía y biomateriales, como se muestra en la Figura 1 (Orozco et al., 2024; Orozco-Cerros et al., 2024).

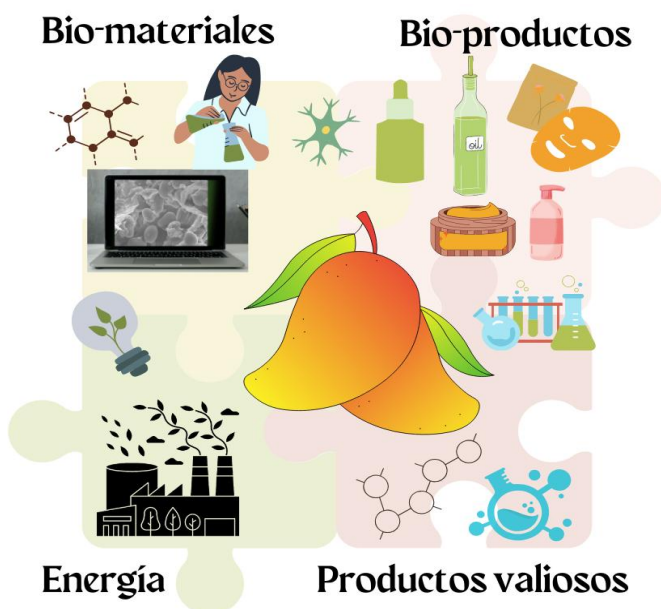


Figura 1. Valorización de residuos de mango (Modificada de Orozco et al., 2024)

Por un lado, México experimenta un estrés hídrico promedio de 44.5% (Adame y Cubero, 2024). Garantizar el vital líquido y su calidad es uno de los grandes retos debido al alto crecimiento y a la concentración poblacional en zonas urbanas. Por ello, resulta imperante la optimización del uso del recurso hídrico y su calidad. En México, la falta de mantenimiento o cierre de plantas potabilizadoras (PP) y de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (PNH, 2020-2024) ponen en riesgo el saneamiento del agua para uso y consumo. Esta situación se agrava en comunidades donde la operación y eficacia de las PTAR depende del recurso monetario más que de la autogestión.

El desarrollo de bioadsorbentes activados a partir de residuos es una alternativa viable y puede formar parte de las estrategias de gestión de residuos agroindustriales. Los biomateriales activados poseen varios grupos funcionales. Estos grupos son los encargados de la adsorción de diferentes contaminantes orgánicos y metales pesados. Los carbones estructurados y activados, sintetizados a partir de diferentes precursores químicos y altas temperaturas, han demostrado excelentes características y altas áreas superficiales. Esto los hace viables para remover contaminantes del agua y de las aguas residuales.

Los materiales de carbono sintetizados a partir de residuos de biomasa poseen cualidades superiores a los nanomateriales de carbono tradicionales, por ejemplo, contenido de carbono (grado grafitico), longitud, estructura y diámetro (Mubarak et al., 2022). Para la síntesis de materiales derivados de la biomasa se emplean varios métodos, activación física y química y la carbonización (Mubarak et al., 2022; Man and Ridzuan, 2008; Oladimeji et al., 2021; Wibawa et al., 2020). La carbonización o pirólisis extrema, que en su mayoría deja carbono como residuo, implica el calentamiento, la deshidratación, la degradación y, finalmente, la carbonización de la sustancia orgánica presente en el precursor de la biomasa.

El objetivo de esta investigación fue obtener un material, carbón estructurado de bajo costo, a partir de piel de mango por un método pirolítico empleando como agente activante al hidróxido de potasio y su uso potencial como tratamiento terciario en una planta de tratamiento de agua de la comunidad purépecha³ de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México. En este trabajo se sintetizó y caracterizó un material de carbón estructurado de bajo costo obtenido a partir de piel de mango, por un método pirolítico empleando como agente activante al hidróxido de potasio.

Materiales y métodos

Reactivos: Se empleó como agente activante para la síntesis del bioadsorbente activado estructurado hidróxido de potasio (KOH). Todos los reactivos usados para el análisis de la calidad de agua tratada y post-tratada fueron de grado reactivo y suministrados por Merck, de acuerdo con las NOM y los métodos *APHA*, como se verá abajo.

Recuperación del subproducto: Los residuos de piel de mango fueron lavados para eliminar los restos de pulpa. La piel de mango fue cortada en piezas pequeñas (1×1 cm), sometida a un proceso de secado a 50°C por 72 horas y molida para generar un polvo de tamaño de partícula >450 µm (Orozco et al., 2024; Orozco-Cerros et al., 2024). El material particulado de piel de mango fue empleado para el desarrollo del bioadsorbente activado estructurado.

Método pirolítico. Se tomaron 5 g de material particulado, se agregaron 5 g de KOH y 5 mL de agua ultrapura, agitando hasta formar una mezcla homogénea. La mezcla resultante (piel de mango + KOH) fue sometida a un proceso térmico a 650°C por 60 minutos, en atmósfera inerte (Oginni et al., 2019), que fue etiquetada como BPM (bioadsorbente de piel de mango).

³ Palabra de la lengua *p'urhepecha* o *p'urhe*, idioma purépecha [p'h'u'ɾepetʃa] (https://es.wikipedia.org/wiki/Pueblo_pur%C3%A9pecha) [Nota de los(as) editores(as)]

El BPM⁴ fue caracterizado por espectroscopía infrarroja, EIR, difracción de rayos X y análisis termogravimétrico. Se emplearon un difractómetro Bruker D2-Phaser utilizando radiación $\text{CuK}\alpha$ a 30 kV y 10 mA; un espectrómetro IR Thermo Scientific Nicolet iS10 y un analizador térmico Perkin Elmer modelo STA 6000, utilizando oxígeno a $30 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$, con muestras de aproximadamente 20 mg de material y calentándolas de 25 a 900°C a $10^\circ\text{C min}^{-1}$. Las condiciones de medición se encuentran descritas en Orozco et al. (2024). La morfología del bioadsorbente activado se observó con un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-7600F de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

El material BPM fue aplicado para el post-tratamiento de una muestra de agua residual tratada recolectada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Francisco Pichátaro, PTAR-SFP (Figura 2). La planta incluye pretratamiento físico, 2 lagunas de maduración (anaerobia y facultativa), tuberías de interconexión y equipamiento, con capacidad de 7 L/s (licitación: LO-916035999-E19-2019). El proceso de post-tratamiento se llevó a cabo en una columna de adsorción de 100 cm^3 a escala de laboratorio y con operación hidrodinámica continua. Consistió en la aplicación de tres ciclos continuos, empleando 2 g de BPM. Se hizo un experimento para corroborar la reutilización del bioadsorbente BPM, instrumentando dos ciclos adicionales con el mismo bioadsorbente.

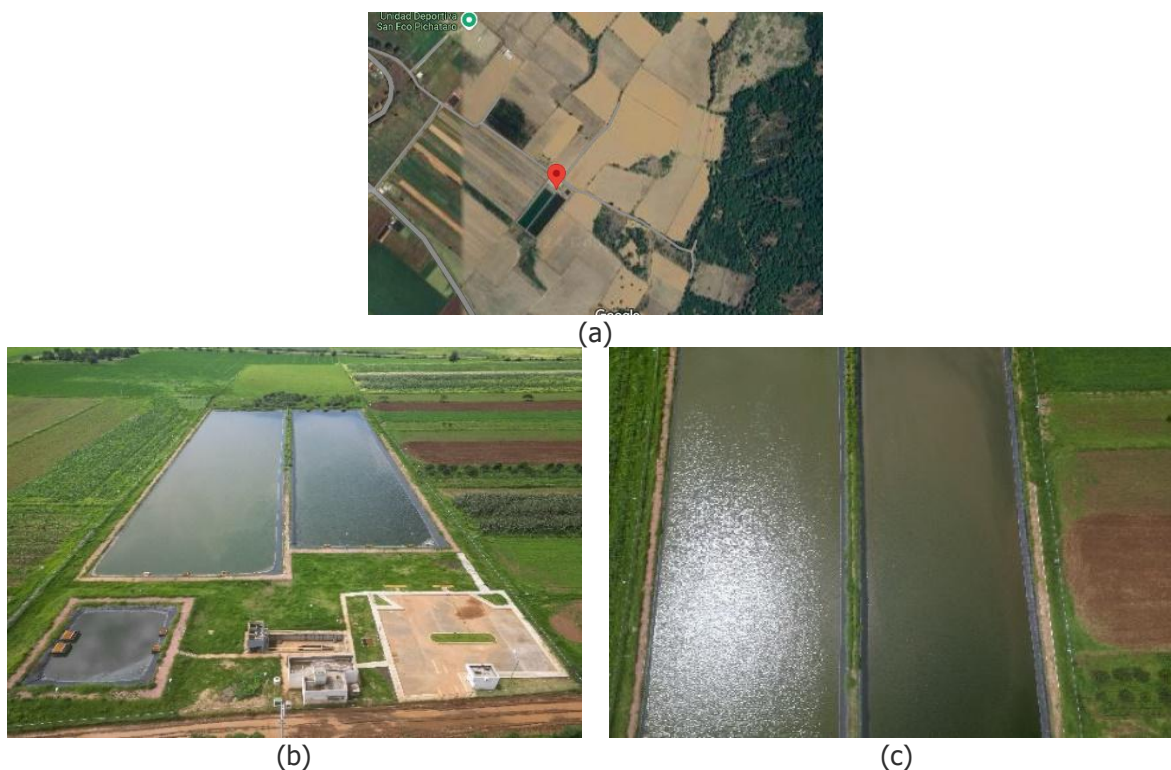


Figura 2. (a) Ubicación de la planta de tratamiento de agua residual, PTAR-SFP, (b) Vista de la planta y (c) Vista de las lagunas

Para el análisis de la calidad del agua residual tratada y post-tratada se evaluaron algunos de los parámetros del índice de calidad de agua (ICA), usado en la década de los setentas del siglo XX, ya que el laboratorio de la comunidad no cuenta todavía con la infraestructura para medir lo señalado por la norma oficial mexicana correspondiente, así como su equivalente estadounidense (NOM, APHA). La Tabla 1 presenta los parámetros que se usaban para ese ICA y los que se encuentran resaltados fueron

⁴ Los autores consideraron importante adquirir un carbón producido con fibra de coco comercial pero el fabricante no da en la etiqueta información sobre su origen ni cómo fue elaborado. Este material fue caracterizado de la misma forma que el BPM

los que se pudieron realizar. Estos fueron pH (Hanna Instruments, 2017a) método electroquímico HI98129 Hanna 0.00 a 14.00±0.05), conductividad eléctrica (Hanna Instruments, 2017a), método electroquímico HI98129 Hanna, 0 a 20 mS/cm), sólidos disueltos totales (Hanna Instruments, 2017a,b), método electroquímico HI98301 Hanna 0 a 20 mg L⁻¹), oxígeno disuelto (método yodométrico, reportado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004), nitrógeno como nitratos (DOF, 2001) y dureza (método de titulación EDTA, Capote et al., 2015). También pudieron medirse con un donativo de "kits" demanda química de oxígeno (DOF, 2012), carbono orgánico total (Hach, 2024, "COT kit" rango alto). Se pudo también medir Fe (método de σ -fenantrolina, APHA-AWWA-WEF, 2022). Todas las muestras se evaluaron por triplicado, con excepción de las de COT que solamente se hizo para una muestra.

Tabla 1. Parámetros considerados en el índice de calidad de agua (ICA) (SEMARNAT, 2013)

Parámetro	Ponderación	Parámetro	Ponderación
Demanda bioquímica de oxígeno	5.0	Nitrógeno en nitratos	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

También se encontraron un grupo de tablas con información más reciente sobre calidad de agua de suministro (pozos - agua subterránea) donde se dan valores para estas variables (Conagua, 2013-2023) pero no tienen oxígeno disuelto ni pH:

Calidad del agua para sólidos disueltos totales-riego agrícola	Criterio	Descripción
Excelente para riego	SDT menor o igual a 500	Excelente para riego de todo tipo de cultivos
Cultivos sensibles	SDT mayor de 500 y menor o igual a 1000	Apta para riego de cultivos sensibles
Cultivos con manejo especial	SDT mayor de 1000 y menor o igual a 2000	Apta para riego de cultivos con manejo especial
Cultivos tolerantes	SDT mayor de 2000 y menor o igual a 5000	Apta para riego de cultivos tolerantes
Indeseable para riego	SDT mayor de 5000	Indeseable para riego
Calidad del agua para conductividad	Criterio	Descripción
Excelente para riego	CONDUC menor o igual a 250	Excelente para riego de todo tipo de cultivos
Buena para riego	CONDUC mayor de 250 y menor o igual a 750	Apta para riego de cultivos sensibles
Permisible para riego	CONDUC mayor de 750 y menor o igual a 2000	Apta para riego de cultivos con manejo especial
Dudosa para riego	CONDUC mayor de 2000 y menor o igual a 3000	Apta para riego de cultivos tolerantes
Indeseable para riego	CONDUC mayor de 3000	Indeseable para riego
Calidad del agua para nitrógeno de nitratos	Criterio	Descripción
Potable – Excelente	N_NO3 menor o igual a 5	Agua potable. Agua no contaminada o condición normal

Potable - Buena calidad	N_NO3 mayor de 5 y menor o igual a 11	Aguas con indicios de aguas residuales o fertilizantes. Condición eutrónica-altos niveles de nutrientes. Efectos moderados en cultivos regados
No apta como FAAP	N_NO3 mayor de 11	Aguas superficiales con fuerte impacto de aguas residuales crudas con alta carga de nutrientes. Condición hipertrónica, florecimientos algales que incluyen especies tóxicas a seres vivos

Calidad del agua para hierro	Criterio	Descripción
Potable – Excelente	FE menor o igual a 0.3	Agua potable. Agua no contaminada o condición normal
Sin efectos en la salud - Puede dar color al agua	FE mayor de 0.3	Sin efectos en la salud - Puede dar color al agua
Calidad del agua para dureza	Criterio	Descripción
Potable – Suave	DUR menor o igual a 60	Agua potable. Bajo contenido de minerales
Potable - Moderadamente suave	DUR mayor de 60 y menor o igual a 120	Agua potable. Moderado contenido de minerales
Potable – Dura	DUR mayor de 120 y menor o igual a 500	Agua potable. Alto contenido de minerales, principalmente sales de calcio y magnesio
Muy dura e indeseable usos industrial y doméstico	DUR mayor de 500	Agua no apta como fuente de abastecimiento de agua potable. Muy dura e indeseable usos industrial y doméstico

De ellas se descartaron los valores que hacían al agua indeseable para uso poblacional (riego o consumo directo).

Resultados y discusión

Caracterización de BPM

Las imágenes de *SEM* del material producido (BPM) fueron comparadas con uno que se tenía disponible obtenido a partir de fibra de coco para ver si había diferencias (Figura 3). Como se puede observar el bioadsorbente de coco (comercial) posee microestructuras en forma de esferas de poliglúcidos de tamaño de 10-16 μm (Figura 3a). El carbón de coco comercial no tiene porosidad, siendo su morfología característica de un material no activado (Orozco et al., 2024). El bioadsorbente de BPM presenta porosidad como resultado de la reacción del KOH con el carbón durante el proceso de activación (Figura 3b). Esto coincide con los resultados reportados por Oginni et al. (2019). La morfología porosa de la superficie de los carbones activados es un punto positivo para la adsorción de contaminantes orgánicos o metales pesados.

En la Figura 4a se muestran los patrones de difracción de rayos X para los carbones activados BAC y BPM. Los materiales muestran un pico amplio a 22.8 correspondientes al plano (002) de una estructura de grafito indexada (JCPDS 00-056-0159) (Keppetipola et al., 2021). Este pico es característico de materiales altamente desordenados, parcialmente cristalizados y con una morfología de fase principalmente gráfitica. En la Figura 4b se muestran los espectros IR de los bioadsorbentes activados BAC y BPM. La banda a 3280 cm^{-1} se debe a las vibraciones de estiramiento OH del enlace de hidrógeno intermolecular. Dos pequeños hombros en 1560 y 1370 cm^{-1} podrían asignarse al enlace C=C sp^2 y al estiramiento C-H del anillo aromático. Las bandas a 1030-1080 cm^{-1} podrían asignarse al estiramiento C-O de fenoles y alcoholes, respectivamente. La banda a 870-990 cm^{-1} podría asignarse a la flexión C-C y a la C-H fuera del plano en los anillos aromáticos (Leite et al., 2018; Orozco et al., 2024; Orozco-Cerros et al., 2024).

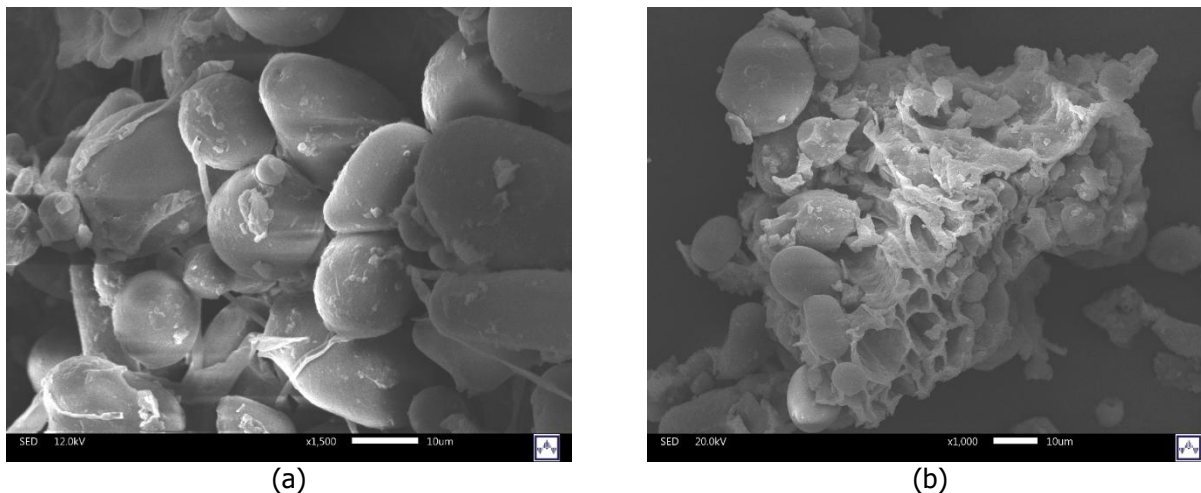


Figura 3. Imágenes de microscopía electrónica de barrido: (a) BAC (coco) y (b) BPM (piel de mango)

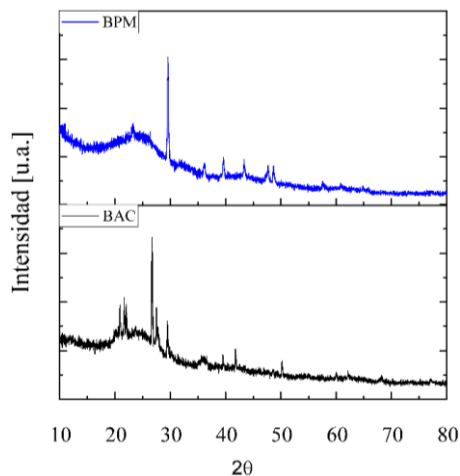


Figura 4a. Patrones de difracción de rayos X de los materiales BAC y BPM

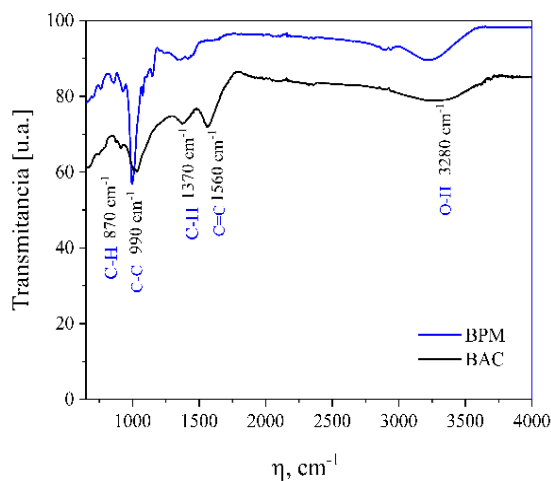


Figura 4b. Espectros IR de los materiales BAC y BPM

En la Figura 5 se presenta el análisis termogravimétrico del carbón activado de coco BAC y del bioadsorbente activado estructurado, BPM. Como se puede observar los materiales BAC y BPM muestran comportamientos de degradación diferentes. Los materiales BAC y BPM tienen una pérdida de masa⁵ de 8 y 12% ($T < 100^{\circ}\text{C}$), respectivamente. Esto podría deberse a otros constituyentes volátiles de las muestras, por ejemplo, los constituyentes del aroma o aceites esenciales que son volátiles y por tanto tienen puntos de ebullición menores a 100°C (Solís-Fuentes y Durán-de-Bazúa, 2004). El bioadsorbente activado estructurado y el carbón activado de coco poseen estabilidad térmica a $T < 335^{\circ}\text{C}$ y por encima de esta temperatura el material se descompone. Las pendientes de descomposición son diferentes, siendo más pronunciada para BPM, lo cual es de esperarse debido a la composición de los recursos biomásicos empleados (Orozco et al., 2024).

⁵ Masa y peso NO son sinónimos. La masa es una propiedad de los cuerpos y se mide en kg y el peso es una fuerza aplicada a los cuerpos y se mide en N [nota de los(as) editores(as)]

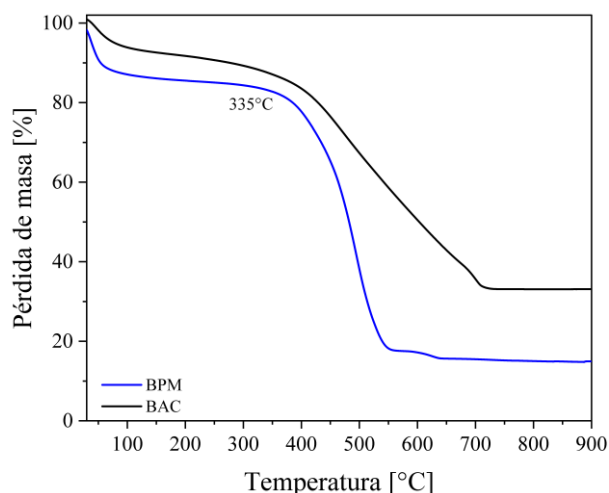


Figura 5. Análisis termogravimétrico de los bioadsorbentes BAC (coco) y BPM (piel de mango)

Aplicación del BPM

El objetivo de esta investigación fue mejorar la calidad de agua tratada en la PTAR de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México, usando el material desarrollado, BPM, como adsorbente de contaminantes no biodegradables presentes después del tratamiento biológico. Esto permitiría reutilizar el agua para actividades productivas de la comunidad. En la literatura se han probado diferentes carbones activados para mejorar la calidad del agua tratada reduciendo el contenido de contaminantes medidos como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno, (DQO) (Man y Ridzuan, 2008; Oladimeji et al., 2021), metales pesados (Rajan y Anish, 2024), minerales, cloruros, nitratos, entre otros (Jaber et al., 2024).

En la Tabla 2 se presenta la comparación del agua postratada de la PTAR de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México con el material en estudio. Se usaron como se mencionó en la metodología los parámetros del ICA para agua de origen subterráneo (tomados de la Tabla 1) y, dado que los autores no conocen la forma en que se obtuvieron las ponderaciones de ella, se complementó la información con la proporcionada por la Comisión Nacional del Agua de México (Conagua 2013-2023) considerando que fuera todavía apta para su uso. Los datos que sí cumplieron con algún parámetro están en negritas.

Los otros dos parámetros que pudieron medirse (DQO, COT) e incluso el pH se compararon con la norma oficial mexicana vigente (DOF, 2021) para su liberación a aguas y bienes nacionales, la cual fue recientemente actualizada. En esa norma, cuando los cloruros son mayores o iguales a 1000 mg/L, debe medirse COT.

Dado que se contaba con el donativo de los "kits" se midieron ambas, DQO y COT, porque no se tenía la forma de medir cloruros. Esa norma también indica que, cuando la conductividad eléctrica sea mayor o igual a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se debieran analizar y reportar enterococos fecales. Desafortunadamente tampoco se cuenta con infraestructura para medir este último parámetro.

Por esta razón, a esta parte de la investigación los autores la consideraron como preliminar.

Nuevamente se consideró el material de coco de origen desconocido adquirido comercialmente para ver su desempeño en el postratamiento del agua de la PTAR de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.

Tabla 2. Comparación del agua postratada con el material en estudio (BPM) con los dos parámetros de la Norma vigente que debiera cumplir la PTAR-SFP de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México

Parámetro	Agua tratada PTAR-SFP	Valor BPM	Valor BAC (control comercial)	Base de comparación
Demanda química de oxígeno (DQO), mg/L	799±37	143±12	314±13	DOF (2021): 60-210
Carbono orgánico total (COT), mg/L	571	24	237	DOF (2021): 15-53
Valor de pH	6.86	8.37	7.87	DOF (2021): 6-9
Dureza, mg CaCO ₃ /L	849.89	64.27	171.40	ICA, Conagua: 60-120
Nitrógeno de nitratos, mg/L	15.0	8.53	11.75	ICA, Conagua: 5-11
Sólidos totales disueltos (STD), mg/L	1630	1670	1850	ICA, Conagua*: 1000
Conductividad eléctrica (CE), mS/cm	3230	3530	3730	ICA, Conagua*: 250-2000
Fe, mg/L	0.518±0.026	0.107±0.01	0.062±0.008	ICA, Conagua: ≤0.3
Oxígeno disuelto (OD), mg/L	0.8	3.7	1.7	ICA, Conagua**: >6.5-8

*Uso para riego, **No se encontró un valor en la Conagua y se usó el de una página-e de Canadá (https://www.gov.nt.ca/sites/ecc/files/dissolved_oxygen.pdf)

El agua tratada en la planta instalada en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México, puede clasificarse como agua fuertemente contaminada de acuerdo con los valores de los parámetros obtenidos (solamente el valor de pH cumple con la normativa vigente). Esto indicaría que el sistema de tratamiento establecido por las autoridades en el momento de decidir la construcción de esta PTAR no fue el idóneo para el tipo de agua residual a depurar. De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2021), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, los valores de la DQO y los del COT no cumplen con los límites máximos permisibles para descarga en bienes nacionales más bajos sino solamente para algunos de ellos.

El post-tratamiento del agua con el bioadsorbente activado estructurado (BPM) y con el carbón de coco (BAC) permite disminuir el contenido de materia orgánica, de 571 mg/L de COT a 24 y 237 mg/L con los materiales BPM y BAC, respectivamente. Aquí es importante mencionar que esta variable no fue realmente tomada por los legisladores que aprobaron esta nueva norma como un parámetro de calidad sino solamente para el caso de que hubiera un exceso de cloruros. Esta variable no fue medida en estos experimentos. En este contexto no puede considerarse como parámetro de comparación.

El contenido de material susceptible a ser oxidado, medido como DQO, mostró un decremento de 799 mg/L a 143 y 314 mg/L para BPM y BAC, respectivamente. El bioadsorbente BPM demostró tener propiedades superficiales para la remoción de contaminantes presentes en el agua tratada, comparado con el BAC comercial. Si se observa la Figura 3 se ve que este material comercial no posee porosidad o sitios activos disponibles para la adsorción. En las Figuras 6a y b se muestra una imagen del agua tratada y post-tratada con los bioadsorbentes BPM y BAC, respectivamente. Como se puede observar con el material BPM, el agua post-tratada no posee color (no se hizo la prueba de color de acuerdo con la NOM vigente sino solamente se apreció visualmente) (Figura 6a).

En futuros experimentos se evaluará también para poder relacionar esta variable con el decremento de contaminantes presentes y la mejora en su calidad. Con el BAC la muestra de agua post-tratada prácticamente no cambia de color (Figura 6b). Si bien existe una disminución de color, el valor de este parámetro cuando se midiera probablemente estaría por encima de los límites máximos permisibles para su descarga en bienes naturales y su uso en sistemas de riego agrícola.

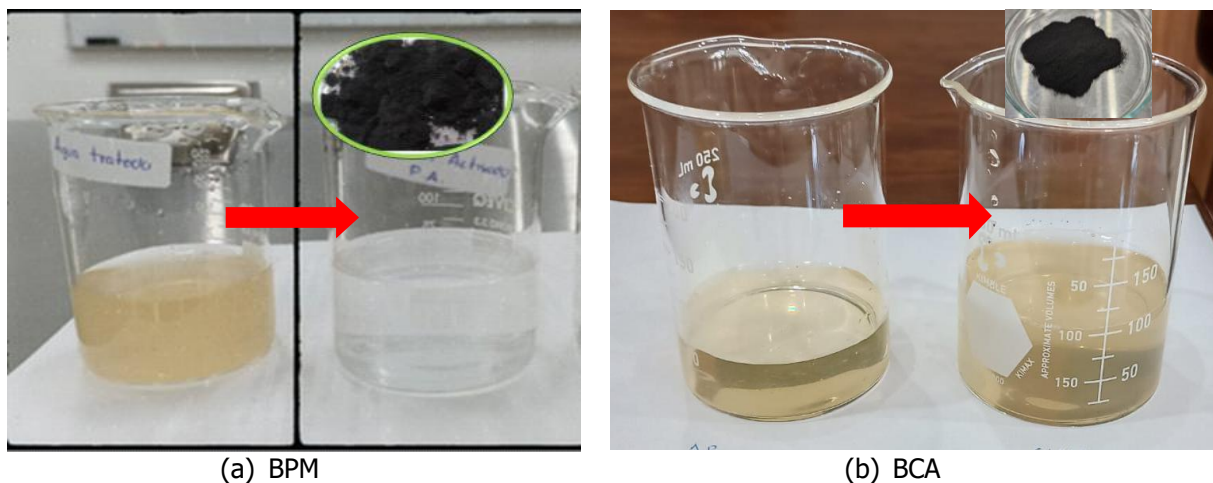


Figura 6. Comparación del agua tratada y post-tratada con los bioadsorbentes aplicados

El postratamiento de agua mejoró la calidad de agua tratada con el bioadsorbente BPM, de acuerdo con los criterios de la Conagua (2013-2023), en los parámetros de dureza, nitrógeno como nitratos y Fe, pudiendo tener la opción de su uso en riego de cultivos comestibles, aunque justamente por su contenido de sales medidas como conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales no es apta para riego pues salinizaría los suelos.

Finalmente, para analizar la posible reutilización del bioadsorbente BPM, el material se probó dos ciclos adicionales (y se hizo lo mismo para el material de coco comercial). Los resultados de los valores de parámetros de pH, dureza, SDT, CE, N de NO_3^- , Fe, DQO, COT, se muestran en la Figura 7.

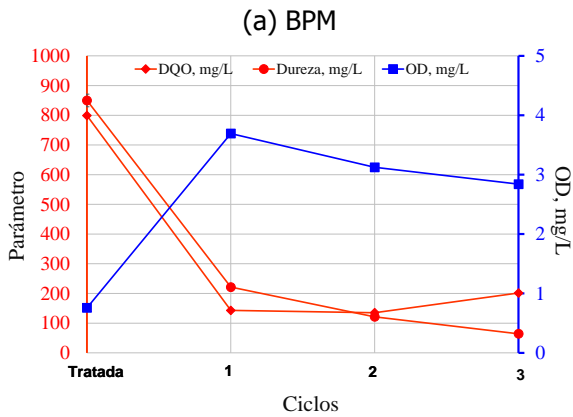
En la Figura 7a.1, para el material BPM, se puede observar que los valores de remoción de la DQO se mantienen en los tres ciclos. Este resultado es relevante ya que muestra que el material BPM tiene potencial para ser reutilizable por tres ciclos consecutivos. El material BAC (ver Figura 7b.1), aunque absorbe poco, se mantiene en los valores reportados en el primer ciclo. El oxígeno disuelto no se considera por tener valores muy bajos.

Para el hierro y el nitrógeno de nitratos (Figuras 7a.2, 7b.2) el segundo y tercer ciclos no mantienen el desempeño inicial y los otros parámetros, con excepción del pH, no cumplieron con lo deseado según la recomendación de la Conagua (2013-2023) como se ve en las Figuras 7a.3 y 7b.3.

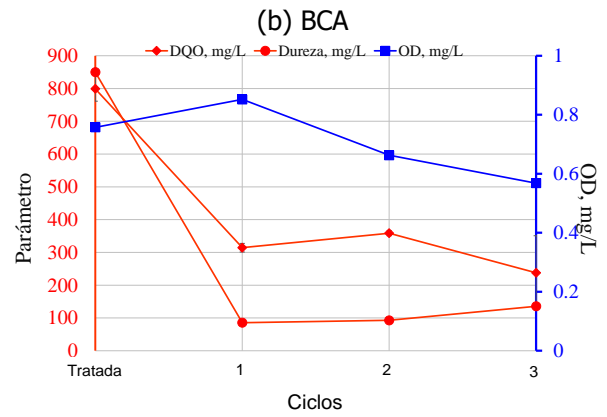
La reutilización del agua tratada es una de las metas en el Programa Hídrico Nacional. Para cumplir esa meta es importante poner en operación, dar mantenimiento y operar las PTAR que sí garantizan el cumplimiento de las normas vigentes, así como incorporar tecnologías que permitan incrementar la calidad del agua tratada. De acuerdo con la ONU-OMS, el 80% de las aguas residuales y tratadas se descargan al ambiente sin tratamiento adecuado (ONU-Hábitat y OMS, 2021).

En este contexto es importante el desarrollo e implementación de tecnologías emergentes en las PTAR que permita la reutilización y la optimización del recurso hídrico, uno de los objetivos para el desarrollo sustentable 2020-2030 (ODS).

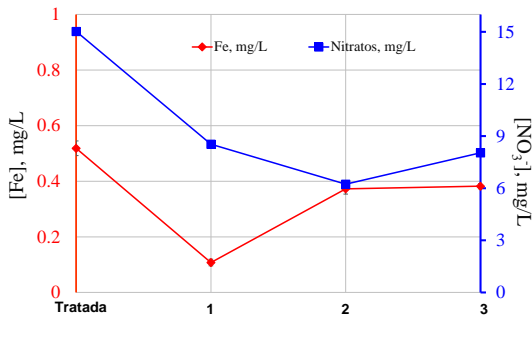
Este biomaterial, obtenido de lo que ahora es un residuo, podría ser una opción para las comunidades más vulnerables del país, como las comunidades purépechas (*Pur'épechas*, en la lengua originaria) si se logran superar estos valores haciendo modificaciones en las condiciones de producción del carbón activado.



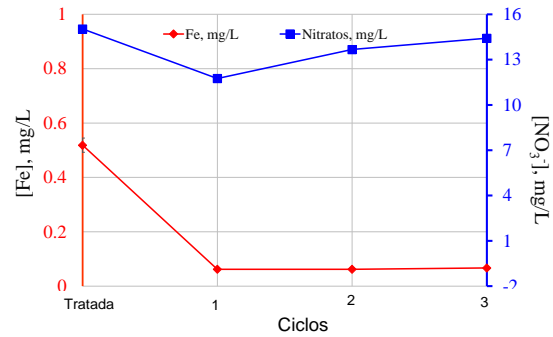
7a.1. Demanda química de oxígeno, dureza y oxígeno disuelto



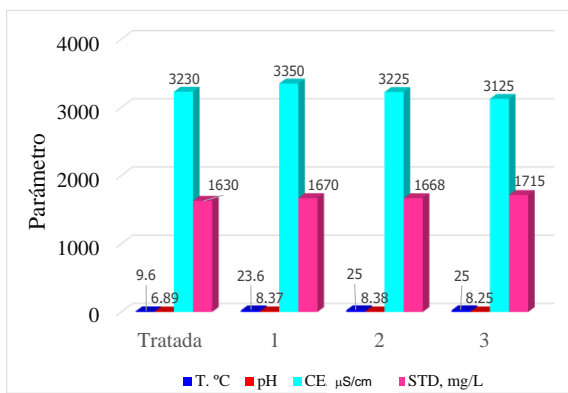
7b.1. Demanda química de oxígeno, dureza y oxígeno disuelto



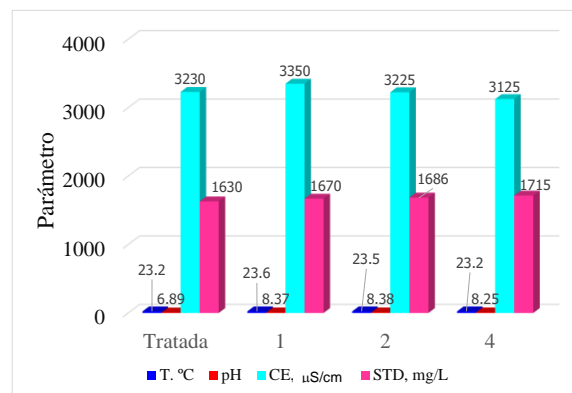
7a.2. Hierro y nitratos



7b.2. Hierro y nitratos



7a.3. Temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos



7b.3. Temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos

Figura 7. Perfiles de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada y post-tratada (tres ciclos continuos) empleando los materiales (a) BPM y (b) BAC

Conclusiones

En esta investigación se llevó a cabo el post-tratamiento de agua residual tratada de la planta de tratamiento de agua residual, PTAR, de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México, a escala de laboratorio. Para este objetivo se desarrolló un bioadsorbente activado estructurado a partir de residuos de piel de mango. Los resultados obtenidos se compartieron con los habitantes de las comunidades para su discusión y elaboración de estrategias que permitan mejorar la calidad del agua tratada.

El bioadsorbente activado estructurado podría llegar a ser una tecnología sostenible que podría aplicarse para mejorar la calidad del agua tratada en la PTAR y, con ello, poder reutilizarla de forma que garantice la salud de la población y de los ecosistemas, así como contribuir a la optimización del uso del recurso hídrico, cada vez más escaso.

El desarrollo de la tecnología a partir de residuos agroindustriales generados en la región como la piel de mango puede ser una opción viable en términos sociales y ambientales, además de ofrecer una estrategia para el manejo integral de residuos, a través de su valorización y aprovechamiento, generando modelos económicos bajo una perspectiva de economía circular.

Para ello deberá obtenerse el apoyo de un laboratorio equipado que permita la producción eficiente del carbón activado y la realización de las pruebas analíticas para todos los parámetros tanto de la NOM-001-SEMARNAT-2021 como de los 18 parámetros considerados para agua subterránea del ICA y de la Conagua (2013-2023). Una vez mejorando esta parte probablemente pudieran alcanzarse hasta tres ciclos de reutilización del material adsorbente que pudiera emplearse. Los compuestos gaseosos obtenidos de su reactivación podrían reasimilarse en la vegetación circundante promoviendo la recuperación de bosques y matorrales, como mejoradores de suelos ya que los materiales sólidos resultantes serían inocuos.

Glosario

Siglas y términos	Significado
APHA	American Public Health Association (nombre abreviado de la APHA-AWWA-WEF, de los Estados Unidos)
BAC	Siglas para el bioadsorbente comercial de coco
BPM	Siglas para el bioadsorbente activado estructurado por bioadsorbente de piel de mango
ICA	Siglas para índice de calidad del agua usado en México desde 1970
ICTI	Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán, México
JCPDS	Siglas en inglés para <i>Joint Committee on Powder Diffraction Standards. Its cards are used to identify the phases present in XRD (X-ray diffraction) patterns</i> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Identify the peaks in your XRD pattern: Use a software program or manually identify the peaks in your XRD pattern</i> 2. <i>Determine the crystal structure: Based on the peak positions and intensities, you can determine the crystal structure of the material. You can use a crystallographic database such as the ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) to search for potential matches</i> 3. <i>Obtain the JCPDS card: Once you have identified the crystal structure, you can request the JCPDS card from the ICDD (International Centre for Diffraction Data). You will need to provide the ICDD with the ICSD number or other identifying information about the crystal structure.</i>

Siglas y términos	Significado
	<p>Traducción al español: Las tarjetas del Comité Conjunto sobre Estándares de Difracción de Polvos se utilizan para identificar las fases presentes en los patrones <i>XRD</i> (difracción de rayos X).</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Identifique los picos en su patrón <i>XRD</i>: utilice un programa de software o identifique manualmente los picos en su patrón <i>XRD</i> 2. Determine la estructura cristalina: basándose en las posiciones e intensidades de los picos, puede determinar la estructura cristalina del material. Puede utilizar una base de datos cristalográfica como <i>ICSD</i> (base de datos de estructura de cristal inorgánico) para buscar posibles coincidencias 3. Obtenga la tarjeta <i>JCPDS</i>: Una vez que haya identificado la estructura cristalina, puede solicitar la tarjeta <i>JCPDS</i> al <i>ICDD</i> (Centro Internacional de Datos de Difracción). Deberá proporcionar al <i>ICDD</i> el número <i>ICSD</i> u otra información de identificación sobre la estructura cristalina. <p>https://www.researchgate.net/post/Can_someone_here_help_me_obtain_JCPDS_card_for_my_XRD_data#:~:text=JCPDS%20(Joint%20Committee%20on%20Powder,X%20Dray%20diffraction)%20patterns</p>
NMX	Acrónimo para Norma Mexicana (no obligatoria)
NOM	Acrónimo para Norma Oficial Mexicana (obligatoria)
ODS	Objetivos para el desarrollo sustentable de la Organización de las Naciones Unidas
PTAR	Acrónimo para plantas de tratamiento de aguas residuales
UNAM-DGAPA-	Siglas de Universidad Nacional Autónoma de México-Dirección General de
PAPIIT	

Reconocimientos

La autora Sayra Orozco agradece a CONAHCYT por la Beca de Consolidación M1 and M2 (I1200/320/2022-I1200/331/2023). El autor Michel Rivero agradece a la UNAM-DGAPA-PAPIIT Proyecto IA103623 y al ICTI proyecto FCCHTI23-ME-4.1.-0027 por el apoyo financiero parcial.

Referencias

- Adame, L., Cubero, B. 2024. HR Ratings comenta sobre el estrés hídrico y sus principales causas en México. 1 <https://www.fao.org/aquastat/en/>
- APHA-AWWA-WEF, 2022. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24th Edition. American Public Health Association-American Water Works Association-Water Environment Federation. Lipps, W.C., Braun-Howland, E.B., Baxter, T.E., eds. Washington, D.C. Estados Unidos.
- Capote, L., Tarcisio, J., Matute, P., Saida, B., Rojas, V., Jesús, R. 2015. Determinación de la dureza total en agua con EDTA empleando una solución amortiguadora inodora de borato. Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel. 46(1-2):25-37. Recuperado en 06 de noviembre de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-04772015000100003&lng=es&tlng=es
- Conagua. 2013-2023. Indicadores de calidad del agua de pozos (agua subterránea). <https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua?idiom=es>
- DOF. 2012. Norma Mexicana NMX-AA-030/1-SCFI-2012, Norma mexicana que establece un método para medir la demanda química de oxígeno (DQO) en el agua, <https://www.dof.gob.mx/>
- DOF. 2021. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, renovando aspectos técnicos que, por el transcurso del tiempo, esta última ya no cumplía. <https://www.dof.gob.mx/>

- DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen⁶ en servicios al público. <https://www.dof.gob.mx/>
- DOF. 2001. NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas - determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>
- Espinosa-Aquino, B., Martínez-y-Moreno, G.J., Durán-de-Bazúa, C., Mendoza-Hernández, A., Méndez-Mendoza, J., Contreras-González, E. 1999. Uso de energías combinadas, solar y de gas LP, para la conservación de frutas (Caso: Mango petacón). *Rev. IMIQ*, 40(10-11):23-26. ISSN 0188-7319.
- Espinosa-Aquino, B., Méndez-Mendoza, J., Durán-Domínguez, M.d.C. 2011. CÁMARA AEROTÉRMICA. Patente Núm. 392970. Solicitud de Registro: Diciembre 13, 2011 en la Oficina Regional Centro, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y Facultad de Química, UNAM. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) **MX/e/2011/089839**. Folio MX/a/2011/013387, Dirección General de Inventiones y Marcas. Departamento de Patentes. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Otorgada el 04 de abril de 2022. Ciudad de México, México.
- Hach. 2024. Organic Carbon, Total (TOC), HR Direct Method 10128, Test 'N Tube. <https://latam.hach.com/tnt-para-toc-metodo-de-purga-100-a-700-mg-l-c/product-downloads?id=54617162663>
- Hanna Instruments. 2017a. Manual de instrucciones. HI 98129 - HI 98130. Medidores impermeables de pH, CE/TDS y temperatura. https://h.hannainst.com.mx/descargas/?q=HI98129&catid=0&show_pagination=1&paged=1&limit=60
- Hanna Instruments. 2017b. Instruction manual. HI98300/1/2/3/4. Conductivity/TDS Meters with automatic temperature compensation. https://h.hannainst.com.mx/descargas/?q=HI9142&catid=0&show_pagination=1&paged=1&limit=60
- GVR-4-68039-929-5. 2024 Avocado Market Size, Share & Trends Analysis Report By Form (Fresh, Processed), By Distribution Channel (B2B, B2C), By Region, And Segment Forecasts, 2023 – 2030. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fresh-avocado-market-report>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2004). http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/participacion-de-la-ciudadania/-/document_library_display/3DCVBB3LTRP3/view/105409131
- Jaber, L., Backer, S.N., Laoui, T., Abumadi, F., Koujan, M.M.S., Khalil, A.K., Shanableh, A., Atieh, M.A. 2024. Recent trends in surface impregnation techniques on activated carbon for efficient pollutant removal from wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 319: 100562. doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100562
- Jiménez-Bermúdez, M., Silva-Hernández, E.R., Solís-Fuentes, J.A., Durán-de-Bazúa, C. 1995. Mango stone fat (*Mangifera indica* L.), a possible substitute for cacao fat (*Theobroma cacao*). In I CONGRESO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS. FEA/UNICAMP-CYTED-SBCTA-ITAL. Noviembre 5-9, 1995. Campinas, Sao Paulo, Brasil.
- Keppetipola, N.M., Dissanayake, M., Dissanayake, P., Karunarathne, B., Dourges, M.A., Talaga, D., Servant, L., Olivier, C., Toupance, T., Uchida, S., Tennakone, K., Asoka-Kumara, G.R., Cojokaru, L. 2021. Graphite-type activated carbon from coconut shell: A natural source for eco-friendly non-volatile storage devices. *Royal Society of Chemistry Advanced*. 11(5):2854-2865. doi: 10.1039/d0ra09182k
- Leite, A.J.B., Carmalin-Sophia, A., Thue, P.S., dos-Reis, G.S., Dias, S.L.P., Lima, E.C., Vaghetta, J.C.P., Pavan, F.A., Soares-de-Alencar, W. 2017. Activated carbon from avocado seeds for the removal of phenolic compounds from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*. 71:168-181. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20540>
- Lorenzo-Santiago, M. A., Juárez-López, A. L., Rosas-Acevedo, J. L., Rendón-Villalobos, J. R., Toribio-Jiménez, J., & García-Hernández, E. 2018. Management and Final Disposal of Mango Waste in the State of Guerrero, Mexico: A Brief Review. *Journal of Agricultural Science*, 10(34). <https://doi.org/10.5539/jas.v10n12p34>
- Man, K.L., Ridzuan, Z. 2008. Production of activated carbon from sawdust using fluidized bed reactor. International Conference on Environment, ICENV, 2008. <https://www.semanticscholar.org/paper/PRODUCTION-OF-ACTIVATED-CARBON-FROM-SAWDUST-USING-Lam-Zakaria/cb5c70ac51ce90fb8d1d8d257e4a4b865153fbd6>
- Martínez-y-Moreno, G.J., Espinosa-Aquino, B., Durán-de-Bazúa, C. 1995. Propuesta de la utilización de energía combinada solar y gas LP, en la conservación de frutas (Caso particular: mango). En Memoria de la XIX Semana Nacional de Energía Solar. Pub. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Pp. 61-64. Octubre 2-6. La Paz, Baja California Sur, México.
- Mubarak, M.F., Zayed, A.M., Ahmed, H.A. 2022. Activated Carbon/Carborundum@Microcrystalline Cellulose core shell nano-composite: Synthesis, characterization and application for heavy metals adsorption from aqueous solutions. *Journal of Industrial Crops and Products*. 182: 114896. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114896>
- Oginni, Tosin, Tingi, Kaushlendra, Oporto, Gloria, Dawson-Andoh, Ben, McDonald, Louis, Sabolsky, Edward. (2019). Influence of one-step and two-step KOH activation on activated carbon characteristics. *Bioresource Technology Reports*. 7: 100266. 10.1016/j.biteb.2019.100266.
- Oladimeji, T.E., B.O., Odunoye, B.O., Elehinafe, F.B., Obanla, O.R., Odunlami, O.A. 2021. Production of activated carbon from sawdust and its efficiency in the treatment of sewage water. *Heliyon*. 7(1): e05960. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05960>.
- ONU-Habitat y OMS. 2021. Progress on wastewater treatment – Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Habitat) y Organización Mundial de la Salud (OMS). Ginebra, Suiza.
- Orozco, S., Montiel, E., Valencia, J., Espino, R., Guerra, M.C., Chávez, J. Apolinar, M. Rivero. 2024. Effective RhB dye removal using sustainable natural bioadsorbents synthesized from avocado seed and skin. *Water Air Soil Pollut*. 235(155) <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06952-6>
- Orozco-Cerros, S.L., Espino-Valencia, J., López-Sosa, L.B., Rivero-Corona, M.A. 2024. Bio-adsorbente natural a partir de piel de aguacate para la remoción de un colorante catiónico. *Ambiens Techné et Scientia México*. Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México, A.C., ISSN 2954-3622, 12-1 (77-94).

⁶ Reusen no existe. Sería reutilicen o, en todo caso, reusen para romper el diptongo [Nota de los(as) editores(as)]

-
- PNH. 2020-2024. Programa Nacional Hídrico, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua Disponible en gob.mx/semarnatgob.mx/Conagua
- Rajan, M.J., Anish, C.I. 2024. Role of activated carbon in water treatment. In *Water Quality – New Perspectives*. Dincer, S., Takci, H.A.M., Ozdeneffe, M.S., eds. Chapter 3. IntechOpen. ISBN 978-1-83969-010-5, ISBN 978-1-83969-009-9. doi: 10.5772/intechopen.108349
- SEMARNAT. 2013. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2013, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html
- Solís-Fuentes, J.A. 1998. El aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos de la agroindustria alimentaria, cinco ejemplos. Tesis de Maestría en Ciencia de los Alimentos (Ingeniería). Facultad de Química, UNAM. Defensa: Abril 3, 1998. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pdbis/259600/Index.html
- Solís-Fuentes, J.A. 2003. Cinética de fusión-cristalización y conducta polimórfica de triacilglicéridos de grasas de fuentes no convencionales. Tesis de Doctorado en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Ingeniería Química). UNAM. Defensa: Noviembre 12, 2003. Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ppt2002/0324126/Index.html>
- Solís-Fuentes, J.A., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2003. Characterization of eutectic mixtures of different natural fat blends by thermal analysis. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 105(12):742-748. ISSN (printed): 1438-7697, Online ISSN: 1438-9312. Redes internacionales: <http://wenku.baidu.com/view/72c872ef998fcc22bcd10dea>
- Solís-Fuentes, J.A., Durán-de-Bazúa, M.C. 2004. Mango seed uses: Thermal behaviour of mango seed almond fat and its mixtures with cocoa butter. *Bioresource Technology.* 92(1):71-78.
- Solís-Fuentes, J.A., Durán-de-Bazúa, M.C. 2006. Ecomaterials: Holistic recovery of mango seeds to produce paper and carton from pericarp and mango almond fat to substitute cacao butterfat. In *XV International Materials Research Congress*. Agosto 20-24, 2006. Ciudad de México D.F., México.
- Solís-Fuentes, J.A., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2011. Mango (*Mangifera indica* L.) Seed and Its Fats. In *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*. Eds. Preedy, V.R., Watson, R.R., Patel, V.B., eds. Chapter 88. Editorial Project Management, Life Sciences, Elsevier, ISBN 9780123756886. Academic Press (imprint of Elsevier). 1a ed. Pp. 741-748. London, Burlington, San Diego.
- Solís-Fuentes, J.A., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2020. Mango Seed: Mango (*Mangifera indica* L.) Seed and Its Fats. In *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*. Overview and General Themes. Preedy, V.R., Watson, R.R., eds. Chapter 8. Editorial Project Management, Life Sciences, Elsevier. ISBN 978-0-12-818553-7. London, San Diego, Cambridge, Kidlington, Oxford: Academic Press (imprint of Elsevier). 2ª ed. Pp. 79-90 (2020). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818553-7.00001-2>
- Solís-Fuentes, J.A., Hernández-Medel, M.d.R., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2004. Vegetable fat characterization by DSC and X-Ray diffraction techniques / Case: Mango (*Mangifera indica*) almond fat. In *XIII International Materials Research Congress 2004*. Agosto 22-27, 2004. Cancún, Q.R. México.
- Solís-Fuentes, J.A., Hernández-Medel, M.d.R., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2007a. Determination of the predominant polymorphic form of mango (*Mangifera indica*) almond fat by differential scanning calorimetry and X-ray diffraction. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 107(6):395-401.
- Solís-Fuentes, J.A., Hernández-Medel, M.d.R., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2007b. Isothermal crystallization kinetics of mango (*Mangifera indica*) almond seed fat. *J. Appl. Sci.* 7(11):1538-1542. ISSN (printed): 1812-5654. ISSN (electronic): 1812-5662. <http://www.docsdrive.com/pdfs/ansinet/jas/2007/1538-1542.pdf>
- Solís-Fuentes, J.A., Tapia-Santos, M., Fernández-Suárez, A.D. Álvarez-Reyes, A.R., Hernández-Medel, R., Durán-de-Bazúa, C. 2006. Residuos agroindustriales, revaloración de las semillas de mango y mamey / *Agroindustrial residues, re-valorization of mango and mamey seeds*. Vol. 8, Serie: Tecnologías más Limpias / Cleaner Technologies. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 235 pags. Facultad de Química, UNAM. ISBN 970-32-2544-6. 50 ejemplares/exemplars, 1ª Ed. (2004). Disco compacto 50 ejemplares/exemplars, 2ª Ed. (2006). Ciudad de México D.F., México.
- Wibawa, P.J., Nur, M., Asy'ari, M., Nur, H. 2020. SEM, XRD and FTIR analyses of both ultrasonic and heat generated activated carbon black microstructures. *Heliyon.* 6(3):e03546. doi:doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03546

Hoja en blanco / *Intentionally blank page*

Evaluación del efecto del ultrasonido con catalizador químico en la producción de biodiésel a partir de aceite usado

Evaluation of the effect of ultrasound with a chemical catalyst in the production of biodiesel from used oil

Perla Margarita Meza-Inostroza¹, Laura Y. Sicairos-Medina¹, Leonel Ernesto Amabilis-Sosa², Edgar Ledezma-Zavala¹, Ricardo Roé-Sosa³, Adriana Roé-Sosa*¹

¹Universidad Tecnológica de Culiacán, Coordinación de Ingeniería en Tecnología Ambiental, Carretera a Imala s/n. 80014 Culiacán, Sinaloa, México, Correo-e (*e-mail*): adriana.roe@utculiacan.edu.mx* Tel+526674510640

²CONAHCYT-TECNM/ITCuliacán, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Juan de DiosBátiz 310, 80220 Culiacán, Sinaloa, México

³Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Contaduría y Administración. Blvd. Miguel Tamayo Espinosa de los Monteros s/n, Torre de Rectoría, Col. Desarrollo Urbano Tres Ríos, 80050 Culiacán, Sinaloa, México

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

Resumen

En México se generan millones de litros de aceite procesado en restaurantes. Es un residuo peligroso debido a su corrosividad, lo que implica un gasto económico por el servicio de confinamiento especial. En el caso de darse una disposición inadecuada de este residuo peligroso, puede contaminar agua, aire y suelo. Por otra parte, el aceite vegetal usado puede ser empleado como materia prima en la producción de biodiésel. En este proyecto se investigó la obtención de biodiésel a partir de aceite vegetal de soya usado, empleando 22Hz de ultrasonido a amplitudes de 10, 20, 30, 40 50 y 60% con menores tiempos de reacción a los reportados convencionalmente, usando NaOH como catalizador. Los resultados indican la viabilidad de la transesterificación del aceite vegetal de soya usado para producir biodiésel, ya que se obtuvieron rendimientos entre 82 y 89% en todos los tratamientos, observándose diferencias al emplear ultrasonido con respecto de los controles. Se observó que el ultrasonido disminuye el tiempo de calentamiento y proceso de fabricación del biodiésel en todos los casos, lo que impacta en la reducción de energía utilizada durante la producción del biodiésel. El producto final cumple con los parámetros establecidos en la normativa con respecto de viscosidad cinemática, densidad, porcentaje de cenizas, punto de inflamación y enturbiamiento en todos los tratamientos. Se requiere dar un pretratamiento de secado en todos los casos y, en amplitudes de 50 y 60%, se obtuvo un pH menor de 6. Por ello, es necesario continuar con la investigación empleando tiempos menores para evaluar la calidad del biodiésel en estas amplitudes.

Palabras clave: Aceite vegetal usado, biodiésel, ultrasonido, cavitación

Abstract

In Mexico, millions of liters of processed oil are generated in restaurants. It is a hazardous waste due to its corrosiveness, which implies an economic expense for the special containment service. In the case of an inadequate disposal of this hazardous waste, it can contaminate water, air, and soil. On the other hand, used vegetable oil can be used as raw material in the production of biodiesel. In this project, the production of biodiesel from used soybean vegetable oil was investigated, using 22 Hz ultrasound at amplitudes of 10, 20, 30, 40, 50 and 60% with shorter reaction times than those conventionally reported, using NaOH as a catalyst. The results indicate the viability of the transesterification of used soybean vegetable oil to produce biodiesel, since yields between 82 and 89% were obtained in all treatments, observing differences when using ultrasound with respect to the controls. It was observed that ultrasound reduces the heating time and the biodiesel manufacturing process in all cases, which impacts on the reduction of energy used during the biodiesel production. The final product complies with the parameters established in the regulations regarding kinematic viscosity, density, ash percentage, flash point, and cloudiness in all

treatments. A drying pretreatment is required in all cases and, at amplitudes of 50 and 60%, a pH of less than 6 was obtained. Therefore, it is necessary to continue with the research using shorter times to evaluate the quality of biodiesel in these amplitudes.

Keywords: *Used vegetable oil, biodiesel, ultrasound, cavitation*

Introducción

La creciente demanda de combustibles fósiles en todos los sectores de la sociedad y el impacto ambiental que estos generan han llevado a la búsqueda de opciones ambientalmente aceptables y económicamente competitivas. El biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales constituye una opción con potencial en la reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos, además de que posee características como la capacidad calorífica, similares al diésel fósil (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013; Bousba et al., 2024)

Lo anterior presenta algunos inconvenientes, por ejemplo, los aceites vegetales comestibles como girasol (*Helianthus annuus* L.), soya (*Glycine max*), maíz (*Zea mays*) y palma (Arecáceas) son de bajo costo, alto rendimiento y bajo contenido de azufre. Pero, el uso de dicha materia prima genera competencia con la disponibilidad de productos alimenticios y su producción a gran escala representa un impacto negativo sobre los ecosistemas (Aboelazayem et al., 2017).

El uso de aceites no comestibles como los de *Jatropha curcas* L., semilla de algodón (*Gossypium herbaceum*), Neem de la India (*Azadirachta indica*), entre otros, no compite con los productos alimenticios. No obstante, su disponibilidad es limitada y se solidifican a temperatura ambiente, al igual que las grasas animales, lo cual dificulta el proceso de producción de biodiésel (Pikula et al., 2020).

Los residuos de aceites vegetales de cocina son una opción potencial como materia prima para la producción de biodiésel. Estos residuos son clasificados como peligrosos y, usualmente, los restaurantes deben pagar por el servicio de recolección a empresas que les dan un confinamiento especial, para evitar problemas de salud y contaminación del aire (Sharma et al., 2018), del suelo (Zargar et al., 2012; Yaakob et al., 2013) y del agua (Kabir et al., 2014; Bhatia et al., 2020). Algunos productores mezclan los residuos de aceite vegetal con alimento para ganado con el fin de incrementar las calorías del consumo, lo cual puede generar problemas de salud para estos animales (Tres et al., 2013), así como para las personas que ingieran la carne derivada de animales alimentados con esta mezcla (Félix et al., 2017). Por otro lado, si los residuos de aceite se queman hay una alta probabilidad de formar dioxinas causando cáncer a las personas que inhalen esos gases de combustión (Ben et al., 2018).

La disposición directa de los residuos de aceite vegetal al drenaje provoca taponamientos e inundaciones en las ciudades. Además, se sabe que un litro de aceite puede contaminar 1,000 litros de agua, impactando hasta en un 30% los costos anuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Debido a lo anterior, es importante desarrollar tratamientos para reutilizar los residuos de aceite vegetal de cocina como materia prima de productos nuevos, como el biodiésel (Abdelkader et al., 2022; Awogbemi et al., 2021; Olu-Arotiowa et al., 2022). Si bien, su disponibilidad depende de la región y requieren infraestructura específica para su recolección, tiene beneficios adicionales como la minimización de residuos, reducción del impacto ambiental de las actividades que los generan, además de reducir los suministros de alimentos (Tchoufon et al., 2020).

La producción de biodiésel a partir del aceite usado se puede realizar por tres métodos: Transesterificación (ácida, básica, enzimática y con fluidos supercríticos), pirólisis y micro-emulsificación (Gebremariam et al., 2017; Nisar et al., 2017). La transesterificación de grasas animales y aceites vegetales es el método más utilizado para la producción de biodiésel. En dicho método, los

triglicéridos presentes en la materia prima reaccionan con un alcohol de cadena corta como metanol o etanol, para producir biodiésel. Aquí, es necesario emplear un agente catalizador para incrementar la velocidad de reacción, cuya selección depende de la cantidad de ácidos grasos libres en la materia prima (Ayas et al., 2014). Durante la transesterificación, el radical del alcohol es desplazado por otro alcohol proveniente de un éster que, a su vez, es suministrado por los triglicéridos de las grasas animales o vegetales. El producto principal de la reacción son los ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, que son los componentes de interés del biodiésel (Meher et al., 2006).

La transesterificación ácida es un proceso que consiste en la reacción entre los triglicéridos de la muestra y alcohol acidificado. Los ácidos empleados a nivel experimental son el H_2SO_4 y el HCl. Es de utilidad cuando la materia prima contiene una gran cantidad de ácidos grasos libres. Sin embargo, requiere un tiempo de reacción mayor y temperaturas más altas que la transesterificación básica (alcohol basificado) (Gebremariam et al., 2017; Hassan et al., 2020). Por su parte, el uso de catalizadores básicos (NaOH, KOH) permite realizar la reacción en condiciones de baja presión y temperatura. El proceso de conversión es más rápido y, por lo tanto, ocurre en periodos más cortos (Malabadi et al., 2023). Se ha observado que una concentración de 1% de catalizador básico durante dos horas de reacción, proporciona rendimientos superiores al 90% (Tchuifon et al., 2020).

En cuanto a la transesterificación enzimática, se emplea la enzima lipasa como catalizador de la reacción. El aceite interactúa con la enzima durante la reacción para formar un complejo enzima-sustrato. En etapas posteriores, se produce una forma acilada de la enzima, que forma un complejo con metanol o etanol. El rearreglo de este complejo produce biodiésel y permite regenerar la enzima de interés (Kalita et al., 2022). Una de sus principales ventajas es el corto tiempo de reacción y nulo riesgo de saponificación, además de no utilizar reactivos o productos químicos (Malabadi et al., 2023).

A diferencia de los anteriores métodos catalíticos convencionales, la transesterificación mediante fluidos supercríticos no se ve afectada por la cantidad de ácidos grasos libres y el contenido de humedad presentes en la materia prima. Los rendimientos óptimos de esta transesterificación son alrededor del 98% (Aboelazayem et al., 2017). Sin embargo, la baja eficiencia energética del proceso y la necesidad de condiciones de alta temperatura y presión son desventajas operacionales (Pikula et al., 2020). De manera similar, la pirólisis de aceite vegetal o grasa animal, genera una fracción líquida con características similares a las del diésel. Sin embargo, requiere procesamiento posterior para la separación de las diferentes fracciones (Gebremariam et al., 2017).

La transesterificación asistida con energía sonoquímica ha tomado relevancia en los últimos años. Dicha energía se define como la aplicación de energía ultrasónica (superior a la audible por el ser humano equivalente a 20 kHz (Sáez-Bastante et al., 2024). Las ondas ultrasónicas crean la formación, el crecimiento y el colapso implosivo de burbujas en el líquido, lo que se denomina cavitación. Este fenómeno genera energía exclusiva para las reacciones por explosión de las burbujas con alta presión y temperatura que permite una transferencia de masa más rápida en un sistema (Sankaranarayanan et al., 2013).

Se sabe que el efecto de las ondas ultrasónicas se encuentra en función de su intensidad (W/cm^2) y de su frecuencia (kHz). Aplicando estos conceptos a la transesterificación, una frecuencia más alta hace que la sonda de ultrasonido vibre más rápido, lo que genera una mayor superficie para mezclar el alcohol, los triglicéridos y las burbujas de cavitación más pequeñas (Topare et al., 2015). Además, esa sonicación contribuye a la distribución uniforme de la temperatura dentro de la mezcla de reacción, minimizando los gradientes de temperatura y evitando puntos calientes localizados, que pueden ser problemáticos en los métodos de calentamiento convencionales (Milano et al., 2024).

El efecto de cavitación mejora la transferencia de masa y aumenta la velocidad de la reacción de transesterificación, reduciendo los tiempos de reacción y mejorando el rendimiento del biodiésel. Se

realizó una revisión bibliográfica sobre investigaciones relacionadas con la producción de biodiésel empleando ultrasonido. La Tabla 1 presenta los resultados encontrados.

Tabla 1. Comparación de algunos estudios donde se empleó ultrasonido en la producción de biodiésel

	(Refaat et al., 2008)	(Hingu et al., 2010)	(Sankaranarayanan et al., 2013)	(Ashok et al., 2024)	(Thanh et al., 2010)	(Salamatina et al., 2010)	(Milano et al., 2024)	
Catalizador	NaOH y KOH	KOH	Mezcla de óxidos derivados de CaAl_2 -Hidróxidos dobles estratificados	Residuos de cáscara de banana calcinada	KOH	BaO SrO	KOH	
Tipo de aceite	Aceite de girasol	Aceite de cocina	Aceite de girasol usado dos veces	Aceite usado	Aceite de canola	Aceite de palma	Aceite de palma	Aceite de <i>Ceiba pentandra</i>
Concentración del catalizador, % masa	0.5 y 1.0	1	5	1.8±0.09 mg KOH/g	0.7	2.8	2.8	1
Relación molar alcohol-aceite	3:1, 6:1 y 9:1	6:01	4:01	2:01	5:01	9:01	9:01	60%
Temperatura, °C	25 y 65	45	40	65	-	65	65	60
Frecuencia, kHz	20	20	34 ± 3	-	20	20	20	20
Amplitud, %	100	-	-	-	-	70	80	35
Tiempo, min	5	40	90	25	50	<50	<50	50
Rendimiento o eficiencia de conversión, %	98.94	90	85	72.25	99	>95	>95	98.76

Como se observa, los rendimientos obtenidos han sido variables, según el tiempo de reacción, la frecuencia y el tipo de catalizador. Por tanto, no se sabe cuáles son las condiciones óptimas en donde se obtiene la mayor eficiencia en el proceso de transesterificación asistida por ultrasonido.

De acuerdo con estas investigaciones, el objetivo del presente trabajo fue el de estudiar la reacción de transesterificación catalizada por NaOH, a una temperatura de 60°C y el efecto del ultrasonido a una frecuencia de 22Hz, modificando la amplitud del equipo de ultrasonido utilizado, con el objetivo de tener la máxima conversión de biodiésel a partir de residuos de aceite vegetal en el mínimo tiempo. El diseño experimental se explica en el apartado de metodología.

Materiales y métodos

Obtención y caracterización del aceite utilizado como materia prima

Se utilizó aceite vegetal usado proveniente de un restaurante de comida japonesa (sushi), caracterizado por emplear siempre aceite de soya. Este aceite tuvo un pretratamiento para la eliminación de residuos gruesos y finos. Posteriormente, fue caracterizado mediante pH, humedad, cenizas e índice de acidez (Figura 1). La determinación de sólidos gruesos se realizó mediante la metodología ASTM D1796: Se colocaron 150 mL de aceite en envases de plástico de 200 mL y fueron centrifugados a 800 rpm durante 12 minutos. Posteriormente, el aceite se filtró a través de una malla

metálica de 0.425 mm y para los residuos finos se utilizó papel filtro Whatman 1005-042, con poros de 2.5 micras, caudal de 0.15 s/mL cm², grado 5 (125 mm)⁷. Se procedió a medir el volumen del aceite filtrado y la masa de los residuos finos (ASTM-D1796, 2022). El aceite ya filtrado y centrifugado fue el empleado como materia prima para la producción de biodiésel.

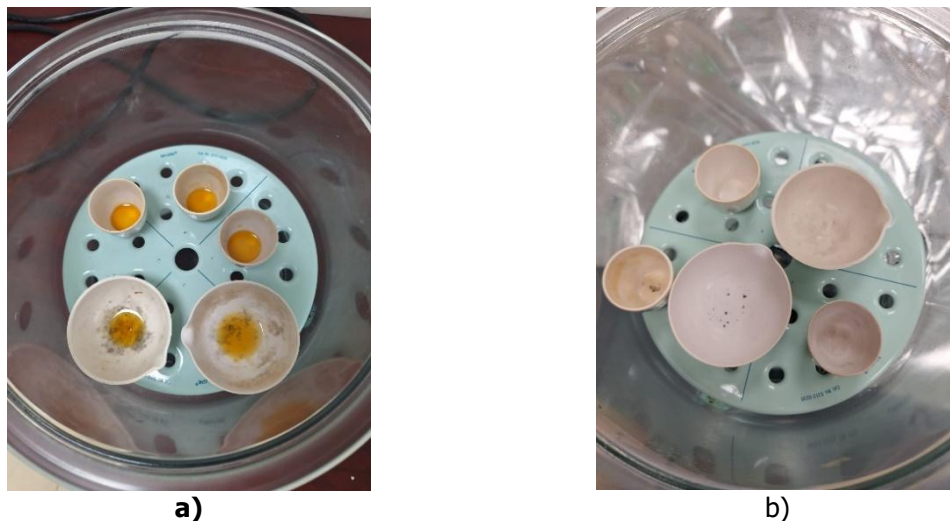


Figura 1. a) Determinación de humedad b) Determinación de cenizas

El pH se midió empleando un potenciómetro marca Bante Instruments previamente calibrado, manteniendo la temperatura a 22°C y agitación constante (ASTM-D6304, 2020). La humedad se determinó mediante los procedimientos gravimétricos de ASTM-D6304 (2020), que se basan en utilizar la Ec. 1. Por su parte, las cenizas se determinaron calentando 2 mL de aceite o biodiésel a 550°C durante una hora, calculando el porcentaje de cenizas mediante la Ec. 2 (ASTM-D482, 2019) (Figuras 1a,b). Para la determinación del índice de acidez se realizó la titulación del aceite mediante NaOH al 1% con fenolftaleína como indicador para poder aplicar la Ec. 3 (ASTM-D664-06, 2007) (Figura 2).

$$Hum(\%) = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h} \right) (100\%) \quad \text{Ecuación 1}$$

M_h = Masa⁸ inicial de la muestra, incluyendo el agua presente en ella, g

M_s = Masa seca de la muestra, después de haber sido deshidratada en el horno, g

$$Cenizas(\%) = \frac{(M_1 - M_2)}{M - M_2} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

M_1 = Masa del crisol más las cenizas, g

M_2 = Masa del crisol seco, g

M = Masa inicial de la porción de muestra, g

$$IA = \frac{(N)(V)(39.997)}{P} \quad \text{Ecuación 3}$$

⁷ Whatman Círculos de papel de filtro cualitativo 1005-125, 2.5 micras, 94 s/100 mL/pulgada cuadrada, grado 5, diámetro de 125 mm (paquete de 100, <https://www.amazon.com.mx/Whatman-Filter-Paper-Grade-Pack/dp/B007FXLDOW>)

⁸ Masa y peso no son sinónimos. La masa es una propiedad de los cuerpos y se mide en kg y el peso es una fuerza que se aplica a los cuerpos y se mide en N. La confusión provino del uso de una báscula que aprovecha la fuerza de la gravedad terrestre para medir la masa de un cuerpo pesándolo [Nota de los(as) editores(as)]

donde:

N = Normalidad de la solución de NaOH utilizada en la titulación de la muestra, N

V = Volumen de NaOH gastados en la titulación de la muestra, mL

39.997 = Equivalente de NaOH

M = Masa de la muestra, g



Figura 2. Determinación del índice de acidez del aceite

Obtención de biodiésel y diseño experimental

Para realizar el proceso completo de esterificación, se requiere agregar metanol en exceso. Se ha reportado una relación molar mínima de 3:1 de metanol/aceite (Refaat et al., 2008), así como relaciones molares de hasta 12:1 (Soon et al., 2013). Por lo anterior, fue necesario calcular la masa de ácidos grasos en el aceite utilizado, por lo que se consideró lo reportado por Lafont et al. (2014) quien investigó la composición de ácidos grasos en siete diferentes aceites de soja, sin encontrar diferencia significativa entre ellos, por lo cual se tomaron los valores promedio reportados en la Tabla 2. Con esos valores se calculó la masa molar del aceite (Tabla 3).

Tabla 2. Descripción de ácidos grasos contenidos en el aceite de soja

Ácido graso	Fórmula química	Masa molecular	Fracción molar	Mmi.xi
Ácido palmítico	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256.43 g/mol	11.29 ±0.2	2895.09 g/mol
Ácido esteárico	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284.48 g/mol	4.11 ±0.1	1169.21 g/mol
Ácido oleico	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282.46 g/mol	23.35 ±0.5	6595.44 g/mol
Ácido linoleico	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	288.45 g/mol	53.01 ±0.3	15290.73 g/mol
Ácido linolénico	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	278 g/mol	5.91 ±0.04	1642.98 g/mol
Σ (MMi.Xi) +38				27631.46 g/mol

Tabla 3. Relación metanol/aceite utilizada en esta investigación

	Masa molar (kg/mol)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Mol por volumen usado	Relación metanol/aceite
Aceite de soja usado	27.63	869	0.001	0.869	5.49
Metanol	0.03204	792	0.0002	0.1584	

El uso de catalizadores básicos, como NaOH e KOH, permite llevar a cabo las reacciones de interés bajo condiciones de presión estándar y temperaturas entre 50 y 65°C y el proceso de conversión es más rápido, con tiempos que oscilan entre 60 y 90 minutos (Ferella et al., 2010; Malabadi et al., 2023; Ramezani et al., 2010; Refaat y El Sheltawy, 2008). Por lo anterior, el índice de acidez mide la cantidad de ácidos grasos libres que tiene el aceite. En esta investigación esta información indicó agregar 3.5g de NaOH por litro de aceite usado, lo que sería equivalente el 3% de NaOH para que se lleve a cabo la reacción completa de transesterificación. La relación molar metanol/aceite fue de 5.49, lo que equivalía a que en un litro de aceite usado se agregaran 200 mL de metanol y 3.5 g de NaOH.

La reacción se llevó a cabo a 60°C con y sin ultrasonido, se trabajaron seis diferentes amplitudes y dos controles sin ultrasonido (Tabla 4).

Tabla 4. Tratamientos establecidos para evaluar el efecto del ultrasonido sobre el tiempo de producción de biodiésel y su rendimiento, n=3. Todos los tratamientos utilizaron NaOH como catalizador

Tratamiento	Amplitud (%)	Tiempo de calentamiento (min)
Control 1	Sin ultrasonido	60
Control 2	Sin ultrasonido	30
1	10	30
2	20	30
3	30	30
4	40	30
5	50	30
6	60	30

Se utilizó un homogeneizador marca *OPTIC IVYMEN SYSTEM* el cual trabaja a 22Hz a un rango de amplitud de 0 a 100% y cuenta con un sensor de temperatura. Se han reportado trabajos a partir de 20Hz con rendimientos arriba del 85% (Hingu et al., 2010; Milano et al., 2024; Refaat et al., 2008; Salamatinia et al., 2010; Thanh et al., 2010), por lo que se consideró viable el estudio a 22Hz. Por este motivo, los parámetros que permanecieron constantes fueron la frecuencia de 22Hz, temperatura de 60°C, concentración de NaOH de 3% y un tiempo de 30 min, a fin de evaluar el efecto del ultrasonido a menor tiempo del reportado con rendimientos mayores al 90%. Se hizo un diseño factorial con seis niveles, el factor es la amplitud y los niveles son 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60%. Se implementaron dos tratamientos a 0% de amplitud como controles, para poder comparar el efecto del ultrasonido. Se ha reportado el tiempo óptimo de reacción de transesterificación entre 60 y 90 min con rendimientos mayores al 90% y, en este trabajo, se usó 60 min como tiempo máximo. Las variables de respuesta fueron rendimiento de biodiésel, masa de glicerina, pH y los parámetros de caracterización del biodiésel estandarizado a nivel internacional (Tabla 4) (Figura 3).

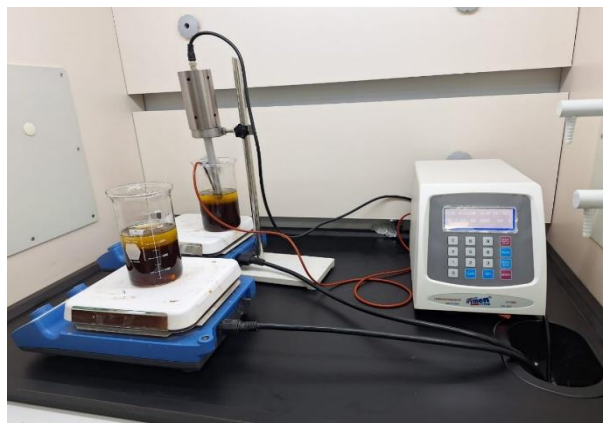


Figura 3. Producción de biodiésel a partir de aceite usado con y sin ultrasonido

Caracterización del biodiésel

Para la caracterización del biodiésel se siguieron los métodos de prueba normalizados para el diésel como combustible. Los parámetros establecidos fueron: La viscosidad dinámica y cinemática a 40°C, punto de inflamación y punto de niebla, densidad a 15°C, volumen de biodiésel y rendimiento (Tabla 5). Para la evaluación de la viscosidad cinemática, Ec. 4, fue necesario medir la densidad y la viscosidad dinámica a 40°C. La viscosidad dinámica se midió en un viscosímetro rotacional (Figura 4a) a 600 rpm, en unidades de mPa.s. Se utilizaron 400 mL de biodiésel, se calentaron a 40°C y se

colocaron en un vaso de precipitado de 500 mL, angosto y alto, con un diámetro de 12 cm (ASTM-D445-21, 2021). También se midió la densidad de la muestra a 40 y 15°C, midiendo un volumen determinado y pesando su masa mediante la Ec. 5 (ASTM-D127-19, 2019).

Tabla 5. Parámetros de caracterización de biodiésel

Propiedad	Unidades	Método estándar	Precisión	Norma ASTM 6751 [23]
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	ASTM D 445	± 0.01	1.9-6.0
Densidad a 15°C	mg/m ³	ASTM D 127	± 0.1	870-890
Índice de acidez	mg KOH/g	ASTM D 664 y EN 14111	± 0.001	Máx 0.8
Punto de inflamación	°C	ASTM D 93	± 0.100	Mín 130
Punto de enturbiamiento	°C	ASTM D 2500	± 0.100	(-3) -(12)
Glicerina libre	% masa	ASTM D 6584	N.E.	Máx 0.02
Humedad	%	EN 14214	±0.001	0.05% (500ppm)
Cenizas	%	NOM-L-63-CT-1981)	±0.002	0.15%

N.E. = no especificado

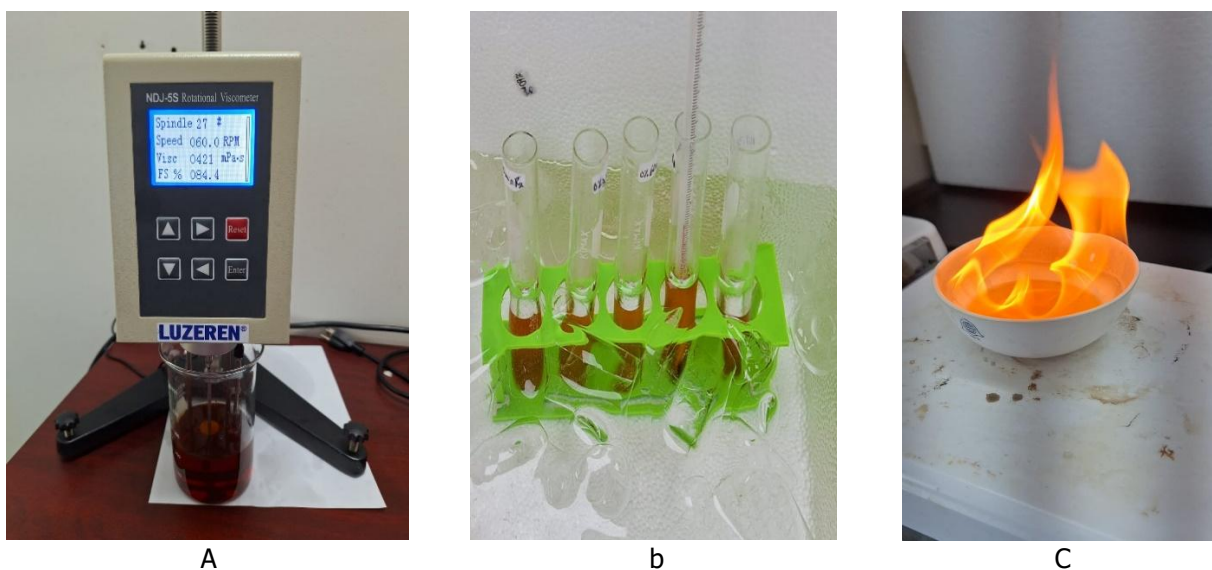


Figura 4. a) Viscosímetro rotacional marca Luzeren para determinar viscosidad dinámica, b) Prueba de punto de niebla, c) Prueba de punto de inflamación

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

γ =Viscosidad cinemática, kg/m.s

μ =Viscosidad dinámica, Mpa.s

ρ : Densidad, kg/m³

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 5}$$

ρ : Densidad, kg/m³

m = Masa, kg

V = Volumen, m³

Se registró la temperatura a la que se observó el enturbiamiento del biodiésel o punto de niebla, sometiendo las muestras a -1°C , en un baño de agua congelada (ASTM-D2500-02, 2002) (Figura 3b). Para la determinación del punto de inflamación, se colocaron 20 mL de biodiésel en un crisol, el cual fue calentado a temperaturas mayores de 150°C . Una vez que se alcanzó la temperatura fijada, se le colocó una flama y se registró la temperatura a la que se encendió el biodiésel, siendo esta equivalente al punto de inflamación (ASTM-D93, 2020) (Figura 3c). Los volúmenes de biodiésel y glicerina se midieron empleando una probeta de 250 mL y el rendimiento se calculó empleando el volumen inicial de aceite y el volumen de biodiésel obtenido, mediante la Ec. 6.

$$RB = \frac{V_{\text{biodiesel}}}{V_{\text{aceite}}} (100) \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

RB = Rendimiento biodiésel, %

$V_{\text{biodiésel}}$ = Volumen obtenido del biodiésel, mL

V_{aceite} = Volumen utilizado del aceite, mL

Análisis estadístico

Se midieron la media y la desviación estándar de cada uno de los tratamientos. Se realizó un análisis de varianza, ANDEVA, de una vía ($\alpha = 0.05$) y la prueba de Tukey *post hoc* para la comparación de medias. Lo anterior para cada una de las variables de respuesta analizadas (densidad, punto de inflamación y punto de niebla, volumen de biodiésel, volumen de glicerina, y rendimiento). Considerando el bajo número de réplicas, los residuos de los ANDEVA fueron evaluados en cuanto a aleatoriedad y normalidad para garantizar que las pruebas estadísticas fueran paramétricas. Para todo lo anterior se utilizó el software Minitab 17 para Windows.

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica de la materia prima

Se analizó aceite de soya usado en un restaurante de comida japonesa de la localidad. Los resultados de estos parámetros y de otras determinaciones pueden observarse en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del aceite usado de soya, proveniente de un restaurante

Parámetro	Resultado
Tipo de aceite	Soya
Humedad (%)	0.15 ± 0.03
Cenizas (%)	0.25 ± 0.02
pH	5 ± 0.20
Índice de acidez (mg NaOH/kg de aceite)	3.50 ± 0.10
Sólidos finos (mg/kg)	3 ± 0.01
Sólidos gruesos (mg/kg)	500 ± 10.00
Viscosidad dinámica a 40°C (mPa.s)	45 ± 1.00
Densidad (kg/m^3)	0.869
Viscosidad cinemática (mm^2/s)	51

La caracterización del aceite indicó que no se requiere un pretratamiento para la fabricación del biodiésel, ya que el índice de acidez fue de 3.5 mg de NaOH/kg de aceite. La relación utilizada para la fabricación del biodiésel fue de 1000 mL de aceite usado por 200 mL de metanol a una temperatura de 60°C . Además, el contenido de cenizas indica que los constituyentes inorgánicos y de sólidos finos son menores al 1%, por lo que la fabricación del biodiésel será con un contenido de impurezas no relevante.

Fabricación y caracterización del biodiésel

La teoría establece que a mayor frecuencia de ultrasonido se obtiene mayor cavitación en la reacción de transesterificación, lo que permite disminuir el tiempo de reacción y obtener altos rendimientos de biodiésel. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que el aumento en la amplitud no precisamente conlleva a una mejora en el rendimiento, ya que se utilizaron amplitudes que van en un rango de 10-60% y el mayor rendimiento obtenido fue de 90.25% utilizando 30% de amplitud durante 30 minutos de reacción de transesterificación (Tabla 7).

Tabla 7. Caracterización de viscosidad, pH y porcentaje de rendimiento del biodiésel obtenido con y sin ultrasonido

Tratamiento	Amplitud (%)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)	Viscosidad dinámica a 40°C (mPa.s)	Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	pH
CONTROL 1	0%	60	88.40 ± 0.14	293 ± 2.85	3.29 ± 0.010	6.35 ± 0.21
CONTROL 2	0%	30	86.00 ± 0.35	275 ± 1.79	4.89 ± 0.005	7.85 ± 0.21
Tratamiento 1	10%	30	85.30 ± 0.14	430 ± 7.10	5.00 ± 0.003	9.80 ± 0.28
Tratamiento 2	20%	30	89.95 ± 0.50	418 ± 6.23	4.82 ± 0.006	8.80 ± 0.23
Tratamiento 3	30%	30	90.25 ± 0.02	423 ± 5.34	4.90 ± 0.004	7.85 ± 0.21
Tratamiento 4	40%	30	88.10 ± 0.27	422 ± 4.90	4.91 ± 0.003	6.80 ± 0.27
Tratamiento 5	50%	30	89.85 ± 0.35	424 ± 1.10	4.93 ± 0.002	5.85 ± 0.21
Tratamiento 6	60%	30	86.45 ± 0.64	422 ± 5.08	4.92 ± 0.005	4.90 ± 0.14
Tratamiento 7	60%	10	87.05 ± 0.35	420 ± 1.35	4.95 ± 0.008	5.45 ± 0.12

Es probable que esto se deba a que a amplitudes bajas no se genera la energía de activación necesaria para llevar a cabo la reacción de transesterificación, mientras que a amplitudes elevadas pueden hacer que la punta del sonotrodo se llene de burbujas, lo que produce coalescencia de burbujas y desacoplamiento acústico. Estos criterios actúan para reducir el número de burbujas de cavitación activas. Esto indicaría que se debe encontrar un punto intermedio (optimización) en donde se logre mejorar el efecto de dispersión y transferencia de masa de los ultrasonidos, al tiempo que permita que las dos capas de reacción inmiscibles se emulsionen por completo (Golmakani et al., 2022).

La amplitud máxima utilizada fue de 60% y se obtuvo un rendimiento de 86.45% en un tiempo de 30 minutos y de 87.05% cuando la reacción ocurrió en 10 minutos. Por tanto, se podría establecer que es posible disminuir el tiempo de reacción e incrementar los rendimientos de biodiésel. En efecto, Sáez-Bastante et al. (2024) demostraron que un aumento en la frecuencia aplicada a la mezcla de reacción da lugar a resultados ligeramente mejores, para los mismos tiempos de reacción evaluados en la presente investigación. Los autores obtuvieron un rendimiento de biodiésel de 99.28% bajo las siguientes condiciones: 100% de amplitud durante 15 minutos de reacción, utilizando 1.25% de catalizador KOH. Después de 15 min de reacción, los resultados tanto para biodiésel como para glicéridos se encontraban dentro de la norma europea EN 14214 para todas las frecuencias utilizadas.

Por otro lado, los rendimientos de biodiésel empleando el método convencional (sin ultrasonido) fueron de 88.5% y 86% en tiempos de reacción de 60 y 30 minutos, respectivamente. Esto permitiría inferir que, para incrementar los rendimientos, es necesario aumentar la temperatura de reacción. Cuando a la reacción de transesterificación se le aplicó ultrasonido se alcanzaron rendimientos superiores al método convencional: 89.95, 90.25 y 89.85% a 20, 30 y 50% de amplitud. El efecto del tratamiento por ultrasonido en el porcentaje del rendimiento del biodiésel presentó diferencia significativa entre todos los experimentos en el rendimiento de todos los tratamientos aplicados ($P < 0.05$) (Tabla 7).

Los rendimientos obtenidos en este trabajo son superiores a los que reporta Vital-López et al. (2023) quienes utilizaron aceite de girasol y obtuvieron un rendimiento de 65.32% empleando un tiempo de reacción de 30 minutos, KOH como catalizador y una temperatura de reacción de 22°C. Los valores de viscosidad del biodiésel fueron de $4.64 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y la densidad fue de 0.88 g cm^{-3} . Sin embargo, cuando incrementaron la temperatura de reacción a 50°C los rendimientos incrementaron a 84.14% y los valores de viscosidad y densidad cambiaron: $4.04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y 0.87 g cm^{-3} . No obstante, los mejores rendimientos (93.40%) los lograron alcanzar cuando duplicaron el tiempo de reacción (60 minutos), utilizando una relación molar metanol/aceite de 6:1 y una frecuencia de 24 kHz. En esta investigación se alcanzaron rendimientos similares a los optimizados por Vital-López et al. (2023), con una diferencia de 3.15%, incrementando 10°C la temperatura y disminuyendo a la mitad de tiempo (30 minutos) la reacción de transesterificación.

Otro trabajo que obtuvo resultados similares a los de la presente investigación fue el de Golmakani et al. (2022) quienes emplearon aceite de oliva no comestible y el mismo tiempo de reacción (30 minutos). Reportaron un rendimiento de 92.69%, lo que implica una diferencia de 2.44% de rendimiento de biodiésel, comparado con los resultados de esta investigación. Estos autores, además, consideraron tres niveles de potencia de ultrasonido (30, 90, 150 W), relaciones molares metanol/aceite (3, 9, 15), concentraciones de catalizador (0.5, 1.0, 1.5%), tiempos de ultrasonido (15, 30, 45 min) y temperaturas de reacción (45, 55, 65°C); encontrando que cuando se utilizó un nivel de potencia de ultrasonido de 90 W, una relación molar metanol/aceite de 9, una concentración de catalizador de 1.0%, un tiempo de ultrasonido de 30 min y una temperatura de reacción de 55°C se generaron los mayores rendimientos. La viscosidad obtenida fue de $4.201 \text{ mm}^2/\text{s}$ y la densidad de 892.996 kg/m^3 . Por tanto, concluyeron que la optimización de las condiciones de reacción de la operación de ultrasonido puede aumentar eficazmente el rendimiento del biodiésel, al mismo tiempo que reduce el consumo de energía (4,775 kWh/kg) y reduce el tiempo de reacción (30 min).

Con respecto de la viscosidad cinemática a 40°C no se presentó diferencia significativa entre los tratamientos con ultrasonido ($P > 0.05$), ya que estuvieron dentro del rango de 1.9 y $6 \text{ mm}^2/\text{s}$ en todos ellos; sin embargo, sí aumentó con respecto a los controles. Todas las viscosidades obtenidas con los tratamientos de ultrasonido cumplieron con el rango establecido en la norma. La viscosidad dinámica a 40°C no presentó diferencia significativa entre los tratamientos por ultrasonido ($P > 0.05$), pero sí se observó un incremento de aproximadamente 200 mPa.s con respecto de los controles (Tabla 7).

El pH aceptado del biodiésel se reporta entre 6 y 8.4 (EN-14214, 2008; Medina, 2005; Pandey et al., 2012) y, en este proyecto, se observó que el pH disminuyó conforme la amplitud del ultrasonido aumentaba, mostrando diferencia significativa entre los tratamientos ($P < 0.05$). Se vio que a amplitudes de 50 y 60% el pH estuvo por debajo de 6, límite mínimo permitido (Tabla 7).

En la Tabla 8 se observó una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) en el porcentaje de humedad del biodiésel obtenido ($P < 0.05$), los cuales fueron valores menores del 6% en todos los tratamientos con y sin ultrasonido. La EN 14214 normaliza un contenido máximo de agua de 500 ppm o 0.05% de humedad, por lo que fue necesario reducir la humedad calentando las muestras de biodiésel a 100°C durante dos horas para, posteriormente, hacer las pruebas de punto de inflamación y punto de niebla.

El contenido de cenizas en los controles fue de 0.06 y 0.07%, los tratamientos con ultrasonido de amplitud de 10%, 30, 40% y 60% no presentaron diferencia significativa ($P > 0.05$). Sin embargo, en amplitudes del 20% y 50% presentaron valores de 0.17 y 0.12% respectivamente, siendo el del 20% de amplitud, el único que no cumple con la norma (NOM-L-63-CT, 1981) que indica un rango de 0.002 a 0.15% (Tabla 8).

El punto de niebla osciló entre 0.5 y 2°C, observándose el valor máximo de 2°C a una amplitud de 30%, el cual disminuyó conforme se fue incrementando la amplitud hasta llegar a 0°C con 60%. Con las amplitudes de 10 y 20% se obtuvieron valores menores a los controles. En todos los tratamientos se obtuvieron valores dentro del rango permitido de -3°C a 12°C (Tabla 8).

Los tratamientos sin ultrasonido presentaron un punto de inflamación de 190°C, observándose que el tratamiento por ultrasonido presenta una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$), ya que conforme aumentó la amplitud se redujo el punto de inflamación entre 180 y 170°C en amplitudes del 10 al 50%, observándose un incremento a 190°C en amplitudes de 60%. En todos los tratamientos se cumple con la restricción de mínimo 130°C (Tabla 8).

Tabla 8. Caracterización de humedad, cenizas, densidad, punto de niebla e inflamación del biodiésel obtenido con y sin ultrasonido

Tratamiento *	Amplitud (%)	Tiempo (min)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Punto(°C)		Densidad	
					Niebla	Inflamación	40°C (kg/m ³)	15°C (kg/m ³)
CONTROL 1	0%	60	2.96 ±0.04	0.06 ±0.001	1.50	190.00	857.76 ±0.10	866.24 ±0.10
CONTROL 2	0%	30	4.29 ±0.07	0.07 ±0.002	0.75	190.00	864.22 ±0.05	872.38 ±0.09
Tratamiento 1	10%	30	4.08 ±0.16	0.03 ±0.001	1.00	190.00	859.37 ±0.10	872.66 ±0.10
Tratamiento 2	20%	30	2.71 ±0.11	0.17 ±0.001	0.50	180.00	866.62 ±0.03	872.66 ±0.05
Tratamiento 3	30%	30	2.29 ±0.08	0.04 ±0.002	2.00	180.00	862.1 ±0.04	869.03 ±0.05
Tratamiento 4	40%	30	2.77 ±0.06	0.05 ±0.002	1.00	166.00	858.67 ±0.06	874.97 ±0.09
Tratamiento 5	50%	30	5.95 ±0.12	0.12 ±0.001	1.00	170.00	860.08 ±0.07	871.77 ±0.05
Tratamiento 6	60%	30	5.34 ±0.21	0.07 ±0.001	0.00	190.00	858.37 ±0.10	878.6 ±0.10
Tratamiento 7	60%	10	5.31 ±0.16	0.06 ±0.002	0.00	190.00	848.1 ±0.10	869.89 ±0.10

*Ver Nomenclatura al final del artículo

Los valores de densidad a 15°C indican cumplimiento con la norma en todos los tratamientos con ultrasonido, excepto en el control 2, que se dio tratamiento sin ultrasonido durante 30 min, el cual presentó 866kg/m³, indicando 4kg/m³ menos del límite inferior permitido que era de 870 kg/m³ (Tabla 8).

Conclusiones y recomendaciones

Se observó que la reacción de transesterificación asistida por ultrasonido tiene un efecto significativo en la producción de biodiésel, ya que el reducir 30 minutos la reacción de transesterificación y utilizar diferentes amplitudes de ultrasonido, tuvo resultados similares al proceso de calentar durante 60 minutos a 60°C sin ultrasonido. Esto impacta en un proceso más rápido y de menor consumo energético debido a la reducción del calentamiento. Se concluye que es viable producir biodiésel a partir del aceite usado de soya con un menor tiempo de reacción de esterificación comparado con el método convencional, lo cual impacta en la reducción de costos del proceso.

Por otro lado, se recomienda continuar con la investigación, reduciendo el tiempo de exposición al ultrasonido, a fin de evaluar el efecto del tiempo en los rendimientos de biodiésel. Con respecto de la humedad, es necesario aplicar un tratamiento térmico para alcanzar los porcentajes aceptados por la norma. Como desafío local se tiene que las regulaciones pueden no tener en cuenta las variaciones regionales, como el clima y la logística, que pueden afectar la calidad del biodiésel. Por ejemplo, el alto contenido de agua en el biodiésel ha sido un problema sistémico en ciertas regiones de Brasil, impactando el cumplimiento de las normas nacionales (Oliveira et al., 2021). Si bien estas regulaciones tienen como objetivo mejorar la calidad y sostenibilidad del biodiésel, los desafíos actuales en la implementación y las disparidades regionales ponen de relieve la necesidad de marcos regulatorios adaptativos que tengan en cuenta las condiciones locales.

Nomenclatura

CONTROL 1.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 60 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento no se aplicó ultrasonido
CONTROL 2.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento no se aplicó ultrasonido
Tratamiento 1.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 10% de amplitud
Tratamiento 2.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 20% de amplitud
Tratamiento 3.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 30% de amplitud
Tratamiento 4.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 40% de amplitud
Tratamiento 5.	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 50% de amplitud
Tratamiento 6	Tratamiento a 60°C, con un tiempo de 30 min, con 3.5% de NaOH, y una relación metanol/aceite de 5.5:1. A este tratamiento se aplicaron 22Hz de frecuencia y 60% de amplitud

Reconocimientos

Este trabajo surgió del proyecto "Evaluación del efecto de ultrasonido con catalizador químico en la producción de biodiésel a partir de aceite usado", el cual fue financiado por la Universidad Tecnológica de Culiacán, en la convocatoria de proyectos internos de investigación 2024.

Referencias bibliográficas

- Aboelazayem, O., Gadalla, M., Saha, B. 2017. Optimising biodiesel production from high acid value waste cooking oil using supercritical methanol. In: SEEP 2017 – Proceedings of the 10th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection. Pp: 57-66. University of Maribor Press, Maribor. ISBN 9789612860646. URI: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/163032>
- Ashok, C., Sankarajan, E., Kumar, P., Janani, G., Raj, A., Muthuvelu, K. S., Rangasamy, G. 2024. Ultrasound-assisted transesterification of waste cooking oil to biodiesel utilizing banana peel derived heterogeneous catalyst. *Biotechnology for Sustainable Materials*. 1(5):1-14. 10.1186/s44316-024-00004-z
- ASTM-D93. 2020. Standard test methods for flash point by Pensky-Martens closed cup tester.
- ASTM-D127-19. 2019. Standard test method for drop melting point of petroleum wax, including petrolatum.
- ASTM-D445-21. 2021. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity).
- ASTM-D482. 2019. Standard test method for ash from petroleum products, <https://doi.org/10.1520/D0482-19>
- ASTM-D664-06. 2007. Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration.
- ASTM-D1796. 2022. Standard test method for water and sediment in fuel oils by the centrifuge method (laboratory procedure).
- ASTM-D2500-02. 2002. Standard test method for cloud point of petroleum products.
- ASTM-D6304. 2020. Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric Karl Fischer titration.
- Ayas, N., Yilmaz, O. 2014. Catalytic esterification and transesterification reaction of high acidic value waste oil by microwave heating. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 34(2):575-581. <https://doi.org/10.1002/ep.11985>
- Awogbemi, O., Von-Kallon, D.V., Aigbodion, V.S. 2021. Trends in the development and utilization of agricultural wastes as heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Journal of the Energy Institute*. 98:244-258. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.06.017>

- Ben-Hassen Trabelsi, A., Zaafour, K., Baghdadi, W., Naoui, S., Ouerghi, A. 2018. Second generation biofuels production from waste cooking oil via pyrolysis process. *Renewable Energy*. 126:888-896. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.002>
- Bhatia, S.K., Gurav, R., Choi, T.-R., Kim, H.J., Yang, S.-Y., Song, H.-S., Park, J.Y., Park, Y.-L., Han, Y.-H., Choi, Y.-K., Kim, S.-H., Yoon, J.-J., Yang, Y.-H. 2020. Conversion of waste cooking oil into biodiesel using heterogenous catalyst derived from cork biochar. *Bioresource Technology*. 302:122872. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122872>
- Bousba, D., Sobhi, C., Zouaoui, E., Rouibah, K., Boublia, A., Ferkous, H., Haddad, A., Gouasmia, A., Avramova, I., Mohammed, Z., Parvulescu, V.I., Yadav, K.K., Hasan, M., Cabral-Pinto, M.M.S., Elboughdiri, N., Benguerba, Y. 2024. Efficient biodiesel production from recycled cooking oil using a NaOH/CoFe₂O₄ magnetic nano-catalyst: Synthesis, characterization, and process enhancement for sustainability. *Energy Conversion and Management*. 300:118021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.118021>
- EN-14214. 2008. Improvements needed for the biodiesel standard en 14214.
- Félix, S., Araújo, J., Pires, A.M., Sousa, A.C. 2017. Soap production: A green prospective. *Waste Management*. 66:190-195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.036>
- Gebremariam, S.N., Marchetti, J.M. 2017. Biodiesel production technologies: Review. *AIMS Energy*. 5(3):425-457. <https://doi.org/10.3934/energy.2017.3.425>
- Golmakani, M.T., Dehghan, L., Rahimizad, N. 2022. Biodiesel production enhanced by ultrasound-assisted esterification and transesterification of inedible olive oil. *Grasas y Aceites*. 73(1):12. [10.3989/gya.1233202](https://doi.org/10.3989/gya.1233202)
- Hassan, A.A., Smith, J.D. 2020. Investigation of microwave-assisted transesterification reactor of waste cooking oil. *Renewable Energy*. (162):1735-1746. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.123>
- Hingu, S.M., Gogate, P.R., Rathod, V.K. 2010. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*. 17(5):827-832. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.010>
- Kabir, I., Yacob, M., Radam, A. 2014. Households' awareness, attitudes and practices regarding waste cooking oil recycling in Petaling, Malaysia. *Journal of Environmental Science, Toxicology, and Food Technology*. 8(10):45-51. [10.9790/2402-081034551](https://doi.org/10.9790/2402-081034551)
- Kalita, P., Basumatary, B., Saikia, P., Das, B., Basumatary, S. 2022. Biodiesel as renewable biofuel produced via enzyme-based catalyzed transesterification. *Energy Nexus*. 6(2):100087. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100087>
- Lafont, J.J., Durango, L.C., Aramendiz, H. 2014. Estudio químico del aceite obtenido a partir de siete variedades de soya (*Glycine max* L.). *Información Tecnológica*. 25(2):79-86. [doi: 10.4067/S0718-07642014000200009](https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000200009)
- Malabadi, R.S., Kolkar, K., Chalannavar, R., Castaño-Coronado, K. 2023. Biodiesel production via transesterification reaction. *Open Access Research Journal of Science and Technology*. 09(02):010-021. [10.53022/oarjst.2023.9.2.0064](https://doi.org/10.53022/oarjst.2023.9.2.0064)
- Meher, L.C., Vidya-Sagar, D., Naik, S.N. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 10(3):248-268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- Milano, J., Tiong, S.K., Silitonga, A.S., Chia, S.R., Ong, M.Y., Kusumo, F., Sebayang, A.H., Yusof, T., Kalam, M.A. 2024. Synthesis of *Ceiba pentandra* biodiesel using ultrasound and infrared radiation: Comparison and fuel characterisation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1372(1):012046. [10.1088/1755-1315/1372/1/012046](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1372/1/012046)
- Nisar, S., Ishaq, A., Sultana, A., Faiza, S.M. 2017. Reactions other than transesterification for biodiesel production. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 12:141-146.
- NOM-L-63-CT. 1981. Norma Oficial Mexicana NOM-L-63-CT-1981, productos derivados del petróleo-combustible diésel-determinación del contenido de cenizas, así como el aviso de la declaratoria de vigencia.
- Oliveira, P.A., Baesso, R.M., Morais, G.C., Alvarenga, A.V., Costa-Félix, R.P.B. 2021. Ultrasound-assisted transesterification of soybean oil using low power and high frequency and no external heating source. *Ultrasonics Sonochemistry*. (78):105709. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105709>
- Olu-Arotiowa, O.A., Odesanmi, A.A., Adedotun, B.K., Ajibade, O.A., Olasesan, I.P., Odofin, O.I., Abass, A.O. 2022. Review on environmental impact and valorization of waste cooking oil. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*. 16(1): 144-163. <https://www.laujet.com/index.php/laujet/article/view/474/377>
- Pandey, V.C., Singh, K., Singh, J.S., Kumar, A., Singh, B., Singh, R.P. 2012. *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(5):2870-2883. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.004>
- Pikula, K., Zakharenko, A., Stratidakis, A., Razgonova, M., Nosyrev, A., Mezhuev, Y., Tsatsakis, A., Golokhvast, K. 2020. The advances and limitations in biodiesel production: Feedstocks, oil extraction methods, production, and environmental life cycle assessment. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 13(4):275-294. [10.1080/17518253.2020.1829099](https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1829099)
- Refaat, A.A., El Sheltawy, S.T. 2008. Comparison of three options for biodiesel production from waste vegetable oil. (109):133-140.
- Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Priego-Capote, F., Dorado, M.P. 2024. Multifrequency ultrasound-based predictive method for biodiesel production. *Johnson Matthey Technology Review*. 68(3):427-438. <https://doi.org/10.1595/205651324X17004922618615>
- Sankaranarayanan, S., Kannan, S. 2013. Sonochemistry: A simple and efficient route for biodiesel production from neat and blended vegetable oils using Idh-derived base catalysts. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*. 5(4):210-218. <https://doi.org/10.1007/s12572-013-0098-y>
- Sharma, S., Saxena, V., Baranwal, A., Chandra, P., Pandey, L.M. 2018. Engineered nanoporous materials mediated heterogeneous catalysts and their implications in biodiesel production. *Materials Science for Energy Technologies*. 1(1):11-21. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.05.002>
- Talebian-Kiakalaieh, A., Amin, N.A.S., Mazaheri, H. 2013. A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. *Applied Energy*. (104):683-710. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.061>

-
- Tchuifon, T.D.R., Lemoupi, N.S.B., Ndifor-Angwafor, G.N., Nanssou, K.P.A., Nsah-Ko, T., Tagaboue, N.R.D., Tiotsop, K.I.-H., Bopda, A., Gabche A.S. 2020. Production of biodiesel by transesterification reaction of waste cooking oil. *Chemical Science International Journal*. 29(5):1-12. <https://doi.org/10.9734/csji/2020/v29i530176>
- Topare, N., Patil, K., Naik, P., Sonawane, M., Joshi, P. 2015. Application of ultrasound for synthesis of biodiesel. *Emerging Trends in Chemical Engineering*. 2(1):1-8.
- Tres, A., Bou, R., Guardiola, F., Nuchi, C.D., Magrinyà, N., Codony, R. 2013. Use of recovered frying oils in chicken and rabbit feeds: Effect on the fatty acid and tocol composition and on the oxidation levels of meat, liver and plasma. *Animal*. 7(3):505-517. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001607>
- Vital-López, L., Mercader-Trejo, F., Rodríguez-Reséndiz, J., Zamora-Antuñano, M.A., Rodríguez-López, A., Esquerre-Verastegui, J.E., Vázquez, N.F., García-García, R. 2023. Electrochemical characterization of biodiesel from sunflower oil produced by homogeneous catalysis and ultrasound. *Processes*. 11(1):12. 10.3390/pr11010094
- Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., Sopian, K. 2013. Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 18:184-193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.016>
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R. 2012. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*. 233-234:254-258. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.021>

Hoja en blanco / *Intentionally blank page*

Modelación de trayectorias y estimación de dosis en la Ciudad de México por una emisión nointencionada de material radioactivo desde la Planta Nucleoeléctrica Laguna Verde

Trajectory modeling and dose estimation in Mexico City due to an unintentional release of radioactive material from the Laguna Nuclear Power Plant

Agustín García-Reynoso*¹, Lina Merino-Salgado¹, Mayra Vera-Sanchez¹, Iván Hernández-Paniagua¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera o Atmósfera y Cambio Climático. Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México. Correo-e (*e-mail*): agustin@atmosfera.unam.mx*

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio 2025 / *Number 1, January-June* 2025)

Resumen

Se estimó la dosis de radiación teórica en la Ciudad de México (CDMX) de una posible emisión no intencional de material radioactivo a la atmósfera. Para la identificación de la posible dosis se computaron trayectorias iniciando en la Central Nuclear Laguna Verde con un recorrido de 12 horas para un conjunto de días de los años 2019-2020, empleando el modelo híbrido Lagrangiano integrado de trayectoria de partícula única (*por sus siglas en inglés*) *Hysplit* y la información del pronóstico meteorológico. De las trayectorias generadas para cada año, se seleccionaron las del mes donde se observaron trayectorias que llegarían a la ciudad de México (CDMX) y se computaron todas las trayectorias de todas las horas de ese mes. De este conjunto de trayectorias se seleccionó la que llegaría a la CDMX y se realizó la modelación de dispersión para conocer la concentración que podría generar en el ambiente y con ello calcular la dosis. Para estimar la dosis se consideró una emisión similar a la de Fukushima y la trayectoria tendría hasta 24 horas de desplazamiento. Se observó que la mayoría de las trayectorias se agrupaban al este de la Sierra Madre Oriental pudiendo alcanzar Poza Rica de Hidalgo, Xalapa de Enríquez y el Puerto de Veracruz. Si se considera una emisión hipotética de 5 PBq durante una hora en el mes de octubre de 2019 y en agosto de 2020 se observa que la dispersión llega a la CDMX representaría una dosis en 24 horas de 0.01 a 1 mSv.

Palabras clave: *Hysplit*, dosis, trayectorias, escenario, Xalapa de Enríquez, Puerto de Veracruz

Abstract

The theoretical radiation dose in Mexico City (CDMX) from a possible unintentional release of radioactive material into the atmosphere was estimated. To identify the possible dose, trajectories were computed starting at the Laguna Verde Nuclear Power Plant with a 12-hour journey for a set of days in the years 2019-2020, using the integrated hybrid Lagrangian single-particle trajectory model (Hysplit) and weather forecast information. From the trajectories generated for each year, those from the month where trajectories were observed that would reach Mexico City (CDMX) were selected and all the trajectories for all hours of that month were computed. From this set of trajectories, the one that would reach CDMX was selected and dispersion modeling was performed to determine the concentration it could generate in the environment and thereby calculate the dose. To estimate the dose, an emission similar to that of Fukushima was considered and the trajectory would have a displacement of up to 24 hours. It was observed that most of the trajectories were grouped to the east of the Sierra Madre Oriental and could reach Poza Rica de Hidalgo, Xalapa de Enríquez and the Port of Veracruz. If a hypothetical emission of 5 PBq for one hour is considered in the month of October 2019 and in August 2020, it is observed that the dispersion reaches Mexico City, which would represent a dose of 0.01 to 1 mSv in 24 hours.

Keywords *Hysplit*, dose, trajectories, scenario, Xalapa, Port of Veracruz

Introducción

Se considera que un contaminante es toda sustancia o energía que al estar en el ambiente lo modifica de forma negativa (DOF, 1988). Así, la radiación ionizante es una fuente de energía y a partir de un valor umbral de emisión se puede considerar como un tipo de contaminación. Los compuestos radiactivos, los equipos de rayos X y los combustibles de los reactores nucleares pueden emitir radiación ionizante. La radiación ionizante incluye tanto partículas como radiación electromagnética. Para el caso de la partículas se tiene la radiación alfa y beta que son esencialmente fragmentos de átomos, en el caso de la radiación electromagnética se tienen a los rayos X y gamma (CDC, 2016).

Las fuentes de radiación pueden ser naturales (CNSC, 2020) o de origen antrópico debido a liberaciones continuas o no intencionales como en los accidentes de Chernóbil (Chirikova et al., 2022) y Fukushima (Nishiyama et al., 2022). Dependiendo de la dosis de radiación, se pueden ocasionar efectos adversos a la salud que pueden manifestarse como quemaduras de la piel, defectos de nacimiento, caída del cabello, cáncer e incluso provocar la muerte (CDC, 2016). La dosis media de radiación por una persona en los EE. UU. es de 6,200 mSv (EPA, 2022).

A diferencia de las plantas termoeléctricas convencionales que usan petróleo, gas natural o carbón en una central nuclear el principio básico es la obtención de energía calorífica por medio de la fisión de los átomos. Esta energía calorífica convierte el agua líquida en forma de vapor la que se convierte en energía mecánica al mover una turbina y mediante un generador se convierte en energía eléctrica (SGM, 2017).

La Central Nuclear Laguna Verde (CNLV) en Veracruz México tiene una operación a la fecha de 30 años, su licencia de operación ha sido renovada hasta el año 2050 (CFE, 2020). El combustible usado en la CNLV contiene uranio enriquecido en alrededor del 4% y no podría causar una explosión atómica ya que para ello se requiere de una proporción superior al 95% (García-Díaz, 2020; Imparcial, 2020). La CNLV se ubica en Veracruz, México, a 60 km al noreste de la ciudad de Xalapa, a 70 km del Puerto de Veracruz y a 290 km de la Ciudad de México (Sánchez-Yáñez, 2007) y aporta el 4.7% de la energía eléctrica del país. Originalmente la central tenía una capacidad de 654 MW por unidad, pero en el 2010 se aumentó a 805 MW para la Unidad 1 y 803 MW para la Unidad 2, actualmente tiene una capacidad de 1640 MW.

Desde hace tiempo, en el desarrollo de los planes de respuesta a emergencias y en las evaluaciones de riesgo se emplean modelos de dispersión con los que se puede conocer la concentración y la exposición a emisiones ionizantes mediante los resultados de dispersión (Maryon y Best, 1995).

En México, solo se tiene conocimiento público de un estudio que analiza el área de influencia de las emisiones en caso de un evento extraordinario en la Central Nuclear (Hernández-Garcés et al., 2024). Este trabajo se centra en el impacto de una liberación en las ciudades cercanas a la planta nuclear, pero no aborda los efectos en poblaciones más distantes, como la Ciudad de México. En este trabajo se presenta el procedimiento utilizado para identificar las posibles zonas de influencia de una emisión de materia ionizante debido a una liberación no intencional, con el objeto de identificar si existe una posible trayectoria que surja desde la Central Nuclear Laguna Verde y cuyo destino llegue a la Ciudad de México. Para este trabajo se emplearon datos de meteorología para los años 2019 y 2020.

Datos y métodos

Datos meteorológicos

La información meteorológica provino del pronóstico meteorológico elaborado por el grupo de Interacción Océano Atmósfera del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Este pronóstico se elaboró utilizando el modelo Weather Research and Forecasting Model (WRF) en su

versión 3.9 (GIOA, 2017). El pronóstico contemplaba dos dominios de modelación: El dominio 1 cubriendo toda la República Mexicana y el dominio 2 el centro de México. Se recopiló información a partir del 2017 a la fecha. Se emplearon los resultados de los años 2019 y 2020, utilizando el dominio 2 que incluyó el área de latitud sur, 14.5 a 21.6 grados al norte, y de longitud -106.1 a -93.1, con celdas de 5x5 km. Cada pronóstico diario generó un archivo que contenía 5 días de pronóstico (120 horas) y, para la selección de los episodios y en la generación de trayectorias, solamente se emplearon las primeras 55 horas de cada archivo como se describe posteriormente. Las variables que se extrajeron de este pronóstico y fueron empleadas por el modelo híbrido lagrangiano de trayectoria integrada de partícula única (por sus siglas en inglés *HYSPLIT*) fueron presión, temperatura, campo de vientos, viento a 10 m, la razón de mezcla de vapor de agua, la altura de capa de mezclado, la altura de terreno y la precipitación. Este sistema de pronóstico meteorológico se evaluó con observaciones en superficie y en el mar mediante boyas. Los resultados de la evaluación mostraron un desempeño aceptable para reproducir la temperatura y el viento en la zona (Zavala-Hidalgo et al., 2017).

Modelo de trayectorias y de dispersión *HYSPLIT*

Para determinar la dirección en la que viajarían las emisiones y las zonas afectadas se utilizaron trayectorias calculadas mediante el modelo híbrido lagrangiano integrado de trayectoria de partícula única – *HYSPLIT* (Stein et al., 2015). El método de cálculo del modelo fue un híbrido entre el enfoque lagrangiano, que usa un marco de referencia móvil para los cálculos de advección y de difusión a medida que las trayectorias o paquetes de aire se mueven desde su ubicación inicial y la metodología euleriana, que emplea una cuadrícula tridimensional fija como un marco de referencia para calcular las concentraciones de contaminantes en el aire. En el *HYSPLIT*, el cálculo básico de la trayectoria constó de tres pasos: Configuración, ejecución y visualización. Una trayectoria representa la integración del vector de posición en el espacio y el tiempo, a través de un campo de viento que varía tanto en el tiempo como en el espacio. En la atmósfera, la dirección y velocidad del viento fue un campo continuo, pero la representación numérica utilizada en estos cálculos fue “discreta” en el espacio y el tiempo. La precisión con la que los datos meteorológicos cuadrículados representaban las condiciones atmosféricas reales podía variar de un día a otro y dependía de la ubicación de las regiones con gradientes pronunciados con respecto de los puntos de la cuadrícula.

En este trabajo se empleó el sistema que trabaja en un ambiente GNU/Linux con el que se pueden elaborar programas auxiliares en BASH para emplear la información generada por el pronóstico meteorológico para la región y, al mismo tiempo, generar las trayectorias y los productos de visualización.

Cálculo de trayectorias

Para identificar la trayectoria que pudiera llegar a la Ciudad de México, se empleó el siguiente procedimiento: i) Se seleccionaron los meses con vientos que produjeran trayectorias hacia la CDMX. Para ello, se analizaron cuatro episodios por mes durante los años 2019 y 2020, lo que resultó en un total de 96 días por año. Los episodios seleccionados correspondieron a los días 1-2, 6-7, 15-16 y 24-25 de cada mes, asegurando así una muestra representativa anual. Para estos episodios, se calcularon las trayectorias, las zonas de paso más frecuentes y se agruparon en conjuntos mensuales y anuales. A partir de estos resultados, se identificó el mes en el que alguna trayectoria se dirigiera hacia la CDMX. Durante ese mes, se generaron todas las trayectorias horarias, seleccionándose aquella que se aproximara más a la ciudad. Posteriormente, ii) Se realizó la modelación de dispersión para la trayectoria seleccionada de ese mes con el fin de estimar la dosis máxima que podría alcanzarse.

En el cálculo de las trayectorias para los episodios seleccionados se emplearon los datos meteorológicos del pronóstico empleando 55 horas para cada episodio. Se consideró la ubicación de la CNLV: Latitud=19.7208, longitud= -96.406 y la altura de liberación de la emisión fue de 100 m sobre el nivel piso. El cálculo de las trayectorias inició a las 06:00 UTC (ver Glosario) del día seleccionado, se calculó una trayectoria para cada hora hasta las 12:00 UTC del segundo día, obteniendo así 36

trayectorias por cada día seleccionado del mes, la distancia recorrida por la trayectoria fue la correspondiente a 12h de desplazamiento.

Para el mes en el que se identificaron trayectorias que pudieran llegar a la CDMX, se siguió el mismo procedimiento, pero en este caso se generaron trayectorias para cada hora del mes, obteniendo un total de 744 trayectorias con un desplazamiento de 24 horas. De estas 744 trayectorias, se seleccionó aquella cuyo destino fuera la CDMX, identificándose una trayectoria correspondiente al año 2019 y otra al 2020.

Con el fin de evaluar las emisiones potenciales, se utilizó como punto de referencia un escenario análogo al incidente de Fukushima, pero considerando la capacidad de generación de energía de la planta propuesta. En concreto, se consideraron los reactores de la planta de Fukushima Daiichi, que produjeron 2.719 MW de potencia. En este contexto, se estimó que la emisión durante el incidente de Fukushima ascendió a 940 petabecquerelios (PBq) de yodo-131 en un lapso de 4 a 6 días (WNA, 2022). Estos supuestos formaron una base para evaluar el impacto ambiental potencial y las consideraciones de seguridad de la planta de energía nuclear propuesta ubicada en México. Extrapolando esta información al contexto de la CNLV, que cuenta con una capacidad de 1640 MW, el escenario de emisión proyectado implica una liberación calculada de 5.3 PBq/h de I-131 en un lapso de 5 días.

La dosis se estimó con base en la concentración y los factores de conversión de dosis de la Agencia de Protección al Ambiente de EE. UU. (Eckerman et al., 1988). En este caso, el I-131 se consideró un factor de conversión a dosis por inhalación de $6.08E-09$ (REM/hr)/(Bq/m³). Este valor se empleó considerando que se inhalara durante 24 horas la concentración obtenida por el modelo. El tiempo de vida media supuesto para el I-131 fue de 8.04 día^{-1} que se empleó durante el tiempo de traslado durante la dispersión.

Resultados y discusión

Para identificar el área de influencia potencial de dispersión de las emisiones se emplearon los resultados de las frecuencias de las trayectorias que se muestran en la Figura 1. Estas consideran trayectorias de 12 horas de duración y que pueden llegar a una altura de 5000 m.s.n.m.

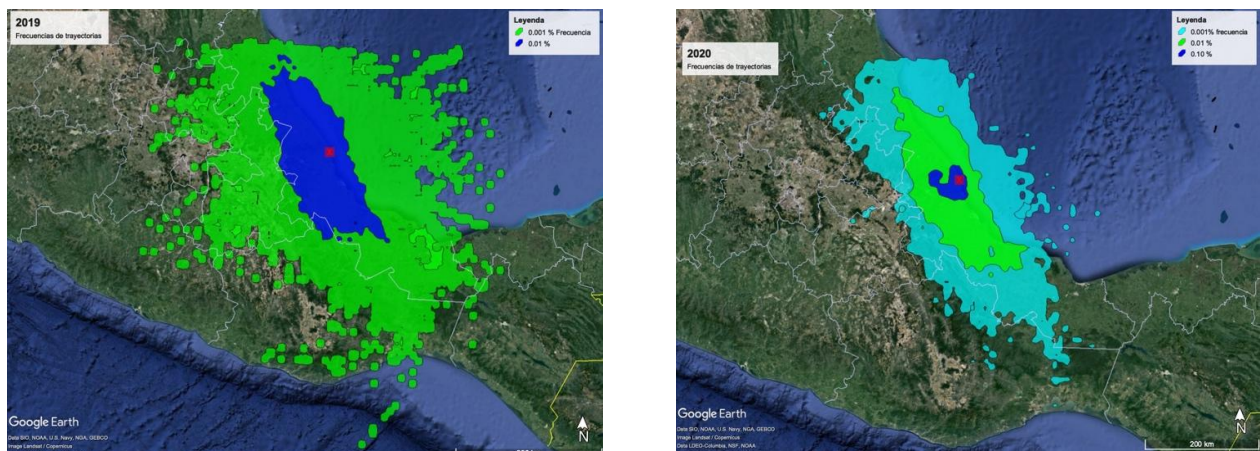


Figura 1. Porcentaje de frecuencias de las trayectorias para el año 2019 (izq.) y 2020 (der.)

Las frecuencias mostradas en las Figura 1 se calcularon con 1,728 trayectorias para cada año. El valor mínimo de 0.001% representaría que solamente una trayectoria pasó por esa celda y el máximo de 0.1% alrededor de 170. De las trayectorias agrupadas por mes, se identificó que en octubre de 2019 y en agosto de 2020 habrían trayectorias llegando a la Ciudad de México, CDMX, por lo que para esos

meses se realizaron las trayectorias horarias de los 31 días del mes obteniéndose 744 trayectorias para cada uno (Figura 2).

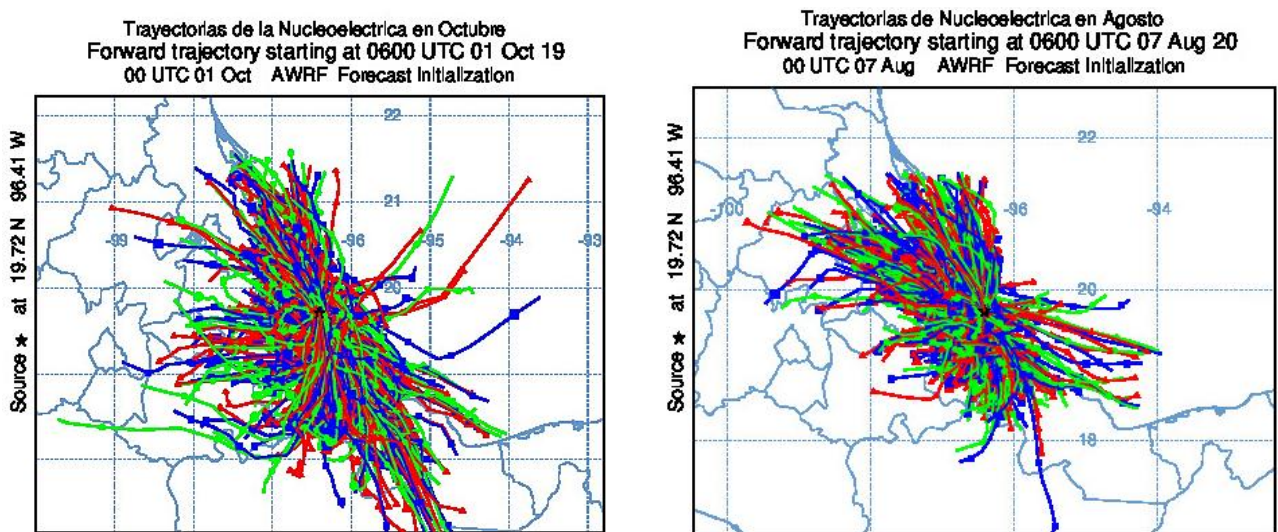


Figura 2. Trayectorias para el mes de octubre 2019 (izq) y agosto 2020 (der)

La Figura 3 muestra las frecuencias de las trayectorias y en la Figura 4 los conjuntos, utilizando las 744 trayectorias y se emplearon 712 trayectorias para agruparse en siete conjuntos. Para octubre de 2019 y para agosto del año 2020 se utilizaron 682 trayectorias en los seis conjuntos mostrados. Existirían trayectorias no incluidas debido a que no se pueden agrupar en alguno de los conjuntos existentes ni tampoco pueden emplearse para hacer otro conjunto adicional.

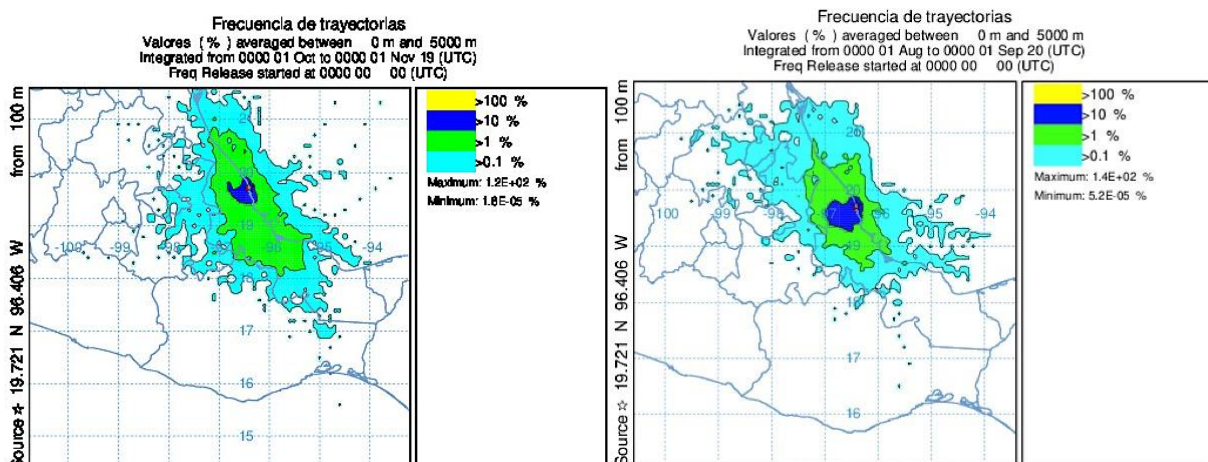


Figura 3. Frecuencias de trayectorias para octubre 2019 (izq.) y agosto 2020 (der):

La Figura 5 muestra la concentración integrada durante seis horas que se tendría de una emisión de una unidad de masa liberada durante una hora iniciando a las 03:00 UTC del día 15 de octubre. A este valor también se le conoce como factor de dilución que convierte la emisión (masa/tiempo) en concentración (masa/volumen) y se aprecia que valores de $1E-14$ se pueden tener en zonas de la CDMX.

La Figura 6 muestra las concentraciones para el mes de agosto de 2020 donde se aprecia que concentraciones de $1E-14$ pueden llegar al valle de México y concentraciones de $1E-16$ a la CDMX.

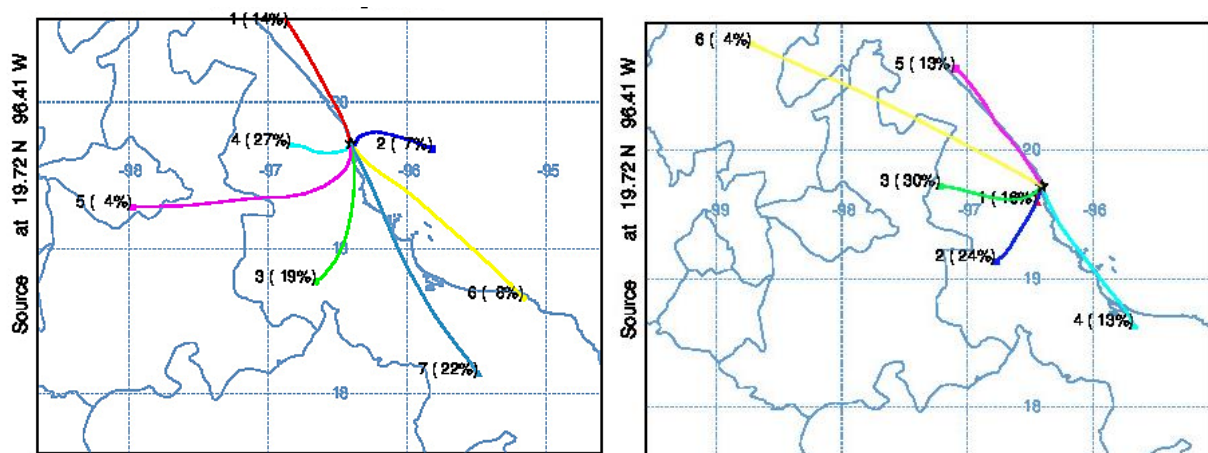


Figura 4. Conjuntos de trayectorias para octubre 2019 (izq) que consideran 712 trayectorias y agosto 2020 considerando 682 trayectorias (der)

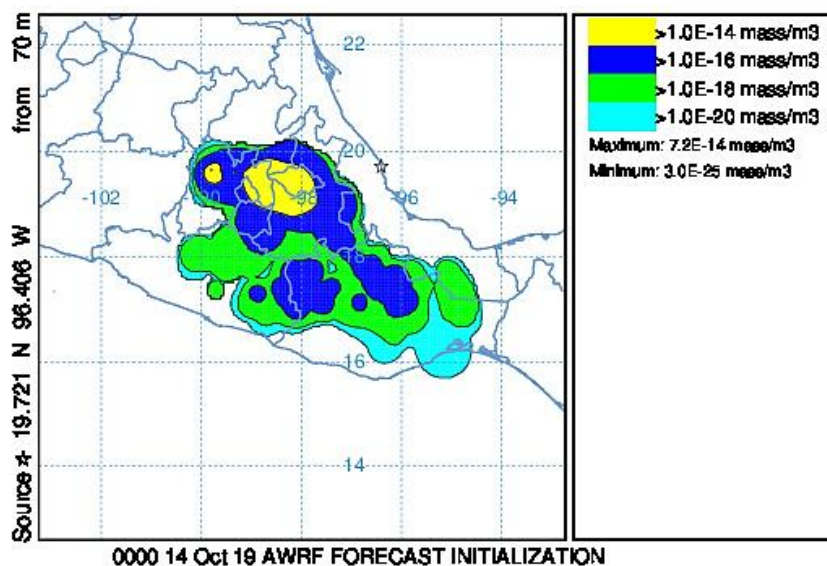


Figura 5. Concentraciones (masa/m³) promedio entre 0 m a 100 m, integradas desde el día 15 de octubre del 2019 a las 21:00 hrs TUC (Tiempo Universal Coordinado) al 16 de octubre 03:00 TUC. La emisión inició a las 3:00 TUC del 15 de octubre

Con base en la emisión de 5.3 PBq se estimó que la dosis equivalente en 24 horas que se podría alcanzar considerando las condiciones de octubre del 2019 podría ser de 0.1 mRem (1 mSv) y para agosto del 2020 de 0.001 mRem (0.01 mSv).

Discusión final

La Figura 1 muestra que las zonas con mayores frecuencias se encuentran al este de la Sierra Madre Oriental, mientras que solamente algunas trayectorias llegarían a sobrepasarla y de éstas, todavía serían menos las que superaran la Sierra Nevada para llegar al Valle de México en ambos años. Las trayectorias podrían viajar al oeste alcanzando Xalapa, al sur llegando al Puerto de Veracruz y la norte a Poza Rica de Hidalgo. Con lo anterior se observa que el alcance de una trayectoria que partiera de la CNLV y viajara durante 12 horas podría cubrir una distancia de aproximadamente 430 km, siendo los meses de octubre del 2019 y agosto del 2020 donde la emisión llegaría a la CMX y a otros estados

como Puebla y Tlaxcala. Con base en los resultados de dispersión se observa que el tiempo de arribo a la CDMX es de 21 horas para el caso de la liberación en octubre 2019 y de 9 horas en agosto del 2020. Las diferencias en los tiempos de viaje y arribo de las masas de aire están impactadas por las condiciones meteorológicas regionales.

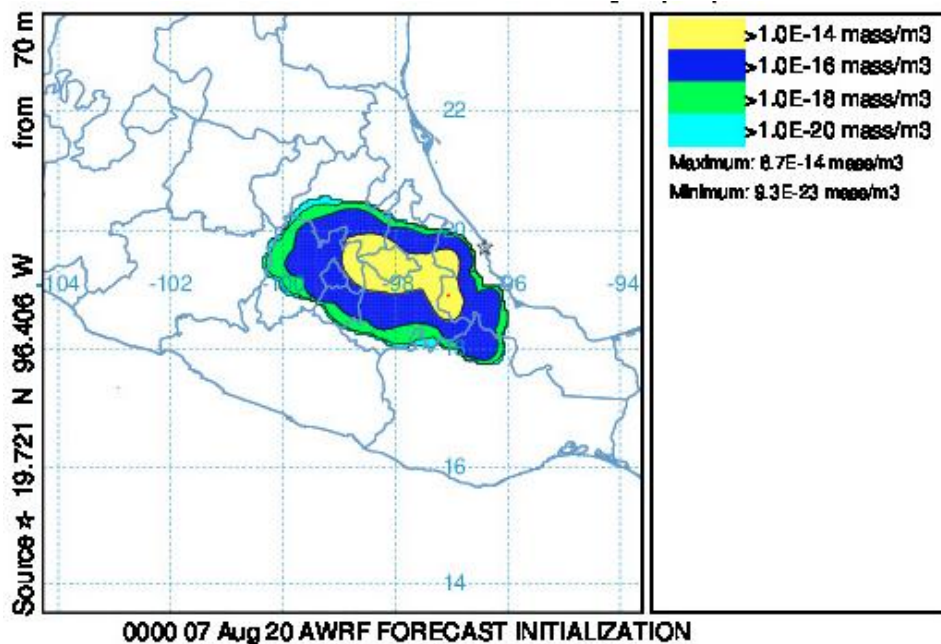


Figura 6. Concentraciones (masa/m³) promedio entre 0 m a 100m, integradas desde el día 8 de agosto del 2020 a las 20:00 hrs TUC (Tiempo Universal Coordinado) al 9 de agosto 2:00 TUC. La emisión inicia a las 8:00 TUC del 8 de agosto 2020

Comparando la dosis externa debida a la liberación de I-131 se obtuvo que la dosis en 24 horas sería de hasta 1 mSv que es similar a los 1.45 mSv de radiación cósmica diaria a 2200 m.s.n.m y menor a los 17 mSv/día de radiación de la radiación media por una persona en los EE. UU.

Conclusiones

Mediante el uso de modelos de meteorología y trayectorias, se identificaron las zonas donde podría transportarse una emisión no intencional de la CNLV para los años 2019 y 2020. Se observó que la mayoría de las trayectorias finalizan al este de la Sierra Madre Oriental, mientras que algunas pueden pasar por las ciudades de Xalapa, Puerto de Veracruz y Poza Rica de Hidalgo. A partir de las trayectorias computadas, se determinó que, durante octubre de 2019 y agosto de 2020, existieron trayectorias que, tras 12 horas, pudieron tener como destino la CDMX.

Considerando una emisión hipotética de 5.3 PBq con duración de una hora, se podría alcanzar una dosis de hasta 1 mSv en la Zona Metropolitana del Valle de México.

La presente investigación conjunta herramientas de cómputo de trayectorias y modelación de dispersiones para realizar estudios de exposición y determinación de dosis a radiación por una liberación continua o no intencional de material en la CNLV. Esta información puede ser útil para el plan de emergencia radiológica externo (PERE) de la CNLV.

Glosario

Siglas y términos	Significado
CNLV	Central Nuclear Laguna Verde
CDMX	Ciudad de México
<i>HYSPLIT</i>	Siglas en inglés para Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única. Es un modelo informático que se utiliza para calcular la trayectoria de las masas de aire y los contaminantes. Este modelo es ampliamente utilizado en meteorología y es un servicio del Laboratorio de Recursos Atmosféricos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (<i>NOAA</i>) de Estados Unidos
m. s. n. m.	Abreviatura para metros sobre el nivel del mar
mSv	Los milisieverts son una unidad de medida de la dosis de radiación absorbida por el cuerpo humano
MW	Los megavatios, una unidad de medida de potencia eléctrica que equivale a un millón de vatios
REM/h	Rem es la abreviatura de Röntgen equivalent man, una unidad de medida de la peligrosidad de la radiación. Unidad de medida de radiación por hora
PBq	Petabecquerelios
PERE	Plan de emergencia radiológica externo
TUC	Siglas para Tiempo Universal Coordinado. Es una escala de tiempo que es mantenida por los laboratorios de tiempo de todo el mundo y es determinada por relojes atómicos de alta precisión
<i>WRF</i>	Weather Research and Forecasting Model

Reconocimientos

A la unidad de cómputo y supercómputo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por su apoyo para la instalación de los códigos empleados en este trabajo, así como al grupo de Interacción Océano Atmósfera por el acceso a los datos de pronóstico meteorológico.

Referencias bibliográficas

- CDC. 2016. Radiación ionizante (Ionizing Radiation). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Retrieved 7/01/2022 de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts149.html
- CFE. 2020, 4/sep/2020. 30 años de operación segura: Laguna Verde. Comisión Federal de Electricidad. Retrieved 08/06/2022 de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2101>
- Chirikova, E., McConnell, R.J., O'Kane, P., Yauseyenko, V., Little, M.P., Minenko, V., Drozdovitch, V., Veyalkin, I., Hatch, M., Chan, J.M., Huang, C.Y., Mabuchi, K., Cahoon, E.K., Rozhko, A., Zablotska, L. B. 2022. Association between exposure to radioactive iodine after the Chernobyl accident and thyroid volume in Belarus 10-15 years later. *Environmental Health*. 21(5):1-10. doi.org/10.1186/s12940-021-00820-0
- CNSC. 2020. Natural background radiation. Canadian Nuclear Safety Commission. Retrieved 08/06/2022 de <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/natural-background-radiation.cfm>
- DOF 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Eckerman, K.F., Wolbarst, A.B., Richardson, A.C.B. 1988. Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion: Derived Guides for Control of Occupational Exposure and Exposure-to-dose Conversion Factors for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance. Oak Ridge National Laboratory. P.p. 234. <https://www.osti.gov/servlets/purl/6294233>
- EPA. 2022. Cálculo de sus dosis de radiación. Environmental Protection Agency. Retrieved 13 dic 2022 de <https://espanol.epa.gov/espanol/calculo-de-sus-dosis-de-radiacion>
- García-Díaz, R. 2020. Análisis de Dispersión de la Pluma Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde Mediante Teledetección. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del agua. Toluca, México. P.p. 156.

-
- GIOA. 2017. Pronóstico Meteorológico. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Retrieved 9/06/2022 de <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/inf-wrf>
- Hernández-Garcés, A., García- Reynoso, J.A., Morera-Gómez, Y. 2024. Impact of radioactive emissions de the Laguna Verde nuclear power plant using CALPUFF. *Annals of Nuclear Energy*. 205, 110603. doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110603
- Imparcial. 2020. ¿Es posible que la central nuclear de Laguna Verde en México explote como una bomba u ocurra un incidente como el de Chernobyl? *El Imparcial*. <https://www.elimparcial.com/mexico/Es-posible-que-la-central-nuclear-de-Laguna-Verde-en-Mexico-explote-como-una-bomba-u-ocurra-un-incidente-como-el-de-Chernobyl-20201230-0051.html>
- Maryon, R.H., Best, M.J. 1995. Estimating the emissions de a nuclear accident using observations of radioactivity with dispersion model products. *Atmospheric Environment*. 29(15):1853-1869. doi: doi.org/10.1016/1352-2310(95)00042-W
- Nishiyama, H., Kamida, S., Moriizumi, J., Yamazawa, H. 2022. Analysis of volatile nuclides' behavior in the atmosphere released due to the FDNPP accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 249:C7-106894. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106894
- Sánchez-Yáñez, M. 2007. Evaluación y expresión de incertidumbre en los procesos de seguridad, eficiencia y medio ambiente de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana. México. <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/47532>
- SGM. 2017. 24/05/2022. Energía Nuclear. Servicio Geológico Mexicano. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Energia-nuclear.html
- Stein, A., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J., Cohen, M., Ngan, F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 96(12):2059-2077.
- WNA. 2022. Fukushima Daiichi Accident. World Nuclear Association. <https://www.world-nuclear.org/focus/fukushima-daiichi-accident/fukushima-daiichi-accident.aspx>
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Gómez-Ramos, O., Zavala-Romero, O., López-Espinosa, E., Pedraza-Díaz, A., Arellano-Guerrero, F. 2017. Actividad 3. Evaluación del desempeño de los pronósticos, determinación de incertidumbres e implementación del sistema de visualización. Desarrollo de un sistema de pronóstico operacional de eventos extremos basados en modelos numéricos de predicción de las condiciones meteorológicas, de oleaje y marea de tormenta, incluyendo la evaluación del desempeño de modelo y la determinación de incertidumbres, con fines de alertamiento. Informe interno del Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

Hoja en blanco / *Intentionally blank page*

Quitosana-calcita derivada de residuos de camarón como una alternativa verde y ecológica para la extracción en fase sólida de contaminantes orgánicos en agua

Chitosan-calcite derived from shrimp waste as a green and ecological alternative for solid phase extraction of organic contaminants in water

Aranys-del-Carmen-Borja-Urzola*^{1,2}, Laura Paez-Daniels², Ronny Adrián Flores-Ortega³, María-de-Carmen-Durán-Domínguez-de-Bazúa⁴

¹Centro de Investigación e Innovación en Biodiversidad y Cambio Climático, ADAPTIA. Universidad Simón Bolívar. Carrera 53#64-51. Barranquilla-Colombia. Correo-e (*e-mail*):

aranys.borja@unisimon.edu.co, aradelc12@gmail.com

²Programa de Química y Farmacia. Facultad de Ciencias Básicas y Biomédicas. Universidad Simón Bolívar. Carrera 59#59-65. Barranquilla-Colombia

³Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Central del Ecuador

⁴Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 Ciudad de México, México

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

Resumen

Esta investigación presenta una propuesta para usar la quitosana proveniente de la desacetilación de la quitina presente en residuos de camarón, como un adsorbente verde y ecológico para la extracción en fase sólida de contaminantes orgánicos en agua. El adsorbente compuesto de quitosana y carbonato de calcio se obtuvo a partir de residuos de camarón café (*Farfantepenaeus aztecus*) a los que se les indujo biomineralización de CaCO_3 usando una solución saturada de CaCl_2 en metanol y agua como fuente de iones Ca^{2+} , solvente MAC-141⁹ ®©. La caracterización por IF-TF, DRX, ATG y MEB mostró que el adsorbente contiene carbonato de calcio en forma de calcita, poros en la superficie, estabilidad térmica y grupos NH_2 , OH y NHCOCH_3 en su estructura. Su aplicación como adsorbente en la EFS para extraer contaminantes en agua se evaluó usando tres herbicidas triazínicos como modelo de contaminantes orgánicos (terbutilazina, metribuzina y prometrina). Los resultados de la aplicación en EFS mostraron que la quitosana-calcita obtenida se comporta como una fase normal en su mecanismo de separación y es necesaria la saturación con NaCl para su aplicación cuando la matriz es acuosa. En comparación con fases comerciales, como la C18 y la *Oasis-HLB*, los porcentajes de eficiencia de recuperación indicaron que la quitosana-calcita puede aplicarse en EFS de contaminantes orgánicos de baja y mediana polaridad al modificar la matriz acuosa.

Palabras clave: Adsorbente verde, contaminantes emergentes, preparación de muestras, quitosana

Abstract

*This research presents a proposal to use chitosan from the deacetylation of chitin present in shrimp waste, as a green and ecological adsorbent for the solid phase extraction of organic contaminants in water. The chitosan and calcium carbonate composite adsorbent was obtained from brown shrimp (*Farfantepenaeus aztecus*) waste that was induced to biomineralize CaCO_3 using a saturated solution of CaCl_2 in methanol and water as a source of Ca^{2+} ions, solvent MAC-141¹⁰ ®©. The characterization by FT-IR, XRD, TGA, and SEM showed that the adsorbent contains calcium carbonate in the form of calcite, pores on the surface, thermal stability and NH_2 , OH and NHCOCH_3 groups in its structure. Its application as an adsorbent in SPE to extract contaminants in water was evaluated using three triazine herbicides as models of organic contaminants (terbutylazine, metribuzin and prometryn). The results of the SPE application showed that the obtained chitosan-calcite behaves*

⁹ Al final del artículo se encuentra un glosario con el significado de las siglas

¹⁰ At the end of the articles there is a glossary with the meaning of the acronyms

as a normal phase in its separation mechanism and saturation with NaCl is necessary for its application when the matrix is aqueous. Compared with commercial phases, such as C18 and Oasis-HLB, the recovery efficiency percentages indicated that chitosan-calcite can be applied in SPE of low and medium polarity organic contaminants by modifying the aqueous matrix.

Keywords: Green adsorbent, emerging contaminants, sample preparation, chitosan

Introducción

La búsqueda de alternativas sostenibles en el ámbito de la preparación de muestras en la química analítica es, hoy en día, uno de los escenarios más prometedores en el desarrollo e innovación de métodos adaptados a los conceptos de sostenibilidad, eficiencia y economía, derivados de los principios de la química analítica verde (Jagirani y Soylak, 2024; Pacheco-Fernández et al., 2020; Werner et al., 2024a). En este contexto, la extracción en fase sólida (SPE) emergió y se sostiene como una técnica de separación y preconcentración de analitos de gran relevancia debido a sus ventajas en cuanto a la reducción del consumo de disolventes, simplicidad y selectividad. Sin embargo, entra en desventaja al hablar de química analítica verde, ya que se usan normalmente como fases sólidas o adsorbentes, materiales comerciales y de alto valor económico o provenientes de procesos de síntesis que generan residuos y demanda un consumo energético. Una de las tendencias actuales en su adaptación a los principios de la química analítica verde es el desarrollo de materiales adsorbentes que sean económicos, amigables con el ambiente y con las propiedades que se requieren para su aplicación en procesos de extracción (Jagirani y Soylak, 2024; Sajid, 2022a). En este sentido, los adsorbentes que proviene de fuentes naturales y renovables se convierten en una opción sostenible y en un campo de investigación y desarrollo con potencial a futuro.

Las tendencias actuales dentro de esta área de investigación se han centrado en el uso de materiales altamente porosos para preparar polímeros de imprenta molecular (He et al., 2015; Martins et al., 2015) y nanotubos de carbono (Han et al., 2016) que muestran buenas recuperaciones y selectividad hacia compuestos orgánicos. Sin embargo, es preocupante en el ámbito ambiental el efecto nocivo y el alto valor económico de los reactivos requeridos en sus rutas sintéticas (Pacheco-Fernández et al., 2020). Por estas razones, se hace necesario la búsqueda de alternativas respetuosas con el ambiente y de bajo costo para obtener nuevos adsorbentes. Se han usado materiales naturales y desechos biológicos, como cáscaras de frutas, residuos de café, corcho, etc. (Sun et al., 2022; Werner et al., 2024a,b), hongos, algas, bacterias (Xiong et al., 2016), y biopolímeros naturales, como celulosa, alginato, agarosa y quitosana (de-Oliveira-Arias et al., 2014, 2018; Pacheco-Fernández et al., 2020).

Los adsorbentes a base de polímeros naturales, como la quitosana y la quitina, son abundantes, renovables, biodegradables y han mostrado eficiencia en la adsorción de metales, fenoles y otros contaminantes (Jagirani y Soylak, 2024; Sajid, 2022b; Salamatinia y Amouzgar, 2015). Los residuos de crustáceos son la principal fuente de biomasa en la producción de quitina y quitosana y por eso su uso ayuda a la sostenibilidad del ambiente (Bakshi et al., 2020). La quitosana, que proviene de la desacetilación de la quitina tiene en su estructura principalmente grupos $-NH_2$, $-OH$ y $-NHCOCH_3$ que la hacen reactiva y le confieren la habilidad de interactuar con diferentes tipos de contaminantes por mecanismos de complejación, intercambio iónico, interacciones electroestáticas, puentes de hidrógeno e interacciones dipolo-dipolo (Bhatnagar y Sillanpää, 2009; Salehi et al., 2016; Wan-Ngah et al., 2011; Werner et al., 2024a,b). Sin embargo, sus características físicas y mecánicas, como su baja área superficial y carencia de poros en la superficie, hace que las propuestas para su aplicación incluyan modificaciones químicas o físicas igual de contaminantes (Wang y Zhuang, 2017; Werner et al., 2024a,b) que las realizadas en las fases convencionales comerciales.

En esta investigación se usa la metodología de obtención de quitosana a partir de residuos de camarón propuesta en investigaciones anteriores (Borja-Urzola et al., 2020) para inducir la biomineralización de carbonato de calcio por medio de la quitosana al usar un disolvente compuesto de metanol, agua y

cloruro de sodio para así obtener un adsorbente a base de quitosana y carbonato de calcio con propiedades que permitan su aplicación como fase sólida. El carbonato de calcio, es un agente porogéno usado para mejorar la porosidad de los adsorbentes (Rekik et al., 2019; Salehi et al., 2016; Salehi y Madaeni, 2014; Wahba, 2017) y a la vez aportar rigidez y estabilidad, propiedades que se requieren para la *SPE*. La aplicación como fase sólida en el proceso de extracción de contaminantes orgánicos presentes en agua se evaluó en tres herbicidas triazínicos (terbutilazina, metribuzina y prometrina) de gran importancia ambiental debido a su toxicidad y presencia en matrices de agua superficial y subterránea (Herrera-Herrera et al., 2015; Mojiri et al., 2020; Zhao et al., 2011). En estudios previos (Borja-Urzola et al., 2021) se evaluó la capacidad de adsorción de la quitosana calcita frente a estos mismos compuestos y se encontró que el adsorbente permite su remoción de matrices acuosas en experimentos en lote. Borja-Urzola et al. (2021) reportaron que la quitosana calcita es capaz de interactuar con la metribuzina, prometrina y terbutilazina principalmente a través de la formación de puentes de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas y interacciones dipolo-dipolo; por eso la importancia de estudiar su aplicación como posible fase sólida para la extracción y concentración de triazinas en matrices acuosas ambientales ya que promete ser un adsorbente con propiedades promisorias en su aplicación en la química analítica. Los resultados obtenidos son la base para futuros estudios sobre la aplicación de la quitosana como adsorbente verde y ecológico para la *SPE* u otras técnicas de preparación de muestras para extraer y concentrar contaminantes orgánicos en matrices ambientales.

Materiales y métodos

La quitosana-calcita se obtuvo aplicando la metodología reportada en trabajos previos (Borja-Urzola et al., 2020). Para su obtención se utilizaron residuos de camarón marrón (*Farfantepenaeus aztecus*) y la reacción de desacetilación y la biomineralización del carbonato de calcio se hizo usando una solución de cloruro de calcio en agua y metanol, asistida por agitación y ultrasonido. El acetato de etilo (AcET), acetona (AcTN), isopropanol (iPrOH), acetonitrilo (ACN), metanol (MeOH) y Hexano utilizados en *SPE* fueron grado cromatográfico (J.T. Baker, México). El NaCl, Florisil®, alumina y la sílica se obtuvieron de Sigma-Aldrich. La metribuzina y prometrina de 99.9 y 99.5% de pureza, respectivamente, fueron obtenidas de ChemService, México. Terbutilazina de 98.0% de pureza fue obtenida de Sigma-Aldrich, Mexico. Para elaborar los cartuchos SPE de quitosana-calcita se utilizaron reservorios de polipropileno (6 mL-Part N°. 12131009) y *frits* de polipropileno (Part N°. 12131021) de *Agilent Technologies*. Para comparar los cartuchos de quitosana calcita con fases comerciales se utilizaron cartuchos C18-Chromabond (500 mg/6mL) y Oasis HLB de Waters (200 mg/6mL). La cuantificación de terbutilazina, metribuzina y prometrina se hizo utilizando el cromatógrafo de gases 7890A de Agilent Technologies con detector de fotoionización de flama (FID). Para esto se empleó una columna DB-5% proporcionada por Agilent Technologies, México.

Caracterización de la quitosana-calcita

La quitosana-calcita fue caracterizada usando FT-IR, XRD, SEM y TGA. Los espectros FT-IR fueron obtenidos usando un espectrómetro PerkinElmer (*Spectrum 100*). Los análisis XRD se obtuvieron usando un difractómetro modelo D8 ADVANCE DAVIN con radiación de Cu-Mo y detector Lynxeye. La morfología del adsorbente fue estudiada usando espectroscopía de difracción de rayos X (EDS) empleando un JEOL JSM-5900 LV y finalmente, el perfil térmico fue analizado usando un equipo TGA 4000 de PerkinElmer.

Extracción en fase sólida

Los cartuchos utilizados se prepararon pesando una cantidad de quitosana-calcita y colocando en un reservorio de polipropileno para *SPE* de 6 mL. La inmovilización del adsorbente se hizo usando dos *frits* de polipropileno. Todos los experimentos se hicieron por triplicado y se evaluó la recuperación obtenida por comparación de las áreas de los analitos, con aquellas obtenidas por inyección directa de la mezcla de estándares a la misma concentración. Para estudiar el comportamiento de la quitosana-

calcita como fase sólida se comparó la eficiencia de recuperación de los analitos de estudio frente a cartuchos elaborados con quitosana comercial y cartuchos comerciales Oasis HLB. Para ello se colocaron los cartuchos en serie vertical donde el primer contacto con la solución fueron los cartuchos de quitosana y de segundo, los cartuchos comerciales. Para evaluar el proceso de SPE se mantuvo el pH de la solución a 7, debido a que estudios previos de capacidad de adsorción de la quitosana-calcita (Borja-Urzola et al., 2021) mostraron que a este valor de pH se favorece la adsorción de triazinas, ya que se evita la repulsión de cargas. Inicialmente se preparó una solución de 100 µg/L de las triazinas. Los cartuchos fueron acondicionados con 6 mL de metanol y 6 mL de agua ultrapura y se pasaron 100 mL de la muestra acuosa con las triazinas. Posteriormente, se lavaron los cartuchos con 12 mL de agua ultrapura y se secaron durante 20 min en una centrífuga a 3500 rpm. La elución se hizo empleando 6 mL de acetona:metanol (50:50). Este procedimiento se aplicó en los cartuchos de quitosana-calcita, quitosana comercial y *Oasis HLB*. Se optimizaron los parámetros de adición de NaCl, tipo y volumen de disolvente de elución y cantidad de adsorbente. Se evaluó la mejora del efecto matriz y el porcentaje de recuperación de los analitos aplicado el modo de mezcla de adsorbente y posteriormente se comparó el método optimizado con cartuchos comerciales *C18-Cromabond* y *Oasis-HLB* de *Waters*.

Cromatografía de gases con detector de fotoionización de flama (GC-FID)

Los análisis se realizaron en un sistema *GC-FID* de Agilent Technologies, modelo 7890A equipado con una columna DB-5% (30m* 0.25mm* 0.25 µm). El puerto de inyección se configuró a 300°C y se inyectó 1 µL de la muestra en modo *splitless* y el flujo de He se mantuvo a 1.15 mL/min. La temperatura del horno fue la siguiente: Temperatura inicial de 100°C, aumentada a 220°C a 80°C/min manteniéndose por 1 min. Posteriormente se aumentó a 250°C a 10°C/min y se mantuvo por 1 min. La temperatura del detector se programó a 300°C, el flujo de H₂ fue de 35 mL/min, aire de 350 mL/min y He (*make up*) de 35 mL/min.

Resultados y discusión

Caracterización de la quitosana-calcita

En el espectro *FT-IR* de la quitosana calcita se observa una banda de absorción en 824 cm⁻¹ que se atribuye al carbonato de calcio (Espíndola-Cortés et al., 2017; Mohammed et al., 2013) (Figura 1a). El adsorbente presenta una banda de adsorción alrededor de 1630 cm⁻¹. Esta banda es característica del doble enlace carbono-oxígeno de la amida I. También se observa una banda, alrededor de los 1621 cm⁻¹, que es un indicador de la formación de la amina primaria después del proceso de desacetilación (Mohammed et al., 2013). La presencia de los enlaces -O-H y -N-H se observa en las bandas de absorción alrededor de 3450 y 3322 cm⁻¹, respectivamente. Se observa una banda en 2924 cm⁻¹ que es característica del enlace -C-H y en 1156, 1060 y 1033 cm⁻¹ que corresponde al enlace -C-O. Las bandas de absorción observadas estuvieron de acuerdo con las bandas encontradas en trabajos previos reportados por Borja-Urzola et al. (2020).

En el difractograma de la quitosana-calcita (Figura 1b) se observan dos picos de difracción alrededor de 9.5° y 19.5° característicos de la quitosana (El-Knidri et al., 2016, 2018). Adicionalmente presenta picos cristalinos en 29.3°, 36.0°, 47.5° y 48.4° asignados a los planos (104), (110), (024) y (018), respectivamente, de la calcita, por lo que es posible que los iones Ca²⁺ sean estabilizados por los monómeros de quitina que no sufren desacetilación (Morse et al., 2007).

El análisis termogravimétrico de la Figura 1c muestra que la descomposición térmica de la quitosana-calcita ocurre en dos etapas. La primera entre 45-110°C con una pérdida de masa del 4-6%, correspondiente a la evaporación de agua (Erdogan y Kaya, 2016). La segunda etapa ocurre a una temperatura de 388°C con una pérdida de masa del 27.64%. Los resultados muestran que la quitosana-calcita presenta estabilidad térmica superior a la reportada por otros autores (Erdogan y

Kaya, 2016; Kaya et al., 2014; Tolesa et al., 2019) que encontraron valores en un intervalo de 295-310°C.

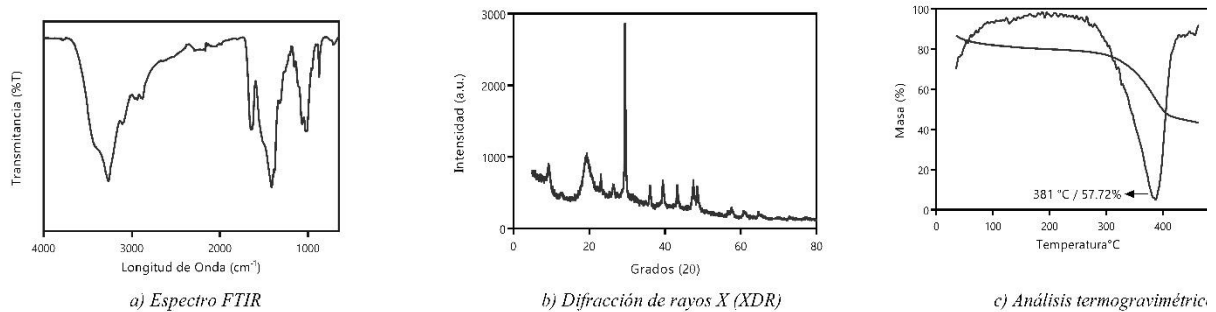


Figura 1. Caracterización de la quitosana-calcita derivada de los residuos de camarón

La morfología de la superficie (Figura 2) indicó que la quitosana presentó una superficie no homogénea que estuvo conformada por una parte lisa y otra rugosa en forma de aglomeraciones. También, se observaron poros de diferentes tamaños distribuidos de manera irregular en la superficie y la formación de pequeños cristales en forma de aglomeraciones.

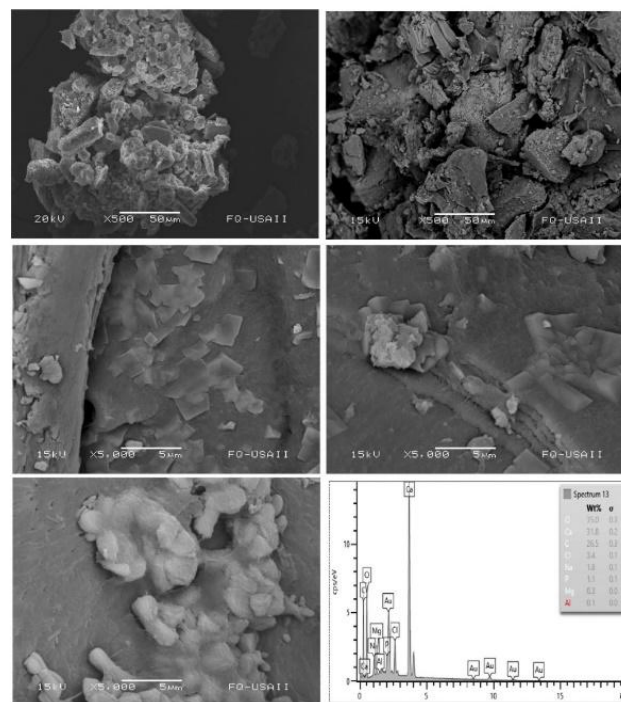


Figura 2. Imágenes de SEM de la morfología de la quitosana-calcita

La presencia de Ca se confirmó mediante el análisis de espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS). Se observa cómo la solución saturada de CaCl_2 en agua y metanol induce la formación de cristales de carbonato de calcio en la superficie del biopolímero confirmando la biomineralización por parte de la quitosana al estar presente una fuente de iones Ca^{2+} (Díaz-Dosque et al., 2008). La presencia de oxígeno y carbono en un porcentaje de masa total del 35 y 26.5%, respectivamente,

implica la presencia de una gran cantidad de grupos funcionales en la superficie del adsorbente que pueden interactuar por medio de reacciones hidrofóbicas o enlaces de hidrógeno.

Optimización de la extracción en fase sólida usando Quitosana-Calcita como adsorbente

En estudios previos se reportó la capacidad de adsorción de la quitosana calcita frente a la terbutilazina, metribuzina y prometrina (Borja-Urzola et al., 2021). En este estudio se reportó que las interacciones químicas entre la quitosana-calcita y las triazinas ocurre por la presencia de varios grupos, -OH, -NH₂ y -NHCOCH₃, presentes en su estructura. Las eficiencias de adsorción reportadas fueron de 76.57±1.28% para la prometrina, 79.22±0.55% para la metribuzina y 68.35±0.46% para la terbutilazina. De acuerdo con estos resultados en un primer intento de evaluar su funcionalidad como fase sólida, se pasó una solución de triazinas a una concentración de 100 µg/L en cartuchos de quitosana-calcita y *Oasis HLB*. Los cartuchos fueron acondicionados con 6 mL de metanol y 6 mL de agua ultrapura. Posteriormente, se pasaron 100 mL solución. El lavado de los cartuchos se hizo con 12 mL de agua ultrapura y se secaron durante 20 min con una centrifuga a 3500 rpm. La elución se hizo empleando 4 mL de una mezcla acetonitrilo:metanol 50:50. Con la finalidad de corroborar la retención y la fugacidad de los analitos en la fase de quitosana, los cartuchos se colocaron en secuencia vertical. El primer cartucho correspondía al de la quitosana-calcita y el segundo al cartucho *HLB*. Los resultados obtenidos mostraron que no hubo retención en los cartuchos elaborados con la quitosana-calcita, debido a que el 90% de los analitos se encontraron en los cartuchos *HLB*. Esto puede deberse a dos factores: 1) La superficie de contacto se ve afectada al momento de empacar el adsorbente en una columna de lecho fijo, por lo que la adsorción de los analitos requiere más tiempo y 2) La quitosana-calcita no funciona bajo el mecanismo de fase reversa y el agua presente en la solución de triazinas compite por los sitios activos polares debido a la formación de puentes de hidrógeno, lo que limita la retención de los analitos.

De acuerdo con lo anterior, se estudió la influencia del cambio de matriz de los analitos sobre la eficiencia de recuperación de los analitos. Para esto se evaluó la saturación de la solución acuosa con NaCl y el cambio de agua a un solvente no polar como el hexano, ya que es posible que debido al grado de desacetilación, %DD, de la quitosana-calcita y la presencia de grupos -NH₂ libres esta se comporte como las fases normales usadas en cromatografía. Los resultados del efecto de la saturación se muestran en la Figura 3a y se observa que el cambio de matriz acuosa a no polar mejora la eficiencia del proceso de extracción en un 100% usando a la quitosana-calcita como fase sólida. Con esto se comprueba que la quitosana-calcita se comporta como un adsorbente altamente polar y que el agua donde están disueltas las triazinas interactúa formando puentes de hidrógeno con los grupos polares del adsorbente. Este hecho, hace que disminuyan los sitios activos y, por tanto, no ocurra la retención de las triazinas. Al momento de pasar la matriz de hexano, las interacciones se hacen específicas y selectivas debido a su mediana polaridad. Esto hace que el hexano pase a través de la columna sin generar interacciones. La saturación mejora significativamente la eficiencia de recuperación de los analitos. Se observa que una saturación del 20% permite recuperar los analitos por encima del 60%. Al evaluar una saturación del 40% se recuperan el 90% de los analitos, por lo que la adición de NaCl favorece la adsorción y elución de la metribuzina, prometrina y terbutilazina en la quitosana-calcita al momento de la *SPE*.

La adición de NaCl incrementa la fuerza iónica de la muestra acuosa y disminuye la solubilidad de los compuestos orgánicos. En consecuencia, se incrementaron los coeficientes de distribución entre la fase sólida y la matriz, mejorando la sensibilidad de los métodos de *SPE*. De acuerdo con Kharbouche et al. (2019) al agregar NaCl en una matriz acuosa las moléculas de agua forman esferas de hidratación alrededor de las moléculas de NaCl, reduciendo así la cantidad de agua disponible para interactuar con los analitos polares. Este paso favorece la transferencia de compuestos polares de la fase acuosa o al adsorbente y mejora los porcentajes de recuperación (Anastassiades et al., 2003). En otras palabras, la muestra se hace menos polar y, por lo tanto, menos receptiva a los analitos polares. De

acuerdo con estos resultados la optimización del proceso de *SPE* se hizo saturando la muestra acuosa al 40% con NaCl.

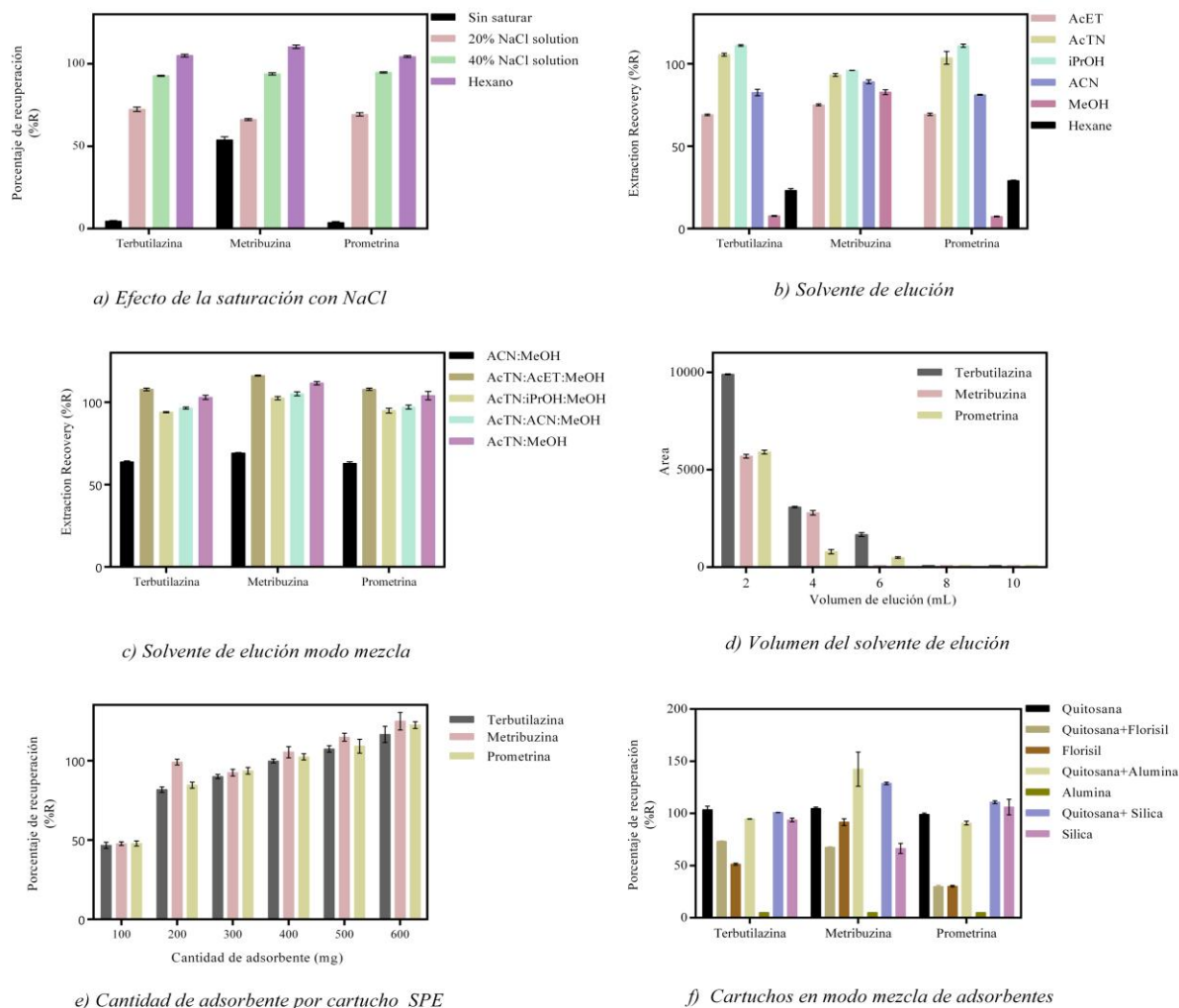


Figura 3. Optimización de la extracción en fase sólida usando quitosana-calcita

La optimización del proceso *SPE* usando quitosana-calcita como adsorbente y terbutilazina, metribuzina y prometrina como analitos se muestra en la Figura 3. El tipo de disolvente y el volumen óptimo de elución se muestran en las Figuras 3b, c y d. La metribuzina fue eluida con un porcentaje de recuperación del $82.78 \pm 1.49\%$ al usar metanol, mientras que la terbutilazina y la prometrina se recuperaron en menos de un 10%. Al usar el hexano se observó un comportamiento inverso con respecto del metanol. En este caso, la metribuzina no logró eluir del cartucho, mientras que la terbutilazina y la prometrina lo hicieron en un 23.08 ± 1.27 y $29.11 \pm 0.26\%$, respectivamente. Este comportamiento indica que la fuerza de las interacciones con las que son retenidos cada uno de los compuestos en la quitosana-calcita es diferente. En el caso de la metribuzina, la interacción quitosana-metribuzina viene dada por una interacción del tipo puente de hidrógeno. Por esta razón el metanol, que es un disolvente altamente polar, fue capaz de romper esta interacción al formar también puentes de hidrógeno con la metribuzina. Para la terbutilazina y la prometrina, la interacción por puentes de

hidrógeno no podría asegurarse y, más bien, podrían ocurrir interacciones polares un poco más débiles como las interacciones hidrofílicas o dipolo-dipolo. Por esta razón no logran ser eluidos por el metanol y se eluyen completamente con los disolventes medianamente polares, como el isopropanol o con los disolventes apróticos, como la acetona, acetato de etilo y acetonitrilo, que son incapaces de interaccionar formando puentes de hidrógeno (Zhou et al., 2017).

La evaluación de la mezcla de disolventes mostró que en todas las mezclas evaluadas la eficiencia de recuperación fue superior al 90%, excepto para la mezcla 50:50 acetonitrilo:metanol, donde los porcentajes de recuperación fueron cercanos al 60% para todos los compuestos. Las mezclas acetona:acetato de etilo:metanol y acetona:metanol mostraron porcentajes de recuperación del 107.92 ± 0.83 y $102.94 \pm 1.27\%$ para la terbutilazina, 116.21 ± 0.33 y $111.59 \pm 1.05\%$ para la metribuzina y de 107.03 ± 0.69 y $104.03 \pm 2.54\%$ para la prometrina, respectivamente. Aunque ambas mezclas mostraron recuperaciones por encima del 100%, se seleccionó la mezcla acetona:metanol (50:50) como disolvente de elución ya que involucraba menos reactivos químicos. En la Figura 3d se observa que la elución completa de los analitos se presentó a los 6 mL al utilizar la mezcla acetona:metanol 50:50.

Con la finalidad de conocer la cantidad óptima de quitosana en los cartuchos *SPE*, éstos fueron empacados con 100, 200, 300, 400, 500 y 600 mg del compuesto y se hizo pasar una solución de 50 mL a una concentración de 50 $\mu\text{g/L}$. Los resultados se muestran en la Figura 3e y se observa que las recuperaciones aumentan conforme se incrementa la cantidad de adsorbente con una eficiencia de recuperación superior al 100% para todos los compuestos a partir de los 400 mg. Se seleccionaron 400 mg de fase sólida para asegurar un menor volumen de elución posteriormente. A esta cantidad de fase sólida se necesitaron adicionar 6 mL de la mezcla acetona:metanol para lograr recuperaciones cercanas al 100%. Con 600 mg, la cantidad óptima de disolvente era de 10 mL y las recuperaciones seguían siendo cercanas al 100%.

Debido a que la interacción de la quitosana con el agua disminuye su eficiencia de adsorción en *SPE* se evaluó el comportamiento de la eficiencia de recuperación al mezclar la quitosana con un adsorbente más polar como el *florisil*®, la alúmina y la sílice. Esta mezcla de adsorbentes, conocida como *Mixed-Mode Sorbents*, en inglés, permite obtener extractos muchos más limpios (disminuyendo el efecto de la matriz) y una mejora en la reproducibilidad del método y en el incremento de los porcentajes de recuperación (Fontanals et al., 2010, 2020; Moral et al., 2023). En la literatura hay propuestas de procesos de extracción con mezclas de adsorbentes (Caban et al., 2019; Fontanals et al., 2020; Moral et al., 2023) donde se usan con la finalidad de reducir el efecto de los componentes de la matriz al ser empleados en el análisis ambiental de muestras acuosas. En la Figura 3f se observa que la sílice y el *florisil*® por sí solos retuvieron a las triazinas ya que se recuperó una parte de los analitos añadidos, mientras que la alúmina no retuvo a los compuestos. Los mayores porcentajes de recuperación los presentó la sílice ($93.79 \pm 1.75\%$ para la terbutilazina, $66.38 \pm 4.86\%$ para la metribuzina y $106.05 \pm 7.50\%$ para la prometrina). Los porcentajes de recuperación en el cartucho de quitosana (cercanos al 100%) mejoraron para la metribuzina con la adición de alúmina, presentado un porcentaje del $142.48 \pm 16.33\%$ para la misma solución de 50 $\mu\text{g/L}$, lo cual es muy interesante, ya que es posible que la alúmina permita la retención y elución de la metribuzina con mayor facilidad y, por eso, su respuesta es diferente a la obtenida con la evaluación de la linealidad a la misma concentración. Este valor de porcentaje de recuperación por encima del 100% es posible debido a que la *SPE* es una técnica de preconcentración de compuestos en concentraciones trazas, por lo que una ligera variación en el volumen de elución y en el final recuperado, hace que la calibración previamente realizada en el equipo instrumental, presente variaciones de unidades. La sílice junto con la quitosana permitió obtener eficiencias mayores de recuperación que al evaluar la quitosana por sí sola. También se obtuvo menos variación y la desviación estándar de los resultados disminuyó, indicando que quizás la sílice ayudó a disminuir el efecto matriz del agua saturada. Los cartuchos de *florisil*® no permitieron

que la muestra fluyera con facilidad a través del cartucho, por lo que no es adecuado mezclar quitosana con *florisil*® ya que la transferencia de masa de los analitos al adsorbente se vería afectada.

Rendimiento analítico de *SPE* y comparación con alternativas comerciales

Para validar el rendimiento del método *SPE* propuesto, se determinó el rango lineal, el coeficiente de determinación (R^2) y la comparación con fases de *SPE* comerciales. Todo esto en función de las condiciones óptimas realizadas en los experimentos anteriores. La linealidad se evaluó en un rango de 10 a 100 $\mu\text{g/L}$, obteniéndose valores de R^2 de 0.988, 0.976 y 0.983 para la terbutilazina ($y = 104.41x - 236.92$), metribuzina ($y = 62.21x - 267.36$), prometrina ($y = 97.58x - 77.52$), respectivamente. Los valores de R^2 obtenidos indican una relación entre la concentración de los analitos y la respuesta del método de *SPE* propuesto.

La comparación con fases comerciales comunes empleadas para la extracción de las triazinas estudiadas se muestra en la Figura 4. La quitosana-calcita puede lograr porcentajes de recuperación cercanos al 100% al igual que lo hacen las fases comerciales, lo cual demuestra que es posible usar la quitosana calcita obtenida de los residuos de camarón como adsorbente en procesos de extracción en fase sólida. Esta quitosana presenta la ventaja de ser un adsorbente efectivo, económico y amigable con el ambiente, ya que la quitosana es biodegradable y proviene de una fuente renovable, los residuos de camarón.

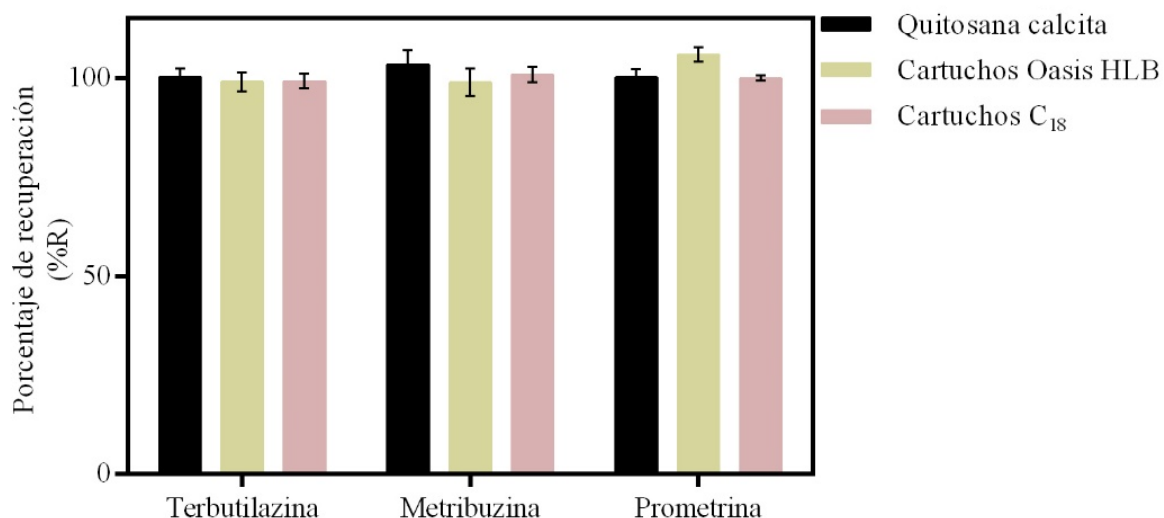


Figura 4. Comparación con fases sólidas comerciales, *C18-Cromabond* y *Oasis HLB-Waters*

Conclusiones

La quitosana-calcita puede considerarse un adsorbente de bajo-coste ya que proviene de residuos sin valor agregado de la industria de alimentos y se obtiene por una metodología que requiere poco procesamiento y además, se evita el uso de reactivos agresivos como el NaOH concentrado, el cual es usado en los métodos de extracción convencional. La quitosana-calcita como fase sólida se caracteriza por ser una fase polar debido a la presencia de los grupos $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$ y $-\text{NHCOCH}_3$. El agua desactiva su función como adsorbente al saturar los sitios polares activos. Esta investigación demostró que su aplicación en matrices polares necesita una modificación de la matriz, por ejemplo, una saturación con sales, como el NaCl. Los analitos usados para evaluar el proceso de *SPE* presentan baja a mediana polaridad, mostrando una retención y posterior elución de manera eficiente. La quitosana-calcita puede presentar limitaciones al usarse con compuestos muy polares, que pueden generar interacciones muy

fuertes, que requieran un volumen muy alto de disolvente para su elución o que impida su completa desorción de adsorbente.

La quitosana-calcita obtenida por la metodología propuesta por Borja-Urzola et al. (2020) presenta un %DD cercano al 60%. Este valor de %DD es muy importante debido a que en comparación con la quitosana comercial que presenta un %DD entre 75-85% su aplicación como adsorbente en SPE no es posible al momento de usar una matriz acuosa sin modificación. El %DD limita su aplicación como fase sólida al momento de estudiar analitos de baja y mediana polaridad presentes en matrices acuosas. Un mayor grado de desacetilación se asocia con una mayor cantidad de grupos aminos libres y, por ende, las interacciones por puentes de hidrógeno con el agua se incrementan y llevan a una hidratación del adsorbente o retención de agua, limitando el paso de la muestra a través de la columna. Sin embargo, es posible su aplicación en otras técnicas de preparación de muestras destinadas a matrices de naturaleza diferente a la acuosa o como adsorbente de limpieza en procesos de "Clean-up" donde se requiere de eliminar las interferencias polares de las muestras a estudiar. Estos resultados explican por qué en la literatura no hay reportes del uso de la quitosana en SPE y sí los hay en el proceso de "clean-up" (de-Oliveira-Arias et al., 2014, 2018).

Glosario

Términos y siglas	Significado
AcET	Acetato de etilo
ACN	Acetonitrilo
AcTN	Acetona
<i>C18-Cromabond</i>	Cartuchos comerciales <i>C18-Cromabond</i> - Fase sólida de n-octadecilo ligado a sílice
<i>DB-5%</i>	Columna no polar usada en cromatografía de gases compuesta de (5%-Fenil)-metilpolisiloxano
<i>EDS</i>	Espectroscopía de dispersión de energía de rayos X por sus siglas en inglés, <i>energy dispersive spectroscopy</i>
<i>FID</i>	Siglas en inglés para detector de ionización de flama (<i>Flame ionization detector</i>)
<i>Florisil®</i>	Silicato de magnesio activado. Fase sólida comercial usada como adsorbente en cromatografía
<i>FT-IR</i>	Siglas en inglés para IR-FT, infrarrojo con Transformada de Fourier (<i>Fourier Transform Infrared</i>)
<i>GC-FID</i>	Siglas en inglés para CG-DIF, cromatografía de gases acoplado a un detector de ionización de flama o llama (<i>gas chromatograph-flame ionization detector</i>)
He	Helio
H ₂	Hidrógeno
iPrOH	Isopropanol
MAC-141 ®©	Disolvente formado por una mol de metanol, cuatro moles de agua y una mol de cloruro de calcio (Flores-Ortega et al., 2004)
<i>make up</i>	Términos usados para hacer referencia al gas auxiliar empleado en cromatografía de gases
MeOH	Metanol
min	Minutos
mL	Mililitros
NaCl	Cloruro de sodio
<i>Oasis-HLB-Waters</i>	Cartucho comercial conocido como <i>Oasis HLB</i>
rpm	Revoluciones por minuto

Términos y siglas	Significado
<i>SEM</i>	Microscopía electrónica de barrido por sus siglas en inglés, <i>scanning electron microscopy</i>
<i>SPE</i>	Extracción en Fase Sólida (<i>SPE</i> , por sus siglas en inglés <i>Solid Phase Extraction</i>)
<i>TGA</i>	Análisis termogravimétrico por siglas en inglés, <i>thermogravimetric analysis</i>)
<i>XRD</i>	Difracción de Rayos X (<i>XRD</i> , por sus siglas en inglés <i>X Ray Diffraction</i>)
Símbolos griegos y otros	
µg	Unidad de masa-Microgramos
°C	Unidad de Temperatura- grados Celsius
%DD	Porcentaje de desacetilación de la quitosana

Reconocimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por medio de los Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (LIQyQA) de la Facultad de Química para la realización de los experimentos de optimización de la extracción en fase sólida y la caracterización de la quitosana.

Referencias bibliográficas

- Anastassiades, M., Lehotay, S.J. Stajnbaher, D., Schenck, F.J. 2003. Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction / Partitioning and "Dispersive solid-phase extraction" for the determination of pesticide residues in produce. *Journal of AOAC International*. 86(2):412-431.
- Bakshi, P.S., Selvakumar, D., Kadirvelu, K., Kumar, N.S. 2020. Chitosan as an environment friendly biomaterial – A review on recent modifications and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 150:1072-1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.113>
- Bhatnagar, A., Sillanpää, M. 2009. Applications of chitin- and chitosan-derivatives for the detoxification of water and wastewater - A short review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 152(1-2):26-38. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.09.003>
- Borja-Urzola, A.d.C., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2021. Chitosan-calcite from shrimp residues: A low-cost adsorbent for three triazines removal from aqueous media. *Materials Today Communications*. 26: 102131. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102131>
- Borja-Urzola, A.d.C., García-Gómez, R.S., Flores, R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2020. Chitosan from shrimp residues with a saturated solution of calcium chloride in metanol and water. *Carbohydrate Research*. 497:108116 <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108116>
- Caban, M., Lis, H., Kobylis, P., Stepnowski, P. 2019. The triple-sorbents solid-phase extraction for pharmaceuticals and estrogens determination in wastewater samples. *Microchemical Journal*. 149: 103965. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.103965>
- de-Oliveira-Arias, J.L., Rombaldi, C., Caldas, S.S., Primel, E.G. 2014. Alternative sorbents for the dispersive solid-phase extraction step in quick, easy, cheap, effective, rugged and safe method for extraction of pesticides from rice paddy soils with determination by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 1360:66–75. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.07.082>
- de-Oliveira-Arias, J.L., Schneider, A., Batista-Andrade, J.A., Vieira, A.A., Caldas, S.S., Primel, E.G. 2018. Chitosan from shrimp shells: A renewable sorbent applied to the clean-up step of the QuEChERS method in order to determine multi-residues of veterinary drugs in different types of milk. *Food Chemistry*. 240:1243–1253. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.041>
- Díaz-Dosque, M., Aranda, P., Darder, M., Retuert, J., Yazdani-Pedram, M., Luis Arias, J., Ruiz-Hitzky, E. 2008. Use of biopolymers as oriented supports for the stabilization of different polymorphs of biomineralized calcium carbonate with complex shape. *Journal of Crystal Growth*. 310(24):5331-5340. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.08.057>
- El-Knidri, H., Belaabed, R., Addaou, A., Laajeb, A., Lahsini, A. 2018. Extraction, chemical modification and characterization of chitin and chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*. 120:1181-1189. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.139>
- El-Knidri, H., El-Khalifaouy, R., Laajeb, A., Addaou, A., Lahsini, A. 2016. Eco-friendly extraction and characterization of chitin and chitosan from the shrimp shell waste via microwave irradiation. *Process Safety and Environmental Protection*. 104:395-405. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.09.020>
- Erdogan, S., Kaya, M. 2016. High similarity in physicochemical properties of chitin and chitosan from nymphs and adults of a grasshopper. *International Journal of Biological Macromolecules*. 89:118-126. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.059>

- Espíndola-Cortés, A., Moreno-Tovar, R., Bucio, L., Gimeno, M., Ruvalcaba-Sil, J.L., Shirai, K. 2017. Hydroxyapatite crystallization in shrimp cephalothorax wastes during subcritical water treatment for chitin extraction. *Carbohydrate Polymers*. 172:332–341. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.055>
- Flores-Ortega, R.A., Barrera-Rodríguez, S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2004. Extracción ecológica de quitina y subproductos. Patente Núm. 264482. Solicitud de Registro: Octubre 1, 2004. Facultad de Química, UNAM. IMPI. PA/a/2004/009517. Otorgada el 12 de febrero de 2009. Ciudad de México, México.
- Fontanals, N., Borrull, F., Marcé, R.M. 2020. Mixed-mode ion-exchange polymeric sorbents in environmental analysis. *Journal of Chromatography A*. 1609: 460531. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.460531>
- Fontanals, N., Marcé, R.M., Borrull, F., Cormack, P.A.G. 2010. Mixed-mode ion-exchange polymeric sorbents: dual-phase materials that improve selectivity and capacity. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. 29(7):765-779. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.03.015>
- Han, Y., Song, L., Zou, N., Chen, R., Qin, Y., Pan, C. 2016. Multi-residue determination of 171 pesticides in cowpea using modified QuEChERS method with multi-walled carbon nanotubes as reversed-dispersive solid-phase extraction materials. *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*. 1031:99-108. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2016.07.043>
- He, J., Song, L., Chen, S., Li, Y., Wei, H., Zhao, D., Gu, K., Zhang, S. 2015. Novel restricted access materials combined to molecularly imprinted polymers for selective solid-phase extraction of organophosphorus pesticides from honey. *Food Chemistry*. 187:331-337. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.069>
- Herrera-Herrera, A.V., Asensio-Ramos, M., Hernández-Borges, J., Rodríguez-Delgado, M.A. 2015. Pesticides and Herbicides: Types, Uses, and Determination of Herbicides. *Encyclopedia of Food and Health*. Pp. 326-332. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00536-5>
- Jagirani, M.S., Soylak, M. 2024. Green sorbents for the solid phase extraction of trace species. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 47:100899. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100899>
- Kaya, M., Baublys, V., Can, E., Šatkauskienė, I., Bitim, B., Tubelytė, V., Baran, T. 2014. Comparison of physicochemical properties of chitins isolated from an insect (*Melolontha melolontha*) and a crustacean species (*Oniscus asellus*). *Zoomorphology*. 133(3):285–293. <https://doi.org/10.1007/s00435-014-0227-6>
- Kharbouche, L., Gil-García, M.D., Lozano, A., Hamaizi, H., Galera, M.M. 2019. Solid phase extraction of pesticides from environmental waters using an MSU-1 mesoporous material and determination by UPLC-MS/MS. *Talanta*. 199:612–619. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.02.092>
- Martins, N., Carreiro, E.P., Locati, A., Ramalho, J.P.P., Cabrita, M.J., Burke, A.J., Garcia, R. 2015. Design and development of molecularly imprinted polymers for the selective extraction of deltamethrin in olive oil: An integrated computational-assisted approach. *Journal of Chromatography A*. 1409:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.07.025>
- Mohammed, M.H., Williams, P.A., Tverezovskaya, O. 2013. Extraction of chitin from prawn shells and conversion to low molecular mass chitosan. *Food Hydrocolloids*. 31(2):166–171. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.10.021>
- Mojiri, A., Zhou, J.L., Robinson, B., Ohashi, A., Ozaki, N., Kandaichi, T., Farraji, H., Vakili, M. 2020. Pesticides in aquatic environments and their removal by adsorption methods. *Chemosphere*. 253:126646. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126646>
- Moral, A., Clivillé-Cabrè, P., Borrull, F., Furton, K.G., Kabir, A., Marcé, R.M., Fontanals, N. 2023. Application of a homemade silica-based mixed-mode ion-exchange sorbent for the determination of drugs in environmental water samples. *Advances in Sample Preparation*. 7: 100074. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2023.100074>
- Morse, J.W., Arvidson, R.S., Lüttge, A. 2007. Calcium carbonate formation and dissolution. *Chemical Reviews*. 107(2):342–381. <https://doi.org/10.1021/cr050358j>
- Pacheco-Fernández, I., Allgaier-Díaz, D.W., Mastellone, G., Cagliero, C., Díaz, D.D., Pino, V. 2020. Biopolymers in sorbent-based microextraction methods. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. 125: 115839 <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115839>
- Rekik, S.B., Gassara, S., Bouaziz, J., Deratani, A., Baklouti, S. 2019. Enhancing hydrophilicity and permeation flux of chitosan/kaolin composite membranes by using polyethylene glycol as porogen. *Applied Clay Science*. 168:312–323. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.029>
- Sajid, M. 2022a. Chitosan-based adsorbents for analytical sample preparation and removal of pollutants from aqueous media: Progress, challenges and outlook. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 36: e00185 <https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00185>
- Sajid, M. 2022b. Chitosan-based adsorbents for analytical sample preparation and removal of pollutants from aqueous media: Progress, challenges and outlook. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 36:e00185 <https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00185>
- Salamatinia B., Amouzgar, P. 2015. A short review on presence of pharmaceuticals in water bodies and the potential of chitosan and chitosan derivatives for elimination of pharmaceuticals. *Journal of Molecular and Genetic Medicine*. S4:001. <https://doi.org/10.4172/1747-0862.s4-001>
- Salehi, E., Daraei, P., Shamsabadi, A.A. 2016. A review on chitosan-based adsorptive membranes. *Carbohydrate Polymers*. 152:419-432. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.033>
- Salehi, E., Madaeni, S.S. 2014. Influence of poly(ethylene glycol) as pore-generator on morphology and performance of chitosan/poly(vinyl alcohol) membrane adsorbents. *Applied Surface Science*. 288:537-541. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.067>
- Sun, R., Lu, F., Yu, C., Yang, Y., Qiao, L., Liu, A. 2022. Peanut shells-derived biochars as adsorbents for the pipette-tip solid-phase extraction of endocrine-disrupting phenols in water, milk and beverage. *Journal of Chromatography A*. 1673:463101. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2022.463101>
- Tolesa, L.D., Gupta, B.S., Lee, M.J. 2019. Chitin and chitosan production from shrimp shells using ammonium-based ionic liquids. *International Journal of Biological Macromolecules*. 130:818–826. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.018>

-
- Wahba, M.I. 2017. Porous chitosan beads of superior mechanical properties for the covalent immobilization of enzymes. *International Journal of Biological Macromolecules*. 105:894–904. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.102>
- Wan-Ngah, W.S., Teong, L.C., Hanafiah, M.A.K.M. 2011. Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. *Carbohydrate Polymers*. 83(4):1446–1456. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.11.004>
- Wang, J., Zhuang, S. 2017. Removal of various pollutants from water and wastewater by modified chitosan adsorbents. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 47(23):2331–2386. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1421845>
- Werner, J., Frankowski, R., Grześkowiak, T., Zgoła-Grześkowiak, A. 2024a. Green sorbents in sample preparation techniques – naturally occurring materials and biowastes. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. 176:117772 <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117772>
- Werner, J., Zgoła-Grześkowiak, A., Grześkowiak, T., Frankowski, R. 2024b. Biopolymers-based sorbents as a future green direction for solid phase (micro)extraction techniques. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. 173:117659 <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117659>
- Xiong, Y., Wan, L., Xuan, J., Wang, Y., Xing, Z., Shan, W., Lou, Z. 2016. Selective recovery of Ag(I) coordination anion from simulate nickel electrolyte using corn stalk based adsorbent modified by ammonia-thiosemicarbazide. *Journal of Hazardous Materials*. 301:277–285. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.003>
- Zhao, G., Song, S., Wang, C., Wu, Q., Wang, Z. 2011. Determination of triazine herbicides in environmental water samples by high-performance liquid chromatography using graphene-coated magnetic nanoparticles as adsorbent. *Analytica Chimica Acta*. 708(1–2):155–159. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.10.006>
- Zhou, N.Z., Liu, P., Su, X.C., Liao, Y.H., Lei, N.S., Liang, Y.H., Zhou, S.H., Lin, W.S., Chen, J., Feng, Y.Q., Tang, Y. 2017. Low-cost humic acid-bonded silica as an effective solid-phase extraction sorbent for convenient determination of aflatoxins in edible oils. *Analytica Chimica Acta*. 970:38–46. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.02.029>

Hoja en blanco / *Intentionally blank page*

Instructivo para autores(as)¹¹

La revista *Ambiens Techné et Scientia México* es una revista científico-tecnológica bianual editada por la Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México y la Red Internacional de Ciencias Ambientales. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja el punto de vista de las entidades que la publican. Está indizada en el catálogo Latindex.

La revista *Ambiens Techné et Scientia México* podrá aceptar para su publicación los siguientes tipos de manuscritos:

- Investigación y desarrollo. Se presentan aportaciones de estudios experimentales y/o teóricos de investigación básica y/o aplicada o de desarrollo humanístico o tecnológico. Su objeto será difundir los avances de las ciencias y las tecnologías derivadas así como aquellas que protejan al ambiente, de tal forma que resulten de interés para los profesionales de la ciencia, la tecnología y las humanidades teniendo como referente a la protección del ambiente (ciencias y tecnologías verdes)
- Artículos técnicos. Deben abordar temas de interés práctico para investigadores de las ciencias y las ingenierías y tecnologías, así como para investigadores de las humanidades y las ciencias sociales, educativas y de la salud tales como procedimientos de cálculo, criterios de selección de equipo, predicción de propiedades, técnicas de simulación y optimización u optimación de procesos, instrumentación y control, etc.
- Actualización profesional y educación. Presentarán los aspectos fundamentales de la enseñanza en la ingeniería y las tecnologías, así como para las ciencias exactas, naturales y humanísticas y de todos los ámbitos del conocimiento humano, de forma clara y accesible. Su propósito será mantener actualizados, a los profesionales, académicos y estudiantes, proporcionando material didáctico útil.

Los manuscritos deberán ser **inéditos y contener material original** para los y las lectores(as). Los autores serán los únicos responsables del contenido de sus trabajos. Si son aceptados para su publicación en la revista, los autores ceden de manera automática sus derechos autorales a la revista para facilitar su publicación en formatos físicos y/o electrónicos, incluido *Internet*. Una versión electrónica ya sea en español o en inglés deberá ser enviada a:

Marisela Bernal-González, Directora de la revista (Editora-en-Jefe), UNAM, Facultad de Química
 Beatriz Espinosa-Aquino, Directora adjunta de la revista (Editora-en-Jefe adjunta), BUAP, Instituto de Ciencias
 Rolando Salvador García-Gómez, Director administrativo de la revista (Editor técnico), UNAM, Facultad de Química
 Samuel Mendoza-Pérez, Director administrativo adjunto (Editor técnico adjunto), UNAM, Facultad de Química

Consejo Editorial de la Revista *Ambiens Techné et Scientia México*
 UNAM, Facultad de Química
 Facultad de Química de la UNAM

Authors instructions¹²

The journal Ambiens Techné et Scientia México is a biannual scientific-technological journal edited by the Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México (Network for the Analysis of Environmental Quality in Mexico) and the Red Internacional de Ciencias Ambientales (International Network of Environmental Sciences). The content of the articles is the sole responsibility of the author(s) and does not reflect the point of view of the entities that publish it. It is currently indexed in the Latindex catalog.

The journal Ambiens Techné et Scientia México can accept for publication the following type of contributions:

- Research, investigation and development. They present contributions from experimental and/or theoretical studies of basic and/or applied research or humanistic or technological development. Their objective is the dissemination of the advances in science and derived technologies as well as those related to environmental protection, in such a way that they are of interest to scholars in the fields of science, technology and humanities with reference to environmental protection (green sciences and technologies)*
- Technical articles. They address topics of practical interest to scientists, to engineers, to researchers in the humanities and the social, educational, and health sciences, such as calculation procedures, equipment selection criteria, property prediction, simulation techniques and process optimization or optimization, instrumentation and control, etc.*
- Professional updating and education. Contributions will include the fundamental aspects of teaching in engineering and technologies, as well as for the exact, natural and humanistic sciences and all areas of human knowledge, in a clear and accessible way. Its purpose will be to keep professionals, academics, and students updated, providing useful didactic material.*

Manuscripts should be unpublished and contain original material for readers. The author(s) are solely responsible for the content of their work. If accepted for publications in the journal, the author(s) automatically assign their copyrights to the journal to facilitate publication in physical and/or electronic formats, including the Internet. An electronic version in either Spanish or English should be sent to:

*Marisela Bernal-González, Director of the Journal (Editor-in-Chief), UNAM, Facultad de Química
 Beatriz Espinosa-Aquino, Adjunct Director of the Journal (Adjunct Editor-in-Chief), BUAP, Instituto de Ciencias
 Rolando Salvador García-Gómez, Administrative Director of the Journal (Technical Editor), UNAM, Facultad de Química
 Samuel Mendoza-Pérez, Adjunct Technical Director of the Journal (Adjunct Technical Editor), UNAM, Facultad de Química*

*Editorial Council of the Journal Ambiens Techné et Scientia México
 UNAM, Facultad de Química*

¹¹ Los artículos han sido arbitrados por pares -modalidad doble ciego- y reflejan opiniones de la exclusiva responsabilidad del(a) o de los(as) autores(as). Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización

¹² *The articles were peer-reviewed in the double-blind modality and their content is the exclusive responsibility of the author(s). The total or partial reproduction of the contents and images of the publication without prior authorization is prohibited*

Circuito de la Investigación Científica s/n, Cd. Universitaria
04510 Ciudad de México.
Red para Análisis de la Calidad Ambiental en México
Correos-e: marisela_bernal2000@yahoo.com.mx,
marisela_bernal2000@quimica.unam.mx,
bett_espinosa@hotmail.com, rolandoga2000_a@yahoo.com,
rolandogarciagomez@quimica.unam.mx,
zamuél@comunidad.unam.mx

Facultad de Química de la UNAM
Circuito de la Investigación Científica s/n, Cd. Universitaria
04510 Ciudad de México. MÉXICO
Correos-e: marisela_bernal2000@yahoo.com.mx,
marisela_bernal2000@quimica.unam.mx,
bett_espinosa@hotmail.com, rolandoga2000_a@yahoo.com,
rolandogarciagomez@quimica.unam.mx,
zamuél@comunidad.unam.mx

Cada manuscrito tendrá un número de archivo. Una vez aceptado, el(los) autor(es) deberá(n) enviar la versión final en forma electrónica (como un archivo adjunto en un correo electrónico empleando paquetería Word para Windows 97-2003 para evitar incompatibilidades). En el texto deberán insertarse las tablas y material gráfico con una resolución alta en donde correspondan. El documento deberá seguir el formato que se describe a continuación. El idioma oficial de la revista es el español y deberá contar con un resumen en inglés y al menos tres palabras clave en ambos idiomas para ser incluidas en los índices internacionales. Si la contribución se encuentra en el idioma inglés, estas deberán contener además del título, el resumen y las palabras clave en español. En este caso, si la lengua materna de los autores no es el inglés, el texto deberá ser revisado por una persona conocedora del tema y cuya lengua materna sea el inglés.

Título y autores(as)

La primera página deberá contener el título del trabajo, su traducción al inglés, los nombres completos de los autores como deseen que aparezcan, sin grados ni títulos. Si usan sus dos apellidos, paterno y materno, se deberán unir con un guión para evitar confusiones a los lectores sobre cuál es el apellido del(a) autor(a). Debe contener también el nombre y la dirección de la institución donde se realizó el trabajo. Debe indicarse con un asterisco al autor a quien debe dirigirse la correspondencia, con la dirección, teléfono, fax y correo electrónico. Si se desea, en un pie de página se pueden indicar la o las direcciones actuales de los autores. El título debe reflejar el objetivo principal del trabajo en forma concisa. Utilice un título complementario sólo cuando sea estrictamente necesario.

Resumen

La segunda página debe contener un breve resumen del trabajo (un párrafo entre 200 y 400 palabras), donde se establezcan los objetivos metodológica, resultados y conclusiones. Se recomienda encarecidamente que todas y cada una de las traducciones sean realizadas por traductores expertos. Se deberá de presentar en español e inglés. Se incorporarán de tres a cinco palabras clave en español e inglés.

Texto

El texto comenzará en la tercera página. Deberá estar escrito de una manera concisa y coherente, utilizando enunciados cortos y simples en estilo impersonal y evitando la información detallada previamente de libros, tesis, artículos previos o cualquier material publicado de fácil acceso. El(los) autor(es) deberá(n) dividir el texto en secciones, las cuales pueden incluir introducción o antecedentes, técnicas experimentales / teoría, procedimientos, resultados, discusión y conclusiones. En la introducción se establecerá el objeto del artículo, evitando una relación demasiado extensa de la literatura existente. Las referencias a las ecuaciones, figuras y tablas deberán hacerse con un número entre paréntesis. Las ecuaciones incluirán su número entre paréntesis, a la derecha. Los resultados se presentarán, de preferencia, en tablas o figuras, limitando el texto exclusivamente al análisis e interpretación de las mismas. Como norma, las tablas con datos que han sido incluidos en figuras (o viceversa) deberán evitarse. Se limitará el número de tablas y figuras al mínimo requerido para que el trabajo se entienda en forma clara y correcta. El texto no debe incluir símbolos escritos a mano sino con el propio procesador de palabras evitando que se presten a confusión,

Each manuscript will have a file number. Once accepted, the author (s) must send the final version electronically (as an attachment in an email using Word for Windows 97-2003 packages to avoid incompatibilities). Tables and graphic material with high resolution should be attached where applicable. The document must follow the format described below. The official language of the journal is Spanish and it must have an additional abstract in English and at least three keywords in both languages to be included in the international indexes. If the contribution is in the English language, these must also contain the title, the abstract and the keywords in Spanish. In this case, if the authors' mother tongue is not English, the text must be reviewed by a person familiar with the subject and whose mother tongue be English.

Title and author(s)

First page should contain the contribution title in Spanish, its translation into English, and the full names of the author(s) without degrees or honorific titles. If paternal and maternal last names are used, then they should be separated by a hyphen. It should also contain the name and address of the institution where the research was carried out. An asterisk will indicate the author to whom correspondence should be addressed, including full postal address, phone and fax numbers, and e-mail. If desired the present addresses of the author(s) can be included. The title of the contribution should reflect the main objective in a concise form. The use of complementary titles will be accepted only when strictly necessary.

Abstract

The second page will contain the abstract of the contribution (between 200 and 400 words), which clearly establishes the objectives, methodology, results, and the conclusions. It should be presented in Spanish and English. It is strongly advised that any and all translations be conducted by knowledgeable translators. It also should include between three and five key words in Spanish and English.

Text

The text will start on the third page. It should be written in a concise and coherent manner, using simple short sentences, an impersonal style, and avoiding the inclusion of detailed information from previously published accessible books, theses, and articles. The author(s) may divide the text into unnumbered sections, such as the introduction, theoretical background, procedures and/or experimental techniques, results and discussion, and the conclusions. In the introduction, the subject of the contribution will be presented, avoiding a long review of existing literature. Reference to equations, figures, and tables should be included in parentheses. Equations will include its number in parenthesis in the right side of the text. Methodology should be precise enough for the readers to be able to replicate the experimental work or the mathematical development of the contribution. Results will be either presented in tables or figures, with analysis and interpretation in the text. As a rule, tables with data already included in figures (or vice versa) should be avoided. The number of tables and figures will be kept to the minimum required for the contribution to be clearly

debiendo ser claramente identificados la primera vez que se utilicen. Al final del texto deberán presentarse en forma concisa las conclusiones generales del trabajo. Si fuera estrictamente necesario incluir símbolos de un procesador de texto que pudieran resultar confusos, deberán estar claramente identificados en el margen la primera vez que se utilicen. Al final del texto, se deberán numerar para su rápida búsqueda como se indica a continuación.

Nomenclatura

Los símbolos usados en el texto y en las ecuaciones deberán ser reunidos e identificados nuevamente en una tabla de nomenclatura que se colocará después del texto entre las conclusiones y los reconocimientos y si estos no existieran seguiría la bibliografía citada en el texto. Los caracteres romanos deben listarse primero y, a continuación, los griegos. Los símbolos utilizados serán los de uso común en las ciencias exactas y las ingenierías, así como en las ciencias naturales, sociales y humanísticas y en el área específica del artículo. Esta revista usa el PUNTO decimal (DOF, 2009) y los °C y % junto al guarismo. Las abreviaturas de las locuciones latinas *et altere*, et al., así como *et cetera*, etc., no van en cursivas.

Unidades

El sistema de unidades que deberá emplearse es el Sistema Internacional (SI). Si se desea, se pueden poner entre paréntesis los valores de otras unidades o factores de conversión.

Figuras y fotografías. Tablas

Las figuras deberán de ser de buena calidad y nítidas (fotografías en color: mínimo 300 ppp / CMYK en formato Tiff, dibujos de líneas en color: mínimo 300 ppp / mapa de bits, fotografías en blanco y negro: escala de grises, mínimo 450 ppp en formato Tiff, líneas en blanco y negro Dibujos: mínimo 1000 ppp / mapa de bits o EPS o SVG). Todas las palabras y números en cifras deberán imprimirse, evitando pegar copias escaneadas con una definición débil. Las fotografías deberán de ser nítidas y legibles. Una vez aceptado el artículo, deberán insertarse en su lugar correspondiente ya que se reproducirán a partir de estos originales y se reducirán su tamaño si es necesario. Cada tabla debe de tener como título: Tabla 7. Frecuencia. (Pérez et al., 1989) o Tabla 9. Frecuencia. si son datos tomados de otro (s) autor (es) o si son datos de esta contribución, respectivamente, y sin un punto final

Bibliografía

La literatura citada en el texto o referencias a trabajos anteriores serán señaladas en el texto en orden alfabético por el apellido del(os) autor(es) y el año de publicación, separados por una coma y entre paréntesis. Si son más de dos autores se pondrá et al., después del apellido del primer autor (P. ej.: Stoker et al., 1981). En caso de citarse varios trabajos simultáneamente, se separarán por punto y coma entre cada cita (P. ej.; Pérez et al., 1989; Stoker et al., 1981) por orden alfabético. En el caso de que el nombre del(os) autor(es) forme parte de la redacción del escrito, únicamente se pondrá entre paréntesis el año de publicación. La lista de referencias se insertará después de las conclusiones, nomenclatura y agradecimientos, si es que estos existen y se hará también por orden alfabético, sin numeración y cuando se mencionen varios artículos del mismo autor, estos se presentarán cronológicamente, del más reciente al más antiguo. Si hay dos o más referencias del o los autores para un mismo año agregar las letras a,b, etc., al año (Stoker et al., 2006a,b).

Cada una de las referencias contendrá los siguientes datos (para revistas periódicas): Nombre del(os) autor(es), comenzando con el apellido paterno seguido de las iniciales de los nombres (si se desea incluir el apellido materno éste deberá estar unido por un guión al paterno). Año de la publicación. Título completo de la publicación (usando mayúsculas solamente cuando sea necesario gramaticalmente). Nombre completo de la revista en que apareció. Volumen seguido por el número (si hay) entre paréntesis y, después de dos puntos las páginas de iniciación y conclusión del artículo

understood. The final part of the text should present in a concise manner the general conclusions. If it were strictly necessary to include word processor symbols that might be confusing, they should be clearly identified in the margin the first time they are used. At the end of the text they should be listed for its quick finding as indicated below.

Nomenclature

*Symbols used in the text and in the equations should be gathered and identified in a table of nomenclature to be placed at the end of the text, between the conclusions and the references. Latin characters should be listed first, and then Greek ones. Symbols employed will be those of common use for each discipline and the specific area of the contribution. This journal uses the DECIMAL POINT and °C and % next to the number. The abbreviations of the Latin phrases *et altere*, et al., and *et cetera*, etc., are not underlined.*

Units

Units system to be employed is the International System (SI). If it is considered important, numerical values in other units or conversion factors may be added in parenthesis.

Figures and photographs. Tables

Figures should be of good quality and sharp (Color Photographs: Minimum 300 dpi/CMYK in Tiff format, Color Line Drawings: Minimum 300 dpi/bitmap, B & W Photographs: Gray Scale, minimum 450 dpi in Tiff format, B & W Line Drawings: Minimum 1000 dpi/bitmap or EPS or SVG). All words and numbers in figures should be printed, avoiding pasting scanned copies with weak definition. Photographs should be sharp and legible. Upon acceptance of the article, they should be inserted in its proper place; they will be reproduced from these originals and reduced if required. Each table should have the title as a heading: Table 7. Frequency ... (Pérez et al., 1989) or Table 9. Frequency ..., if they are data taken from other author(s) or if these are data from this contribution, respectively, and with no final point

References

References cited in the text should be in alphabetical order of the author(s) last name and the year of publication separated by a comma and in parenthesis, and separating with semicolon (;) each reference. If there are more than two authors, et al. will be added to the first author last name (Pérez, 1998; Ramírez and López, 2001; Stoker et al., 2006). In case the last name(s) is (are) part of the text, only the year of publication will appear in parenthesis (... the experiments carried out by Stoker et al. (2006) ...). The list of references will be inserted after the conclusions, nomenclature, and acknowledgements, if these exist, and they will appear in alphabetical order without numbering. When there are several works by the same author they will be presented chronologically, with the newest reference appearing first. If two or more are from the same year a letter a, b, etc., should be added to the year (Stoker et al., 2006a,b).

Each reference will have the following information. For periodical journals: Last name of the author(s) followed by his/her/their initials (first, second names). For Spanish speaking people wishing to include the mother's full last name or initial, a hyphen should be added between both last names. Year of publication. Full title of the publication. Full name of the journal. Volume followed by the number (if there is any) in parenthesis and, after a colon the starting and ending pages numbers separated by a hyphen. Example: Hegg, D.A., Hobbs,

separadas por un guión. Ejemplo: Hegg, D.A., Hobbs, P.V. 1978. Oxidation of sulfur dioxide in aqueous systems with particular reference to the atmosphere. *Atmospheric Environment*. 12(1-3):241-253. doi¹³: doi.org/10.1016/0004-6981(78)90204-4.

En el caso de libros, el título debe ir primero. Después, debe indicarse la casa editorial. Posteriormente, la o las páginas que fueron consultadas (P. 25, si fue solamente una o Pp. 237-242, si fueron varias). Finalmente, la ciudad y país de edición, separados por una coma. Ejemplo: Stoker, M.S., Stone, R., Seager, S.L. 1981. *Química ambiental; contaminación del aire y del agua*. Ed. Blume. P. 320. Barcelona, España. Cuando se trate de artículos dentro de volúmenes conmemorativos, memorias de simposios o congresos o libros en que colaboren varios autores, se citará según el siguiente ejemplo. Underbrink, A.C., Sparrow, A.H. 1973. A radiobiological test system. En *Chemical mutagens: Principles and methods for their detection*. Hollander, A., ed. Plenum Press. Vol. 3. Pp. 71-203. Nueva York, EE. UU.

Si se citan tesis se seguirá el siguiente ejemplo. López-Pérez, R. 1994. *Uso de un programa computarizado para determinar propiedades termodinámicas*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México. México.

Si la cita es a una norma se pondrá la fuente, el año, el título de la norma, la entidad que la emitió, la ciudad y el país de edición. Ej.: DOF. 2009. *Diario Oficial (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.)*. Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. *Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. Ciudad de México. México.*

Si se citan patentes, se debe dar el título y después el número asignado, la ciudad y el país de registro, como sigue: Martínez, C. 1970. *Procedimiento para cocer sorgo por extrusión*. Registro: Abril 7. Pat. No. 17253384. Dirección General de Invenciones y Marcas. Departamento de Patentes. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Ciudad de México. México.

Si la cita proviene de las redes internacionales se pondrá el autor (si existe) o la palabra Anónimo, el año de la consulta y la "dirección" como puede ser consultada: Anónimo, 2007. *Presentación*. <http://www.ambiental.unam.mx>. Si viene de una revista electrónica se pondrá el nombre del(os) autor(es), el año, el título de la contribución, el título de la revista seguido de las palabras entre paréntesis (en línea) y su número de ISSN y doi, si lo tiene, el

P.V. 1978. Oxidation of sulfur dioxide in aqueous systems with particular reference to the atmosphere. Atmospheric Environment. 12(1-3):241-253. doi¹⁴: doi.org/10.1016/0004-6981(78)90204-4.

In the case of books, the title should be first. Afterwards, the editorial house should appear. Then, the page(s) consulted (P. 25, if it was only one or Pp. 237-242, if there were several of them). Finally, the city and country of edition, separated by a comma. Example: Stoker, M.S., Stone, R., Seager, S.L. 1981. Química ambiental; contaminación del aire y del agua. Ed. Blume. P. 320. Barcelona, España. When the reference comes in commemorative volumes, proceedings from symposia or congresses, or they are chapters of books, they will be cited as follows: Underbrink, A.C., Sparrow, A.H. 1973. A radiobiological test system. In Chemical mutagens: Principles and methods for their detection. Hollander, A., ed. Plenum Press. Vol. 3. Pp. 71-203. New York, U. S.

If a thesis is cited, the following example is given: López-Pérez, R. 1994. Uso de un programa computarizado para determinar propiedades termodinámicas. Professional Thesis. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México. Mexico.

If the citation is for an act or normativity the source, year, title, entity that emitted it, city and country of edition should be given. Example: DOF. 2009. Official Gazette (First Section). Modification of subsection 0, the heading of Table 13, the last paragraph of Annex B and the Decimal sign section of Table 21 of the Official Mexican Standard NOM-008-SCFI-2002, General system of measurement units. FOURTH.- The heading of table 13 is modified to read as follows: Table 21 - Rules for writing numbers and their decimal sign. Decimal sign The decimal sign must be a comma on the line (,) or a point on the line (.). *If the magnitude of a number is less than unity, the decimal sign must be preceded by a zero. Official Gazette of the Federation: Thursday, September 24, 2009. Federal Executive Branch. Mexico City. Mexico.*

If patents are cited, the title will be given, then the number assigned to it, the city and country of registration, as follows: Martínez, C. 1970. Procedimiento para cocer sorgo por extrusión. Registration: April 7. Pat. No. 17253384. Dirección General de Invenciones y Marcas. Departamento de Patentes. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Ciudad de México. Mexico.

If the citation comes from international networks, the author (if it exists) or the word Anonymous, the year of the consultation and the "address" as it can be consulted will be entered: Anonymous, 2007. Presentation. <http://www.ambiental.unam.mx>. If it comes from an electronic journal, the name of the author (s), the year, the title of the contribution, the title of the journal, followed by the words in parentheses (online) and their ISSN

¹³ El desarrollador y administrador del sistema DOI es la International DOI Foundation (IDF), que lo introdujo en 2000 (Paskin, Norman. 2010. "Digital Object Identifier (DOI) System". *Encyclopedia of Library and Information Sciences*, 3a ed., Taylor y Francis, pp. 1586-1592). Las organizaciones que cumplen con las obligaciones contractuales del sistema DOI y están dispuestas a pagar para convertirse en miembros del sistema pueden asignar DOI (Davidson, Lloyd A.; Douglas, Kimberly. 1998. "Identificadores de objetos digitales: promesa y problemas para la publicación académica". *Revista de publicación electrónica*. 4(2). DOI: 10.3998/3336451.0004.203). El sistema DOI se implementa a través de una federación de agencias de registro coordinadas por la IDF ("Bienvenido al sistema DOI". [Doi.org](http://www.ambiental.unam.mx). 28 de junio de 2010. Consultado el 7 de agosto de 2010). A finales de abril de 2011, unas 4,000 organizaciones habían asignado más de 50 millones de nombres DOI ("Noticias DOI@, abril de 2011: 1. El sistema DOI supera los 50 millones de identificadores asignados". doi.org. 20 de abril de 2011. Consultado el 3 de julio de 2011) y en abril de 2013 este número había aumentado a 85 millones de nombres DOI asignados a través de 9,500 organizaciones (Wikipedia, 2013)

¹⁴ *The developer and administrator of the DOI system is the International DOI Foundation (IDF), which introduced it in 2000 (Paskin, Norman. 2010. "Digital Object Identifier (DOI) System". Encyclopedia of Library and Information Sciences (3rd ed.), Taylor and Francis, pp. 1586-1592). Organizations that meet the contractual obligations of the DOI system and are willing to pay to become a member of the system can assign DOIs (Davidson, Lloyd A.; Douglas, Kimberly. 1998. "Digital Object Identifiers: Promise and problems for scholarly publishing". *Journal of Electronic Publishing*. 4(2). doi: 10.3998/3336451.0004.203). The DOI system is implemented through a federation of registration agencies coordinated by the IDF ("Welcome to the DOI System". [Doi.org](http://doi.org). 28 June 2010. Retrieved 7 August 2010). By late April 2011 more than 50 million DOI names had been assigned by some 4,000 organizations ("DOI@ News, April 2011: 1. DOI System exceeds 50 million assigned identifiers". [Doi.org](http://doi.org). 20 April 2011. Retrieved 3 July 2011), and by April 2013 this number had grown to 85 million DOI names assigned through 9,500 organizations (Wikipedia, 2013)*

volumen y entre paréntesis el número y después de dos puntos las páginas inicial y final separadas por un guión si las tiene. Finalmente, la dirección electrónica.

Material complementario

Las deducciones matemáticas, datos experimentales extensos, programas computacionales y las partes del manuscrito de menor importancia serán enviados por separado como material adicional. Este material quedará depositado en la administración de la Revista ATSM y en un pie de página en el artículo publicado se darán las indicaciones necesarias para obtener una copia de dicho material en caso de ser requerido. El material complementario contendrá solamente información relevante que no sea incluida en la publicación.

Archivo en pdf

Cada autor recibirá libre de costo una copia de su contribución en formato electrónico .pdf como aparece publicado en el ejemplar.

and doi number will be entered, if it has it, the volume and in parentheses the issue, and after a colon the initial and final pages separated by a hyphen if it has them. Finally, the electronic address.

Supplementary Material

Mathematical deductions, profuse experimental data, computer programs, and those parts of the manuscript of lesser importance will be sent as separate additional material. This material will be deposited with the IMIQ administration and a foot note in the printed contribution will indicate to those readers interested in obtaining a copy of it, the instructions to get it. This supplementary material will only contain relevant information that has not been included in the publication.

File in pdf

Each author will receive free of charge a copy of his/her contribution in electronic format .pdf as it is in the exemplar.

Lista de comprobación del envío por parte del(a) autor(a) responsable de la publicación

Submission checklist by the author(s) responsible for the publication

Aviso de derechos de autor(a)

Copyright notice

Marque los siguientes elementos para indicar que este envío está preparado para que la revista lo examine y más abajo se pueden añadir comentarios al(a) editor(a):

Please check the following items to indicate that this submission is ready for the journal to review and comments to editors can be added below:

	El envío no ha sido publicado previamente ni se ha enviado previamente a otra revista (o se ha proporcionado una explicación en Comentarios al(a) editor(a))	<i>The submission has not been previously published or previously submitted to another journal (or an explanation has been provided in Comments to the editor)</i>
	Esta revista mantiene los códigos de ética y las buenas prácticas editoriales científicas, tecnológicas y humanísticas (por ejemplo, COPE, CSE, CSIC, etc.). En caso de detectar alguna falta de ética y/o de buenas prácticas la o las personas perderán automáticamente el derecho a enviar contribuciones	<i>This journal maintains the codes of ethics and good scientific, technological, and humanistic editorial practices (for example, COPE, CSE, CSIC, etc.). In case of detecting any lack of ethics and/or good practices, the person or persons will automatically lose the right to send contributions</i>
	El material de esta revista ha sido evaluado por pares y su contenido incluyendo figuras, mapas, etc., es responsabilidad de sus autores	<i>The material in this journal has been peer reviewed. Its content including figures, maps, etc., is the responsibility of the authors</i>
	La revista, aunque no cuenta con la	<i>Although the journal does not have the</i>

<p>promoción directa de sitios especializados no comerciales o comerciales con acceso, permite a sus autores(as) que socialicen sus contribuciones en esos sitios especializados</p>	<p><i>direct promotion of non-commercial or commercial specialized sites with access, it allows its authors to socialize their contributions on those specialized sites</i></p>
<p>El manuscrito enviado está en formato Microsoft Word y la versión final aceptada por los evaluadores deberá estar en Word para Windows 97-2003 para evitar incompatibilidades</p>	<p><i>The submitted manuscript is in Microsoft Word format and the final version accepted by the evaluators must be in Word for Windows 97-2003 to avoid incompatibilities</i></p>
<p>Se han añadido direcciones de páginas electrónicas (doi o equivalente) para las referencias donde ha sido posible</p>	<p><i>Electronic page addresses (doi or equivalent) have been added for references where possible</i></p>
<p>El texto tiene interlineado doble; las páginas están numeradas al igual que las líneas del texto, estas últimas de manera consecutiva; el tamaño de fuente es 12 puntos tipo Tahoma; se usa cursiva sólo para el nombre de las especies en vez de subrayado y todas las ilustraciones, figuras y cuadros se colocan donde deben ir de acuerdo con su cita en el texto</p>	<p><i>Text is double spaced; the pages are numbered like the lines of the text, the latter consecutively; the font size is 12 point Tahoma type; italics are used only for the name of the species instead of underlining and all illustrations, figures and tables are placed where they should go according to their citation in the text</i></p>
<p>Es indispensable incluir, en la sección de comentarios al editor, los nombres, institución y direcciones de correo electrónico de todos(as) los(as) autores(as), comprometiéndose el(a) autor(a) responsable de la publicación a la anuencia de los otros coautores a que el manuscrito sea evaluado y eventualmente publicado en esta revista</p>	<p><i>It is essential to include, in the comments to the editor section, the names, institution and email addresses of all the authors, the author responsible for the publication committing to the consent of the other co-authors that the manuscript be evaluated. and eventually published in this journal</i></p>
<p>Es indispensable incluir, en la sección de comentarios al(a) editor(a), los nombres, institución y direcciones de correo electrónico de al menos tres posibles revisores(as) para su manuscrito, que no deberán pertenecer a la institución de trabajo de ninguno de los autores ni tener vínculos de proyectos conjuntos con ellos(as)</p>	<p><i>It is essential to include, in the comments to the editor section, the names, institution and email addresses of at least three possible reviewers for your manuscript, who should not belong to the work institution of any of the authors or have joint project links with them</i></p>
<p>Como la revista se revisa por pares en la modalidad doble ciego, tiene que asegurarse que los nombres de los autores no se han incluido después del título del trabajo, ni en las propiedades del archivo</p>	<p><i>As the journal is peer-reviewed in double-blind mode, you have to make sure that the names of the authors have not been included after the title of the work, nor in the properties of the file</i></p>
<p>El Consejo Editorial se reserva la</p>	<p><i>The Editorial Board reserves the</i></p>

confidencialidad de los formatos de evaluación usados por los(as) revisores(as) de las contribuciones (doble ciego). En los documentos revisados se indicarán las recomendaciones de los(as) revisores(as) y los puntos de mejora para los posibles dictámenes (aceptado, aceptado con correcciones, enviado para correcciones mayores y enviado al autor para otra revista fraterna con la temática <i>ad hoc</i>	<i>confidentiality of the evaluation formats used by the reviewers of the contributions (double blind). The revised documents will indicate the recommendations of the reviewers and the points of improvement for the possible opinions (accepted, accepted with corrections, sent for major corrections, and sent to the author for another ad hoc fraternal journal</i>
El tiempo máximo para que el(a) autor(a) de correspondencia reciba información de aceptación o rechazo es de 3 meses	<i>The maximum time for the corresponding author to receive acceptance or rejection information is 3 months</i>
La revista permite el autoarchivo de los artículos publicados en repositorios institucionales, temáticos o páginas Web personales siempre y cuando no haya un uso lucrativo de ellos	<i>The journal allows the self-archiving of articles published in institutional or thematic repositories or personal Web pages as long as there is no lucrative use of them.</i>
Esta revista no exige que los(as) autores(as) tengan (ID):ORCID. Si el(a) autor(a) lo desea puede ponerse en su contribución.	<i>This journal does not require authors to have (ID):ORCID. If the author wishes, this information can be included in his/her contribution</i>
Para garantizar su difusión a más lectores(as) el Consejo Editorial y los(as) autores(as) están de acuerdo en que esta revista esté bajo la Licencia <i>Creative-Commons</i> con derechos de atribución y no comercial (CC-BY-SA):	<i>To guarantee its dissemination to more readers, the Editorial Board and the authors agree that this journal is licensed under the Creative-Commons License with attribution and non-commercial rights (CC-BY-SA) :</i>
"Esta licencia permite el uso comercial de la obra y de las posibles obras derivadas, pero la distribución de éstas se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original, es decir, la obra derivada que se lleve a cabo a partir de la obra original deberá ser explotada bajo la misma licencia"	<i>"This license allows the commercial use of the work and of the possible derivative works, but the distribution of these must be done with a license equal to that which regulates the original work, that is, the derivative work that is carried out from of the original work must be exploited under the same license"</i>

Una vez que un artículo es aceptado para su publicación, el autor está de acuerdo en que los derechos de su texto pasan a ser propiedad de la Revista ATSM con las implicaciones legales que esto significa.

Once an article is accepted for publication, the author agrees that the rights to its text become the property of ATSM Journal with the legal implications that this means.

La distribución de artículos aceptados, pero

The distribution of articles accepted,

aún no publicados (*preprints*), por cualquier medio no está permitida. La infracción de esta norma puede ocasionar que el artículo aunque ya esté aceptado, sea retirado para su publicación.

but not yet published (preprints), by any means is not allowed. Violation of this rule may cause the article, even if it is already accepted, to be withdrawn for publication.

<p>Los(as) autores(as) se comprometen a aceptar las condiciones de este aviso de derechos de autor(a), que se aplicarán a este envío siempre y cuando se publique en esta revista y más abajo se pueden añadir comentarios al(a) editor(a).</p>	<p><i>The author(s) agree to accept the conditions of this copyright notice, which will apply to this submission as long as it is published in this journal and comments to the editor can be added below.</i></p>
---	--

Declaración de privacidad de la revista

Los nombres y direcciones de correo-e introducidos en este sitio se usarán exclusivamente para los fines declarados por esta revista y no estarán disponibles para ningún otro propósito u otra persona.

Journal privacy statement

The names and email addresses entered on this site will be used exclusively for the purposes stated by this journal and will not be available for any other purpose or other person.

Comentarios para el(a) editor(a)

Introduzca el texto relacionado con los puntos señalados arriba

Comments to the Editor

Introduce any text corresponding to the points above

Como apoyo a los(as) autores(as), lectores(as) o revisores(as), a continuación se presentan algunos puntos interesantes proporcionados por las(os) colegas de la Red de Revistas Científicas de Acceso Abierto Diamante presentado por el Sistema de Información Científica Redalyc de la Universidad Autónoma del Estado de México, México.	<i>As support to the authors, readers or reviewers, below are some interesting points provided by the colleagues of the Diamante Open Access Scientific Journals Network presented by the System of Scientific Information Redalyc of the Autonomous University of the State of Mexico, Mexico.</i>
1. CRITERIOS BÁSICOS DE ADMISIÓN	<i>1. BASIC CRITERIA FOR ADMISSION</i>
1.1. Política de Acceso Abierto Inmediato (AAI) Esta revista permite leer, descargar, copiar, distribuir, imprimir, buscar o vincular los textos completos de sus artículos, de manera inmediata después de su publicación.	<i>1.1. Immediate Open Access Policy (AAI) This journal allows you to read, download, copy, distribute, print, search or link the full texts of its articles, immediately after publication.</i>
1.2. No efectuar cargos por procesamiento de artículos (APC) No se efectúan cargos monetarios por revisión, procesamiento, evaluación o publicación de artículos (APC, en inglés <i>article processing charges</i>) a autores y/o instituciones.	<i>1.2. No Article Processing Charges (APC) No monetary charges for article review, processing, evaluation or publication (APC, in English article processing charges) are made to authors and/or institutions.</i>
1.3. Institución editora La institución editora de la revista es una red académica perteneciente al sector académico o de investigación sin fines de lucro por lo que queda inscrita en uno de los supuestos señalados de que debe ser una institución académica, de investigación, sociedad científica, universidad u organización sin fin de lucro perteneciente al sector académico o de investigación.	<i>1.3. Publishing institution The publishing institution of the journal is an academic network belonging to the non-profit academic or research sector, which is why it is registered in one of the aforementioned assumptions that it must be an academic, research institution, scientific society, university or non-profit organization, belonging to the academic or research sector.</i>
1.4. Revisión por pares Todos los originales publicados son sometidos a un proceso de dictamen por pares académicos (especialistas). El tipo evaluación es la conocida como doble ciego.	<i>1.4. Peer Review All published originals are submitted to an opinion process by academic peers (specialists). The type of evaluation is known as double blind.</i>
1.5. Antigüedad Tiene once años de existencia. Los fascículos editados en el último año (2022) están visibles en la plataforma OJS y en la página de la revista https://atsmexico.org/atsm . Para efectos de la evaluación, sólo se considerarán los números regulares editados.	<i>1.5. Antiquity It has eleven years of existence. The issues published in the last year (2022) are visible on the OJS platform and on the journal page https://atsmexico.org/atsm. For evaluation purposes, only regular published issues will be considered.</i>
1.6. Cumplimiento de periodicidad Los fascículos se publican puntualmente de acuerdo con la periodicidad expresada por la revista (semestralmente). El primer fascículo se pone en línea el 30 de junio y el segundo el 30 de diciembre.	<i>1.6. Periodicity compliance The issues are published punctually according to the periodicity expressed by the journal (semester). The first issue goes online on June 30 and the second on December 30.</i>
1.7. Datos de identificación Los datos visibles en el sitio web de la revista https://atsmexico.org/atsm : ● Título completo ● ISSN electrónico ● Institución editora	<i>1.7. Identification data The data visible on the journal website https://atsmexico.org/atsm: ● Full title ● electronic ISSN ● Publishing institution</i>

<ul style="list-style-type: none"> ● Ciudad ● País ● Correo 	<ul style="list-style-type: none"> ● City ● Country ● Mail
2. CRITERIOS CUALITATIVOS	2. <i>QUALITATIVE CRITERIA</i>
2.1. Porcentaje de contenido científico El 100% de las colaboraciones de cada fascículo son resultados originales producto de investigaciones científico-tecnológicas y sometidas a revisión por pares.	2.1. <i>Percentage of scientific content</i> <i>100% of the collaborations in each issue are original results, the product of scientific-technological research and subjected to peer review.</i>
2.2. Exogeneidad de las publicaciones El 80% de los trabajos científicos publicados en cada número son colaboraciones ajenas a la institución editora RACAM y su sororal RedICA (con al menos un autor ajeno a la institución).	2.2. <i>Exogeneity of publications</i> <i>80% of the scientific papers published in each issue are collaborations outside the RACAM publishing institution and its sister organization RedICA (with at least one author outside the institution).</i>
2.3. Artículos por año Se publican siempre 12 artículos o resultados de investigación al año. El promedio anual es de 12 artículos	2.3. <i>Articles per year</i> <i>Articles or research results published per year are 12. The annual average is 12 articles.</i>
2.4. XML JATS Se dispone de artículos marcados en formato XML JATS.	2.4. <i>XML JATS</i> <i>Articles are available in XML JATS format.</i>
2.5. Publicación homogénea La revista es homogénea y publica 6 artículos por fascículo.	2.5. <i>Homogeneous publication</i> <i>The journal is homogeneous and publishes 6 articles per issue.</i>
2.6. Indexaciones La revista está indexada en Directorio Latindex y será enviada para calificación.	2.6. <i>Indexing</i> <i>The journal is indexed in the Latindex directory and will be sent for qualification.</i>
2.7. Plataforma electrónica La revista tiene una página independiente https://atsmexico.org/atsm .	2.7. <i>Electronic platform</i> <i>The journal has an independent page</i> <i>https://atsmexico.org/atsm.</i>
2.8. Formatos de lectura Pone a disposición de los usuarios los siguientes formatos electrónicos para el despliegue de los artículos publicados: PDF, XML JATS.	2.8. <i>Reading formats</i> <i>It makes the following electronic formats available to users for displaying published articles: PDF, XML JATS.</i>
2.9. Contenido científico Publica fascículos completos con contenido científico y tecnológico, artículos derivados de investigaciones.	2.9. <i>Scientific content</i> <i>It publishes complete fascicles with scientific and technological content, articles derived from research.</i>
3. CRITERIOS ALTAMENTE VALORADOS CUANTITATIVOS	3. <i>HIGHLY VALUED QUANTITATIVE CRITERIA</i>
3.1. Prácticas editoriales	3.1. <i>Editorial practices</i>
3.1.1. Exogeneidad de evaluadores Los evaluadores no cobran y son externos a las dos entidades editoras RACAM y RedICA.	3.1.1. <i>Exogeneity of evaluators</i> <i>The evaluators do not charge and are external to the two publishing entities RACAM and RedICA.</i>
3.1.2. Publicación original e inédita Todo artículo postulado para su publicación es original e inédito y no está postulado simultáneamente en otras revistas u órganos editoriales.	3.1.2. <i>Original and unpublished publication</i> <i>All articles submitted for publication are original and unpublished and are not simultaneously submitted to other journals or editorial bodies.</i>

3.1.3. Publicación preprints La revista no acepta preprints.	3.1.3. Preprint publication <i>The journal does not accept preprints.</i>
3.1.4. Exogeneidad del Consejo Editorial El 75% de los integrantes del Consejo Editorial son ajenos a la entidad editora.	3.1.4. Exogeneity of the Editorial Board <i>75% of the members of the Editorial Board are outside the publishing entity.</i>
3.1.5. Tiempos de evaluación Brinda información a los autores sobre los tiempos estimados (30-60 días), para los procesos de evaluación (revisión por pares): Recepción y aceptación.	3.1.5. Evaluation times <i>It provides information to the authors about the estimated times (30-60 days), for the evaluation processes (peer review): Reception and acceptance.</i>
3.1.6. Formato de evaluación en línea El formulario de evaluación (utilizado en el proceso de revisión por pares) no aparece al público abiertamente pero se encuentra al final del reglamento de la revista que está en la plataforma.	3.1.6. Online evaluation form <i>The evaluation form (used in the peer review process) does not appear openly to the public but is found at the end of the journal's regulations that are on the platform.</i>
3.1.7. Fechas recepción y aceptación En la primera página después del título y los(as) autor(as), se indican las fechas de recepción y aceptación en cada artículo.	3.1.7. Reception and acceptance dates <i>On the first page, after the title and the author(s), the dates of receipt and acceptance of each article are indicated.</i>
3.1.8. Indicadores bibliométricos y/o cientométricos Son públicos los indicadores sobre el desempeño de la revista: La tasa de rechazo, el número de descargas, citas, o "responsables".	3.1.8. Bibliometric and/or scientometric indicators <i>The indicators on the performance of the journal are public: The rejection rate, the number of downloads, citations, or "responsible".</i>
3.2. Periodicidad 3.2.1. Periodicidad El fascículo incluye en su portada los meses que comprende el periodo de publicación, para el primero es enero-junio y para el segundo julio-diciembre y en su cintilla legal se señala que la fecha de publicación del primer fascículo es 30 de junio y del segundo 30 de diciembre en la página principal de la revista, hoja 2, así como la correspondiente en el segundo fascículo.	3.2. Periodicity 3.2.1. Periodicity <i>The issue includes on its cover the months that comprise the publication period, for the first it is January-June and for the second July-December and in its legal ribbon it is indicated that the date of publication of the first issue is June 30 and second December 30 on the main page of the journal, page 2, as well as the corresponding one in the second issue.</i>
3.2.2. Fecha de publicación La revista especifica el momento en el que pone en línea sus fascículos	3.2.2. Publication date <i>The journal specifies the moment in which it puts its issues online</i>
3.3. Acceso abierto 3.3.1. Licenciamiento En la primera página de cada contribución se menciona explícitamente el licenciamiento bajo el cual la revista <i>Ambiens Techné et Scientia México</i> e institución editora RACAM y RedICA publica los contenidos es: CC-BY-NC, CC: Creative Commons; BY: puede usar y compartir la obra, dando crédito al autor; NC: puede usar y compartir, solo si no hace un uso comercial.	3.3. Open access 3.3.1. Discharge <i>On the first page of each contribution, the licensing under which the Ambiens Techné et Scientia México journal and RACAM and RedICA publishing institution publishes the contents is explicitly mentioned: CC-BY-NC, CC: Creative Commons; BY: you can use and share the work, giving credit to the author; NC: You can use and share, only if you do not make a commercial use.</i>
3.3.2. Metadatos de la licencia En el encabezado de la primera página incluye la información relativa a la licencia <i>Creative Commons</i> (legible por máquinas) en los metadatos de los artículos en formatos portables (PDF).	3.3.2. License metadata <i>In the header of the first page, it includes the information related to the Creative Commons license (readable by machines) in the metadata of the articles in portable formats (PDF).</i>
3.3.3. Fuentes de financiamiento Esta revista no tiene ninguna fuente de financiamiento y sus editores y evaluadores trabajan altruistamente. Esta publicación electrónica recibe apoyo altruista de	3.3.3. Funding sources <i>This journal does not have any funding source and its editors and reviewers work altruistically. This electronic publication receives altruistic support</i>

personal académico de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes dedican parte de su tiempo libre a esta publicación electrónica.	<i>from academic staff of the Faculty of Chemistry of the National Autonomous University of Mexico, who dedicate part of their free time to this electronic publication.</i>
3.3.4. Derechos de autor (<i>copyright</i>) El titular de los derechos de autor (copyright), es la propia revista y los autores ceden los derechos para ser publicada su contribución de acuerdo con el siguiente inciso 3.3.5.	3.3.4. <i>Copyright</i> <i>The owner of the copyright is the journal itself and the authors assign the rights to publish their contribution in accordance with the following subsection 3.3.5.</i>
3.3.5. Política de autoarchivo La revista permite el autoarchivo de los artículos publicados, en repositorios institucionales, temáticos o páginas web personales.	3.3.5. <i>Self-Archive Policy</i> <i>The journal allows the self-archiving of published articles, in institutional, thematic repositories or personal web pages.</i>
3.4. Gestión Editorial Este rubro está señalado en el instructivo de autores antes de este texto	3.4. <i>Publishing Management</i> <i>This item is indicated in the authors' instructions before this text</i>
3.4.1. Datos de contacto Indica en los datos de contacto (En la hoja legal, segunda de cada número se encuentra esta información): <ul style="list-style-type: none"> ● Nombre completo del contacto ● Nombre completo de la institución u organismo editor (sin abreviaturas) ● Ciudad y país de edición (sin abreviaturas) ● Correo electrónico (institucional) 	3.4.1. <i>Contact information</i> <i>Indicate in the contact information (In the legal page, second of each number, this information is found):</i> <ul style="list-style-type: none"> ● <i>Full name of the contact</i> ● <i>Full name of the publishing institution or organization (without abbreviations)</i> ● <i>City and country of publication (without abbreviations)</i> ● <i>Email (institutional)</i>
3.4.2. Objetivos y alcance (Instructivo para autores) Indica explícitamente los objetivos y alcance, así como la definición de la naturaleza, propósito, público y/o comunidad a la que se dirige en los antecedentes de la revista.	3.4.2. <i>Objectives and scope (Instructions for authors)</i> <i>It explicitly indicates the objectives and scope, as well as the definition of the nature, purpose, public and/or community to which it is directed in the background of the journal.</i>
3.4.3. Especificidad temática La revista recibe artículos a, b y c, según el instructivo de autores(as).	3.4.3. <i>Thematic specificity</i> <i>The journal receives articles a, b, and c, according to the author's instructions.</i>
3.4.4. Equipo Editorial El equipo editorial se describe con funciones o roles y se da crédito a las personas encargadas (Esta información se encuentra en la hoja legal).	3.4.4. <i>Editorial Team</i> <i>The editorial team is described with functions or roles and credit is given to the people in charge (This information is found in the legal sheet).</i>
3.4.5. Membrete bibliográfico Se identifica cada artículo mediante membrete bibliográfico en la página inicial (En el contenido de cada número): <ul style="list-style-type: none"> ● Nombre de la revista ● ISSN-e ● Volumen y número ● Periodo que cubre la edición indicando meses y años (Hoja legal) ● Nombres de los autores 	3.4.5. <i>Bibliographic letterhead</i> <i>Each article is identified by bibliographic letterhead on the home page (in the content of each number):</i> <ul style="list-style-type: none"> ● <i>Journal name</i> ● <i>ISSN-e</i> ● <i>Volume and number</i> ● <i>Period covered by the edition indicating months and years (Legal page)</i> ● <i>Author names</i>
3.4.6. Afiliación del Consejo Editorial Se indica la afiliación institucional de los miembros del consejo editorial, incluyendo el país (Hoja legal).	3.4.6. <i>Editorial Board Affiliation</i> <i>The institutional affiliation of the members of the editorial board is indicated, including the country (Legal page).</i>
3.4.7. Tabla de contenido con traducción Al inicio de cada fascículo existe una tabla de	3.4.7. <i>Table of contents with translation</i> <i>At the beginning of each issue there is a table of</i>

<p>contenido que menciona: El título completo de todos los artículos en el idioma original y en un segundo idioma, en este caso el inglés; además, incluye el nombre del(os) autor (es).</p>	<p><i>contents that mentions: The complete title of all the articles in the original language and in a second language, in this case English; In addition, it includes the name of the author(s).</i></p>
<p>3.4.8. Datos del o de la(los)(las) autor(es)(as) Cada artículo indica los nombres completos de los autores, la institución de adscripción, el país de la institución de adscripción de cada autor y el correo electrónico de al menos un autor, el de correspondencia.</p>	<p>3.4.8. <i>Data of the author(s)</i> <i>Each article indicates the full names of the authors, the affiliation institution, the country of the affiliation institution of each author and the email address of at least one author, the correspondence address.</i></p>
<p>3.4.9. Identificador de autor (ID) ORCID La revista no exige que los autores tengan ID: ORCID, en caso de que cuente con él se les recomienda que lo coloquen después de los datos de afiliación.</p>	<p>3.4.9. <i>Author Identifier (ID) ORCID</i> <i>The journal does not require authors to have ID: ORCID, if they do, it is recommended that they place it after the affiliation data.</i></p>
<p>3.4.10. Indexaciones La revista está indexada en el Directorio Latindex y se iniciará en breve el proceso de evaluación. Cada registro declarado cuenta con un enlace directo al lugar en que se encuentra la lista maestra (<i>Master list</i>) donde se menciona la revista o dirección electrónica (URL) donde están los datos de la revista (Esto se logra accediendo con el vínculo al extremo inferior derecho que indica el vol(num)año)</p>	<p>3.4.10. <i>Indexing</i> <i>The journal is indexed in the Latindex Directory and the evaluation process will begin shortly. Each declared record has a direct link to the place where the master list (Master list) is located where the journal is mentioned or the electronic address (URL) where the journal data is (This is achieved by accessing the link at the bottom end right indicating the vol(num)year)</i></p>
<p>3.4.11. Normas de referencias bibliográficas Esta revista menciona en el instructivo para autores que utiliza el estilo Elsevier de mediados del siglo XX para las referencias bibliográficas, el cual los autores deben observar (ver instructivo para autores páginas arriba).</p>	<p>3.4.11. <i>Bibliographic reference standards</i> <i>This journal mentions in the instructions for authors that it uses the mid-twentieth century Elsevier style for bibliographic references, which authors must observe (see instructions for authors pages above).</i></p>
<p>3.4.12. Estilo de citación A continuación, se muestra el estilo de citación que se debe utilizar: Elsevier de mediados del siglo XX. Ejemplo: Ver el instructivo de autores</p>	<p>3.4.12. <i>Citation style</i> <i>Below is the citation style to use: Elsevier mid-20th century.</i> <i>Example: See the instructions for authors</i></p>
<p>3.4.13. Resumen y palabras clave en idioma original Cada artículo incluye tanto el resumen como las palabras clave en el idioma original, el español.</p>	<p>3.4.13. <i>Abstract and keywords in original language</i> <i>Each article includes both the abstract and the keywords in the original language, Spanish.</i></p>
<p>3.4.14. Resumen y palabras clave en segundo idioma Cada artículo incluye el resumen y las palabras clave en un segundo idioma, el inglés.</p>	<p>3.4.14. <i>Abstract and keywords in second language</i> <i>Each article includes the abstract and keywords in a second language, English.</i></p>
<p>3.4.15. Instrucciones para los autores en dos idiomas Se incluyen estas instrucciones para los autores en un segundo idioma (inglés) de manera visible en la página de la revista.</p>	<p>3.4.15. <i>Instructions for authors in two languages</i> <i>These instructions for authors are included in a second language (English) conspicuously on the journal page.</i></p>
<p>3.4.16. Código de ética La revista menciona su adhesión al código de ética y buenas prácticas editoriales científicas (COPE) en el instructivo de autores.</p>	<p>3.4.16. <i>Code of ethics</i> <i>The journal mentions its adherence to the code of ethics and good scientific editorial practices (COPE) in the authors' instructions.</i></p>
<p>3.4.17. Detección de similitud (posible plagio) Esta revista no aplica la detección de similitud y posible plagio, pues para utilizar el software que posee la Dirección General de Publicaciones de la UNAM, entidad a la que pertenece la mayoría del Comité Editorial, esa autoridad indicó desde el inicio de la publicación en 2013 que era necesario que esta fuera</p>	<p>3.4.17. <i>Similarity detection (possible plagiarism)</i> <i>This journal does not apply the detection of similarity and possible plagiarism, because to use the software owned by the General Directorate of Publications of the UNAM, entity to which the majority of the Editorial Committee belongs, that authority indicated from the beginning of the</i></p>

<p>parte de las revistas de la Universidad Nacional Autónoma de México requiriendo la firma del titular de una dependencia académica, lo cual ejercería coerción sobre la libertad académica de la revista. Por lo tanto, se apela a la ética de los autores(as) y, en caso de que llegara a detectarse un posible plagio se haría del conocimiento de los autores(as) responsables de la publicación para corregirlo y, en caso de no cumplir, se retiraría la contribución.</p>	<p><i>publication in 2013 that it was necessary for this to be part of the journals of the National Autonomous University of Mexico requiring the signature of the head of an academic unit, which would exert coercion on the academic freedom of the journal. Therefore, the ethics of the authors is appealed to and, in the event that a possible plagiarism is detected, the authors responsible for the publication will be made aware of it in order to correct it and, in case of non-compliance, the contribution would be withdrawn.</i></p>
<p>3.4.18. Política de preservación digital No se cuenta con una política de preservación de archivos digitales en Lockss, Clockss, Portico, etc., debido a que son empresas de lucro y nuestra revista no es lucrativa por lo que no se cuenta con fondos para pagar este tipo de servicios. Cada una de las contribuciones se almacena en formato pdf con sistemas de cómputo “espejo”, independientes uno de otro.</p>	<p><i>3.4.18. Digital Preservation Policy There is no policy for the preservation of digital files in Lockss, Clockss, Portico, etc., because they are for-profit companies and our journal is not for profit, so there are no funds to pay for this type of service. Each of the contributions is stored in pdf format with "mirror" computing systems, independent of one another.</i></p>
<p>3.5. Aprovechamiento de Tecnología</p>	<p><i>3.5. Leveraging Technology</i></p>
<p>3.5.1. Uso de gestor editorial Utiliza un gestor editorial electrónico como herramienta de control del proceso de dictamen y no sólo como plataforma de publicación abierta: <i>Open Journal System (OJS)</i>.</p>	<p><i>3.5.1. Use of editorial manager It uses an electronic editorial manager as a control tool for the opinion process and not only as an open publication platform: Open Journal System (OJS).</i></p>
<p>3.5.2. Protocolos de interoperabilidad La revista sí cuenta con protocolos de interoperabilidad y la dirección electrónica es: https://atsmexico.org/atsm/about</p>	<p><i>3.5.2. Interoperability protocols The journal does have interoperability protocols and the electronic address is: https://atsmexico.org/atsm/about</i></p>
<p>3.5.3. Motor de búsqueda La revista sí cuenta con un motor de búsqueda específico para los contenidos de la revista y para la localización y recuperación de artículos publicados; además, permite el uso de operadores lógicos para optimizar la búsqueda.</p>	<p><i>3.5.3. Search Engine The journal does have a specific search engine for the journal contents and for locating and retrieving published articles; In addition, it allows the use of logical operators to optimize the search.</i></p>
<p>3.5.4. Descarga individual de contenidos Permite la descarga de cada uno de los artículos de manera individual.</p>	<p><i>3.5.4. Individual download of content Allows the download of each of the articles individually.</i></p>
<p>3.5.5. Colección integrada Todos los números digitales disponibles están visibles en un solo sitio web.</p>	<p><i>3.5.5. Integrated collection All available digital numbers are visible on a single website.</i></p>
<p>3.5.6. Identificador de recursos digitales Los artículos no cuentan con un identificador digital de objeto (DOI), pues esta fundación exige un pago anual y por tal razón no se cuenta con él. Supuestamente existen empresas patrocinadoras pero el comité editorial de esta revista no ha encontrado ninguna que sea gratuita.</p>	<p><i>3.5.6. Digital resource identifier The articles do not have a digital object identifier (DOI), since this foundation requires an annual payment and for this reason it is not available. Supposedly there are sponsoring companies but the editorial committee of this journal has not found any that are free.</i></p>
<p>3.5.7. Navegación y usabilidad La página electrónica cuenta con adecuada navegabilidad, es decir, permite el acceso a los contenidos de la revista en un máximo de tres clics.</p>	<p><i>3.5.7. Navigation and usability The electronic page has adequate navigability, that is, it allows access to the contents of the journal in a maximum of three clicks.</i></p>
<p>3.5.8. Valor agregado La revista no cuenta con características propias para</p>	<p><i>3.5.8. Added value The journal does not have its own characteristics</i></p>

<p>brindar valor agregado al usuario: En el texto de REDALyC se recomiendan servicios multimedia, acceso a datos fuente, servicios de accesibilidad e interacción con el usuario, así como la promoción a través de sitios especializados no comerciales (Open edition, Doaj, Erudit, etc.), comerciales con acceso (Google Académico, Mendeley, Academia.edu, Research Gate, etc.). La primera y más importante razón es que la revista es justamente eso, una revista académica que visibiliza el conocimiento generado por colegas de habla española para el beneficio de la sociedad y el mejoramiento de la calidad de vida de las personas.</p>	<p><i>to provide added value to the user: The REDALyC text recommends multimedia services, access to source data, accessibility services and interaction with the user, as well as promotion through specialized non-commercial sites (Open edition, Doaj, Erudit, etc.), commercial with access (Google Scholar, Mendeley, Academia.edu, Research Gate, etc.). The first and most important reason is that the journal is exactly that, an academic journal that makes visible the knowledge generated by Spanish-speaking colleagues for the benefit of society and the improvement of people's quality of life.</i></p>
<p>3.5.9. Interacción con el usuario La revista no facilita el uso de tecnologías de interacción, como blogs y/o foros que permitan al usuario una mayor interacción exactamente por las razones señaladas en el punto anterior.</p>	<p><i>3.5.9. User interaction The journal does not facilitate the use of interaction technologies, such as blogs and/or forums that allow the user greater interaction for exactly the reasons indicated in the previous point.</i></p>
<p>3.5.10. Estadísticas de descargas La revista tiene un apartado de estadísticas de descargas actualizadas, ya sean de su propio sitio web o bien recurriendo a servicios de terceros.</p>	<p><i>3.5.10. Download statistics The journal has a section with updated download statistics, whether from its own website or using third-party services.</i></p>

|

Esta revista es electrónica

Se terminó de editar en el servidor de los Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de
Química Ambiental

Ciudad de México, México

2025