



UJAT

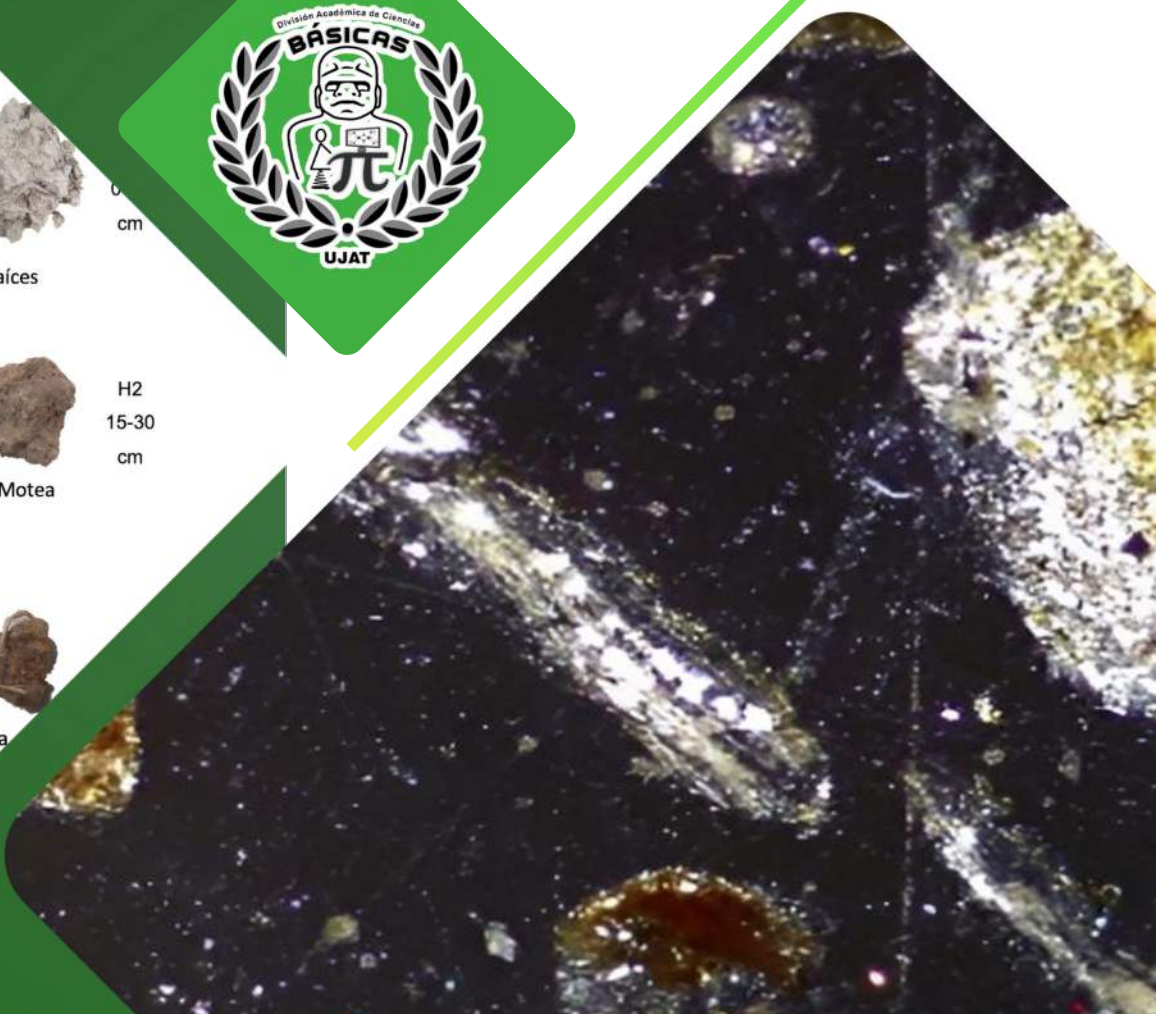
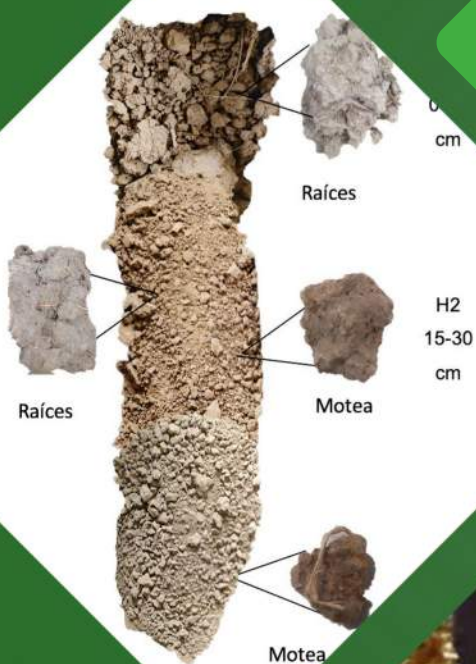
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

JOB π S

Journal of Basic Sciences

DACB • UJAT



Nos complace presentar el número 31 del Journal of Basic Sciences, con un conjunto de investigaciones sobre diversas problemáticas ambientales, geocientíficas y tecnológicas, presentes tanto en el estado de Tabasco como en otras regiones del país. A lo largo de las temáticas abordadas en este número, se reflejan los desafíos que generan las actividades humanas sobre el medio ambiente, así como la necesidad de generar soluciones sustentables a partir del conocimiento que se genera en las ciencias básicas y que es aplicado en el desarrollo de tecnologías. El enfoque multi e interdisciplinario característico de esta revista, se refleja al integrar elementos de la química, la física aplicada y las matemáticas, hacia áreas tan diversas como la geografía, la geología, las ciencias ambientales o la biotecnología; ofreciendo un panorama del estado actual de problemáticas específicas y proponiendo al mismo tiempo rutas de acción viables desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

En primer término, se presenta un estudio enfocado a las islas de calor urbano en Villahermosa, Tabasco, en donde a partir de un crecimiento urbano desordenado y la reducción de la cobertura vegetal se han intensificado significativamente las temperaturas locales. Esta situación pone de manifiesto la importancia de incorporar criterios de planificación ecológica en el desarrollo urbano. Por otro lado, se incluye también una evaluación geoquímica de sedimentos lacustres en regiones de San Luis Potosí y Zacatecas, con el objetivo de identificar la concentración y el comportamiento de elementos de tierras raras, con este estudio se aportan datos importantes que permiten entender la evolución geológica de los depósitos sedimentarios analizados, lo que lleva a valorar el potencial económico que representan.

De la misma forma, se presentan dos estudios vinculados a la problemática ambiental generada por la industria petrolera en el estado de Tabasco. Por un lado, se realizó una revisión sistemática de técnicas de remediación contaminados con hidrocarburos, con la finalidad de evaluar su aplicabilidad en función de factores tales como el tipo de suelo, el equipo requerido y la viabilidad. Por otro lado, se exponen los resultados de un estudio realizado en Nacajuca, Tabasco, cuya finalidad fue establecer las alteraciones en el suelo a causa de la contaminación por hidrocarburos, identificando efectos negativos en composición química, estructura y fertilidad.

Así mismo, se incluye una propuesta para aprovechar subproductos agroindustriales generados en Tabasco, implementándolos en procesos de biorremediación, con la finalidad de transformar residuos en insumos útiles para el desarrollo de prácticas sostenibles, con un enfoque de economía circular. Finalmente, se presenta una contribución encaminada a analizar un sistema de celda conectada a un convertidor, desde la perspectiva de la estabilidad energética. Mediante técnicas de control basadas en pasividad, se logra mejorar el rendimiento y comportamiento dinámico del sistema, encaminado a mejorar el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes.

En conjunto, las contribuciones incluidas en este número son una muestra de los distintos esfuerzos encaminados a enfrentar los retos ambientales y tecnológicos actuales, mediante el uso del conocimiento científico y la innovación aplicada, ampliando el entendimiento de fenómenos complejos e impulsando la búsqueda de soluciones prácticas y sostenibles

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Lic. Guillermo Narváez Osorio.
Rector

Dr. Luis Manuel Hernández Govea.
Secretario de Servicios Académicos

Dr. Wilfrido Miguel Contreras Sánchez.
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Dr. Pablo Marín Olán. Director de Difusión,
Divulgación Científica y Tecnológica

Directorio Divisional División Académica de Ciencias Básicas

Dra. Hermicenda Pérez Vidal.
Directora

Dr. Luis Manuel Martínez González.
Coordinador de Investigación

M.C. Abel Cortazar May.
Coordinador de Docencia

L.Q. Esmeralda León Ramos.
Coordinador de Difusión Cultural y Extensión

CONSEJO EDITORIAL

- **Dr. Carlos Ernesto Lobato García.** Editor en Jefe. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0003-3734-7780>
- **Dr. Adib Abiu Silahua Pavón.** Gestor Editorial. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0001-5344-1430>

COMITÉ EDITORIAL

- **Mtra. Claudia Gisela Vázquez Cruz.** Editora Asociada. Actuaría. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0009-0002-1791-5621>
- **Mtra. María Hortensia Almaguer Cantú.** Editora Asociada. Ciencias de la Computación. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0009-0007-7839-9014>
- **Dr. José Arnold González Garrido.** Editor Asociado. Ciencias Farmacéuticas. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://orcid.org/0000-0003-1135-4050>
- **Dr. José Luis Benítez Benítez.** Editor Asociado. Física. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://orcid.org/0009-0000-0561-5029>
- **Mtro. Guillermo Chávez Hernández.** Editor Asociado. Geofísica. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0002-3555-9678>
- **Dra. Addy Margarita Bolívar Cimé.** Editora Asociada. Matemáticas. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0002-7342-0888>
- **Dra. Nancy Romero Ceronio.** Editora Asociada. Química. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0001-8169-3811>

JOURNAL OF BASIC SCIENCES, Vol. 11, Núm. 31, agosto de 2025, es una publicación continua cuatrimestral, editada por la División Académica de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040. <https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>. Editor Responsable de la Revista: Carlos Ernesto Lobato García. Reserva de derechos al uso exclusivo 04-2015-052110084000-203, ISSN: 2448-4997, ambos otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 30 de enero de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación y de esta Casa Editora.

Las publicaciones respaldadas con el sello editorial de la UJAT no podrán utilizarse para entrenar modelos de IA generativa, a menos de que haya una declaración expresa, tanto de la Universidad como de los autores y/o herederos.

CONTENIDO

	Pág.
Islas de Calor Superficial Urbano en México: Caso de estudio, Villahermosa, Tabasco	1-8
Evaluación de Tierras Raras en sedimentos lacustres, Mesa Central Norte entre San Luis Potosí y Zacatecas, México	9-17
Factibilidad de los diversos tratamientos para derrames de hidrocarburos en suelos en el Estado de Tabasco	18-35
Análisis geoquímico de acumulación de hidrocarburos en suelos de Tucta, Nacajuca	36-51
Valor agregado a residuos agroindustriales como alternativa en la biorremediación de suelos	52-61
Efecto de un control basado en pasividad en un sistema celda-convertidor	62-75

Islas de Calor Superficial Urbano en México: Caso de estudio, Villahermosa, Tabasco

Ramos-Zúñiga, L. G.¹ , Gómez-Arredondo, C. M.^{2*} 

¹Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)

²Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT)

*luis.ramoszg@uanl.edu.mx

Resumen

La urbanización transforma el entorno natural en estructuras artificiales, como edificios y carreteras, que almacenan y liberan calor, incrementando las temperaturas urbanas hasta 11 °C más que en áreas rurales. Este fenómeno, llamado Isla de Calor Urbano (ICU), resulta de cambios en la cobertura del suelo que alteran la radiación y el enfriamiento por evaporación. En México, estudios han mostrado que la alta densidad urbana y la falta de áreas verdes intensifican las ICU, elevando la demanda energética, especialmente en ciudades tropicales costeras como Villahermosa, Tabasco. Esta ciudad es vulnerable al cambio climático debido al crecimiento urbano acelerado y la disminución de vegetación. Zonas como Guayabal y Ciudad Industrial registran las temperaturas más altas por su infraestructura y densidad poblacional. Mitigar las ICU requiere conservar áreas verdes, cuerpos de agua y limitar superficies asfaltadas para reducir el calor urbano y mejorar la calidad ambiental.

Palabras claves: *Islas de calor urbano, Villahermosa, Google Earth Engine*

Abstract

Urbanization replaces natural environments with artificial structures like buildings and roads, using materials such as asphalt and concrete that store and release heat, raising urban temperatures by up to 11°C compared to rural areas. This Urban Heat Island (UHI) effect stems from land cover changes that disrupt radiation balance and evaporative cooling. In Mexico, research using observations, weather stations, and satellite imagery highlights that high urban density and scarce green spaces intensify UHI impacts, increasing energy demands, particularly in tropical coastal cities like Villahermosa, Tabasco. Villahermosa faces heightened vulnerability to climate change and rising temperatures due to rapid urban expansion and vegetation loss. Neighborhoods such as Guayabal and Ciudad Industrial record the highest temperatures due to dense infrastructure. While urbanization has improved services, it has also exacerbated energy consumption and heat levels. Addressing UHI requires preserving green spaces, protecting water bodies, and reducing asphalted areas to improve environmental quality.

Keywords: *Urban Heat Islands, Villahermosa, Google Earth Engine*

Recibido: 14 de diciembre de 2024, Aceptado: 05 de junio de 2025, Publicado: 22 de agosto de 2025

1. Introducción

Acondicionar una zona y prepararla para uso ciudadano, es un proceso conocido como urbanización, esto implica la transformación de fenómenos naturales en estructuras antropogénicas, las cuales incluyen edificios, carreteras y estacionamientos. Cabe destacar que ciertas sustancias como el asfalto, concreto y ladrillos poseen gran capacidad térmica. Estas sustancias almacenan calor durante las horas diurnas y lo liberan gradualmente durante el período nocturno, lo que incrementa los niveles de temperatura en los entornos urbanos. Este efecto suele ser de hasta 20 grados Fahrenheit (aproximadamente 11 grados Celsius), lo que es más alto que las temperaturas en zonas rurales (Greenberg, 2023; Simon and Simon, 2024; Figura 1). Estos cambios en la cubierta del terreno pueden modificar las características de la superficie terrestre, estas modificaciones incluyen variaciones en el grado de radiación que es reflejado y absorbido por la superficie, así como los mecanismos por los cuales el calor es liberado de la superficie, por ejemplo, destruir la vegetación para urbanizar una zona disminuye el enfriamiento por evaporación. Estas alteraciones en la superficie pueden tener grandes implicaciones en las condiciones climática y meteorológicas (Kalnay and Cai 2003).

El efecto de isla de calor urbano (ICU) se refiere al fenómeno en el que las áreas urbanas registran temperaturas más altas en comparación con su entorno rural o superficies no urbanizadas equivalentes (Arnfield 2003; Qian et al. 2022). Este fenómeno ha sido reconocido durante casi dos siglos, con su primera documentación realizada por Howard (1833).

En México, el estudio de las ICU ha realizado mediante observaciones directas, estaciones climatológicas e imágenes satelitales (MODIS, Landsat, Sentinel). Se ha comprobado que la alta densidad urbana y la escasez de áreas verdes intensifican las ICU, aumentando el consumo de energía en sistemas de enfriamiento, especialmente en ciudades tropicales costeras, como es el caso de Tabasco, en México.

La ciudad de Villahermosa se destaca como una de las ciudades más vulnerables frente a los escenarios de cambio climático, particularmente en lo que respecta al aumento de las temperaturas. Uno de los primeros trabajos documentados sobre este fenómeno fue Ángulo-Córdova (1998), usando un vehículo instrumentado que media la humedad y temperatura relativa en distintos puntos de la ciudad creando un mapa de islíneas; Cervantes et al. (2000), quienes realizaron mediciones puntuales de temperatura y humedad relativa, identificando una estrecha correlación entre la distribución térmica y la configuración urbana. Sosa-Olivier et al. (2018) realizaron un estudio piloto enfocado en evaluar la contribución del tránsito vehicular al efecto de las ICU en la ciudad. Jacome (2024), basó su estudio en imágenes satelitales.

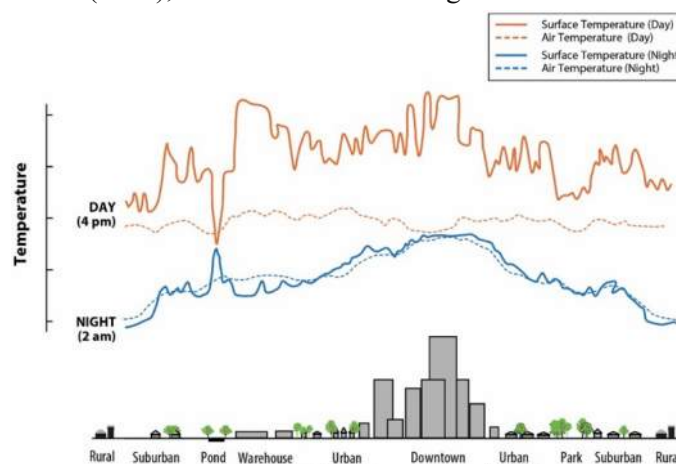


Figura 1. Líneas que muestra el cambio en los valores de temperatura superficial y de temperatura del aire a lo largo de 24 horas (EPA, 2024).

1.1 Causas de las ICU

Las ICU son causadas por diversos factores, como los cambios en el uso del suelo, el calor antropogénico y la geometría urbana. La urbanización reemplaza la vegetación con materiales que retienen el calor, como el concreto y el asfalto, mientras que las superficies impermeables limitan la refrigeración a través de la evaporación. Las actividades humanas, como las emisiones de vehículos, los procesos industriales y el consumo de energía en edificios, generan calor adicional, agravado por el calor residual de los sistemas de aire acondicionado y calefacción. El diseño de las áreas urbanas, con edificios densos y altos, crea cañones urbanos que atrapan el calor y evitan su disipación, intensificando aún más el efecto de las ICU.

1.2 Causas de las ICU

En las zonas urbanas, las temperaturas pueden ser de 2 a 5 grados Fahrenheit más altas que en las áreas rurales circundantes, con diferencias más marcadas durante el verano, lo que afecta el sueño y la salud, especialmente en la noche. A nivel ambiental, las ICU favorecen la formación de ozono a nivel del suelo, deteriorando la calidad del aire y aumentando los problemas respiratorios, mientras que el incremento en la demanda de aire acondicionado genera un mayor consumo energético y presión sobre las redes eléctricas. En cuanto a la salud, la exposición prolongada al calor puede provocar enfermedades como agotamiento por calor y golpes de calor, afectando principalmente a las poblaciones vulnerables como ancianos, niños y personas con condiciones de salud preexistentes.

1.2 Estrategias y mitigación

Las estrategias para mitigar las ICU incluyen medidas de planificación urbana, materiales sostenibles y participación comunitaria. En el diseño urbano, el uso de techos y paredes verdes, así como la creación de parques y áreas forestales, ayuda a enfriar las ciudades y mejorar la calidad del aire. El empleo de pavimentos frescos, techos reflectantes y superficies permeables reduce las temperaturas al reflejar la luz solar y permitir la infiltración de agua, promoviendo la evaporación. En el ámbito político y social, los gobiernos pueden incentivar proyectos de infraestructura verde mediante beneficios fiscales y campañas de sensibilización para educar a la población sobre las ICU, fomentando acciones colectivas para reducir su impacto.

2. Metodología

El análisis de las ICU se llevó a cabo mediante el uso de técnicas de teledetección y computo en la nube mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), primero se realizó la adquisición de datos Satelitales, donde se utilizaron imágenes satelitales provenientes de sensores térmicos como Landsat ya que tienen una resolución nativa mucho más fina (entre 60 m y 120 m, dependiendo del satélite) que los satélites MODIS (1km) para obtener datos de temperatura superficial (LST) en áreas urbanas y rurales. Adicionalmente, se recopilaron datos multiespectrales e hiperespectrales para clasificar la cobertura del suelo (vegetación, cuerpos de agua y áreas urbanizadas). El periodo temporal por analizar corresponde al verano para los últimos 5 años (2019-09-01 al 2024-09-01)

En el procesamiento y análisis de datos, los datos térmicos se procesaron para generar mapas de temperatura superficial, identificando áreas con mayor intensidad térmica asociadas a la urbanización.

Simultáneamente, se realizó una clasificación de la cobertura del suelo para evaluar su relación con las variaciones de temperatura.

Con el uso de GEE los mapas de temperatura se integraron con SIG, en la nube, para superponer datos demográficos e infraestructura urbana. Esto permitió identificar áreas vulnerables y poblaciones afectadas. Esta metodología combinó herramientas avanzadas de teledetección y procesamiento en la nube para proporcionar una evaluación integral de las ICU, orientada al diseño de estrategias de mitigación y planificación urbana sostenible.

3. Resultados

El mayor aumento de las temperaturas en Villahermosa se identificó hacia el sureste de la ciudad (Figura 2), particularmente en la zona de Guayabal, coincidiendo con áreas de alta densidad poblacional. En los últimos años, Guayabal ha experimentado un crecimiento urbano significativo, con mejoras en servicios básicos como electricidad, agua potable y caminos, lo que ha mejorado la calidad de vida de sus habitantes; sin embargo, este desarrollo ha incrementado la demanda de servicios y la expansión de infraestructura, contribuyendo al aumento de temperaturas locales. De manera similar, la localidad de Ciudad Industrial, al norte de la ciudad, también destaca por su alta densidad poblacional y sus efectos asociados. Por otro lado, Atasta de Serra se identifica como una de las zonas más vulnerables de Villahermosa, reflejando los desafíos del crecimiento urbano en un contexto de clima tropical con alta humedad, frecuentemente entre el 70% y el 90%, lo que intensifica la sensación térmica en toda la ciudad

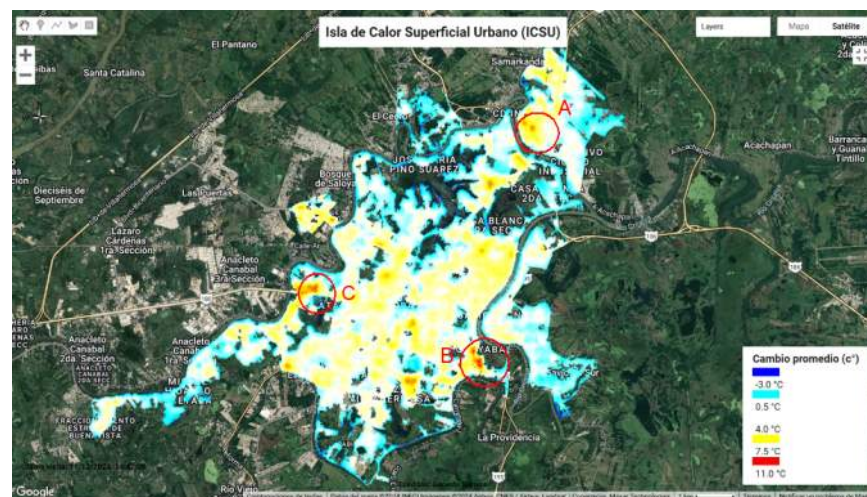


Figura 2. Isla de Calor Superficial Urbano de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Los círculos representan zonas con valores de variación de temperatura más altos. A: corresponde con la zona de Ciudad Industrial, B: zona de Guayabal y C: Atasta de Serra.



Figura 3. Isla de Calor Superficial Urbano Zona A; Empresa BIMBO Villahermosa (círculo rojo), Servicio de paquetería UPS Customer Center y escuela de educación para adultos IEAT (círculo azul).

La zona A (figura 3), ubicada al norte de la ciudad, en la colonia Ciudad Industrial, particularmente, los valores con diferencia de temperatura más alta en esta área se localizan en la planta *BIMBO Villahermosa* donde se alcanza hasta $+9^{\circ}\text{C}$ por encima del promedio. La misma variación se puede encontrar en el área ocupada por el servicio de paquetería *UPS Customer Center* y la escuela de educación para adultos *IEAT* al NW de la planta *BIMBO Villahermosa*. Como es de esperar, los valores más bajos se encuentran en las márgenes del Río La Pigua, donde el agua y las áreas verdes y arboladas reducen los valores de temperatura hasta -3°C

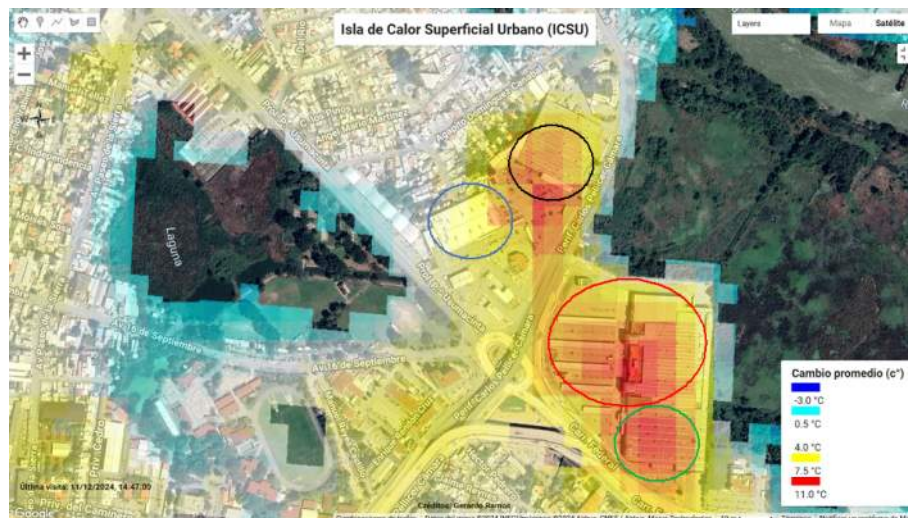


Figura 4. Isla de Calor Superficial Urbano Zona B; Bodega Aurrera Periférico Sur (círculo azul), Sams Club Guayabal (círculo negro), Soriana Hiper Guayabal (círculo rojo) y City Club Villahermosa (círculo verde).

En la zona B (figura 4), hacia el SE de la ciudad en la colonia Guayabal, se localiza un área comercial que alberga a *Bodega Aurrera Periférico Sur* (círculo azul), *Sams Club Guayabal* (círculo negro), *Soriana Hiper Guayabal* (círculo rojo) y *City Club Villahermosa* (círculo verde). La empresa *Soriana Hiper*

Guayabal y su estacionamiento muestran una diferencia de temperatura de hasta $+10.5^{\circ}\text{C}$ sobre el promedio, mientras que el *City Club Villahermosa* ubicado al lado norte sur de *Soriana* exhibe una temperatura de hasta $+11.3^{\circ}\text{C}$ con relación al promedio. Al noroeste de estos comercios se encuentra *Sams Club Guayabal* donde la variación de temperatura, en relación con el promedio, es de $+10.5^{\circ}\text{C}$; hacia el SSW de este lugar se encuentra *Bodega Aurrera*, sin embargo, las temperaturas son de $+7^{\circ}\text{C}$ en este lugar. De nueva cuenta, los lugares con áreas verdes y aquellos en las cercanías al Río Grijalva muestran la variación más baja (entre $\pm 1^{\circ}\text{C}$).



Figura 5. Isla de Calor Superficial Urbano Zona C; Chedraui Tabasco Villacarrizal (círculo rojo).

En la zona C, ubicada al SW de la ciudad, se localiza el supermercado *Chedraui Tabasco Villacarrizal* en la colonia Carrizal; este lugar exhibe valores de $+10^{\circ}\text{C}$, sobre todo, en el área del estacionamiento de este establecimiento. La zona conocida como La Laguna exhibe una disminución de temperatura de hasta -1.5°C .

4. Conclusiones

La ciudad de Villahermosa, Tabasco, se ha convertido en uno de los principales motores económicos de México, lo que ha propiciado un acelerado crecimiento urbano y cambios significativos en el uso del suelo. Este desarrollo ha intensificado los factores antropogénicos responsables del incremento de las temperaturas y de la dificultad para disipar el calor. A pesar de que los cuerpos de agua y la vegetación son los recursos más eficaces para contrarrestar el calor urbano, su presencia en las áreas urbanizadas es considerablemente limitada.

Las islas de calor urbano detectadas en la región están directamente asociadas a superficies con escasa o nula vegetación, baja humedad relativa y una reducida capacidad de reflexión, lo que explica las altas temperaturas que presentan. Para mitigar este fenómeno y mejorar la calidad del entorno urbano, es indispensable conservar los cuerpos de agua y las áreas verdes en la ciudad, además de minimizar la expansión de superficies asfaltadas, especialmente en zonas como los estacionamientos. El mapa de la isla de calor urbano de la ciudad delinea áreas adicionales que pueden ameritar un análisis más profundo; sin embargo, éstas no entran dentro del alcance del estudio actual. No obstante, se proporciona un hipervínculo al mapa interactivo de la ciudad en la sección de materiales complementarios para que los usuarios exploren áreas de interés.

5. Materiales complementarios

Para analizar algún área de interés dirigirse al siguiente enlace para acceder al mapa interactivo [ICSU_Villahermosa](#). Interactúe con la transparencia de las capas o cambia la vista de satélite y usar el *zoom*.

6. Conflicto de intereses y declaratoria de uso de inteligencia artificial

Los autores declaramos que no existen conflictos de intereses que puedan influir en los resultados, el análisis o la interpretación de los datos presentados en este manuscrito.

En la redacción, análisis y desarrollo de este trabajo se ha utilizado inteligencia artificial de manera asistida, específicamente para la revisión gramatical y mejora en la redacción, garantizando que la interpretación, conclusiones y el contenido final son producto del trabajo intelectual de los autores. Cualquier generación de texto asistida por IA ha sido revisada y validada para cumplir con los estándares de calidad y ética en la investigación.

7. Referencias

- [1] A. J. Arnfield, “Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island,” *Int. J. Climatol.*, vol. 23, pp. 1–26, 2003, doi: 10.1002/joc.859.
- [2] T. Chakraborty, C. Sarangi, and S. N. Tripathi, “Understanding diurnality and inter-seasonality of a sub-tropical urban heat island,” *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 163, pp. 287–309, 2017, doi: 10.1007/s10546-016-0223-0.
- [3] A. Greenberg, “Why cities are so hot (and how we can fix it),” *NOVA | PBS*, Apr. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/why-are-cities-hot-urban-heat-islands/>
- [4] L. Howard, *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around it*. London, U.K.: Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley and R. Hunter, 1833.
- [5] Y. Hu, M. Hou, G. Jia, et al., “Comparison of surface and canopy urban heat islands within megacities of eastern China,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 156, pp. 160–168, 2019, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.08.012.
- [6] E. Kalnay and M. Cai, “Impact of urbanization and land-use change on climate,” *Nature*, vol. 425, p. 102, 2003, doi: 10.1038/nature01952.
- [7] A. Ngie, K. Abutaleb, F. Ahmed, et al., “Assessment of urban heat island using satellite remotely sensed imagery: A review,” *South African Geogr. J.*, vol. 96, pp. 198–214, 2014, doi: 10.1080/03736245.2014.924864.
- [8] T. R. Oke, “The energetic basis of the urban heat island,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 108, pp. 1–24, 1982, doi: 10.1002/qj.49710845502.
- [9] Y. Qian, T. C. Chakraborty, J. Li, et al., “Urbanization impact on regional climate and extreme weather: Current understanding, uncertainties, and future research directions,” *Adv. Atmos. Sci.*, vol. 39, pp. 819–860, 2022, doi: 10.1007/s00376-021-1371-9.

- [10] B. Rivera Hernández, L. A. Aceves Navarro, J. F. Juárez López, J. M. Méndez Adorno, and C. Ramos Álvarez, “Evidencias del cambio climático en el estado de Tabasco durante el periodo 1961–2010,” *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, pp. 2645–2656, 2016.
- [11] M. Simon and M. Simon, “The surprisingly simple way cities could save people from extreme heat,” *Grist*, Jul. 18, 2024. [Online]. Available: <https://grist.org/solutions/solutions-cities-extreme-heat-heat-island-roofs/>
- [12] C. J. Tomlinson, L. Chapman, J. E. Thornes, and C. Baker, “Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review,” *Met. Apps.*, vol. 18, pp. 296–306, 2011, doi: 10.1002/met.287.
- [13] Z. S. Venter, T. Chakraborty, and X. Lee, “Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms,” *Sci. Adv.*, vol. 7, eabb9569, 2021, doi: 10.1126/sciadv.abb9569.
- [14] Z. Wan, *MODIS land surface temperature products users’ guide*. Santa Barbara, CA: Inst. Comput. Earth Syst. Sci., Univ. Calif., 2006.
- [15] Q. Weng, “Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 64, pp. 335–344, 2009.
- [16] S. Zhou and J. Cheng, “An improved temperature and emissivity separation algorithm for the Advanced Himawari Imager,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 58, pp. 7105–7124, 2020, doi: 10.1109/TGRS.2020.2979846.

Evaluación de Tierras Raras en sedimentos lacustres, Mesa Central Norte entre San Luis Potosí y Zacatecas, México

**Ruiz-Mendoza, V.^{1,*} , Torres-Sánchez, S. A.¹ , Torres-Hernández, J. R.² , Ortiz-Ochoa G. D.²,
Morales-Bautista, C.M.³ **

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78290, San Luis Potosí, S.L.P, México

²Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78290, San Luis Potosí, S.L.P, México

³División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa Km. 1, CP, 86690 Cunduacán, Tabasco, México

*vivian.ruiz@uaslp.mx

Resumen

Los elementos de Tierras Raras corresponden desde el Lantano al Luterio son elementos químicos menos solubles y relativamente inmóviles durante procesos geológicos tales como el metamorfismo de bajo grado, la erosión y la alteración hidrotermal. En los estados de San Luis Potosí y Zacatecas existen salares de tipo continental que concentran sedimentos lacustres. Estos sedimentos se clasifican como arenosos y arcillo-limosos. En este estudio se evaluaron las Tierras Raras en estos sedimentos para identificar procedencia, ambiente de depositación e intemperismo. Los sedimentos lacustres que contienen más arcillas son ligeramente enriquecidos en Σ REE. Los valores normalizados a condrita muestran un patrón enriquecido en LREE sobre HREE y en sedimentos (NASC). Las anomalías de Eu Y Ce son negativas lo que indica una fuente continental y un ambiente no oxidativo, respectivamente. Mientras que las relaciones de Y/Ho positivos indican el proceso de intemperismo a partir de una fuente de tipo continental.

Palabras claves: *sedimentos lacustres, salares continentales, Elementos de Tierras Raras*

Abstract

The Rare Earth Elements consist of Lanthanum to Lutetium and are chemical elements which are less soluble and relatively immobile during geological processes such as low-grade metamorphism, erosion, and hydrothermal alteration. In the San Luis Potosí and Zacatecas states, there are continental type salars which concentrate lacustrine sediments. These sediments are classified as sandy and clay-silt. In this study, the Rare Earth Elements in these sediments were evaluated to identify provenance, depositional environment, and weathering. The lacustrine sediments contain more clay component are slightly enriched in Σ REE. The values normalized to chondrite show an enriched pattern in LREE against HREE and in sediments (NASC). The Negative Eu and Ce anomalies indicate a continental source and a non-oxidative environment, respectively. Meanwhile, the positive Y/Ho ratios indicate the weathering process also suggest a continental affinity

Keywords: *lacustrine sediments, continental salars, Rare Earth Elements-REE*

Recibido: 27 de noviembre de 2024, Aceptado: 04 de junio de 2025, Publicado: 22 de agosto de 2025

1. Introducción

Los elementos de Tierras Raras (Rare-Earth Elements, REE término en inglés) van del Lantano al Lutecio (números atómicos 57-71). Estos elementos se dividen en dos subgrupos: los de bajo número atómico y masa, denominados tierras raras ligeras (LREE-light rare earth elements) que van de La a Sm; y las que tienen alto número atómico y masa, nombrados tierras raras pesadas (HREE-high rare earth elements) que van de Gd a Lu. Y, por último, se tienen las tierras raras medias (MREE-middle rare earth elements) que aplica a los elementos Pm a Ho [1]. Las características de las REE es que son menos solubles y relativamente inmóviles durante el metamorfismo de bajo grado, la erosión y la alteración hidrotermal; por lo tanto, indicadores efectivos de la fuente de sedimentos cuando se comparan con la corteza continental superior, la corteza oceánica y material del manto [2]. La erosión física y química forma parte del ciclo sedimentario y al igual que el intemperismo afecta a los minerales primarios en las rocas y a varias clases de sedimentos, por ejemplo; carbonatos, evaporitas, areniscas y lutitas. Por lo tanto, la redistribución de REE ha sido objeto de estudio durante las últimas décadas ya que estas se pueden concentrar específicamente en ciertos horizontes de suelos y en áreas dominadas por carbonatos [3]. Además del intemperismo y la erosión otros factores como la transportación, depositación, litificación que incluye la diagénesis y un posible metamorfismo se ven envueltos en el ciclo sedimentario [4].

Este trabajo tiene como objetivo presentar los patrones de distribución de las REE e inferir su procedencia, intemperismo y ambiente de depositación en los sedimentos lacustres que se concentran en siete salares continentales dentro de la Mesa Central Norte entre San Luis Potosí y Zacatecas. Los cuales se han clasificado como arenosos y arcillo-limosos. La mayoría de estos sedimentos provienen de afloramientos circundantes a estos, representados principalmente por secuencias de rocas carbonatadas, rocas volcánicas de composición variada desde basaltos, andesitas a riolitas, así como granitos y rocas metamórficas. Además, las condiciones climáticas de la región de árido a semiárido permiten la evaporación de agua de estos salares continentales favoreciendo la fraccionación por medio del intemperismo y reciclaje de REE concentradas en los sedimentos lacustres.

2. Metodología Experimental

2.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en la Mesa Central Norte [5] entre San Luis Potosí y Zacatecas (102°05'00"-101°32'00" y 22°40'00"-23°0'00") cubre un área de 3,200 Km², donde se encuentran los salares El Salitral (ELS), San José Saladillo (SJS), El Tule (ETU), Salinas Hidalgo (SAH), La Mesilla (LAM), Cornejo (COR) y El Tapado (ETA) (Fig. 1a-b). La elevación promedio en el área va de 1940 a 2600 m.s.n.m. El clima en la región es árido a semiárido con lluvias en verano lo que permite crear reservorios de agua concentrando sedimentos en zonas lacustres dentro de cuencas endorreicas. La geología del área está representada por rocas metamórficas del Jurásico Superior al Cretácico Inferior. Secuencias volcanosedimentarias (andesitas y areniscas); calizas, lutitas y areniscas del Cretácico Inferior y un plutón granodiorítico del Cretácico Superior. Seguido por riolitas, tobas y brechas riolíticas; y conglomerados continentales del Oligoceno. Las litologías más jóvenes están representadas por basaltos del Pleistoceno, sinters, sedimentos lacustres, evaporitas y aluvión [6].

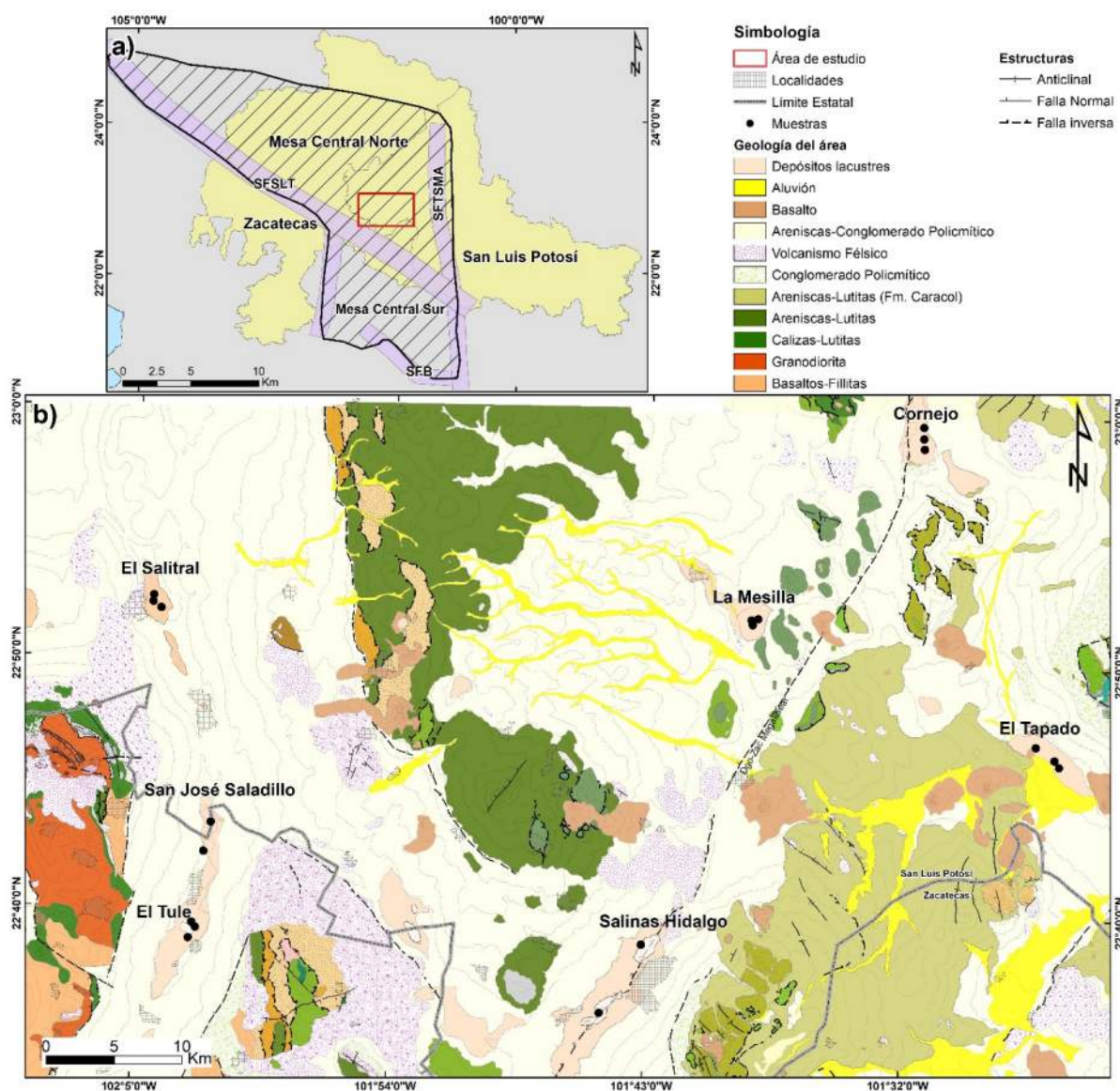


Figura 1. Localización del área de estudio. a) En línea achurada se marca la Mesa Central, la Mesa Central Norte se divide de la del Sur por el Sistema de Fallas San Luis Tepehuanes (SFSLT) (Modificado de [cf.5]). b) Mapa geológico del área de estudio, localización de los salares continentales y en círculos negros las 19 muestras analizadas para este estudio.

2.2 Recolección de muestras y análisis

El trabajo de campo consistió en la recolección de 64 muestras de sedimentos distribuidas en una malla de 500 x 500 m. en cada uno de los siete salares antes mencionados. En la toma de muestras se realizó una trinchera de 1m. de largo x 50 cm. de profundidad, donde se obtuvo una muestra de aproximadamente 600 gr. que se colectaron en bolsas de tela para su posterior secado al aire libre [7]. Cada muestra se etiquetó con las primeras tres letras de cada salar y numeradas consecutivamente. Posterior, las muestras fueron ligeramente desmoronadas con la mano para deshacer aglomerados de los sedimentos y se tamizaron con la malla #80 (180µm) para remover fracciones gruesas. Se seleccionaron 19 muestras que se enviaron al laboratorio Actlabs en Canadá para análisis de Tierras Raras usando ICPOES+ICPMS con Fusión de Peróxido de Sodio.

3. Resultados

3.1 Trabajo de campo

En los siete salares seleccionados los sedimentos presentan una textura al tacto arenosa y arcillo-limosa. La estructura es granular en los sedimentos que son arenosos y ligeramente en bloque los que son más arcillo-limosos. La capa superior de los sedimentos cuando pierden humedad es laminar y varía de espesor de 1 a 3 cm. La tonalidad de la mayoría de los sedimentos consiste en variaciones que van desde gris, verde y café. En el salar San José Saladillo y de Cornejo los sedimentos más arenosos varían en tamaño de gravas en la parte superficial y de muy gruesa a gruesa, hacia la profundidad (50 cm). La composición de estos sedimentos observada en muestra de mano y que se presenta del tamaño de las gravas consiste en fragmentos minerales de cuarzo, fragmentos líticos de volcánicos de los cuales se identifican basaltos y riolitas. En los salares del Salitral, San José Saladillo, El Tule y Cornejo se observa una ligera capa de cristalización por sales.

3.2 Tratamiento de datos

En la Tabla 1 se muestran las concentraciones de REE (ppm) obtenidas del laboratorio. De estos datos se calcularon once variables que incluyen la suma total de las (Σ REE), las REE ligeras (LREE), las REE medias (MREE), las REE pesadas (HREE); las anomalías de Ce y Eu, tanto para condrita como para sedimentos. Σ REE comprende la suma de trece REE; LREE incluye La, Ce, Pr, Nd, Sm; MREE incluye Eu, Gd, Tb, Dy; HREE incluye Ho, Er, Tm Yb, [cf. 3]. Posterior, estas concentraciones de REE (ppm) fueron normalizados con los factores de condrita (C) y de sedimentos (*NASC—North American Shales Composite*) [cf. 1]. Las anomalías de Ce y Eu normalizados se calcularon con respecto a los elementos contiguos a estos elementos, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\text{Eu/Eu}^* = \text{Eu}_C / \sqrt{(\text{Sm}_C \times \text{Gd}_C)} \quad (1)$$

$$\text{Ce/Ce}^* = 5\text{Ce}_C / [4\text{La}_C + \text{Sm}_C] \quad (2)$$

Donde Eu_C , Sm_C , Gd_C , Ce_C , y La_C representan las concentraciones de REE en condrita y de igual manera se utilizaron estas fórmulas para las anomalías de Ce y Eu de sedimentos, utilizando el acrónimo (*NASC*). También se calcularon los ratios de La/Yb tanto para condrita y sedimentos (*NASC*); y los ratios de Y/Ho (mol mol⁻¹) sin normalización de condrita ni de sedimentos.

Tabla 1. Concentraciones de Tierras Raras (ppm) de los sedimentos en los salares continentales

Muestra	SAH-003	SAH-009	ELS-016	ELS-019	ELS-023	SJS-026	SJS-031	ETU-035	ETU-037	ETU-039
La	24.2	25.4	23.8	22.3	16.4	22.4	22.6	32.6	23.3	12.7
Ce	44.4	51.2	81.5	24.3	26.8	43.3	39.3	60.5	40.5	27.4
Pr	6	6.6	4.9	6.4	4.3	5.5	5.6	8	5.6	3.3
Nd	23.3	27.2	18.4	24.4	17.3	21.8	21.3	31.6	22.5	12.1
Sm	4.8	5.5	3.4	5	3.3	4.1	4.1	6.5	4.2	2.6
Eu	0.9	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	0.9	0.6
Gd	4.5	5.7	3.1	5.4	4.3	4.2	3.6	6.3	4.1	2.9
Tb	0.6	0.9	0.5	0.7	0.6	0.6	0.6	1.1	0.6	0.4
Dy	3.5	4.8	2.7	3.9	3.2	3.3	2.9	5.7	3.7	2
Ho	0.8	0.9	0.4	0.8	0.7	0.7	0.5	1.2	0.8	0.4
Er	2.4	3.1	1.5	2.7	2.3	2.3	1.8	4.1	2.2	1.3
Tm	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.6	0.4	0.2
Yb	2.4	2.7	1.4	2.1	2.3	1.9	1.8	3.5	2.2	1.5
Y	21.3	30	14.9	25.6	21.5	19.9	16.1	33.6	23.5	12.9

ΣREE	118.1	135	142.7	99.2	82.6	111.2	105.2	162.7	111	67.4
LREE	102.7	115.9	132	82.4	68.1	97.1	92.9	139.2	96.1	58.1
MREE	9.5	12	7.1	10.8	8.9	8.9	7.9	14.1	9.3	5.9
HREE	5.9	7.1	3.6	6	5.6	5.2	4.4	9.4	5.6	3.4
Ce/Ce_C*	0.788	0.860	1.505	0.463	0.701	0.836	0.752	0.797	0.752	0.925
Eu/Eu_C*	0.597	0.330	0.760	0.474	0.655	0.594	0.642	0.482	0.668	0.673
Ce/Ce_{NASC}*	0.475	0.498	1.041	0.264	0.420	0.522	0.472	0.479	0.473	0.550
Eu/Eu_{NASC}*	0.850	0.470	1.081	0.675	0.932	0.846	0.914	0.686	0.952	0.959
La/Yb_C	6.524	6.087	11	6.871	4.613	7.628	8.124	6.026	6.852	5.478
La/Yb_{NASC}	0.976	0.911	1.646	1.028	0.690	1.142	1.216	0.902	1.025	0.820
Y/Ho	56.969	71.323	79.703	68.469	65.718	60.828	68.897	59.911	62.853	69.004

Muestra	LAM-041	LAM-042	LAM-045	ETA-048	ETA-049	ETA-055	COR-057	COR-64	COR-061	$\bar{x}$ Suelos mundiales [6]
La	31.7	30.1	28.7	8.9	12.3	16.3	7	14.3	24.2	27
Ce	60.7	56.3	54.7	17.7	27.6	33.5	13.9	23.3	49.4	56.7
Pr	7.8	7.6	7.5	2.2	3.3	4.1	1.8	3.7	6.2	7.0
Nd	32.2	27.8	28.7	9.1	11.8	16	6.9	12.8	24.1	26
Sm	6	5.4	6.4	1.4	2.6	3.2	1.6	2.7	4.3	4.6
Eu	0.9	0.9	0.8	0.4	0.3	0.5	0.2	0.7	0.8	1.4
Gd	6.5	5	5.9	1.7	2.6	3.4	1.7	2.6	4.9	3.9
Tb	1	0.8	1	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.7	0.63
Dy	5.9	4.5	5.3	1.2	2	2.5	1.1	1.8	3.9	3.6
Ho	1.2	1.1	1.2	0.3	0.4	0.6	0.2	0.4	0.8	0.72
Er	3.9	3.3	3.5	0.8	1.4	1.9	0.9	1.4	2.9	2.2
Tm	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.4	0.37
Yb	3.5	2.8	3.2	0.8	1.5	1.9	0.8	1.3	2.9	2.6
Y	32.9	30.1	31.9	8.9	14	17.9	7.3	12.9	24.8	33
ΣREE	161.8	146.1	147.4	44.9	66.3	84.7	36.5	65.5	125.5	136.72
LREE	138.4	127.2	126	39.3	57.6	73.1	31.2	56.8	108.2	121.3
MREE	14.3	11.2	13	3.6	5.2	6.9	3.3	5.4	10.3	9.53
HREE	9.1	7.7	8.4	2	3.5	4.7	2	3.3	7	5.89
Ce/Ce_C*	0.826	0.810	0.811	0.869	0.959	0.884	0.843	0.703	0.884	
Eu/Eu_C*	0.444	0.534	0.401	0.799	0.355	0.467	0.374	0.814	0.537	
Ce/Ce_{NASC}*	0.508	0.510	0.463	0.578	0.562	0.535	0.476	0.433	0.559	
Eu/Eu_{NASC}*	0.632	0.760	0.571	1.138	0.506	0.665	0.532	1.159	0.765	
La/Yb_C	5.860	6.955	5.803	7.198	5.305	5.551	5.661	7.117	5.399	
La/Yb_{NASC}	0.877	1.041	0.868	1.077	0.794	0.831	0.847	1.065	0.808	
Y/Ho	58.662	58.549	56.879	63.477	74.889	63.833	78.098	69.004	66.330	

Nota: Ce/Ce_C* y Eu/Eu_C son los valores normalizados a condrita [cf. 1]; Ce/Ce_{NASC}* y Eu/Eu_{NASC}* son los valores normalizados NASC [cf. 1];

$\bar{x}$ —valores promedio de suelos mundiales [8]; los radios de Y/Ho se encuentran en mol mol⁻¹.

En la Tabla 2 se muestran los valores promedio ($\bar{x}$) ΣREE de los sedimentos por cada salar y los calculados de la normalización de las concentraciones de REE para las anomalías de Ce_C y Eu_C en condrita; y Ce_{NASC} y Eu_{NASC} en sedimentos. Así también los radios de La/Yb_C y La/Yb_{NASC}.

Tabla 2. Valores promedio ($\bar{x}$) ΣREE de cada salar, los normalizados de las anomalías de Ce y Eu, y los radios de La/Yb tanto para condrita (C) como para sedimentos (NASC).

Salares	($\bar{x}$) ΣREE	($\bar{x}$) Ce/Ce _C *	($\bar{x}$) Eu/Eu _C *	($\bar{x}$) Ce/Ce _{NASC} *	($\bar{x}$) Eu/Eu _{NASC} *	($\bar{x}$) La/Yb _C	($\bar{x}$) La/Yb _{NASC}
SAH	126.550	0.824	0.463	0.487	0.660	6.305	0.944
ELS	108.166	0.890	0.630	0.575	0.896	7.494	1.122
SJS	108.200	0.794	0.618	0.497	0.880	7.876	1.179
ETU	113.700	0.825	0.608	0.501	0.865	6.119	0.916
LAM	151.766	0.815	0.460	0.494	0.654	6.206	0.929
ETA	65.300	0.904	0.541	0.558	0.770	6.018	0.901
COR	75.833	0.810	0.575	0.489	0.819	6.059	0.907

3.3 Concentración de REE en los sedimentos

Utilizando los valores de Σ REE (ppm) de los sedimentos sin normalizar que se muestran en la Tabla 1, las muestras ELS-016, ETU-035, LAM-041, LAM-042 y LAM-045, sin ligeramente altas con un rango que va de (142.7-162.7) y los valores bajos tienen un rango de (36.5-135) en el resto de los sedimentos en comparación con el promedio de Σ REE de los suelos mundiales de (136.72). Las LREE son ligeramente altas en las muestras ELS-016, ETU-035, LAM-041, LAM-042 y LAM-045 con un rango de (132-139.2) y los valores bajos en las demás muestras entre un rango de (31.2-115.9) en comparación con el promedio de LREE (121.3). Para las MREE se tiene que para las muestras SAH-009, ELS-019, ETU-035, LAM-041, LAM-042, LAM-045 y COR-065 son ligeramente altas con un rango que va de (10.3-14.3) y el resto de las muestras tiene un valor bajo con un rango de (3.3-9.5) en comparación del promedio de los suelos mundiales MREE (9.53). Y para las HREE las muestras que son ligeramente altas son SAH-009, ELS-019, ETU-035, LAM-041, LAM-042, LAM-045, COR-061 con rangos que van de (6-9.4) y el resto de las muestras con valores bajos que van en un rango de (2-5.9) en comparación con el promedio de los suelos mundiales de (5.89).

Correlacionando estos valores con las observaciones de campo clasificando los sedimentos de arenosos y arcillo-limosos; las muestras el ETU-035 y LAM (041-042-045); son ligeramente más arcillosas que el resto de las muestras, debido al ligero enriquecimiento de Σ REE. Debido a que la concentración de REE por el tamaño de grano puede variar de acuerdo con [9] los minerales arcillosos tienen mucho más alta la concentración de REE que las fracciones limosas.

3.4 Normalización de condrita y sedimentos (NASC)

La Figura 2 muestra los patrones de REE normalizados de condrita y sedimentos (NASC) evaluados con los promedios de cada uno de los salares. En el patrón de REE para condrita (Fig. 2a) se observa un enriquecimiento en LREE con respecto a HREE [(La/Yb)_C = 6.01-7.87. Mostrando que los sedimentos provienen de una roca parental de la corteza continental superior.

El patrón normalizado de REE para sedimentos (NASC) (Fig. 2b) se observa un ligero enriquecimiento de HREE con respecto a LREE en los salares El Salitral (ELS) y San José Saladillo (SJS) con el rango La/Yb_{NASC} (1.12-1.17). Mientras que en los demás salares los valores tienen un rango de La/Yb_{NASC} (0.90-0.94). La normalización de los ratios de La/Yb_{NASC} son un indicador que demuestra el empobrecimiento de LREE sobre HREE.

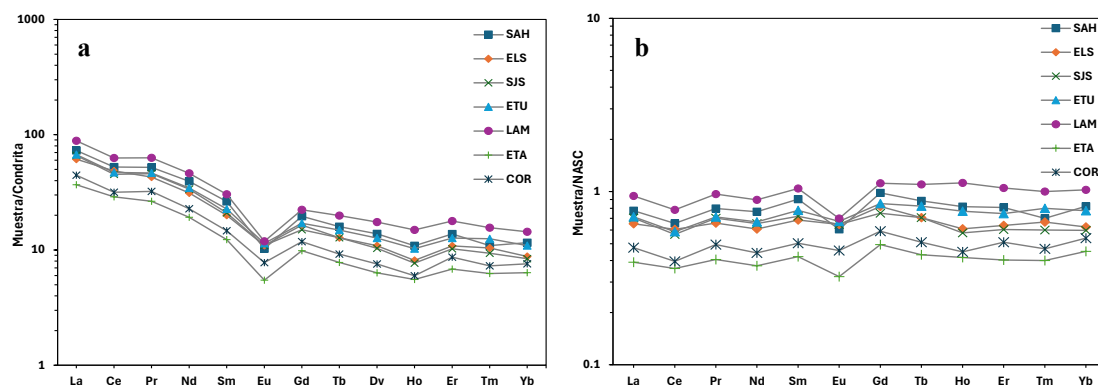


Figura 2. Diagramas de los valores promedio normalizados (ppm) de las concentraciones de REE en los sedimentos de los siete salares continentales. a) Diagrama para condrita normalizada-REE. B) Diagrama para normalización de sedimentos (NASC)-REE. Salinas Hidalgo (SAH), El Salitral (ELS), San José Saladillo (SJS), El Tule (ETU), La Mesilla (LAM), El Tapado (ETA) y Cornejo (COR).

El patrón que se observa de REE contra NASC tiene una tendencia plana entre LREE y HREE (Fig.2b) indicando una posible fuente de los sedimentos relacionada con la litología y sugieren cortas distancia de transporte en el área de estudio. Las REE son fácil de remover de los minerales arcillosos en condiciones neutrales o alcalinas y llegan a mezclarse durante la erosión, el transporte en ríos y en aguas superficiales, la movilización de REE ocurre durante el intemperismo siendo poco probable e insignificante durante la erosión y el transporte [cf.1]. Los salares continentales donde se concentran estos sedimentos están conformados principalmente por calcita, dolomita, cuarzo, ortoclasa, albita, illita-moscovita, etc., [cf. 6] lo que da alcalinidad al sistema ya que las aguas alcalinas de origen lacustre interactúan con rocas que donan más fácilmente Na^+ y K^+ que Ca^+ [10]. Otros factores que influyen en la alcalinidad es el clima árido y la poca precipitación en la región.

3.5 Anomalías de Ce y Eu

En los valores normalizados y promediados (ver Tabla 2) de las anomalías de Ce para condrita ($(\bar{x})\text{Ce}/\text{Ce}_c^*=0.79-0.90$) y para sedimentos (NASC) ($(\bar{x})\text{Ce}/\text{Ce}_{\text{NASC}}^*=0.48-0.57$) indican anomalías negativas. Cuando las anomalías de Ce son valores ligeramente altos (>1.0) denotan que las condiciones son oxidantes [cf. 2]. Estas anomalías negativas en los sedimentos sugieren que las condiciones ambientales en el momento de la depositación de estos no han sido oxidantes.

De igual manera las anomalías de Eu tanto para para condrita ($(\bar{x})\text{Eu}/\text{Eu}_c^*=0.46-0.63$) y sedimentos (NASC) ($(\bar{x})\text{Eu}/\text{Eu}_{\text{NASC}}^*=0.65-0.89$) son negativas, marcando una posible fuente proveniente de rocas félsicas y areniscas que se describe en la geología del área.

3.6 Radios Y/Ho

Los radios Y/Ho indican el proceso de intemperismo debido a que Y muestra una tendencia a ser absorbido por partículas sólidas en el proceso de interacción agua-roca y Ho se lixivía más fácil por lo que resulta en el aumento en las relaciones de Y/Ho en el intemperismo [cf.3]. Los radios molares de Y/Ho de las muestras tienen un rango de (56.88-79.70) y en promedio de 65.96 indicando la fraccionación de una fuente continental. En la Figura 3 se muestran los radios Y/Ho donde se observa una tendencia positiva con $\text{La}_{\text{NASC}}/\text{Yb}_{\text{NASC}}$ ya que el Y se desvía de Ho durante el proceso de intemperismo tal como sugieren [cf.3].

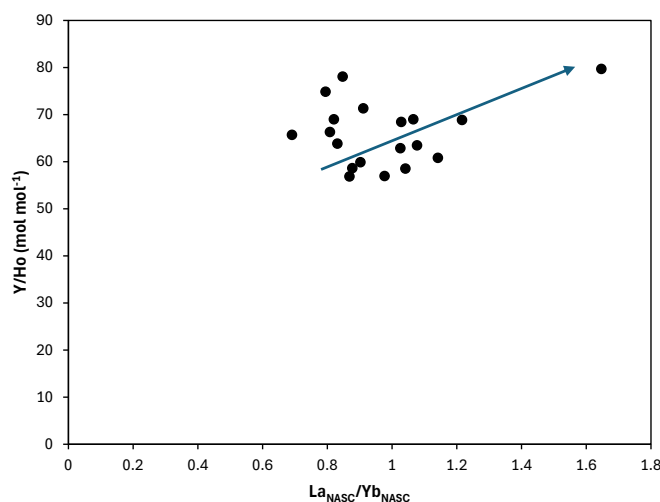


Figura 3. Diagrama $\text{La}_{\text{NASC}}/\text{Yb}_{\text{NASC}}$ contra Y/Ho, con tendencia positiva

4. Conclusiones

Los sedimentos lacustres que contienen más arcillas están ligeramente enriquecidos en Σ REE. En este estudio se evaluaron los valores normalizados de condrita y de sedimentos (NASC) para identificar mejor la fuente de origen de los sedimentos. Los valores normalizados a condrita muestran un patrón enriquecido en LREE sobre HREE. En la normalización de sedimentos (NASC) se observa un patrón plano entre LREE y HREE indicando que la posible fuente de los sedimentos se relaciona con la litología y que el transporte de estos no es tan alto en el área de estudio. Se observa una anomalía negativa de Eu tanto para condrita como para sedimentos (NASC). Mientras que el valor promedio de la anomalía Eu tiene un rango para condrita de $(\bar{X})\text{Eu}/\text{Eu}_C^*=0.46\text{-}0.63$ y sedimentos $(\bar{X})\text{Eu}/\text{Eu}_{\text{NASC}}^*=0.65\text{-}0.89$ indicando que los sedimentos provienen de fuentes félsicas y sedimentarias (areniscas) de la corteza continental superior. Las anomalías de Ce son negativas, con valor promedio para condrita $(\text{Ce}/\text{Ce}_C^*=0.79\text{-}0.90)$ y sedimentos $(\text{Ce}/\text{Ce}_{\text{NASC}}^*=0.48\text{-}0.57)$ indicando un ambiente no oxidativo. Los salares continentales donde se concentran los sedimentos lacustres son alcalinos, permitiendo la movilización de las REE en las arcillas, pero sin transportarse y los ratios de Y/Ho positivos, indican el proceso de intemperismo de una fuente continental que se deposita y recicla en los salares continentales.

5. Agradecimientos

La autora agradece al CONAHCYT el apoyo otorgado para la realización del proyecto #2321409 con Beca de estancia Posdoctoral por México [CVU 270565]. Bajo la supervisión de la Dra. Sonia Alejandra Torres Sánchez. Asimismo, le agradece a la Dra. Sonia Torres Rivera, y al Geólogo Stephen P. de Wit por su valioso apoyo en la toma de muestras.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no existen conflictos de intereses que puedan influir en los resultados, el análisis o la interpretación de los datos presentados en este manuscrito. Así mismo, hacemos constar que no se ha utilizado inteligencia artificial en la redacción, análisis, ni en el desarrollo del presente trabajo

7. Referencias

- [1] P. Henderson, *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1984.
- [2] O. C. Adeigbe and A. Y. Jimoh, "Rare Earth Elements Fingerprints: Implications for Provenance, Tectonic and Depositional Settings of Clastic Sediments of Lower Benue Trough, Southeastern Nigeria," *New York Science Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 11–26, 2014. [Online]. Available: https://www.sciencepub.net/newyork/ny0702/003_22741ny070214_11_26.pdf
- [3] G. Han, Q. Yang, Q. Wu, F. Li, M. Liu, and L. Wang, "Geochemistry of rare earth elements in soils under different land uses in a typical karst area, Guizhou Province, Southwest China," *Can. J. Soil Sci.*, vol. 97, no. 4, pp. 606–612, 2017, doi: 10.1139/cjss-2017-0043.
- [4] S. R. Taylor and S. M. McLennan, *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [5] A. F. Nieto-Samaniego, S. A. Alaniz-Álvarez, J. L. García-Díaz, J. A. Ramírez-Fernández, B. A. Ortega-Flores, and I. Israde-Alcántara, "Una revisión de la geología y evolución tectónica cenozoicas de la Mesa

Central de México,” *Rev. Mex. Cienc. Geol.*, vol. 40, no. 2, pp. 187–213, 2023, doi: 10.22201/cgeo.20072902e.2023.2.1736.

[6] V. Ruiz-Mendoza, R. Villafuerte-Rivera, M. T. García-González, and M. López-Hernández, “An approach to Li-clays in continental salars in the Mesa Central, between San Luis Potosí and Zacatecas, Mexico,” in *Proc. 60th Annu. Meet. Clay Mineral Soc.*, 2023, p. 81.

[7] A. Horta, B. P. Malone, U. Stockmann, B. Minasny, T. F. A. Bishop, A. B. McBratney, R. Pallasser, and L. Pozza, “Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review,” *Geoderma*, vol. 241–242, pp. 180–209, 2015, doi: 10.1016/j.geoderma.2014.11.024.

[8] M. Sager and O. Wiche, “Rare earth elements (REE): Origins, dispersion, and environmental implications—A comprehensive review,” *Environments*, vol. 11, no. 2, pp. 1–50, 2024, doi: 10.3390/environments11020024.

[9] K. R. Randive, S. Ganguly, and S. D. Sharma, “Understanding the behavior of rare earth elements in minerals and rocks,” *Gondwana Geol. Mag.*, vol. 29, pp. 29–37, 2014.

[10] B. M. Tutolo and N. J. Tosca, “Dry, salty, and habitable: The science of alkaline lakes,” *Elements*, vol. 19, no. 1, pp. 10–14, 2023, doi: 10.2138/gselements.19.1.10.

Factibilidad de técnicas de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos para su aplicación en el estado de Tabasco: revisión sistemática

Cahuich-Flores, S. G.¹ , Morales-Bautista, C. M.¹ , Priego-Mendoza, E. A.¹, Gómez-Rivera A.¹ , Pérez-Vidal, H.^{1,*} , Márquez-Herrera, C. E.² 

¹Red de Investigación Multidisciplinar en Materia Ambiental: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, C.P. 86690 Cunduacán, Tabasco, México.

²Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510 Ciudad de México, CDMX.

*hermicenda.perez@ujat.mx

Resumen

La actividad petrolera del estado Tabasco ha sido sinónimo de oportunidad en cuestiones económicas, pero en el ámbito ambiental, ocasiona efectos negativos por la contaminación significativa al suelo. Cuando esto ocurre, es común que algunos sitios no reciban el tratamiento adecuado por diversas razones, siendo el tema económico el de mayor relevancia. Es por ello, que el objetivo de esta investigación fue realizar una búsqueda de técnicas de remediación para conocer si es factible aplicarlos a los suelos de Tabasco, dichas técnicas se obtuvieron de plataformas de búsqueda con alta calidad científica como: Google Académico, Scielo y Science Direct. Para su búsqueda, el presente trabajo se basó en algunos lineamientos del protocolo PRISMA, para la descripción de cada técnica. Los criterios búsqueda y selección dieron como resultado un total de 10 artículos científicos, sin distinción alguna, considerando si se requiere algún equipo sofisticado, el tiempo de remediación y si la técnica es viable para emplearlo en grandes extensiones de contaminación y con esto considerar si pueden aplicarse en Tabasco.

Palabras claves: *derrame, hidrocarburos, suelos contaminados, técnicas de remediación*

Abstract

Oil activity in the state of Tabasco has been synonymous with economic opportunity, but in the environmental sphere, it causes negative effects due to significant soil contamination. When this occurs, it is common for some sites to not receive adequate treatment for various reasons, the economic issue being the most relevant. Therefore, the objective of this research was to conduct a search for remediation techniques to determine their feasibility in Tabasco soils. These techniques were obtained from high-quality scientific search platforms such as Google Scholar, Scielo, and Science Direct. For the search, this work was based on some guidelines of the PRISMA protocol for the description of each technique. The search and selection criteria resulted in a total of 10 scientific articles, without distinction, considering whether sophisticated equipment is required, the remediation time, and whether the technique is viable for use in large areas of contamination, thus determining whether they can be applied in Tabasco.

Keywords: *spill, hydrocarbons, contaminated soils, remediation techniques*

Recibido: 31 de octubre de 2024, Aceptado: 08 de mayo de 2025, Publicado: 22 de agosto de 2025

1. Introducción

El presente trabajo se basó en la búsqueda de información de metodologías que empleen el uso de técnicas de remediación de suelos, en especial aquellos sitios que han sido impactados por derrames de hidrocarburos y sus posibles aplicaciones a suelos tropicales, como los del estado de Tabasco. De manera general, las causas principales que originan un derrame son diversas, pero pueden ser accidentales o intencionados. Por ejemplo, el vandalismo de oleoductos, fallas mecánicas de las máquinas de perforación, fugas involuntarias de tanques de petróleo, así como de origen natural como los terremotos. Todos estos eventos, dan lugar a impactos ambientales al medio ambiente y la salud humana [1-3].

El estado de Tabasco, México, se conforma de 17 municipios, siendo Cárdenas, Centla, Comalcalco, Jalpa de Méndez, Macuspana y Paraíso los más importantes por ser zonas de gran actividad petrolera y de reservas de petróleo [4]. Dicha actividad opera desde hace varios años y a partir de 1992 se empezaron a documentar registros por derrames de hidrocarburos [5]. Moscoso-Baeza et al. (2022) [4] mencionan que durante el periodo de 2018 a 2021 Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha registrado 176 emergencias ambientales, de los cuales 156 han sido provocados por derrames de hidrocarburos y 20 se han registrado por fuga de gas, donde el 63% de estas emergencias pertenecen al estado de Tabasco y Veracruz. Por esta razón, se ha reportado que el impacto ambiental por derrames de hidrocarburos en suelo, pueden alterar lo siguiente: 1. Sus propiedades físicas y químicas (textura, compactación, capacidad de campo, pH, disponibilidad de nutrientes), 2. Las comunidades microbianas (ya que juegan un papel importante en el ciclo de nutrientes, degradación de la materia orgánica y la salud del suelo), 3. Los invertebrados (lombrices, insectos y ácaros, ya que contribuyen a la formación de la estructura del suelo) y 4. Las plantas y animales [6], así como también ocasionar efectos negativos a la salud humana por la exposición, manifestándose como enfermedades cutáneas, digestivas, respiratorias, complicaciones reproductivas y durante el embarazo, entre otros [7-9].

Ante esta problemática el gobierno mexicano consolidó la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012, para regular mediante lineamientos la concentración de hidrocarburos en suelo y “Establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación”, es por ello que el suelo debe ser sometido a una serie de acciones que impliquen su recuperación, que se basa en un conjunto de técnicas, tecnologías o tratamientos de remediación, donde el objetivo es disminuir o eliminar los contaminantes [10]. Estos tratamientos incluyen enfoques químicos (oxidación química, electrocinética), físicos (disposición final, lavado, etc.), térmicos (desorción térmica, incineración, vitrificación, etc.) y biológicos (biorremediación, Bioestimulación, fitorremediación, biolabranza, etc.) y pueden realizarse tanto *in situ* como *ex situ* [10-13].

Para poder elegir alguna técnica de remediación, se debe tener en cuenta la magnitud del sitio contaminado, la topografía, la estructura y las propiedades fisicoquímicas del suelo, así como el tipo y la cantidad del contaminante [14]. Por estas razones, algunos estudios como los de Chan-Quijano et al. (2015) [15] sugieren tres criterios para seleccionar la técnica de remediación más adecuada, estos son: 1) Comprender el uso que se le otorga al sitio (agrícola, forestal recreativo o residencial), 2) Conocer las ventajas, desventajas y limitaciones al realizar una remediación y 3) Tener conocimiento del problema con información reciente. Por tal razón, el objetivo de este trabajo fue realizar una búsqueda de técnicas de remediación que consideren estos aspectos para su aplicación a las condiciones de los suelos de Tabasco.

2. Metodología Experimental

Para el análisis de artículos científicos nos apoyamos con el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic and Meta-Analyses), aplicando solamente algunos puntos o temas que se mencionan.

2.1 Criterios búsqueda, recopilación y selección de artículos

Se recopiló información referente al tema de interés, utilizando diferentes plataformas que poseen información científica y de alta calidad como: Google Académico, Scielo y Science Direct. Para la búsqueda de los artículos de difusión, se consideraron trabajos locales, nacionales e internacionales.

Se emplearon las siguientes palabras claves referente al tema de interés como: “Impacto ambiental”, “Remediación”, “Hidrocarburos y Tabasco,” “Suelo contaminado por Hidrocarburo”. A partir de las palabras clave, se fueron modificando las oraciones de búsqueda para obtener información precisa. En la Tabla 1 se muestran las oraciones ingresadas en las plataformas para la búsqueda de artículos.

Tabla 1. Oraciones ingresadas en las plataformas de búsqueda

Español	Inglés
Contaminación de suelo por hidrocarburo	Soil pollution by hydrocarbon
Derrame de hidrocarburo en Tabasco	Hydrocarbon spill in Tabasco
Remediación ambiental en Tabasco	Environmental remediation in Tabasco
Contaminación del suelo por hidrocarburo en Tabasco	Soil pollution by hydrocarbon in Tabasco

Para la selección de artículos científicos se consideró principalmente la fecha de publicación a partir del año 2020, para garantizar que la información sea la más actualizada y observando que se incluyeran en los reportes nuevas técnicas de caracterización y remediación. También se consideraron los siguientes puntos:

- El proceso de remediación efectuado en suelo
- Que el contaminante sea únicamente hidrocarburo
- Que los artículos sean de acceso libre (Open Access)

Posteriormente, la información obtenida se clasificó y se ordenó de forma cronológica de acuerdo con la fecha de publicación del artículo y tomando en cuenta el apellido del autor en orden alfabético en caso de encontrarse artículos publicados en el mismo año.

2.2 Proceso de análisis de los artículos

Los artículos seleccionados se analizaron individualmente, observando su eficacia y criterios, visualizando los objetivos, la justificación en conjunto de la metodología empleada, agrupándola de acuerdo con el tipo de remediación: biológica, química y física.

Todos los artículos seleccionados se les consideró los siguientes criterios para determinar su viabilidad en el estado de Tabasco: a) si el método reportado requiere de un equipo especializado para llevar a cabo la remediación b) que el método de remediación sea eficaz en obtener valores de límites máximos permisibles iguales o menores a los reportados en la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 c) la cantidad de tiempo que

requiere el método para remediar, ya sea en horas, días, semanas o meses y d) si los métodos son viables para atender grandes extensiones de áreas, por lo que se verificó que en los artículos se mencionara la remediación de suelos de grandes extensiones en metros cuadrados, kilómetros cuadrados o hectáreas.

3. Resultados y Discusión

3.1 Análisis general de la información y selección de artículos

Los resultados de búsqueda de las plataformas (Google Académico, Scielo y ScienceDirect) se reportan en la Tabla 2 de acuerdo con las palabras claves ingresadas. Las búsquedas arrojaron trabajos de tesis, artículos y revistas de divulgación. Se observó que la plataforma Google Académico se destacó por obtener una mayor cantidad de documentos encontrados a diferencia de la plataforma de Scielo y ScienceDirect en donde hubo una menor cantidad de resultados, a pesar de ser plataformas consideradas para publicación de artículos por su alta calidad de información.

Tabla 2. Comparación de los resultados de búsquedas en las plataformas en el periodo de 2020 - 2024

	Google Académico		Scielo		ScienceDirect	
Oraciones de búsqueda	Total de resultados	Total acotado al periodo de estudio*	Total de resultados	Total acotado al periodo de estudio*	Total de resultados	Total acotado al periodo de estudio*
Contaminación de Suelo por Hidrocarburo	24,800	15,900	10	4	55	7
Derrame de Hidrocarburo en Tabasco	1,870	337	0	0	3	0
Remediación Ambiental en Tabasco	1,560	485	0	0	8	3
Contaminación del Suelo por Hidrocarburo en Tabasco	3,720	808	0	0	6	2

La selección de artículos se realizó de acuerdo con el numeral 2.3, dando como resultados un total de 10 artículos. En la Tabla 3 se muestran los artículos agrupados de acuerdo con la técnica de remediación empleada cronológicamente.

Tabla 3. Artículos clasificados por la técnica de remediación y cronológicamente

Técnica de Remediación	Autor		Título de la Investigación
Biológica	Marques-Benavides et al. (2020) [16]	i.	<i>Phaseolus vulgaris</i> en el tratamiento de suelos agrícolas contaminados por hidrocarburos.
Biológica	Pérez-Hernández et al. (2020) [17]	ii.	Potencial de <i>Mimosa pigra</i> para restaurar suelos contaminados con antraceno y fenantreno.
Biológica	Rico-Cerda et al. 2020 [18]	iii.	Recuperación de suelo contaminado por una mezcla de hidrocarburos
Biológica	Ugaz-Hoyos et al. (2020) [19]	iv.	Biosurfactantes en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.
Biológica	Cruz-Colín et al. (2021) [20]	v.	Vermicomposteo de un suelo contaminado con petróleo.
Biológica	Ojeda-Morales et al. (2023) [21]	vi.	Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos empleando sustancias húmicas de vermicomposta.
Química	Lassalle et al. (2023) [22]	vii.	Remediación con haz de electrones de suelos impactados con hidrocarburos pesados.
Química	Moses et al. (2023) [23]	viii.	Una posible remediación de hidrocarburos totales de petróleo de suelos contaminados utilizando nanotubos de carbono multipared suspendidos en surfactante
Física, química y biológica (Mixta)*	Saeed et al. (2021) [24]	ix.	Potencial de bioestimulación del biocarbón para la remediación del suelo contaminado con petróleo crudo y el crecimiento de las plantas.
Física, química y biológica (Mixta)*	Curiel-Alegre et al. (2022) [25]	x.	Aplicación de un consorcio microbiano inmovilizado sobre biochar en la recuperación de un suelo contaminado con hidrocarburo.

*Cuando se usa más de una técnica de remediación en conjunto se denomina mixta o tren de tratamiento.

3.2 Análisis de estructura de cada artículo

A continuación, se reportan los análisis realizados a cada artículo científico, agrupados respectivamente por la técnica de remediación empleada, así como en orden cronológico.

3.2.1 Técnicas de remediación biológica

3.2.1.1 *Phaseolus vulgaris* en el tratamiento de suelos agrícolas contaminados por hidrocarburos

El trabajo fue realizado por Marques-Benavides et al. (2020) [16] en Hidalgo, Michoacán, donde el objetivo principal fue emplear la especie de planta *Phaseolus vulgaris* en conjunto con las bacterias *Azotobacter vinelandii* y *Paenibacillus polymyxa* en suelo contaminado artificialmente a 35,000 ppm de ARA para decrecerlo a un valor inferior al máximo permisible de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012.

Para el diseño experimental se utilizó un suelo laterítico con pH 6.64, materia orgánica 2.57%, capacidad de campo 30.08%, capacidad de intercambio catiónico 4.61 mg/100 g y con textura: arcilla 40.56%, arena 0.76% y limo 37.8%. Posteriormente el suelo se contaminó artificialmente con 35,000 ppm de ARA para lograr un decremento de la concentración, menor a 4,400 ppm valor máximo aceptado por la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012.

Para el proceso de biorremediación, el suelo contaminado inicialmente fue enriquecido por 5 días con lombricomposta (LC) de bovino con la siguiente composición química: nitrógeno total 1.7 %, materia orgánica 34.9%, (P) 0.24%, (Mg) 0.49%, (K) 0.63%, (Ca) 0.63%, pH 7.2. Transcurrido 15 días el suelo contaminado el suelo fue nuevamente enriquecido con un fertilizante mineral (FEMI) con la siguiente composición (g/L): NH_4NO_3 10.0, K_2HPO_4 2.5, KH_2PO_4 2.0, MgSO_4 1.0, NaCl 0.1, CaCl_2 0.1, Fe SO_4 trazas y 10.0 mL/L de una solución de oligoelementos (g/L): H_3BO_3 2.86, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22, $\text{MgCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.81, pH ajustado 7.0. Al cumplirse 30 días del enriquecimiento con LC y FEMI en el suelo se sembraron semillas de *P. vulgaris* en conjunto con 1.0 ml de *A. vinelandii* y *P. polymyxa*, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentraciones de aceite residual automotriz (ARA) en suelo con *P. vulgaris* e inoculado con *A. vinelandii* *P. polymyxa* a nivel: plántula y prefloración.

Tiempo (Días)	Concentración de ARA (35,000 ppm)	
	Suelo con ARA enriquecido con <i>P. vulgaris</i>	Suelo con ARA (control negativo)
0	35,000 ^{a*}	35,000 ^a
19	15,895 ^a (plántula)	34,986 ^a
24	2,044 ^{a+}	33,832 ^a
33	1,152 ^{a+} (floración)	29,220 ^a

*Valores con letra distinta indican diferencia significativa (ANOVA Tukey $p < 0.05$); +=valores inferiores al máximo permisible de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012.

De acuerdo con los resultados presentados, el enriquecimiento del suelo contaminado con ARA a 35,000 ppm con LC y el FEMI favorecieron la siembra de *P. vulgaris* potenciado con *A. vinelandii* y *P. polymyxa*. Logrando a los 19 días una disminución de la concentración y crecimiento de *P. vulgaris*, a los 24 días se redujo la concentración significativamente y a los 33 días la concentración se redujo a un valor de 1,152 ppm con presencia de floración de *P. vulgaris* y logrando estar por debajo de límite máximo de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012, en comparación con el control negativo que su degradación fue pobre ya que no fue enriquecido. Por lo tanto, un suelo contaminado con ARA requiere acciones de restitución de su fertilidad, mediante un tipo de LC y FEMI adecuados para facilitar la fitodegradación.

3.2.1.2 El potencial de *Mimosa pigra* para restaurar suelos contaminados con antraceno y fenantreno.

Este trabajo fue realizado por Pérez-Hernández et al. (2020) [17], cuyo objetivo fue evaluar el potencial de la especie vegetal *Mimosa pigra* para remover y bioacumular antraceno y fenantreno, además de conocer los efectos de los contaminantes sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo a lo largo de una dinámica de 70 días. Se ha reportado que *M. pigra* tiene la capacidad para remover compuestos orgánicos y translocarlos en sus tejidos ya sea en raíz, tallo, hojas o frutos [26].

Para la fitorremediación se contaminó un suelo de textura franco-limosa con 100 mg/kg de antraceno y 200 mg/kg de fenantreno. Se establecieron tres tratamientos que fueron: suelo contaminado con planta (C1), suelo contaminado sin planta (C2) y suelo no contaminado con planta (C0) con una duración de 70 días, monitoreando el crecimiento y producción de biomasa de la planta. Al término de la experimentación se observó un incremento en la capacidad de retención del agua y una disminución de los contaminantes antes de los siete días para todos los tratamientos. Por otra parte, para el tratamiento C1 se obtuvo un porcentaje remoción del 92% y 80% para fenantreno y antraceno, respectivamente. En cambio, para el tratamiento C2 se obtuvieron porcentajes de remoción del 77% y 60% para fenantreno y antraceno, respectivamente. Como conclusión se observó que las características fisicoquímicas del suelo no se vieron afectadas por la fitorremediación como lo fueron el pH, contenido de nitrógeno, conductividad eléctrica, siendo una

alternativa económica y amigable para reducir estos contaminantes. Por lo que se puede inferir que *M. pigra* tiene la capacidad para ser considerada como planta fitorremediadora de estos compuestos orgánicos.

3.2.1.3 Recuperación de suelo contaminado por una mezcla de hidrocarburos

Este trabajo fue realizado por Rico-Cerda et al. (2020) [18], cuyo objetivo principal fue emplear la fitorremediación para disminuir la concentración de un aceite residual automotriz (ARA) de un suelo contaminado a 100,000 ppm a un valor inferior de 4,400 ppm de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012. Para efectuar la fitorremediación del suelo contaminado por ARA en una concentración de 100,000 ppm, se empleó la especie vegetal *Sorghum vulgare* en conjunto con las especies de hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium chrysogenum* considerando que estos microorganismos además de estimular el crecimiento del sistema radical vegetal [27], también son capaces de metabolizar hidrocarburos del tipo ARA [28]. Los resultados de la degradación del ARA se reportan en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentración de aceite residual automotriz en suelo posterior a la fitorremediación con *Sorghum vulgare* potenciado con *Aspergillus niger* y *Penicillium Chrysogenum* a los 120 días.

Suelo Agrícola Contaminado por ARA	ARA (ppm)	
	Inicial	Final
Suelo sin fitorremediación o control negativo	100,000 ^a	80,000 ^b
Suelo fitorremediado, <i>S. vulgare</i> + <i>A. niger</i> + <i>P. chrysogenum</i>	37,620 ^a	3,400 ^b

Letras diferentes son estadísticamente distintas al 0.05% según Tukey

Fuente: Rico-Cerda et al. 2020

De acuerdo con los resultados se demostró que ambas bacterias pudieron metabolizar los hidrocarburos presentes en el ARA, así como también estimularon el crecimiento radicular de la especie *Sorghum vulgare*. El suelo fitorremediado que incluyó solamente la especie de planta *Sorghum vulgare* logró una disminución de la concentración del ARA de 100,000 ppm a 37,620 ppm para un tiempo de 120 días. Posterior a ese tratamiento se inocularon los hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium Chrysogenum* logrando una disminución de la concentración del ARA de 37,620 a 3,400 ppm. Con estos resultados se concluye que la fitorremediación con *Sorghum vulgare* en conjunto con los hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium Chrysogenum* logran efectivamente la reducción de las concentraciones del ARA.

3.2.1.4 Biosurfactantes en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos

El trabajo fue realizado por Ugaz-Hoyos et al. (2020) [19] en la provincia de Talara, región Piura en Perú y el objetivo fue determinar el rendimiento de surfactantes producidos por *Pseudomonas spp.* degradadoras de hidrocarburos de petróleo. Para resolver una de las principales problemáticas como el riesgo ecológico, afectaciones nocivas en los suelos, para el análisis de suelo contaminado con petróleo de la Empresa Interoil Perú S.A.

El diseño experimental se dividió en dos fases: en la primera fase se determinaron las características del suelo contaminado, cuantificando hidrocarburos totales de petróleo (HTP) por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), también se tomó 1 kg de suelo contaminado para el aislamiento de bacterias, determinando el número de microorganismos totales y degradadores hidrocarburos o hidrocarbonoclasticos mediante la técnica del número más probable.

En la segunda fase se determinó el rendimiento de surfactantes producidos por *Pseudomonas spp.* degradadoras de hidrocarburos de petróleo. Primeramente, se realizó la selección de bacterias productoras de surfactantes mediante la prueba de dispersión de gota, se obtuvo el inóculo bacteriano en medio salido Davis con 1% v/v de glicerol a 30 °C durante 24 h con agitación cada 4 h. posteriormente se inoculó nuevamente 5 mL en el mismo medio a 30 °C por 72 h con agitación cada 12 h. se centrifugó y se obtuvo el sobrenadante para la técnica de dispersión de gota, donde se identificó el halo de mayor diámetro de emulsión sobre una capa de hidrocarburo. Se realizó el cálculo $Y(p/x)$ o coeficiente de rendimiento del producto en relación con la biomasa o cantidad de biomasa formada (gg^{-1}), dividiendo los gramos de surfactante entre los gramos de biomasa. Por último, se identificó la actividad detergente mediante una escala elaborada y la actividad emulsificante del surfactante por absorbancia en un espectrofotómetro de luz visible a 540 nm.

En todas las muestras de suelo contaminado se aislaron bacterias heterótrofas cultivables, obteniéndose 113 aislados con agar nutritivo y 135 con agar Mac Conkey, con un total de 248 aislados bacterianos. El género *Pseudomonas* se identificó en el 15.93% de bacterias identificadas con agar nutritivo y 44.44% de aislados en agar MacConkey, obteniéndose 78 aislados de *Pseudomonas spp.* El 55.56% de *Pseudomonas spp.* aisladas en agar nutritivo y 93.33% aisladas en agar Mac Conkey utilizaron petróleo crudo liviano como fuente de carbono y energía, durante 24 - 96 horas, considerándose degradadoras de hidrocarburos de petróleo el 84.62% de aislados. En el medio mínimo de Davis con glicerol como fuente de carbono, el 92.42% de cultivos de *Pseudomonas spp.* degradadores de petróleo desarrollaron durante 72 horas con producción de surfactante.

La actividad detergente de los surfactantes obtenidos o capacidad para facilitar la remoción del petróleo se determinó que (*Pseudomonas spp.* 8JU y 2HI) pueden regular cantidad de petróleo remanente como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Rendimiento $Y(p/x)$ de surfactantes producidos por *Pseudomonas spp.* degradadoras de hidrocarburos de petróleo

<i>Pseudomonas spp.</i> UNPRG	x Biomasa ($g L^{-1}$)	p Surfactante ($g L^{-1}$)	Y (p/x) gg^{-1} %	
2HI	4.328	1.50	0.35	35
8JU	4.839	1.50	0.31	31
4CF	5.393	1.00	0.19	0.19

De acuerdo con los resultados obtenidos de la tabla 6, indican que el uso del género *Pseudomonas spp.* pueden ser consideradas potenciales para la disminución de la concentración de los HTP ya que pueden sintetizar surfactantes a partir de los HTP, como las cepas 8JU y 2HI ya que obtuvieron un rendimiento del 31% y 35% en un intervalo de 72 horas. Con esto, se evidencia que las bacterias del género *Pseudomonas spp.* pueden ser empleadas en biorremediación.

3.2.1.5 Vermicomposteo de un suelo contaminado Petróleo

El trabajo fue realizado por Cruz-Colín et al. (2021) [20] en el estado de Tabasco, México. El objetivo de esta investigación fue aplicar la técnica de vermicomposteo para remediar un suelo contaminado con petróleo a 31,634 ppm empleando la especie *Eisenia foetida* y estiercol de caballo como sustrato.

Para el diseño experimental, el suelo contaminado fue caracterizado mediante la NOM-021-SEMARNAT-2000 donde se determinó pH, porcentaje de materia orgánica y nitrógeno orgánico; también se determinó el recuento de bacterias mesófilas aerobias. Para la cuantificación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en el suelo, se realizó por la técnica de extracción Soxhlet usando diclorometano como solvente. Por

otra parte, al estiércol de caballo, se le determino, pH, carbono orgánico, nitrógeno inorgánico y grasas extraíbles. Las lombrices *E. foetida* fueron sometidos a una aclimatación hacia el sustrato para lograr una asimilación optima de los nutrientes. Los tratamientos establecidos se reportan en la Tabla 7, así como los porcentajes de remoción de HTP.

Tabla 7. Tratamiento de suelo por vermicomposteo

Tratamiento	Nomenclatura	Suelo (g): Sustrato (g): # de lombrices	% Remoción de HTP
Suelo contaminado + Sustrato	C1	180:20:0	9.10
	C2	170:30:0	22.4
	C3	160:40:0	22.6
Suelo Contaminado + Sustrato + Lombrices	T1 – A	180:20:10	15.8
	T1 – B	180:20:20	16.2
	T2 – A	170:30:10	21.9
	T2 – B	170:30:20	19.9
	T3 – A	160:40:10	23.9
	T3 – B	160:40:20	24.8

La experimentación tuvo una duración de 30 días y los resultados demostraron que las lombrices al estar sometidas a la presencia del hidrocarburo ocasionaban una reducción de su peso corporal, esto podría deberse a la poca cantidad del sustrato. Sin embargo, el tratamiento de T3-B fue la que obtuvo el mayor porcentaje de remoción con un valor de 24.8%, debido a que había más presencia de lombrices y sustrato y menos cantidad de suelo contaminado.

Por lo tanto, se concluye que la especie *E. Foetida* tiene el potencial para adaptarse y degradar hidrocarburos hasta tres veces su cantidad, en conjunto con un sustrato, que en este caso fue estiércol de caballo. El sustrato favoreció el crecimiento de las lombrices, es por ello, que en los tratamientos T3-A y T3-B se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción.

3.2.1.6 Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos empleando sustancias húmicas de vermicomposta

El trabajo fue realizado por Ojeda-Morales et al. (2023) [21] en el estado de Tabasco, México. El objetivo fue evaluar la remoción de hidrocarburos totales del petróleo o HTP en tres suelos con diferentes clases texturales: S1: arcilloso, S2: arcilloso-limoso y S3: migajón arenoso; tratados con diferentes clases de abonos: vermicomposta comercial y sustancias húmicas comerciales (humato de potasio).

Para el diseño experimental, se muestreo suelo de 3 sitios y se le realizaron los parámetros fisicoquímicos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 como la textura, densidad aparente, densidad real, humedad, fosforo, magnesio, ácidos húmicos y fúlvicos, pH, temperatura y materia orgánica. El diseño consta con 18 tratamientos (3x3x2) por triplicado (x3), siendo el factor A el tipo de suelo: S1 = Arcilloso, S2 = arcilloso-limoso y S3 = migajón-arenoso; el factor B el contenido de enmienda orgánica (EO): sin vermicomposta (SV) con vermicomposta orgánica (VO) y con sustancias húmicas comerciales (SHC); el factor C la carga microbiana: con microorganismos (CM) y sin microorganismos (SM).

Para la vermicomposta (VO) se empleó la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en diferentes sustratos por separado, como la cascarilla de arroz, bagazo de caña, cascarilla de cacao, estiércol de res y una mezcla de todas. Para la enmienda orgánica (EO) se realizó en tres niveles; el primer nivel no contiene EO, solo se agregó H₂O₂ y se mezcló con el suelo y el petróleo. En el segundo nivel se agregó VO. En el tercer nivel solo se usó SHC.

Para la evaluación de degradación de HTP se empleó una cinética de degradación con respecto al tiempo de duración del experimento que fueron a los 15, 30, 45 y 60 días. Los resultados demostraron que para el factor suelo el S2 (arcilloso-limoso) fue el más eficiente, con un valor de $36,106.4 \pm 15,336$ mg/kg $>S3>S1$. Para el factor de EO, la VO fue la mejor con un valor de $34,461 \pm 14,708$ mg/kg y para el factor de microorganismos, CM fue la que presentó más degradación con un valor de $29,694 \pm 13,947$ mg/kg a comparación de la que no tenía microorganismos con un valor de $44,919 \pm 44,937$ mg/kg.

Profundizando más en las interacciones entre factores el suelo S2 y la VO fue la mejor combinación para degradar los HTP con un valor de 32,457 mg/kg (Figura 1b). En la interacción EO-microorganismos, se observó que los microorganismos favorecen la VO para degradar HTP. En la interacción Suelo-microorganismos, se observó que el S2 se vio favorecido por la presencia de microorganismos para degradar HTP con un valor de 26,430.5 mg/kg. Por último, se muestra la cinética de degradación de HTP (Figura 2c), se observa que la VO a los 60 días fue el tratamiento con mayor degradación con un valor de 27,656 mg/kg.

Se concluye que el tipo de suelo, así como la presencia de microorganismos y el uso de enmienda orgánica como la vermicomposta pueden influir en la degradación de HTP y para poder lograr una biorremediación efectiva depende en gran medida de la biodisponibilidad de los nutrientes. La combinación de estos factores demostró que el vermicompostaje es viable para degradar compuestos orgánicos.

3.2.2 Técnicas de remediación Química

3.2.2.1 Remediación con haz de electrones de suelos impactados con hidrocarburos pesados

El estudio fue realizado por Lassalle et al. (2023) [22] en Dublín, California. El objetivo de esta investigación es una demostración de prueba de concepto de la remediación con haz de electrones de suelos impactados con hidrocarburos de petróleo, que se basa en trabajos previos de investigadores.

Se obtuvieron muestras de suelo de diferentes fuentes con sus respectivos tratamientos. La primera se obtuvo suelo de campo; se obtuvieron tres suelos que fueron GSC1AOS, GSI14RD y lodo BT. GSC1AOS y GSI14RD eran suelos arcillosos y muy meteorizados, impactados con petróleo crudo, en cambio lodo BT, era un lodo de estanque de oleaje húmedo, muy impactado. La segunda se obtuvieron dos suelos de referencia que fueron Benchmark 1 (BM1) y Benchmark 2 (BM2). BM1 y BM2 constan de una matriz de arena, limo y arcilla. BM1 es una mezcla de muestras obtenidas de un campo petrolífero fuera de servicio. A las muestras de suelo obtenidas en campo y las de referencia fueron sometidas al haz de electrones, las unidades se miden en kGy (kilogray). las muestras se almacenaron en un tubo de aluminio montado debajo de la viga y conectado a un tubo de lastre para adaptarse a los aumentos de presión debido a la generación de vapor de agua e hidrocarburos. Para la determinación de HTP se empleó cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) siguiendo los métodos 8015B y 8015C de la EPA SW-846.

Los resultados reportaron (Tabla 8) que los tratamientos GSC1AOS, BM1 y BM2 obtuvieron reducciones significativas de TPH $>75\%$. Para el tratamiento GSC1AOS se observa una reducción del 9.1% a 0.15% con una reducción final de HTP del 98.35%. Para GSI14RD obtuvo una reducción del 58.62%. Para BM1 obtuvo una reducción 1.6% a 0.17% con una reducción de HTP del 89.38%. Para BM2 una reducción de HTP de 76.19%. Por último, para Lodo BT se tuvo que aplicar una dosis más elevada para disminuir los HTP y se logró una disminución del 31.9% al 8% con una reducción de HTP del 74.92%.

Tabla 8. Resumen de suelos tratados con EBeam obtenidos en campo y de referencia. Valores de TPH medidos por GC-FID

Tratamientos	Dosis (kGy)	TPH (% base seca)	Reducción de HTP
GSC1AOS	0	9.1	-
	720	2.3	74.73%
	1000	2.1	76.92%
	1100	0.15	98.35%
GSI14RD	0	2.9	-
	720	1.2	58.62%
BM1	0	1.6	-
	480	1.2	25.00%
	720	1.4	12.50%
	960	0.17	89.38%
BM2	0	2.1	-
	820	0.5	76.19%
Lodo BT	0	31.9	-
	1100	28	12.23%
	820	8	74.92%

Con estos resultados se concluye que a irradiación con haz de electrones fue efectiva para remediar suelos contaminados petróleo. Se demostraron reducciones en TPH por debajo de los niveles objetivo de 1% en peso en una variedad de muestras de suelo obtenidas en el campo y sintetizadas en laboratorio. Las reducciones en el contenido de hidrocarburos se producen a través del craqueo y la volatilización, que resulta ser similar a una desorción térmica y pirólisis relativamente rápida. Esta técnica puede ser viable para ser implementada en el estado de Tabasco, ya que se cuenta con los mismos tipos de suelo, además la técnica no genera emisiones, ya que el proceso se alimenta eléctricamente. Sin embargo, la implementación del proceso para el tratamiento práctico requerirá la adaptación de tecnologías para una remediación segura, rentable y eficiente.

3.2.2.2 Una posible remediación de hidrocarburos totales de petróleo de suelos contaminados utilizando nanotubos de carbono multipared suspendidos en surfactante

El trabajo fue realizado por Moses et al. (2023) [23] en la ciudad de Warri del estado de Delta, Nigeria. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de degradación de HTP empleando nanotubos de carbono. Los nanotubos de carbono (CNT) empleados, son materiales a nano escala unidimensionales hechos de carbono y pueden clasificarse en términos generales como nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) y nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) con estructuras superficiales que pueden modificarse para brindar buenas características de adsorción.

Para el diseño experimental, se muestreo suelo contaminado por un derrame de petróleo crudo, para luego ser secado, molido y tamizado; luego se le determinó capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica y el contenido de nitrógeno y fósforo. Los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) se sintetizaron mediante deposición química de vapor (CVD), las nanopartículas de óxido de hierro (IONP) se sintetizaron mediante la química verde empleando *Telfairia occidentalis* como precursor en un procedimiento similar al método empleado por (Silveira et al. 2018) donde los autores utilizaron $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ y $(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$.

Se establecieron tres tratamientos que fueron los siguientes: (1) = MWCNT + surfactante, (2) = nanotubo de carbono + IONP, (3) = nanocompuesto polimérico (NCP) (Polietilenglicol + MWCNT + IONP), para

diferentes tiempos (30, 60, 90 120, 150 y 180 min). Una vez preparados las 3 soluciones diferentes, en un matraz Erlenmeyer de 250 se mezcló 5 g de suelo contaminado con 10 ml de la solución acuosa por separado. Para el análisis de HTP, se utilizó un espectrofotómetro UV/VIS para medir la concentración del sobrenadante y la cantidad de TPH absorbida.

Los resultados demostraron que los tres tratamientos tuvieron una reacción espontánea al inicio, debido a los sitios de absorción fácilmente disponibles. El tratamiento 1 solo con MWCNT obtuvo la tasa de eliminación más alta del 90% a los 90 min, seguido de MWCNT + IONP una tasa del 85.78% a los 150 min, y PNC una tasa del 79.20% a los 30 min. Posiblemente, la diferencia en las tasas de eliminación de HTP entre los tratamientos se debe al hecho de que el tratamiento PNC tiene más grupos funcionales que los otros dos tratamientos. A los 180 min los 3 absorbentes alcanzaron el equilibrio con el siguiente porcentaje de eliminación PNC (75.60%) > MWCNTs + IONP (75.53%) > MWCNTs (75.53%).

Se concluye que la investigación demostró que el uso de la ultrasonificación aplicada a los tres tratamientos produce suspensiones absorbentes para producir altas tasas de eliminación de HTP del suelo, donde los resultados demostraron que a los 90 min o menos, a diferencia de las técnicas de biorremediación que puede tardar meses. Por otra parte, se recomienda estudios que impliquen la germinación de plantas para comprobar su restauración y reducción de la toxicidad.

3.2.3 Técnicas de remediación mixta

3.2.3.1 Potencial de bioestimulación del biocarbón para la remediación del suelo contaminado con petróleo crudo y el crecimiento de las plantas.

El trabajo fue realizado por Saeed et al. (2021) [24] en Florida, EEUU. El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial del biochar como una herramienta bioestimulante para degradar hidrocarburos para la remediación de suelos contaminados con petróleo.

Para el diseño experimental, se llevó a cabo en macetas de barro con capacidad de 10 Kg de suelo y se establecieron los siguientes tratamientos: (1) To = Control sin aceite y biochar, (2) T1 = 10% de suelo contaminado con petróleo crudo, (3) T2 = 15% de suelo contaminado con petróleo crudo, (4) T3 = Suelo con 1% de biochar, (5) T4 = biochar + 10% de suelo contaminado con petróleo crudo y, (6) T5 = biochar + 15% de suelo contaminado con petróleo crudo. En cada maceta se dejaron germinar tres semillas y se esperó su germinación, durante toda la experimentación las macetas fueron regadas debidamente. Se obtuvieron muestras de plantas y suelo.

El biochar, se obtuvo el pino australiano de granjas locales, donde fue sometida a una pirolisis de 350 °C, luego fue molida a un tamaño de 2mm y se le realizó análisis elemental por espectrofotómetro de absorción atómica y se midió el pH. Para el suelo, se le determinó el pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y contenido de humedad. Para la determinación de HTP se determinó por gravimetría por ultrasonificación, luego por extracción Soxhlet y se cuantificó la concentración cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Las plantas fueron extraídas completamente, se lavaron con agua destilada, luego se secaron a 65 °C por 72 h y se midió la biomasa en base seca.

Los resultados de la degradación de HTP reportaron que hubo una disminución significativa en los suelos tratados con biochar ($p=0.05$) después de 40 días a comparación de los días iniciales. Los suelos tratados con biochar obtuvo porcentajes de degradación del 34.2% y 23.6% para el tratamiento T4 y T5, respectivamente.

Por lo tanto, se demuestra el efecto bioestimulante del biochar para remediar suelos contaminados con hidrocarburos. Se observó mejoría en las actividades microbianas y enzimáticas del suelo para degradar los

HTP, así como también la mejoría de los parámetros morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de la planta. Se determinó que esta técnica puede ser empleada para tratar contaminaciones de gran escala.

3.2.3.2 Aplicación de un consorcio microbiano inmovilizado sobre biochar en la recuperación de un suelo contaminado con hidrocarburo

Esta investigación fue realizado por Curiel-Alegre et al. (2022) [25]. El objetivo fue probar la efectividad de dos adiciones de biocarbón y el uso de ramnolípidos para aumentar la degradación de hidrocarburos recalcitrantes presentes en un suelo contaminado con petróleo.

Para el diseño experimental, se colectó suelo contaminado con hidrocarburos de fracción pesada y de metales traza, provenientes de un parque de maquinaria; se le determinó textura, densidad aparente, capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, pérdida de ignición, carbono orgánico, nitrógeno total y contenido de cal. También se le determinó metales traza e hidrocarburos totales de petróleo.

Por otra parte, se produjeron dos biocarbones a partir de huesos de albaricoque, uno a 450 °C (BH1) y otro a 650 °C (BH2). Se obtuvieron ramnolípidos (RML) comerciales para aumentar la movilidad de los hidrocarburos. Del suelo contaminado se aisló un consorcio microbiano (mBHB) y se inmovilizó en ambos biocarbones y en RML y se mezcló con el suelo.

Se diseñaron ocho tratamientos de incubación en microcosmos de suelo de 200 g (Tabla 9) para una incubación de 90 días a 22 °C, controlando la aireación y la humedad. Los microcosmos fueron muestreados destructivamente a los 2, 15, 30, 45, 60 y 90 días.

Tabla 9. Diseño experimental de los tratamientos

Muestras	Tratamiento
4CT	Suelo + Agua
BH1	Suelo + BH1 + Agua
BH2	Suelo + BH2 + Agua
RML	Suelo + Ramnolípidos + agua
BA4CT	Suelo + Consorcio + mBHB
BABH1	Suelo + Consorcio inmovilizado – BH1+ mBHB
BABH2	Suelo + Consorcio inmovilizado – BH2 + mBHB
BARML	Suelo + Consorcio + RML + mBHB

De acuerdo con los resultados se encontró que la caracterización de los HTP el 82% correspondían a hidrocarburos de cadena larga con peso molecular de C22 – 35. El análisis de degradación de los HTP se consideró al termino de los 90 días. Los tratamientos 4CT y RML, no presentaron degradación. En cambio, para el tratamiento con BH1 y BH2 presentaron degradación del alrededor del 10%, esta degradación fue baja debido a su naturaleza recalcitrante. Por otra parte, los tratamientos en los que se empleó la bioaugmentación mostraron degradaciones más altas, para BA4CT fue del 23 % y para los tratamientos BABH1, BABH2 y BARML fueron cercanos al 30%.

Con estos resultados se concluye que las bajas degradaciones se debían a que el suelo ya se encontraba intemperizado, así como la baja disponibilidad de nutrientes en el suelo, además de la baja biodisponibilidad de estos compuestos a los microorganismos se vio afectada ya que se trataba de un suelo envejecido. Sin embargo, se demostró que la adición de un consorcio microbiano puede degradar hidrocarburos de fracción pesada, aunque también se sugiere que se debe hacer el uso de surfactantes para mejorar la solubilidad de este tipo de hidrocarburos.

3.3 Análisis de artículos científicos y factibilidad de aplicación en suelos de Tabasco

En la Tabla 10 se muestra el análisis comparativo de las técnicas de remediación, identificando la factibilidad de cada una para su aplicación en suelo tabasqueño.

Tabla 10. Análisis comparativo de las técnicas de remediación

No. de Artículo	Autor	Uso de equipo sofisticado	Tiempo de remediación	Capacidad de remediación de grandes extensiones	Reducción de la concentración	Cumplimiento de Normatividad
1	Marques-Benavides et al. (2020) [16]	No requiere	33 días	Extensiones grandes	De 35,000 a 1152 mg/kg	Cumple especificaciones
2	Pérez-Hernández et al. (2020) [17]	No requiere	70 días	Extensiones grandes	92% de remoción	Cumple especificaciones
3	Rico-Cerda et al. 2020 [18]	No requiere	120 días	Extensiones grandes	100,000 a 3400 mg/kg	Cumple especificaciones
4	Ugaz-Hoyos et al. (2020) [19]	Si requiere	72 h	No cumple	No lo menciona	No cumple especificaciones
5	Cruz-Colín et al. (2021) [20]	No requiere	30 días	Extensiones grandes	24.8% de remoción	No Cumple especificaciones
6	Ojeda-Morales et al. (2023) [21]	No requiere	60 días	No cumple	50,000 a 27,000 mg/kg	No cumple especificaciones
7	Lassalle et al. (2023) [22]	Si requiere	De 30 min a 1 h	No cumple	De 91,000 a 1501 mg/kg (98.35% remoción)	Cumple especificaciones
8	Moses et al. (2023) [23]	Si requiere	Hasta 5 meses	No cumple	90% de remoción	Cumple especificaciones
9	Saeed et al. (2021) [24]	Si requiere	40 días	No cumple	34% de remoción	No cumple especificaciones
10	Curiel-Alegre et al. (2022) [25]	Si requiere	90 días	No cumple	4,272 a 3000 mg/kg	Cumple especificaciones

Palma-Vazquez et al. (2017) [29] mencionan que los suelos predominantes en el estado de Tabasco son los Gleysols, Histosols, Fluvisols, Acrisols, Vertisols, Leptosoles, Alisols, Luvisols, Cambisols, Arenosols, Lixisols y Solonchaks. Por lo que hay una variedad de suelos que van desde los arcillosos, arenosos, anegados y de costa. En toda la entidad tabasqueña puede existir por lo menos un caso de contaminación en esos grupos mayores de suelos.

La contaminación de hidrocarburos en Tabasco es muy recurrente por su alta actividad petrolera [30] y el impacto ocasionado es muy significativo, por lo que debe ser considerado el tipo de textura (arcilla, limos, arenas o materia orgánica), siendo los suelos en los que predomine la arena los más vulnerables, ya que el

hidrocarburo recubre las partículas de arena e impide el intercambio catiónico (Solís-García, 2024) [31]. En este caso los artículos 1- 4, 6, 7 y 10 (Tabla 10) si mencionan que tipo de textura contiene su suelo.

También es importante conocer qué tipo de hidrocarburo se encuentra presente en la matriz de suelo por lo que se debe conocer qué tipo de fracción es el hidrocarburo, ya sea: ligera, mediana o pesada, siendo los de fracción ligera y mediana los menos problemáticos para biodegradar, en cambio la fracción pesada tiene una persistencia muy alta [31].

En la Tabla 10, se observa que la duración de las experimentaciones puede variar desde días hasta meses, hay ocasiones en la que puede tomar incluso años, pero muchas veces esto depende de los alcances y limitaciones de la investigación. También se observa que el uso de equipos sofisticados está más presente en las técnicas químicas y algunas biológicas (Artículo 4, 7-10), aunque el uso de estos equipos tiene mucho que ver con los criterios del investigador, ya que también existen métodos tradicionales que pueden ofrecer los mismos resultados con menor presupuesto. además, se consideró si las técnicas pueden aplicarse a grandes extensiones de contaminación de un sitio, las técnicas químicas de los artículos 7-10 (Tabla 10) no aplicaban, ya que se requiere la preparación de soluciones químicas que por lo general suele ser costosas y solo son aplicables a pequeñas cantidades de suelo en gramos.

Es importante destacar los sesgos que representa cada artículo, muchas veces no representan las concentraciones del contaminante de interés, en este caso los autores los omiten reportando las variables de interés, por lo que puede ser complicado una comparación de resultados, aunque se pueden considerar como antecedentes. Es importante destacar que las investigaciones que obtuvieron altas porcentajes de degradación de hidrocarburos son las que más deberían ser consideradas ya que esas pueden ser replicadas u optimizadas, para su aplicación en la remediación de suelos.

Debido a que en Tabasco las áreas de contaminación suelen ser muy grandes se considera que las técnicas biológicas son las más adecuadas (Tabla 10) (Artículo 1-6), ya que se pueden aplicar tanto en suelos contaminados con hidrocarburos de fracción ligera, mediana y pesada, esto se debe a su mayor alcance, teniendo repuestas favorables en un periodo no mayor a 120 días, sin la necesidad de usar herramientas o equipos sofisticados los cuales pueden generar un gasto económico excesivo, cumpliendo con los parámetros de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-201, además de no generar metabolitos que sean tóxicos para el medio ambiente así como también favoreciendo el crecimiento de bacterias, hongos y plantas [19], [31].

4. Conclusiones

En conclusión, las metodologías analizadas para la remediación de suelos impactados por derrames de hidrocarburos destacan la complejidad y los múltiples factores que deben considerarse para su implementación. Aspectos como los costos económicos, los requisitos energéticos, la disponibilidad de nutrientes y contaminantes, las características del suelo y del contaminante, así como los subproductos generados, juegan un papel crucial en la selección de la técnica más adecuada. Si bien las técnicas de remediación in situ suelen ser más eficientes en términos de costo-beneficio al evitar gastos asociados con excavación y transporte, la elección final debe basarse en un análisis integral que garantice la efectividad del proceso y la sostenibilidad ambiental.

Para la selección de alguna de las técnicas se deberán de considerar diferentes variables que pueden ser incluso limitativas, por ejemplo, los costos económicos, los equipos empleados, el tiempo de remediación, conocer si la técnica está disponible en el mercado ya que implicara la importación de esta o si ha sido probado en gran escala.

Las técnicas de remediación física no son recomendables para suelos agrícolas, ya que pueden ser destructivas y económicamente exigentes por la mano de obra y de los materiales empleados. Sin embargo, esta técnica es efectiva ya que requiere un tiempo mínimo de aplicación. Entre las físicas, la térmica generalmente no se aplica en suelos agrícolas ya que es destructiva. Las técnicas de remediación químicas son eficientes por su rapidez y sobre todo porque se puede emplear en cualquier compartimento ambiental, sin embargo, la generación de subproductos no la hace amigable para el medio ambiente. Las técnicas de remediación biológica es una técnica totalmente amigable con el medio ambiente y sobre todo rentable en cuestiones de costos-beneficio, ya que no requiere mucha mano de obra y de personal en el monitoreo. Una de las desventajas es el largo periodo de implementación, sin embargo, son las más viables para aplicarse en el estado de Tabasco, ya que la mayoría de los impactos ambientales son a gran escala y se cuenta con una variedad de recursos biológicos para ser aprovechados en un sistema de biorremediación. Por último, se debe investigar sobre las estrategias que involucre la combinación de diferentes tratamientos de remediación de suelos contaminado por HTP, cuyo enfoque sinérgico pueda resultar en el mejoramiento del rendimiento y en mayores eficiencias de remoción de contaminantes y que sobre todo sea amigable con el medio ambiente.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaria de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de manutención del primer autor en el programa de Doctorado en Ciencias en Química Aplicada de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Así como también se agradece a la red de Investigación Multidisciplinar en Materia Ambiental desde la Perspectiva de la Química Aplicada por proporcionar las herramientas necesarias para esta investigación.

6. Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

7. Declaratoria del uso de Inteligencia Artificial

Los autores declaran que no han utilizado ninguna aplicación, software, páginas web de inteligencia artificial generativa en la redacción del manuscrito, en el diseño de tablas y figuras, ni en el análisis e interpretación de los datos.

8. Referencias

- [1] J. J. dos Santos and L. T. Maranhão, "Rhizospheric microorganisms as a solution for the recovery of soils contaminated by petroleum: A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 210, pp. 104–113, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.01.015.
- [2] I. Hussain *et al.*, "Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Improvement opportunities and field applications," *Environmental and Experimental Botany*, vol. 147, pp. 202–219, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.12.016.
- [3] H. Singh, N. Bhardwaj, S. K. Arya, and M. Khatri, "Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials," *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, vol. 14, p. 100305, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.enmm.2020.100305.

- [4] D. Moscoso-Baeza and A. M. de Escobar-Fernández, “Impacto Económico de la Refinería Olmeca en el municipio de Paraíso, Tabasco,” *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 34, no. S5, Art. no. S5, Dec. 2022, doi: 10.33975/riuq.vol34nS5.1086.
- [5] A. Trujillo-Narcía, M. del C. Rivera-Cruz, L. del C. Lagunes-Espinoza, D. J. Palma-López, S. Soto-Sánchez, and G. Ramírez-Valverde, “Efecto De La Restauración De Un Fluvisol Contaminado Con Petróleo Crudo,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 28, no. 4, pp. 361–374, 2012.
- [6] K. Kumar-Yadav, K. Singh, A. Singh, and D. Kumar, “The Ecological Impact of Oil Spills on Soil Health,” *Vigyan Varta*, no. SP3, pp. 93–96, Aug. 2023.
- [7] M. C. Lin et al., “Adverse pregnancy outcome in a petrochemical polluted area in Taiwan,” *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, vol. 63, no. 8, pp. 565–574, Aug. 2001, doi: 10.1080/152873901316857743.
- [8] C.-Y. Yang, C.-C. Chang, H.-Y. Chuang, C.-K. Ho, T.-N. Wu, and P.-Y. Chang, “Increased risk of preterm delivery among people living near the three oil refineries in Taiwan,” *Environment International*, vol. 30, no. 3, pp. 337–342, May 2004, doi: 10.1016/S0160-4120(03)00180-6.
- [9] C. Paz-y-Mino et al., “Impacto genético en comunidades Amazónicas del Ecuador localizadas en zonas petroleras,” *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, vol. 1, pp. 7–19, Aug. 2010, doi: 10.26807/remcb.v3i1-2.39.
- [10] C. M. Morales-Bautista, C. E. Lobato-García, J. Flores-Jiménez, and C. Méndez-Olán, “Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos,” *Acta Universitaria*, vol. 29, pp. 1–14, Nov. 2019, doi: 10.15174/au.2019.2154.
- [11] T. Volke and A. Velasco, *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México: Instituto Nacional de Ecología, 2002.
- [12] S. J. Varjani, “Microbial degradation of petroleum hydrocarbons,” *Bioresource Technology*, vol. 223, pp. 277–286, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.037.
- [13] A. A. Ahmad et al., “Remediation Methods of Crude Oil Contaminated Soil,” *World Journal of Agriculture and Soil Science*, vol. 4, no. 3, pp. 1–8, Mar. 2020.
- [14] H. Dağhan and M. Öztürk, “Chapter 10 - Soil Pollution in Turkey and Remediation Methods,” in *Soil Remediation and Plants*, K. R. Hakeem, M. Sabir, M. Öztürk, and A. R. Mermut, Eds., San Diego: Academic Press, 2015, pp. 287–312. doi: 10.1016/B978-0-12-799937-1.00010-3.
- [15] J. G. Chan-Quijano, A. Sanchez, S. Ochoa-Gaona, P. Martínez-Zurimendi, L. N. López Jiménez, and A. Vázquez, “Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos,” *Teoría y Praxis*, vol. 17, pp. 123–144, Jun. 2015, doi: 10.22403/UQROOMX/TYP17/05.
- [16] L. Marques-Benavides, D. Modesto-Sánchez, B. C. Saucedo-Martínez, J. L. Rico-Cerda, L. Bribiesca-Rodríguez, and J. M. Sánchez-Yáñez, “Phaseolus vulgaris en el tratamiento de suelo un agrícola contaminado por hidrocarburos,” *Journal of the Selva Andina Research Society*, vol. 11, no. 2, pp. 94–102, 2020.
- [17] V. Pérez-Hernández, L. M. C. Ventura-Canseco, F. A. Gutierrez-Miceli, I. Pérez-Hernández, M. Hernández-Guzmán, and S. Enciso-Saenz, “The potential of Mimosa pigra to restore contaminated soil with anthracene and phenanthrene,” *Revista Terra Latinoamericana*, vol. 38, no. 4, Art. no. 4, Oct. 2020, doi: 10.28940/terra.v38i4.603.
- [18] J. L. Rico-Cerda, J. L. Ignacio-De la Cruz, P. G. Mondragón-Reynel, and J. M. Sánchez-Yáñez, “Recuperación de un suelo contaminado por una mezcla de hidrocarburos,” *Journal of the Selva Andina Research Society*, vol. 11, no. 2, pp. 75–83, 2020.
- [19] J. Ugaz-Hoyos, H. Vega-Cruz, S. Iglesias-Osores, and C. Carreño-Farfan, “Biosurfactantes en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos,” May 29, 2020, *SciELO Preprints*. doi: 10.1590/SciELOPreprints.642.
- [20] M. del R. Cruz-Colín, J. M. Mora-Rodríguez, M. Ávila-Jiménez, M. T. Castañeda-Briones, M. Espinoza-Castañeda, and M. Chávez-Martínez, “Vermicomposteo de un suelo contaminado con petróleo,” *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, vol. 7, no. 7, pp. 552–556, 2021.
- [21] M. E. Ojeda-Morales, Y. Córdova-Bautista, J. G. Álvarez-Ramírez, J. de los S. López-Lázaro, G. Martínez-Pereyra, and C. M. Morales-Bautista, “Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

empleando sustancias húmicas de vermicomposta,” *Revista Terra Latinoamericana*, vol. 41, Jul. 2023, doi: 10.28940/terra.v41i0.1656.

[22] J. Lassalle *et al.*, “Electron beam remediation of soils impacted with heavy hydrocarbons,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 11, p. 100335, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.hazadv.2023.100335.

[23] H. Moses, J. O. Odigure, A. J. Otaru, and C. F. Oduoza, “A potential remediation of total petroleum hydrocarbon from contaminated soils using surfactant suspended multiwall carbon nanotubes,” *Results in Engineering*, vol. 19, p. 101371, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101371.

[24] M. Saeed *et al.*, “Biostimulation potential of biochar for remediating the crude oil contaminated soil and plant growth,” *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 28, no. 5, pp. 2667–2676, May 2021, doi: 10.1016/j.sjbs.2021.03.044.

[25] S. C. Curiel-Alegre *et al.*, “Aplicación de un consorcio microbiano inmovilizado sobre biochar en la recuperación de un suelo contaminado con hidrocarburos,” *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 45, no. 4, Art. no. 4, 2022, doi: 10.19084/rca.28440.

[26] E. A. Pilon-Smits and J. L. Freeman, “Environmental cleanup using plants: biotechnological advances and ecological considerations,” *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 4, no. 4, pp. 203–210, 2006, doi: 10.1890/1540-9295(2006)004[0203: ECUPBA]2.0.CO;2.

[27] M. D. Guevara-Espinosa, N. Cruz-Miranda, M. C. Rivera-Morales, and K. Fuentes-Ortiz, “Phytoremediation of soils contaminated with Mn and Cu from *Ocimum basilicum*,” *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, vol. 9, no. 22, pp. 76–89, Nov. 2018.

[28] H. Contreras and C. Carreño, “Eficiencia de la biodegradación de hidrocarburos de petróleo por hongos filamentosos aislados de suelo contaminado,” *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, vol. 1, no. 1, Art. no. 1, Apr. 2018, doi: 10.25127/ucni.v1i1.269.

[29] D. J. Palma-López, J. Cisneros Dominguez, E. Moreno Caliz, and J. A. Rincon Ramirez, (PDF) *Suelos de Tabasco: Su Uso y Manejo Sustentable*, 1st ed. Villahermosa, Tabasco: Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, 2007. Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/293958380_Suelos_de_Tabasco_Su_Uso_y_Manejo_Sustentable

[30] J. L. Capdepon Ballina and P. Marín Olán, “La economía de Tabasco y su impacto en el crecimiento urbano de la ciudad de Villahermosa (1960-2010),” *LiminaR*, vol. 12, no. 1, pp. 144–160, Jan. 2014, doi: 10.29043/liminar.v12i1.330.

[31] J. A. Solís García, “Buenas prácticas de remediación y restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola,” Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, 2024. Accessed: Mar. 30, 2024. [Online]. Available: <https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/4468>

Análisis geoquímico de acumulación de hidrocarburos en suelos de Tucta, Nacajuca

Méndez-Madrigal, J. M.¹ , Morales-Bautista, C. M.¹ , Chávez-Hernández, G.^{1*} , Falconi-Calderón, R.¹ , Torres-Sánchez, S. A.² 

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), División Académica de Ciencias Básicas (DACB), Km. 1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, A.P. 24, Cunduacán, C.P. 86690, Tabasco, México.

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Facultad de ingeniería/Área de ciencias de la Tierra. Av. Dr. Manuel Nava, Zona Universitaria, CP 78290, San Luis Potosí, S.L.P. México.

*guillermo.chavez@ujat.mx

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo determinar y evaluar la presencia de hidrocarburos con técnicas geoquímicas en suelo de un predio situado en Tabasco. Se determinaron sus propiedades edafológicas, morfológicas y mineralógicas (Fertilidad, petrografía y difracción de rayos X o DRX), así como hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y análisis de fracciones de hidrocarburos (SARA), según la normativa mexicana. En los resultados, se encontró que el suelo analizado es un Gleysol que presenta hidrocarburos totales de petróleo (HTP) que exceden los límites permisibles debido al constante arrastre de sedimentos contaminados por efecto de erosión hídrica y movimientos-transporte de masa, común en el Estado, dando como resultado: material orgánico, estructuras con alta oxidación por minerales salinos y acumulación de hidrocarburos en su análisis morfológico. Esto provocó aumento del pH (ácido a neutro) y cambios en la textura del suelo en la zona de estudio afectando el desarrollo de las plantas.

Palabras claves: *Morfología, Mineralogía, Impacto ambiental*

Abstract

The objective of this investigation was to determine and evaluate the presence of hydrocarbons with geochemical techniques in the soil of a property located in Tabasco. Its pedological, morphological and mineralogical properties were determined (Fertility, petrography and X-ray diffraction or XRD), as well as total petroleum hydrocarbons (TPH) and analysis of hydrocarbon fractions (SARA), according to Mexican regulations. In the results, it was found that the soil analyzed is a Gleysol that presents total petroleum hydrocarbons (HTP) that exceed the permissible limits due to the constant dragging of contaminated sediments due to the effect of water erosion and mass movements-transport, common in the State. Resulting in: organic material, structures with high oxidation by saline minerals and accumulation of hydrocarbons in its morphological analysis. This caused an increase in pH (acid to neutral) and changes in soil texture in the study area, affecting plant development.

Keywords: *Characterization, Morphology, Mineralogy, Environmental impact*

Recibido: 31 de octubre de 2024, Aceptado: 08 de mayo de 2025, Publicado: 22 de agosto de 2025

1. Introducción

Tucta es un poblado ubicado en el municipio de Nacajuca, Tabasco, México. Cuenta con una población de 2307 habitantes [1]. A través de los años ha sufrido de inundaciones por lluvias y su altura promedio de 10 msnm [2]. Además, forma parte de una zona de campos de pozos petroleros en constante actividad (explosiones, emisiones de gases y derrames de hidrocarburo en suelo y cuerpos de agua [3].

Según la guía comunitaria para la salud ambiental [4], la mayor parte de la gente que vive y trabaja cerca de las perforaciones petroleras y refinerías está familiarizada con la contaminación del aire y el agua por el petróleo, sin embargo dicha contaminación causa problemas graves de salud: visión borrosa y otros problemas en los ojos, dolor de cabeza, alucinaciones, euforia, cansancio, habla arrastrada, daño cerebral y coma, convulsiones y muerte súbita, llagas y hemorragias en la nariz; infecciones del oído, asma, bronquitis, neumonía y otras enfermedades respiratorias, infecciones y cáncer de pulmones y garganta, tuberculosis, ataques al corazón, problemas digestivos (incluidos vómitos, úlceras y cáncer de estómago), daño al hígado, los riñones y la médula ósea, problemas menstruales, abortos espontáneos, partos de niños muertos y defectos de nacimiento, así como sarpullido, micosis y cáncer de piel. [3]

En este sentido, Carmona [3] llevó a cabo un estudio de tipo sanitario y socioeconómico sobre el impacto ambiental por la explosión del pozo Terra 123 en comunidades indígenas de Nacajuca, Tabasco. Señalando que en dichas comunidades surgieron problemas de salud frecuentes entre sus habitantes como lo son vitíligo, problemas de visión, problemas de garganta, tos y gripe, así como dermatitis aguda, dolores de cabeza, mareos y náuseas. Afectando principalmente a niños, adultos mayores y mujeres embarazadas que presentaron nacimientos prematuros.

También los hidrocarburos del petróleo pueden afectar la fertilidad a través de varios mecanismos: toxicidad directa a los organismos en el suelo, reducción en la retención de humedad y/o nutrientes, compactación, así como cambios en pH y salinidad [5]. Aunque los hidrocarburos meteorizados que quedan de derrames antiguos y en sitios remediados son de baja toxicidad o de muy corta duración, pueden afectar al rendimiento de forrajes y cultivos debido a alteraciones que no están relacionadas con la toxicidad [6]. La causa de ello se refiere a alteraciones de las propiedades físicas y químicas del suelo, las cuales pueden ocurrir a concentraciones muy bajas, de 2500-4000mg HTP/kg suelo [7].

El recurso suelo es considerado no renovable a escala humana. Brinda los alimentos necesarios para poder sobrevivir. Los hidrocarburos están formados por elementos químicos tóxicos (benceno, tolueno, xileno, etc.) que, al ser derramados en el suelo originan problemas severos, inhibiendo la vegetación, los nutrientes y sus componentes biológicos como, por ejemplo; bacterias, hongos, algas, fauna, etc.), lo cual limita el acceso a la alimentación de calidad [8].

Es por eso por lo que se desea conocer el impacto de la actividad de los pozos petroleros en la fertilidad del suelo y el desarrollo de la agricultura, en Tucta, ya que su población en general se dedica a actividades agropecuarias para consumo propio, principalmente la siembra y cosecha de maíz, calabaza, chile y árboles frutales, sin embargo, aún no hay estudios previos en la zona. Por esta razón, se llevó a cabo una caracterización del suelo por medio de un análisis geoquímico y métodos directos con la finalidad de determinar hidrocarburos presentes en el suelo, localizar las acumulaciones, así como su origen y evaluar la calidad del suelo. Lo anterior con el fin de establecer una relación entre los factores ambientales de la zona y la migración, distribución y acumulación de (HTP).

2. Metodología Experimental

La metodología es descriptiva y se basó en mapas de elevación digital y ubicación espacial de las muestras; también se tomará en cuenta un análisis estadístico de las características físicas y químicas del suelo, descripción edafológica y composición morfológica y mineralógica.

2.1 Muestreo

La zona de estudio se encuentra ubicada en Tucta, Nacajuca, Tabasco, México. A una distancia de 4.5 km del pozo más cercano y cuenta con un área cercana a los 1000 m². Se llevó a cabo la extracción de 5 muestras de suelo y un perfil mediante un muestreo exploratorio sistemático según las especificaciones de la NMX-AA-132-SCFI- 2016. [9] (Figura 1).

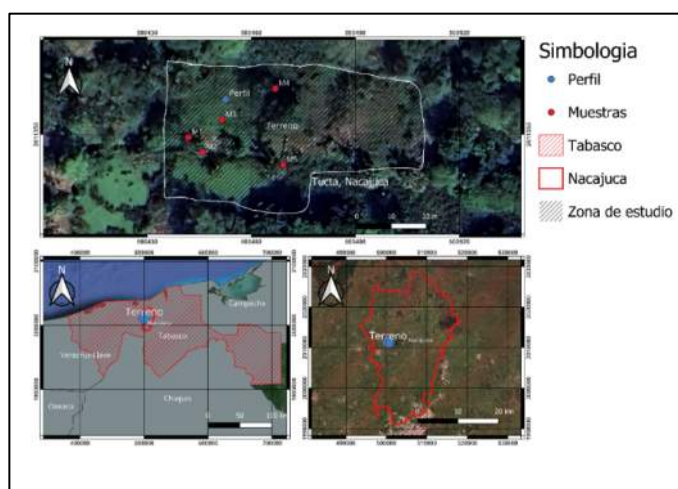


Figura 1. Mapa de ubicación de muestras. (Figura de autoría propia)

2.2 Determinación de propiedades físicas y químicas por medio de la NOM-021-SEMARNAT.2000.

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio para la preparación del suelo mediante los lineamientos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 [10], que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Posteriormente, fueron colocadas al sol para el secado durante 48 horas; transcurrido ese tiempo, se procedió al triturado utilizando un mortero y pistilo. Posteriormente, se pasó la muestra triturada por un tamiz de malla número 10 hasta obtener una cantidad aproximada de 500 g de suelo molido y tamizado por cada muestra.

Para la realización de los análisis se llevaron a cabo los siguientes procedimientos en cada muestra por triplicado: textura (hidrómetro de Bouyoucos), pH (potenciómetro), conductividad eléctrica (conductímetro), materia orgánica (Walkley-Black), densidad real (picnómetro), densidad aparente (probeta) y porosidad (relación entre densidad real y aparente) [11].

2.3 Descripción edafológica.

El perfil de suelo se ubica en las coordenadas UTM datum WGS84: 500452.7 E, 2011360 N, Zona 15, con una profundidad de 51 cm y tres horizontes identificados. Para su descripción se utilizó el manual de evaluación de suelos [12] que toma en cuenta características cualitativas como la presencia de raíces,

materia orgánica, moteas, forma de poros, grado de desarrollo y estructura del suelo y determinación de textura al tacto; también se utilizó el libro Munsell para registrar el color del suelo y de las moteas (Figura 2). De igual forma, se elaboró un mapa con información edafológica del INEGI para determinar el tipo de suelo de la zona de estudio (Figura 3).

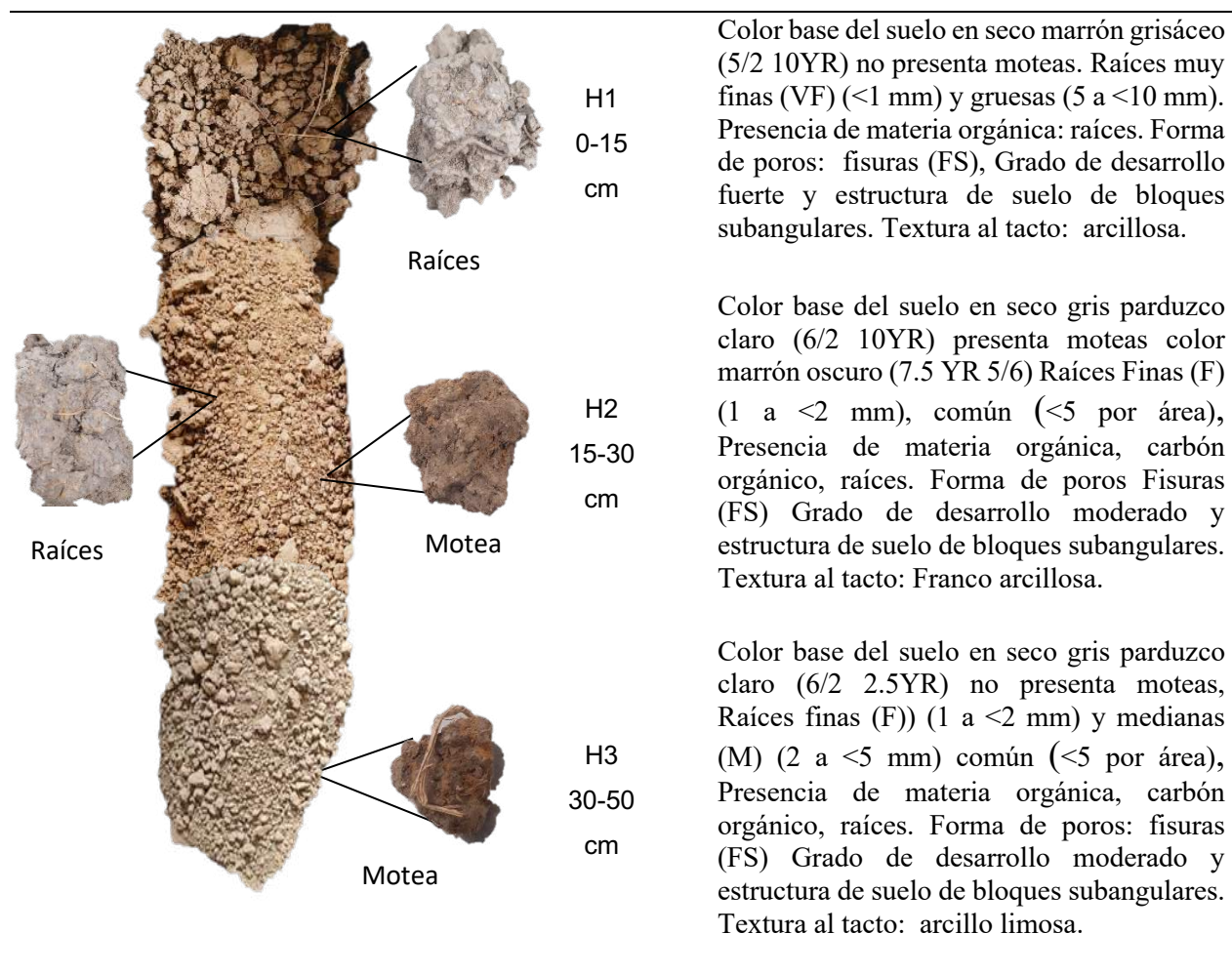


Figura 2. Descripción de perfil edafológico (M6).

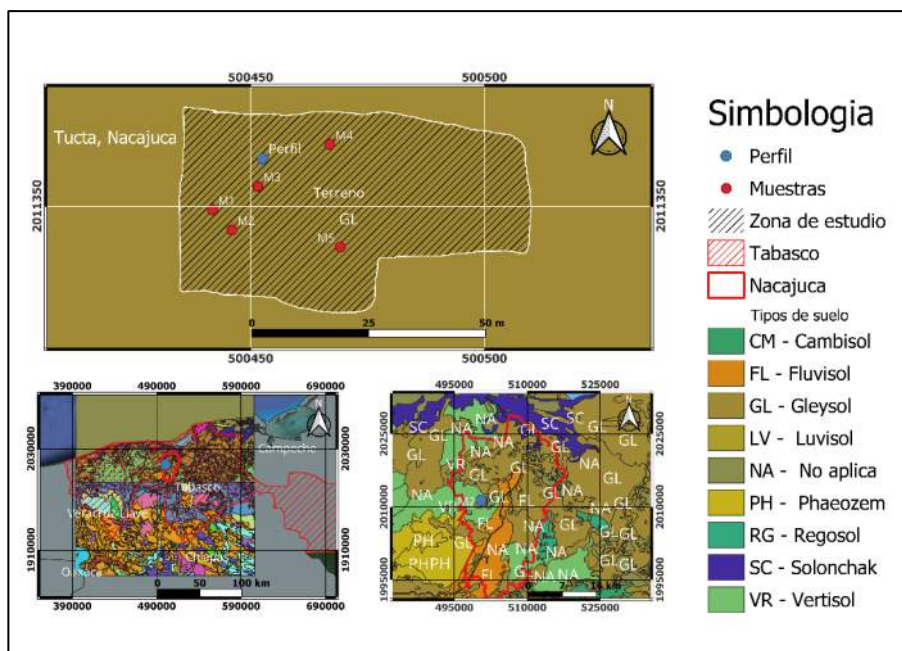


Figura 3. Mapa de edafología. (Figura de autoría propia)

2.4 Mapa de altura

Se elaboró un mapa de altura con curvas de nivel de la zona de interés, incluyendo los pozos cercanos a través de un modelo de elevación digital, con el objetivo de analizar los efectos que produce este factor en la migración y acumulación de hidrocarburos (Figura 4).

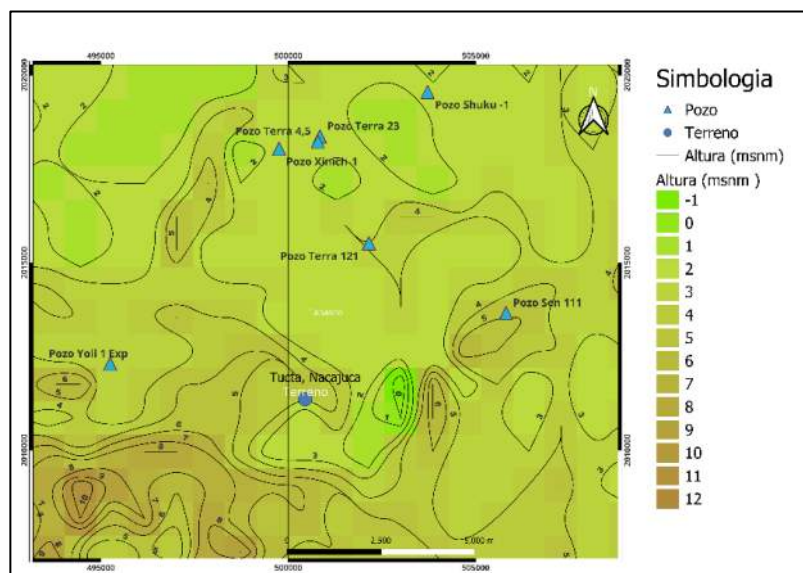
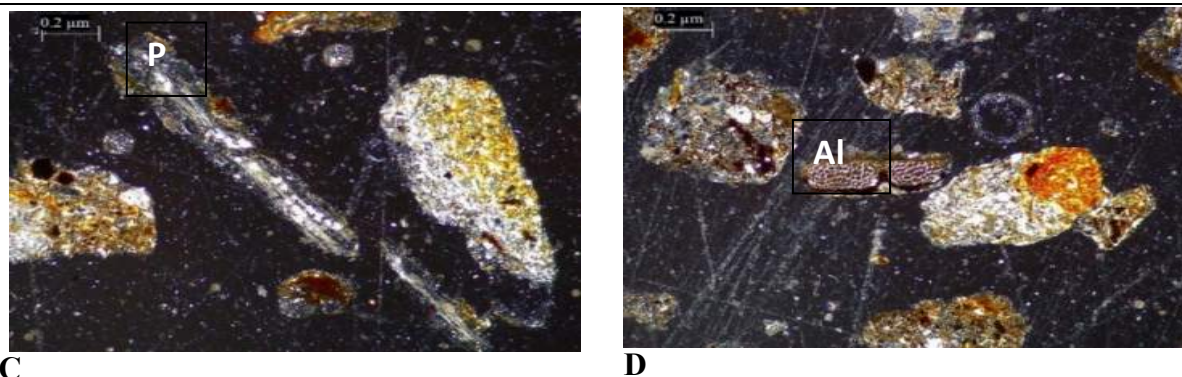


Figura 4. Mapa de alturas de Nacajuca Tabasco. (Figura de autoría propia)

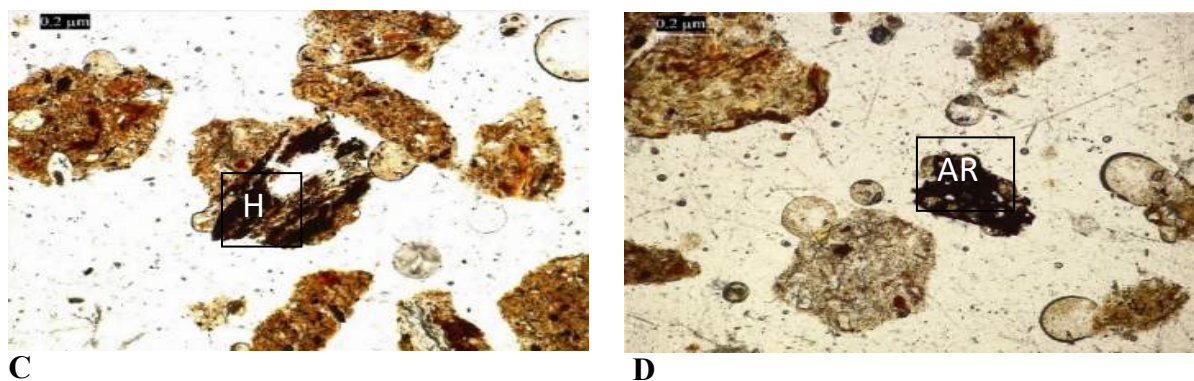
2.5 Análisis de composición mineralógica del suelo por medio de petrografía.

Se llevó a cabo la interpretación de una muestra representativa de suelo en lámina delgada para petrografía por medio del manual para la descripción micromorfológica de suelos [13], con el objetivo de observar los minerales presentes y micro rasgos derivados de la interacción con el hidrocarburo. En el conteo de granos se encontró: Líticos sedimentarios 20, Líticos ígneos 3, Cuarzo 2, Moscovita 1, Biotita 2, Óxidos 6, Cerámica 3, raíces 3, Plagioclasas 7, Hidrocarburo 4. De los cuales se presentan algunos ejemplos en las (Figuras 5 y 6). Se observó una fuerte oxidación y cantidad de material orgánico.



A. Masa basal con distribución de espaciado simple contiene líticos con microestructura de empaquetamiento simple. **B.** Nódulos típicos de hierro anórticos y líticos (N). **C.** Presencia de plagioclasas en forma de nódulos alargados y tabular (P). **D.** Restos de algas y restos orgánicos (Al).

Figura 5. Petrografía de muestra de suelo.



A. Granos sub redondeados con microcomponentes de tonalidad rojiza – café. **B.** Moscovita (M). **C.** Acumulación de hidrocarburos alrededor de los poros (H). **D.** Adherencia de hidrocarburos en material arcilloso (Ar)

Figura 6. Petrografía de muestra de suelo con hidrocarburos.

2.6 Difracción de Rayos X

Se hizo un análisis de difracción de rayos X en dos muestras para su caracterización mineralógica, tomando como criterio de su elección la distancia entre ambos puntos de muestreo presentes en la muestra 1 (M1) y la muestra 4 (M4), con el fin de encontrar diferencias significativas entre ellas. (Figura 7 y 8).

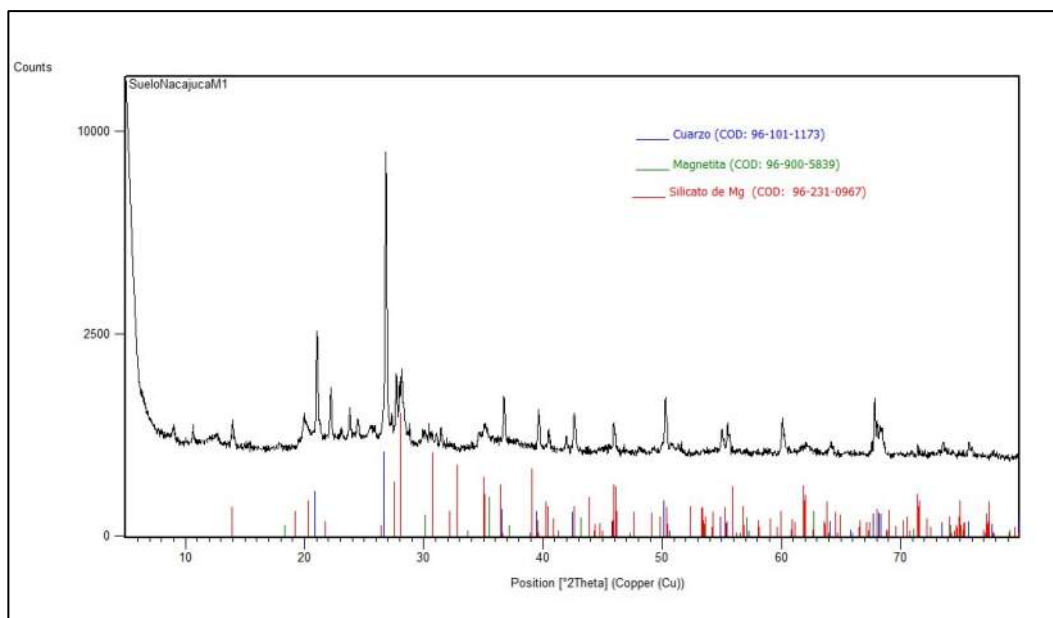


Figura 7. DRX de muestra de suelo (M1).

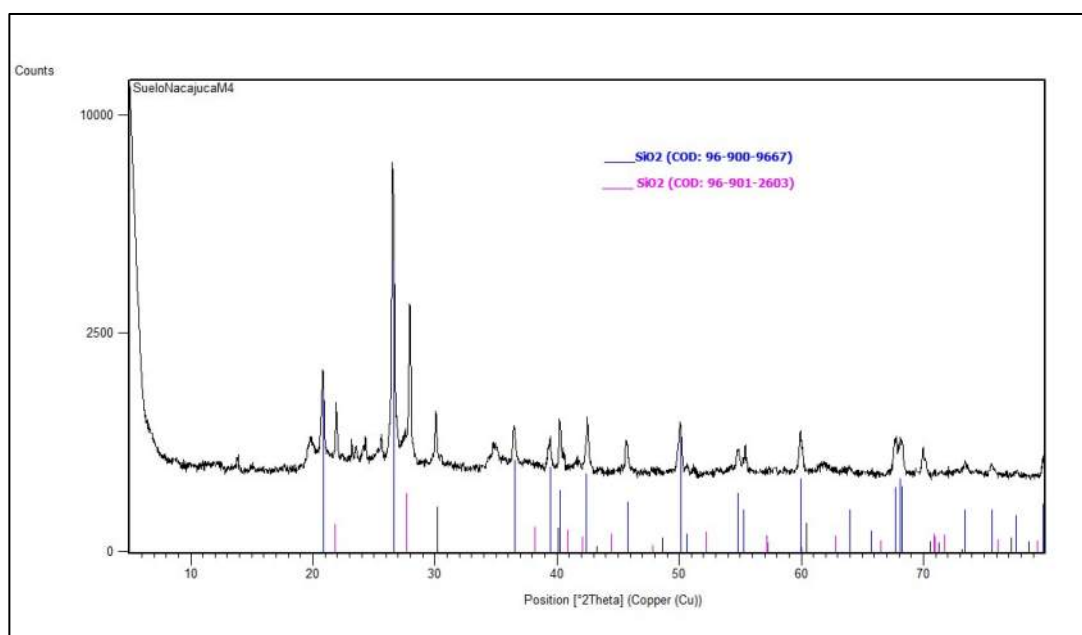


Figura 8. DRX de muestra de suelo (M4).

En los difractogramas se observa que el mineral principal es SiO₂, con dos estructuras moleculares distintas: cuarzo, magnetita y silicato de magnesio. De acuerdo con esto, Acevedo-Sandoval [14] menciona que el material parental, la vegetación, la materia orgánica y el clima son los cuatro factores que influyen sobre la química y la mineralogía de los suelos ácidos, y que las pérdidas y ganancias de óxidos totales manifiestan la intemperización alta a la que estuvieron sujetos estos suelos. El cuarzo es el mineral más común debido a su resistencia en los procesos de meteorización química, y se atribuye a orígenes detríticos resultado de alteraciones físico-mecánicas de las rocas durante el desarrollo de los procesos de transporte y acumulación de residuos meteorizados persistentes en fracciones arcillosas. De igual manera, su porcentaje en mayores cantidades está vinculado con el efecto de gleyzación. Por su parte, el contenido de silicato de magnesio está asociado con sedimentos de llanuras aluviales que retienen con mayor preferencia Mg que

Na y Ca [15]. Por último, la presencia de magnetita que es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso- diférrico, reafirma las observaciones de alta oxidación en las microestructuras del suelo analizado en petrografía.

2.7 Extracción de hidrocarburos con equipo Soxhlet

2.6.1 Diseño compuesto central

Se empleó el método Soxhlet para la extracción de HTP en las muestras de suelo por duplicado durante 8 horas seguidas, utilizando 90 ml de diclorometano (di), hexano (hx) y acetona (Ac) en cada repetición, esto de acuerdo con las especificaciones de la NMX-AA-134-SCFI-2006 suelos-hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría - método de prueba [16], y posteriormente, para la interpretación de los resultados se tomó como referencia la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 [17]. Los datos de la concentración de hidrocarburos se encuentran en la siguiente tabla clasificados por grupos de acuerdo con el análisis estadístico Anova- Tukey. (Tabla 1).

Tabla 1. HTP extraídos por muestra con dicloro metano, hexano y acetona.

ID	HTP (di)	HTP (hx)	HTP(Ac)
mg de hidrocarburo/kg de suelo			
M1	15600 ± 780*	200 ± 10*	5800 ± 290
M2	85000 ± 4250**	800 ± 40	1400 ± 70*
M3	89000 ± 4450**	1400 ± 70	2700 ± 135
M4	17800 ± 890*	600 ± 30	1400 ± 70*
M5	14500 ± 725*	400 ± 20*	1600 ± 80*
M6	14300 ± 715*	300 ± 15*	600 ± 30
<i>p-value</i>		<0.05	
<i>HSD</i>	7107.59	100.91	386.9

Donde: (*) por columnas representa que las muestras pertenecen a un grupo con características similares; (**) representa que las muestras pertenecen a un segundo grupo con características similares pero distintas a cualquier otro grupo y (***) representa que las muestras pertenecen a un tercer grupo con características similares y distintas a otros grupos. Las muestras que carecen de dichos símbolos no tienen similitud con ninguna otra. (*p-value*) es el valor por el cual se determina la hipótesis de que haya diferencia entre conjuntos de datos y (*HSD*) es la diferencia honestamente significativa, es decir, el discriminante para determinar si estadísticamente los valores son similares entre dos muestras o no.

De igual manera, se realizó un análisis de fracciones por selectividad de solventes, según la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 [17] de la que se obtuvo lo siguiente (Figura 9).

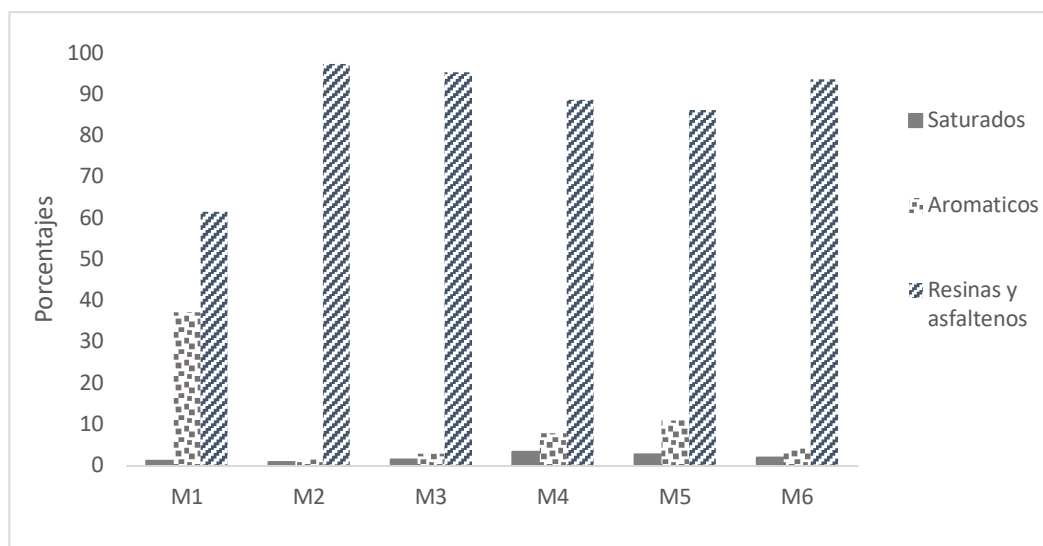


Figura 9. Gráfica de porcentajes SARA por muestra.

Por medio de estudios realizados por Díaz-Ramírez et al. [18] y Marín-García et al.[19] se sabe que el contenido de fracciones SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos, respectivamente) de diversos petróleos se distribuye en saturadas para los petróleos ligeros. En cambio, las fracciones de resinas y asfaltenos se encuentran en los crudos más pesados. Además, está demostrado que existe una relación entre las diversas fracciones de los hidrocarburos y los efectos en las propiedades de los suelos [20]. En la gráfica de porcentajes se observa que todas las muestras presentan un mayor porcentaje de resinas y asfaltenos, las cuales conllevan a la repelencia al agua y los efectos en la baja producción de hortalizas [5]. También se observa que la muestra 1 tiene mayor contenido de fracciones aromáticas; estas son consideradas peligrosas o tóxicas, por lo que se debe de estimar el tipo de plantío que se intente desarrollar, para evitar poner en riesgo la salud pública [20].

3. Resultados

De acuerdo con la información obtenida mediante los sistemas de información geográfica, se encontró como resultado que el predio corresponde al tipo de suelo Gleysol. Los Gleysoles de Tabasco son suelos muy escasamente drenados formados por depósitos de sedimentos transportados por los ríos más caudalosos del país hacia las partes más bajas del estado, en él se llevan a cabo procesos de oxidación y reducción, el nivel freático se encuentra a menos de 50 cm de profundidad. La mayor parte del año y durante la época de lluvias llega hasta la superficie, por lo cual quedan inundados [21].

Este tipo de suelo es uno de los factores principales en la acumulación de HTP presentes en el predio; por otra parte, la migración de los contaminantes puede ser atribuida a efectos de escorrentía, ya que el pozo más cercano se encuentra a 4.4 km de distancia y dos de ellos a una altura mayor que la zona de estudio.

3.1 Resultados de los parámetros de la NOM-021-SEMARNAT-2000

Tabla 2. Resultados de los parámetros de la NOM-021-SEMARNAT-2000 por medio del análisis estadístico Anova-Tukey.

ID	DR	DA	%Po	%CC	pH	CE	%A	%R	%L	%MO
M1	2.88± 0.14	1.00± 0.03*	65.54± 3.27*	53.06 ± 1.90	6.33± 0.05*	0.26± 0.04	26.22 ± 1.01*	0 ± 0*	73.77 ± 1.01*	0.189 ± 0.00*
M2	2.93 ± 0.65	0.99± 0.01*	66.07± 3.30*	49.98 ± 2.72	6.16 ± 0.11*	0.39± 0.02*	32.70 ± 1.15**	1.96± 0**	65.33 ± 1.15**	0.185 ± 0.00*
M3	2.13 ± 0.50	0.90± 0.01**	57.54± 2.87**	51.11± 0.80	5.86 ± 0.20	0.38± 0.01*	29.02 ± 2.72*	1.30± 1.13**	69.66 ± 3.85*	0.889± 0.04
M4	1.95 ± 0.62	0.984 ± 0.00*	49.92± 2.49**	49.66± 0.40	7.2± 0 **	0.47± 0.01	26.04 ± 0*	0 ± 0*	73.96 ± 0*	0.427± 0.02
M5	2.01 ± 0.61	0.935± 0.02**	52.90 ± 2.64**	53.02 ± 1.49	7.2 ± 0**	0.45± 0.01*	30.04 ± 2*	0 ± 0*	69.96 ± 2*	1.186 ± 0.05
M6	1.88 ± 0.56	0.994 ± 0.00 *	47.12 ± 2.35**	48.92 ± 1.91	7.2± 0.1**	0.44± 0.01*	36.6± 2**	0 ± 0*	63.4 ± 2**	0.204 ± 0.01*
<i>p-value</i>										
						< 0.05				
<i>HSD</i>	<i>NA</i>	<i>0.058</i>	<i>7.81</i>	<i>NA</i>	<i>0.29</i>	<i>0.06</i>	<i>4.72</i>	<i>1.26</i>	<i>5.62</i>	<i>0.08</i>

Donde: DR es Densidad Real (picnómetro) y DA es densidad aparente (cilindro), ambas en g/cm³, %Po y % CC son Porosidad y Capacidad de Campo en %, pH es potencial del hidrógeno de relación suelo: agua (1:2), CE es conductividad eléctrica determinada del extracto saturado en dS/cm y %A, %R y %L son los porcentajes de arenas, arcillas y limo, respectivamente, y que fueron obtenidos por el método Bouyoucos. % MO se refiere a porcentaje de materia orgánica.

Después de realizar el análisis ANOVA-Tukey, los resultados muestran que, a excepción de DR y CC, las muestras presentan diferencias significativas ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > HSD$ calculado). En este sentido, para DA, M1, M2, M4 y M6, no presentan diferencias significativas entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < 0.058$): así mismo, M3 y M5 no presentan diferencias significativas entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < 0.058$).

Los datos de capacidad de campo que van del 48.92% a 53.06% nos permiten identificar la textura de las muestras de suelo. De acuerdo con la tabla de Textura- CC (Tabla 3), los valores de CC y PMP (punto de marchitez permanente) corresponden a suelo arcilloso.

Tabla 3. Valores normales de capacidad de campo y coeficiente de marchitez permanente para suelos de diferentes texturas. Recuperado de “apuntes de geotecnia con énfasis en laderas”. UPM

Textura	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente
Arenoso	5-15	3-8
Franco arenoso	10-20	6-12
Franco	15-30	8-17
Franco arcilloso	25-35	13-20
Arcilloso	30-70	17-40

Al comparar los valores de DA con los expuestos en la NOM-021-SEMARNAT-2000, [10] se encontró que M1 corresponde a suelos arcillosos ($1.0 - 1.19 \text{ g/cm}^3$), en cambio M2, M3, M4, M5 y M6 son considerados como suelos orgánicos.

De acuerdo con los datos obtenidos de las muestras en densidad aparente ($0.908\text{-}1.004 \text{ g/cm}^3$) (Figura 10), se observa que corresponden a tipos de horizontes de suelos volcánicos hacia horizontes arcillosos con estructura, de acuerdo con la tabla de tipos de horizontes por densidad aparente (Tabla 4).

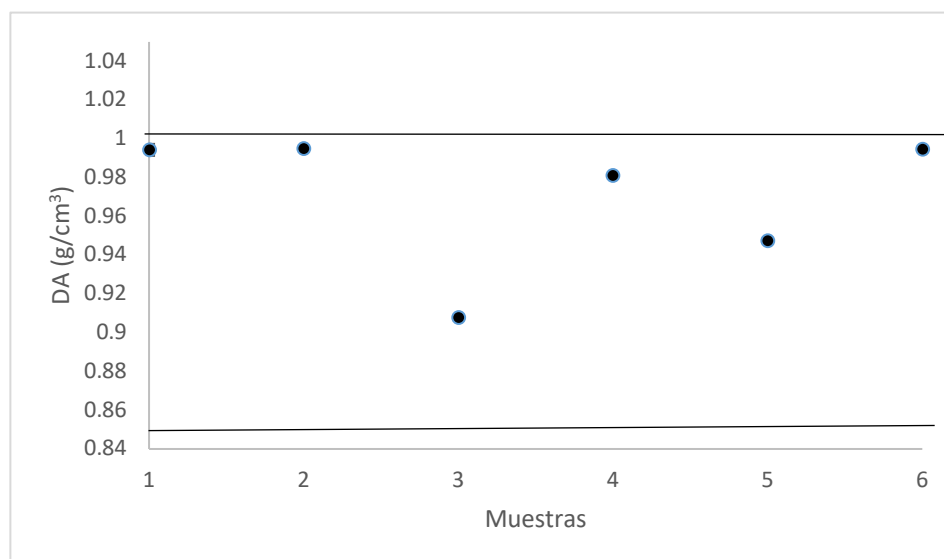


Figura 10. Gráfica de valores de densidad aparente de las muestras de suelo.

Tabla.4. Tipos de horizonte por densidad aparente. [22]

Tipo de horizonte	Densidad aparente (g/cm^3)
Horizontes arenosos	1.45-1.60
Horizontes arcillosos con estructura	1.05-1.10
Horizontes compactos	1.90-1.95
Horizontes de suelos volcánicos	0.85
Horizontes turbosos	0.25
Valor medio	1.35

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico, se encontró en las muestras que Po M1 y M2 son similares, es decir, ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < HSD$ calculado) al igual que M3, M4, M5 y M6, que no tienen diferencias significativas entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < HSD$ calculado). De acuerdo con su clasificación en porcentaje de porosidad, M1 Y M2 corresponden a suelos con porosidad muy amplia y M3, M4, M5 y M6 están clasificados de medio a amplio.

En cuanto a los valores promedio de las muestras en niveles de pH se encontró que no hay diferencia significativa entre M1 y M2 ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < HSD$) de igual forma, M4, M5 y M6 pertenecen a un mismo conjunto; en cambio, la muestra M3 de acuerdo con el análisis estadístico presenta diferencias significativas para ambos grupos ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > HSD$ calculado). A simple vista, se observa que su valor promedio es mucho menor que el de las demás muestras (5.86 dS m^{-1}) este valor fue obtenido de acuerdo con la metodología descrita en la NOM-021-SEMARNAT-2000 [10], de la cual se clasificó como suelo moderadamente ácido. Teniendo como resultado que las muestras están dentro del rango de moderadamente ácidos y neutros.

La acidez del pH en este caso se atribuye a la presencia de oxidación, restos orgánicos oxidados derivados de la materia orgánica presente en el suelo, así como ácidos húmicos que son fuertemente absorbidos o acomplejados con el hierro en pH mayor a 3 [23], así como su composición mineralógica observada por medio de petrografía.

De los resultados del análisis estadístico en conductividad eléctrica de las muestras se obtuvo que M2, M3, M5 y M6 no tienen diferencias significativas entre sí, por el contrario, M1 es diferente a las demás muestras al igual que M4. Se observa que M1 cuenta con el valor promedio más bajo y M4 con el valor promedio más alto de todas las muestras de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 [10] todas las muestras tienen efectos menores de la salinidad, es decir, que sus valores de CE son menores a 1.

La CE está ampliamente relacionada con la disolución de sales en el medio, las cuales a su vez están conformadas por minerales; debido a las propiedades de dichos minerales puede haber una variación en los valores de conductividad eléctrica. Por medio de DRX y petrografía se detectó la presencia de silicatos, alto contenido de hierro y óxidos. La formación de óxidos de hierro en el suelo es afectada por la materia orgánica y por las bacterias [23].

Por medio del triángulo de texturas se obtuvo que todas las muestras tienen la misma textura (franco limoso). Sin embargo, las muestras varían en porcentajes de arena, limo y arcilla de acuerdo con el análisis de contenido de arena que demuestra que M1, M3, M4 y M5 tienen porcentajes similares ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < \text{HSD}$), solo M2 y M6 son distintas del grupo anterior mencionado, es decir, ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > \text{HSD}$), principalmente porque M2 y M6 tienen un mayor contenido de arena.

Así también se encuentra el caso particular de la arcilla en las muestras, debido a que el método Bouyoucos no es del todo eficaz para detectarlas, principalmente por efecto de la presencia de hidrocarburos que puede provocar un acumulamiento de partículas de arcilla, convirtiéndolas en conglomerados similares en tamaño a partículas como el limo [24]; así mismo, Martínez et al. [25] establece que ante la presencia de hidrocarburos medianos hay un aumento de limo y las arenas se degradan. Para el caso del limo se encontraron diferencias significativas del mismo carácter que en los porcentajes de arena, es decir, que M2 y M6 comparten similitudes ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < \text{HSD}$) y M1, M3, M4 y M5 forman un conjunto distinto ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > \text{HSD}$).

En el caso del análisis estadístico de contenido de materia orgánica en las muestras M1, M2, M6 ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < \text{HSD}$), no hay diferencias significativas entre sí, a diferencia de las muestras M3, M4 y M5, que cada una es distinta entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > \text{HSD}$). Sin embargo, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 [10] para suelos no volcánicos están clasificadas para suelos de nivel muy bajo – bajo. Esto sucede principalmente en suelos arcillosos por la degradación provocada por bacterias, así como la presencia de hidrocarburos [23], causando estos fenómenos hidromórficos como lo es una mayor oxidación. Para este caso, la oxidación se ve mejor reflejada mediante láminas delgadas de petrografía que en la descripción edafológica realizada previamente [24].

3.2 Resultados HTP

Después de realizar el análisis en el Anova Tukey, obtuvimos que las muestras presentan diferencias significativas entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > \text{HSD}$ calculado) en los tres solventes utilizados. En este sentido, para HTP (di) M1, M4, M5 y M6 no hay diferencias significativas entre sí, es decir, ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < 7107.59$), así como para M2 y M3 son similares ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < 7107.59$). Al comparar los valores de HTP (di) con los expuestos por la NOM-138-SEMARNAT- SSA1-2012 [18], se encontró que todas las muestras exceden el límite máximo permitido (4400 mg/kg esto es entre fracciones ligeras, medianas y pesadas).

Por su parte, HTP (hx) en M1, M5 y M6 pertenecen a un mismo grupo debido a que no tienen diferencias significativas entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < 100.91$); M2, M3 y M4, todos son distintos entre sí, es decir, ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 100.91$). Al comparar los valores con los de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 [18], todas las muestras exceden el valor máximo permitido para fracciones ligeras de hidrocarburo = 200 mg/kg. En cuanto a HTP(Ac), el análisis estadístico arrojó que M2, M4 y M5 no presentan diferencias significativas entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 < \text{HSD calculado}$.) Y M1, M3 Y M6 son distintos entre sí ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2 > 100.91$). De igual forma, se comparan los valores obtenidos con los expuestos por la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 [18]; en este caso, para fracciones medias en suelos agrícolas, el límite máximo corresponde a 1200 mg/kg, siendo este también excedido por la mayoría de las muestras a excepción de la M6.

4. Conclusiones

El análisis geoquímico nos permitió determinar que hay hidrocarburos presentes en el suelo, equivalentes a hidrocarburos pesados. El transporte de contaminantes y los minerales son atribuidos a las características geológicas del lugar, como la elevación, la cual es también un factor muy importante en la génesis del suelo. En cambio, su acumulación está ampliamente relacionada con aspectos físicos como la textura, densidad, porosidad y capacidad de campo lo que causa afectaciones en la calidad y fertilidad del suelo como, son repelencia al agua y disminución de producción de hortalizas. Además de que se presentaron componentes tóxicos peligrosos para la salud, disminuyendo el acceso a la alimentación de calidad, por otra parte, se encontraron cambios en las características físicas y químicas, principalmente en el contenido de arcillas referente a la textura, ya que se reportó un bajo contenido de ellas, a pesar de las características intrínsecas del suelo de la zona de estudio y todo lo observado en el análisis completo. De igual manera se atribuyen los cambios del pH del suelo de ácido a neutro a la presencia de hidrocarburos, concluyendo que el suelo ha sido afectado.

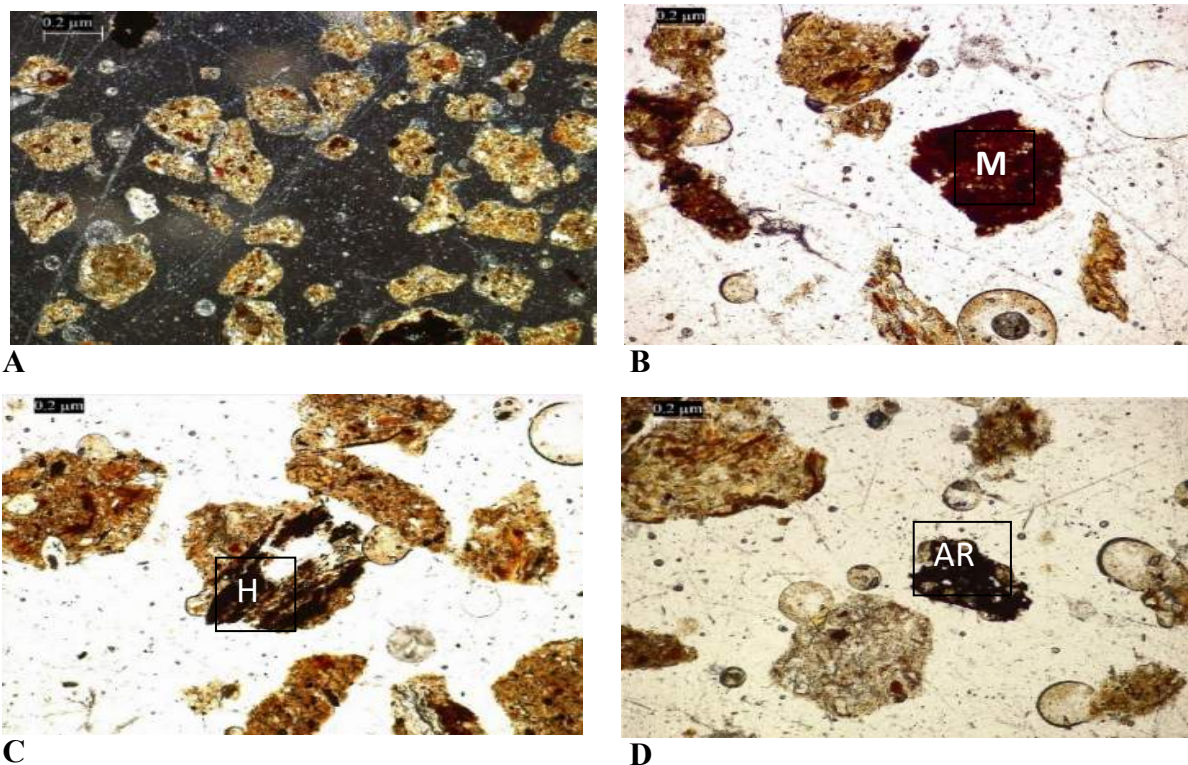
5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Suelos e Hidrocarburos de la DACB-UJAT por el financiamiento de esta investigación, así como a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por la infraestructura científica para el desarrollo de los análisis de DRX y análisis petrográfico.

6. Conflicto de intereses

Por medio de la presente declaramos que no existen conflictos de intereses de ningún carácter económico, político o para beneficio personal con fines de lucro que puedan influir en los resultados, el análisis o la interpretación de los datos presentados en el manuscrito titulado “análisis geoquímico de acumulación de hidrocarburos en suelos de Tucta, Nacajuca.” Sometido a Journals of Basic sciences.

7. Resumen Gráfico



A. Granos sub redondeados con microcomponentes que tienen a tener tonalidad rojiza – café, algunos fragmentos generan fuentes con óxidos. **B.** Moscovita (M). **C.** Acumulación de hidrocarburos alrededor de los poros (H). **D.** Adherencia de hidrocarburos en material arcilloso (Ar)

8. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), *Conteo de población y vivienda 2020*. México: INEGI, 2020.
- [2] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), *Carta topográfica Ocuilzapotlán E15B81, 1:50 000*. México: INEGI, 2000.
- [3] V. Durán-Carmona, “Impacto ambiental por la explosión del pozo Terra 123 en comunidades indígenas de Nacajuca, Tabasco,” Tesis, 2018.
- [4] J. Conant, *Guía comunitaria para la salud ambiental*. Berkeley, CA: Hesperian Health Guides, 2011.
- [5] R. H. Adams, J. Zavala-Cruz, and F. Morales-García, “Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: afectación a la fertilidad y su recuperación,” *Interciencia*, vol. 33, no. 7, pp. 483–489, 2008.
- [6] J. Zavala-Cruz, F. Gavi-Reyes, R. H. Adams-Schroeder, R. Ferrera-Cerrato, D. J. Palma-López, H. Vaquera-Huerta, and J. M. Domínguez-Ezquivel, “Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco, México,” *Terra Latinoamericana*, vol. 23, no. 3, pp. 293–302, 2005.
- [7] R. H. Adams, A. L. Álvarez-Ovando, E. Escalante-Espinosa, and M. Gutiérrez-Rojas, “Dose-response relationship of organisms in soil with heavily weathered hydrocarbons and changes in

- fertility parameters,” in *Proc. 13th Int. Environ. Petroleum Conf.*, San Antonio, TX, Oct. 2006, pp. 16–20.
- [8] M. Ludizaca, “Compost, vermicompost y microorganismos benéficos como alternativas para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos,” Tesis de Ingeniería Ambiental, Univ. Católica de Cuenca, 2021.
- [9] Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016, *Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra*. México: Diario Oficial de la Federación, Jan. 4, 2017.
- [10] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), *NOM-021-SEMARNAT-2000: Especificaciones para la conservación de la flora y fauna silvestre y su manejo*. México: Diario Oficial de la Federación, 2000.
- [11] M. L. Jackson, *Soil Chemical Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1976.
- [12] D. Vargas, A. Cerón, L. Olivares, and M. Bobadilla, *Manual de evaluación de suelos: Énfasis en memoria edáfica, materia orgánica e hidroedafología*. 2020.
- [13] P. Bullock, A. Jongerius, T. Tursina, N. Federoff, G. Stoops, U. Babel, ..., and S. C. A. Ortiz, *Manual para la descripción micromorfológica de suelos*. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 1985.
- [14] O. Acevedo-Sandoval, M. A. Valera-Pérez, and F. Prieto-García, “Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlán, Hidalgo, México,” *Universidad y Ciencia*, vol. 26, no. 2, pp. 137–150, 2010.
- [15] Y. Cobo-Vidal, E. Angarica-Baró, G. Martín-Gutiérrez, A. Serrano-Gutiérrez, and A. Rodríguez-Fajardo, “Mineralogía y química de las arcillas en suelos Pardos y Vertisoles del Oriente de Cuba,” *Ingeniería Agrícola*, vol. 14, no. 2, 2024.
- [16] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), *NMX-AA-134-SCFI-2006: Suelos – Hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría – Método de prueba*. México: Diario Oficial de la Federación, 2006.
- [17] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) and Secretaría de Salud (SSA), *NOM-138-SEMARNAT-SSA-2012: Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y especificaciones para su caracterización y remediación*. México: Diario Oficial de la Federación, 2013.
- [18] I. J. Díaz-Ramírez, E. Escalante-Espinosa, E. Favela-Torres, M. Gutiérrez-Rojas, and H. Ramírez-Saad, “Design of bacterial defined mixed cultures for biodegradation of specific crude oil fractions, using population dynamics analysis by DGGE,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 62, no. 1, pp. 21–30, 2008.
- [19] D. C. Marín-García, R. H. Adams, and R. Hernández-Barajas, “Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 55–64, 2016.
- [20] L. L. Vázquez-Vázquez, M. E. Ojeda-Morales, M. E. M. V. Treviño, I. Sánchez-Lombardo, M. Z. Macías-Valadez, C. Méndez-Olán, and C. M. Morales-Bautista, “Fracciones de hidrocarburos en la evaluación del impacto ambiental de suelos contaminados,” *Avances de Investigación en Ingeniería Aplicada*, p. 644.
- [21] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Síntesis de información geográfica del estado de Tabasco*. México: INEGI, 2001.
- [22] A. Pérez, “Hablemos del suelo I, densidad real y aparente.” [Online]. Available: <https://perezguarinos.wordpress.com>, 2022.
- [23] O. Acevedo-Sandoval, E. Ortiz-Hernández, M. Cruz-Sánchez, and E. Cruz-Chávez, “El papel de óxidos de hierro en suelos,” *Terra Latinoamericana*, vol. 22, no. 4, pp. 485–497, 2004.

- [24] M. del C. Gutiérrez and J. Zavala, “Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos,” *Terra Latinoamericana*, vol. 20, no. 2, pp. 101–111, 2002.
- [25] V. E. Martínez, “Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso,” *Terra Latinoamericana*, vol. 19, no. 1, pp. 9–17, 2001.

Valor agregado a residuos agroindustriales como alternativa en la biorremediación de suelos

López-de Dios, C. del C.¹ , Morales- Bautista, C. M.¹ , Ojeda-Morales, M. E.² , Fuentes Domínguez, I.^{1*} , Torres-Sauret, Q.¹ 

¹División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez Kilómetro 1, La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco México, C.P 86690

²División Académica de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez Kilómetro 1, La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco México, C.P 86690

*fuentesdominguesirene@gmail.com.mx.

Resumen

Los residuos agroindustriales son subproductos generados por procesos agroindustriales y sino no son procesados adecuadamente representan problemas ambientales. Diversos investigadores buscan nuevas vertientes y estos coproductos tengan un valor agregado debido a que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo y un destino final, así como una legislación específica. Por lo cual, este proyecto tiene como objetivo caracterizar cuatro residuos agroindustriales del estado de Tabasco: pez diablo (*Hypostomus plecostomus*), harina de plátano (*Musa paradisiaca* L) lactosuero, melaza, con la finalidad de ser implementados en área ambiental: suelos, bioaumentación a microorganismos, medios para producción de biotensoactivos y así potencializar su valor en prácticas sostenibles. Las caracterizaciones se basaron con métodos Oficial Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (OMA) y Normas Oficiales Mexicanas (NOM-021-SERMANAT-2000, NOM 138-SEMARNAT/SS-2003 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1 2007).

Palabras claves: *Hypostomus plecostomus*, *Musa paradisiaca* L, lactosuero, melaza, biorremediación.

Abstract

In Agroindustrial waste is byproducts generated by agroindustrial processes and if not processed properly, it represents environmental problems. Various researchers are looking for new avenues and these co-products have added value because there is no clear environmental awareness for their management and final destination, as well as specific legislation. Therefore, this project aims to characterize four agroindustrial wastes from the state of Tabasco: devil fish (*Hypostomus plecostomus*), banana flour (*Musa paradisiaca* L), whey, molasses, with the purpose of being implemented in the environmental area: soils, bioaugmentation to microorganisms, means for the production of biosurfactants and thus enhance their value in sustainable practices. The characterizations were based on Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (OMA) and Official Mexican Standards (NOM-021-SERMANAT-2000, NOM 138-SEMARNAT/SS-2003 and NOM-147-SEMARNAT/SSA1 2007).

Keywords: *Hypostomus plecostomus*, *Musa paradisiaca* L, whey, molasses, bioremediation

Recibido: 19 de diciembre de 2024, Aceptado: 10 de junio de 2025, Publicado: 22 de agosto de 2025

1. Introducción

Los residuos son generados a partir de cualquier proceso productivo del sector agroindustrial, estos se encuentran en estado sólido o líquido [17] En la agroindustria se producen residuos específicos dependiendo de cada subsector, los cuales cuentan con propiedades que los hacen viables para ser empleados en otros procesos o bien participar en el tratamiento de ambientes contaminados [16]. En México, la generación de estos subproductos agroindustriales es significativa debido a la diversidad y magnitud de las actividades agroindustriales en el país, se estima que anualmente desperdician más de 20 millones de toneladas de alimentos, parte de los cuales son subproductos agroindustriales que podrían ser aprovechados [10]. Este aprovechamiento está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular con el ODS 2, que busca poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible mediante el uso eficiente de los recursos y la reducción de desperdicios agroalimentarios. El ODS 3, por su parte, persigue garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades, lo que se vincula con la generación de productos derivados de subproductos agroindustriales que pueden fortalecer la seguridad alimentaria y la nutrición, contribuyendo a la mejora de la salud pública. Además, el ODS 13 insta a adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, promoviendo acciones como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la valorización de residuos y la aplicación de economía circular. La valorización de estos subproductos contribuye a la reducción del desperdicio alimentario, el fortalecimiento de sistemas productivos sostenibles y la mitigación del impacto ambiental.

Una especie que no es nativa de México es *Hypostomus plecostomus*, que se conoce de manera común como pez diablo, pez limpia vidrios o pez limpia peceras. Es un bagre blindado del orden de los Siluroformes y familia Loricariidae. Esta especie es originaria de América del Sur y en México los primeros registros de esta especie son del año 1995 en el río Mezcala, ubicado dentro de la cuenca del río Balsas del Estado de Guerrero ha generado mucha preocupación. La expansión de este pez ha generado preocupación ya que sus adaptaciones biológicas lo hacen un superdepredador al punto que se ha convertido en una plaga, en diversos estados como San Luis Potosí, Coahuila, Tamaulipas, Tabasco, Veracruz, Chiapas, especialmente en el Parque Nacional del Cañón del Sumidero. Se caracteriza por tener un sistema de defensa muy eficiente, cuenta con una coraza erigida formada por espinas y placas que dificultan de manera considerable los ataques por parte de sus depredadores. Esta especie de igual forma puede sobrevivir 30 h fuera del agua, y su dieta se basa en detritus, fragmentos de plantas, diatomeas, algas filamentosas, cianobacterias, pequeños organismos de zoobentos y huevos de especies nativas. Un aspecto positivo es que, su carne es nutritiva con un alto porcentaje de contenido proteico y bajo índice de grasa. La harina proveniente de esta especie cuenta con un perfil nutricional y aplicaciones interesante. Es un producto rico en proteínas con un contenido que puede llegar al 47.9% y un nivel significativo de cenizas de 34.7%, lo que contribuye a su uso como fertilizante orgánico. Además, contiene aproximadamente un 7.74% de nitrógeno y un 4.65% de fósforo lo que refuerza su valor como insumo agrícola [11]. Ello los ha colocado como alternativa para diversas aplicaciones como: en la alimentación, aunque es imposible que esta ventaja compense la amenaza que ejercen sobre las demás especies o como alimento para alimentos de ganado, peces o bioaumentación en el área de biorremediación [18]

Harina de plátano: Esta harina tiene su origen en el aprovechamiento del plátano verde, que no es apto para el mercado convencional, transformándolo en un producto de larga duración y alta versatilidad, en México el desarrollo de este producto ha sido impulsado para reducir el desperdicio de este plátano, mejorar los ingresos de los productores locales y diversificar el mercado [12]. Es fuente de antioxidantes y fibra y al carecer de gluten puede emplearse para productos dirigido a a personas con enfermedad celíaca.

La demanda de más y mejores productos de origen natural ha llevado a utilizar residuos, subproductos y descartes de los diferentes sectores tanto agrícolas como agroindustriales. Siendo una alternativa viable su transformación en harinas y poder ayudar a el suelo a obtener los nutrientes necesarios para poder darle vida a las plantas [5].

Lactosuero: Es un líquido resultante de la obtención de queso y contiene los componentes que no se incorporan cuando la caseína se coagula, a pesar de contar con un contenido nutricional elevado, solo un pequeño porcentaje se usa para alimentos para animales de granja y el restante desechado y esto causa problemas de contaminación en ríos y suelos [4]. Este es un subproducto de la industria quesera tiene su origen en el proceso de coagulación de la leche durante la elaboración del queso. Este líquido contiene nutrientes importantes como son proteínas, lactosa, minerales, y vitaminas. Su composición puede variar según el tipo de queso producido y el proceso de fabricación. Por ejemplo, el lactosuero dulce tiene un pH más alto en comparación con el lactosuero ácido [6]. En el caso del estado de Tabasco el lactosuero se genera principalmente en queserías artesanales y semi industriales, donde predomina la producción de queso fresco y cocido y aunque no hay cifras exactas y actualizadas de cantidad de lactosuero generado específicamente en Tabasco, México produce alrededor de 2 millones de toneladas de al año y estados como Tabasco, con una significativa actividad quesera, contribuyen con una parte considerable de este total [7].

La melaza: Es el residuo de cristalización final del azúcar, donde ya no se puede obtener más azúcar por métodos físicos. es utilizada para alimento para ganado bovino. Debido a su alta concentración de azúcares, la melaza representa una fuente de energía que la hacen apta para elaborar los piensos utilizados en su alimentación. Existen diferentes usos de la melaza cabe mencionar algunos para complemento alimentación en bovinos para la salud ya que tiene alto contenido en nutrientes así mismo uso para poder ayudar al suelo a obtener nutrientes que le ayudaran a beneficiar y aprovechar dichos nutrientes [8]. En México la producción de la melaza ha oscilado entre 1.4 y 2.3 millones de toneladas anuales en los últimos años con variaciones según la cosecha de caña de azúcar, México es un exportador neto de melaza, siendo principalmente utilizada en la industria alimentaria para ganado y fermentación industrial [13].

2. Metodología Experimental

2.1 Obtención de la materia prima

El muestro consistió la recolecta de los cuatro residuos agroindustriales en el estado de Tabasco: suero de leche proveniente del municipio de Huimanguillo 17° 83' 28" N - 93° 39' 40" W, melaza del Ingenio Santa Rosalía 18° 05' 21" N - 92° 21' 23" W, residuos de plátano 17° 59' 1" N - 93° 15' 31" W y por último el pez diablo (*Hypostomus plecostomus* sp) Simón Sarlat del municipio Centla 18° 34' 40" N - 92° 80' 83" W, fueron trasladada y procesados en el laboratorio.

2.2 Almacenamiento y elaboración de los residuos sólidos (pez diablo y plátano)

La manufactura para ambos residuos sólidos se realizó bajo la metodología adecuada a partir de un estudio previo (Fuentes-Domínguez *et al.*, 2024), para su conservación se realizó por liofilización FREEZE DRYER, SCIENTZ-10N, al suero de leche, se concentró igloo termo con capacidad 2 gal para su conservación y se guardó en recipientes de plásticos estériles refrigeró (4-5 °C)

y por último la melaza fue almacenada almacenada en frascos de vidrio ámbar, de taparosca y refrigerados (4-5°C). para su procesamiento, su conservación en refrigeración 3°C. NOM-SERMARNAT 2001,

2.3 Conservación de la muestra problema

Para las harinas se procedió a liofilización, siguiendo la metodología siguiente: se colocaron frasco de vidrios a esterilizar en base húmeda a 15 psig durante 15-18 min, posteriormente las harinas fueron depositadas en condiciones axénicas y llevada al liofilizador maneja temperatura y finalmente fueron colocadas en bolsas PET selladas a vacío para su posterior análisis. En el caso del lactosuero fue sometido a congelación y la melaza fue colocado en refrigeración bajo 3°C. para su posterior análisis procesarla en mes.

Se aplicaron diversos métodos para la caracterización de los residuos agroindustriales sólidos (harinas), semisólido (melaza) y líquido (suero de leche) con base a la Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL (OMA) y Normas Oficiales Mexicanas (NOM-021-SERMANAT-2000, NOM 138-SEMARNAT/SS-2003, NOM-155-SCFI-2012 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1 2007).

2.4 Potencial de hidrógeno (pH)

Se utilizaron vasos precipitado con capacidad nominal de 100 mL por triplicado, se pesó 5 g de harinas de plátano y pez diablo y se adiciono 25 mL de agua destilada. Con ayuda de una varilla de vidrio, la mezcla se agito manualmente a intervalos de 5 min, durante 30 min, dejando reposar por 15 min, y finalmente se registra lectura. Para el suero leche medio directa y finalmente la melaza se utilizó la relación 1:2 se registran lecturas.

2.5 Conductividad eléctrica (CE)

Se realizó por el método de saturación 24 h: consistió en utilizar las muestras procesadas para el pH, posteriormente las muestras se filtraron y se registra lectura del extracto por triplicados.

2.6 Densidad aparente

Para muestras sólida se determinó por método del cilindro: consistió en colocar el cilindro limpio y vacío en balanza semianalítica VELAB-300 y se registra, posteriormente se ingresa la harina completamente seca dando ligeros golpes sobre la mesa para eliminar posible aire atrapados y finalmente el cilindro se rellenó completamente con la harina, y el excedente fue retirando con una superficie plana. El cilindro con la muestra fue pesado, este procedimiento se aplicó por triplicado para cada harina.

Para los muestras líquida y semisólida fue utilizada método del micropicnómetro elaboración propia, el cual fue lavado y secado completamente, posteriormente, se pesó del picnómetro vacío, cabe mencionar que la manipulación de éste es utilizando pinzas evitando el contacto directo con las manos, después se llenó con agua destilada y se pesó nuevamente. Finalmente se retiró el agua, y completamente seco los micropicnómetro, se deposita la muestra y se registra el peso. Aplicando este procedimiento por triplicado para cada muestra.

2.7 Cálculos para determinar las densidades de sólido y líquidos

Para calcular la densidad aparente de las harinas se realizaron los siguientes cálculos la fórmula 1, Considerando que la densidad viene expresada mediante la siguiente expresión: $\rho = mv$; La masa de la

ecuación puede ser expresada mediante la diferencia de A y B. y el volumen fue determinado mediante la expresión del cuerpo geométrico de un cilindro circular. $m=B-A$; $v=\pi r^2 \cdot h$, por lo tanto

$$\rho = mv = B - A \pi r^2 \cdot h. \quad (1)$$

donde: ρ : densidad, m: masa, v: volumen, A: masa del cilindro vacío, B: masa del cilindro con la harina
Por otra parte, para las muestras líquida y semisólida se usó el método del picnómetro y utilizando la ecuación 2:

$$\rho_{\text{líquido}} = \frac{(W_{\text{Pic líquido}}) - (W_{\text{Pic vacío}})}{W_{\text{Pic}} + H_2O - W_{\text{Pic vacío}}} X \rho_{H_2O} \dots \quad (2)$$

Dónde:

$W_{\text{Pic líquido}}$ = peso de picnómetro con líquido

$W_{\text{Pic vacío}}$ = peso del picnómetro vacío

$W_{\text{Pic}} + H_2O$ = peso del picnómetro + agua

2.8 Cenizas

Se determinó por método de calcinación, consistió en lavar muy bien los crisoles y se llevaron a peso constante 105°C, posteriormente se agregó 5 g de muestra se puso directo a una parrilla para iniciar una combustión de la materia orgánica. Una vez reducido el volumen se lleva a la mufla a 525°C por 5 horas hasta la obtención de cenizas completamente blancas, aplicando la ecuación 3:

$$\% \text{Cenizas} = + \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} X 100 \quad (3)$$

Donde:

%Cenizas: porcentaje de cenizas

P_0 : Peso del crisol vacío

P_1 : Peso del crisol con muestra

P_2 : Peso del crisol con cenizas

3. Resultados

En la tabla 1 se observan los resultados de métodos realizados a cada una de las muestras de residuos agroindustriales (RA).

Tabla 1. Resultados descriptivos en función los métodos aplicados a los residuos agroindustriales

Residuos agroindustriales	pH	CE (mS/cm)	Densidad (g/cm ³)	Ceniza (%)
Melaza	5.5±0.057	0.6433 ± 0.74	1.316 ± 0.013	12.075 ± 0.304
Harina pez diablo	6.53± 0.057	7.66 ± 0.09	0.520 ± 0.004	36.650 ± 0.101
Harina plátano	7.1 ± 0.057	5.79 ± 0.583	0.517 ± 0.007	12.870.022
Suero de leche	4.26 ± 0.057	3.94 ± 0.05	1.062 ± 0.003	0.865 ± 0.017

En la tabla se observa intervalos de pH desde mínimo de 4 a máximo de 7, conductividad eléctrica de 0.664 hasta 7.66 dsm/cm, densidad aparente la mínima 0.517 y la máxima 1.316 g/cm³ y finalmente el porcentaje de cenizas rangos desde 0.865 hasta 36.650.

4. Discusión

Para el pH es la base principal para que desarrollen cualquier organismo vivo su la composición química varía de acuerdo el proceso industrial que se hayan sometidos las materias primas, para el caso se de la melaza por ser medios ricos en carbohidratos y azúcares tiende a tener pH neutro o ácidos, suero de leche es rico en proteínas y aminoácidos son más ácidos debido a su descomposición lo cual desencadena 0 generan ácidos acéticos, láctico entre otro que pueden contribuir a esos pH. El biofertilizante elaborado a partir de residuos de pescado obtuvo resultados de pH ligeramente ácido- neutros pueden variaron de 5 a 7. Un trabajo realizado en Perú menciona que el biol elaborado a partir de residuos de pescado tiene un pH de 5,86, lo que lo hace ligeramente ácido. Este pH favorece la disponibilidad de nutrientes esenciales para cultivos, facilitando la actividad microbiana y la solubilidad de los nutrientes en el suelo [19]. El pH tiene una máxima disponibilidad de nutrientes en ese rango de 5,9 a 5,64 para así lograr el crecimiento de las plantas. Así mismo Flores et al., 2020 menciona que al agregar melaza al biofertilizante, este sirvió como fuente de carbono y energía, facilitando el crecimiento y desarrollo de bacterias lácticas, lo que provocó una disminución del pH hasta el punto en que el ácido láctico producido impida el crecimiento de las propias bacterias lácticas.

Conductividad (CE) tiene más presencias de cationes por la liberación de minerales presentes en las harinas que con respecto a los líquidos ya que son principalmente carbohidratos proteínas y suero es la proteína lactosa ya que el suero es fuente de proteína, vitaminas, minerales particularmente calcio como también aporta un interesante aporte de carbohidratos y grasa pero en poca porción por eso las harinas son más ricas en macro y micro nutrientes pero el resultado depende del proceso de extracción, del sitio y tiempo de extracción. Dentro de este mismo contexto (CE) para los residuos agroindustriales como suero de leche, harina de pescado, plátano y melaza pueden variar dependiendo de las características específicas del residuo (contenido de nutrientes, ácidos y sales) y el proceso que hayan realizado.

Suero de Leche su rango generalmente se encuentra entre 3 y 10 mS/cm. Este valor depende de la concentración de sales y componentes minerales como el sodio, el potasio y el calcio, los cuales son abundantes en suero debido a la presencia de lactosa y otros nutrientes. No obstante, no hay norma específica para la conductividad del suero de leche. Sin embargo, para aguas residuales, la Norma Mexicana NMX-AA-125-SCFI-2003 y las normas de la EPA (Environmental Protection Agency) en EE. UU. pueden proporcionar valores de referencia para la conductividad en aguas residuales, y estos valores se podrían adaptar en ciertos contextos de biorremediación. Harina de Pescado la CE depende principalmente de su contenido de proteínas, sales y aceites. Estas pueden estar en el rango de 5 a 12 mS/cm, dependiendo de la disolución de los nutrientes y sales. Si la harina se disuelve en agua o se procesa en una suspensión acuosa, la conductividad tiende a aumentar. Harina de Plátano, siendo un residuo menos salino, tiende a tener un rango de conductividad menor en comparación con productos como la harina de pescado o melaza. Los valores típicos pueden estar en el rango de 1 a 5 mS/cm, ya que su contenido en sales es relativamente bajo. Aunque no hay una norma específica para la conductividad de la harina de plátano, el tratamiento de aguas residuales de este tipo podría regirse por las normas ambientales nacionales que regulan la conductividad de los efluentes industriales. Dependiendo de la legislación, como la NMX-AA-125-SCFI-2003 (en México), los valores de conductividad deben ser monitoreados en el contexto de la remoción de sólidos disueltos o la carga orgánica. Y por último la Melaza al ser un subproducto de la producción de azúcar, que

contiene altos niveles de sales minerales, por lo que suele tener una conductividad más alta que otros residuos. Los rangos de la melaza disuelta en agua son entre 15 y 30 mS/cm. Este valor puede variar según la concentración de sales y la dilución de la melaza y son regulados por normas ambientales para el tratamiento de aguas residuales industriales, como las normas de la EPA o las NMX-AA-125-SCFI-2003 en México. La melaza, debido a su alto contenido salino, podría ser monitoreada en el contexto de la carga orgánica o la remoción de sólidos disueltos. La melaza se obtiene de la molienda de la caña de azúcar *Saccharum officinarum* L. (1753), una fuente rica en K, P, Mg, B, Zn, Mn, Fe, Cu, Ca y Cl. Es la principal fuente de energía para la fermentación de los abonos orgánicos además favorece la multiplicación de los microorganismos

Las cenizas de pescado están compuestas por sales minerales y arena y representan la fracción inorgánica de la harina. La arena presente se localiza en el intestino de los peces y es resultado de la movilización de la pesca de agua en zonas costeras, por otro lado, las sales minerales se originan mayoritariamente a la fracción ósea de la materia prima. La cantidad de cenizas en la harina varía dependiendo de proporción muscular-ósea de la materia prima. Por ejemplos, las especies con bajo contenido graso, generan harinas de mayor contenido de cenizas, lo cual explica el menor contenido proteico en las harinas obtenidas de esa especie [10].

Las harinas de pescado blanco como melaza suelen contener un 20% de cenizas mientras que los pescados grasos como anchoveta y arenque suelen contener un 15% y 10% respectivamente. Se reporta que el porcentaje de cenizas es alto en el caso de la harina de pescado, esto se debe por que el esqueleto está formado mayoritariamente de carbono y fosfato de calcio y esto hace que el nivel de cenizas sea alto. En el caso de la harina de plátano las cenizas las constituyen las sales minerales, como el potasio, sodio, calcio y magnesio. Las harinas de mayor extracción contienen un porcentaje más alto de cenizas el nivel de cenizas de la harina de plátano, en el caso de la melaza el porcentaje es menor pero el que nos dio menos fue el suero de leche ya que el nivel de calcio, fósforo, sodio en menor proporción

Las densidades de los residuos agroindustriales como el suero de leche, melaza, harina de pescado y plátano son parámetros importantes a tener en cuenta cuando se busca utilizar estos residuos en procesos de biorremediación. La densidad influye en varios aspectos del proceso, como la distribución de nutrientes, la movilidad de los microorganismos, y la eficiencia de la degradación. A continuación, se describen las densidades aproximadas de estos residuos y cómo pueden aportar a los procesos de biorremediación:

Suero de Leche la densidad del suero de leche es de ≈ 1.03 a 1.04 g/cm^3 . La densidad influye en la capacidad de los microorganismos para adaptarse y metabolizar la lactosa. Un suero con mayor densidad (más concentrado) puede ser más adecuado para microorganismos especializados en la descomposición de azúcares, además, la viscosidad relacionada con la densidad puede afectar la difusión de los nutrientes y la eficiencia de la biorremediación, por lo que es importante controlar la dilución para facilitar la acción microbiana.

Melaza ≈ 1.3 a 1.4 g/cm^3 , dependiendo de su concentración y contenido de este subproducto, rica en azúcares, minerales y ácidos orgánicos. Debido a su alta densidad, la melaza tiene un contenido elevado de nutrientes que pueden ser aprovechados por microorganismos para la biodegradación. El proceso de biorremediación utilizando melaza puede favorecer a microorganismos que consumen estos azúcares, mientras que la densidad alta puede facilitar la liberación de nutrientes en soluciones más concentradas, lo que favorece la actividad microbiana. Sin embargo, su alta densidad también implica que, si no se diluye adecuadamente, podría generar un medio muy viscoso, lo que afectaría la movilidad y eficacia de los microorganismos.

Harina de Pescado ≈ 0.5 a 0.9 g/cm^3 dependiendo de su contenido de aceite, proteína es una fuente rica en proteínas, nitrógeno y fosfatos, nutrientes esenciales para los microorganismos que participan en la

biorremediación. La densidad más baja de la harina de pescado en comparación con otros residuos, como la melaza, significa que tiene una mayor disponibilidad de espacio entre las partículas. Esto favorece la acción de los microorganismos, ya que pueden penetrar más fácilmente en el material y utilizar los nutrientes presentes. Por ende, dado que tiene un contenido significativo de grasa, el proceso de biorremediación podría verse afectado si las condiciones de temperatura no son adecuadas, ya que la grasa podría volverse difícil de degradar para ciertos microorganismos.

Harina de Plátano ≈ 0.6 a 0.7 g/cm^3 su aporte en la biorremediación la harina de plátano, aunque tiene una densidad baja, es rica en carbohidratos complejos y fibra vegetal, lo que puede ser utilizado por algunos tipos de microorganismos como fuente de carbono. Su densidad relativamente baja puede permitir que los microorganismos se distribuyan más fácilmente en el medio de tratamiento, lo que es beneficioso para procesos. A pesar de ser rica en nutrientes, la harina de plátano tiene un bajo contenido de minerales y proteínas en comparación con otros residuos agroindustriales como la melaza o la harina de pescado, lo que podría limitar su capacidad para sustentar ciertos tipos de microorganismos en la biorremediación. Sin embargo, en combinación con otros sustratos, puede ser útil.

5. Conclusiones

Este estudio evaluó las propiedades fisicoquímicas de diversos residuos agroindustriales generados en el estado de Tabasco harina de pescado, harina de plátano, melaza y suero de leche con el objetivo de determinar su viabilidad como sustratos en procesos de biorremediación. Los análisis realizados evidenciaron que estos recursos contribuyen el valor agregado, poseen características favorables, como niveles adecuados de pH, buena conductividad eléctrica y una composición rica en nutrientes esenciales.

Por otra parte, propiedad como la densidad de cada residuo influye directamente en la dinámica microbiana, lo que sugiere que la combinación estratégica de residuos con diferentes propiedades puede potenciar la actividad biológica y acelerar la recuperación de suelos contaminados. En particular, la harina de pescado destacó por su alto contenido de cenizas y su potencial para enriquecer suelos degradados.

Los hallazgos de esta investigación respaldan la utilización de residuos agroindustriales como herramientas ecológicas y sostenibles para el manejo ambiental, contribuyendo a una economía circular en la región.

Se sugiere realizar investigaciones adicionales para formular mezclas de residuos agroindustriales que equilibren adecuadamente la densidad, el contenido nutricional y la capacidad de retención de humedad, maximizando así su eficacia en procesos de biorremediación. De igual manera se recomienda realizar ensayos en suelos contaminados o degradados de Tabasco, para evaluar la efectividad de estos residuos bajo condiciones reales, considerando variables climáticas, tipo de suelo y nivel de contaminación.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la División Académica de Ciencias Básicas por el apoyo brindado al momento de realizar este trabajo de investigación, así mismo se agradece a la academia de química, a su cuerpo académico, a la Red multidisciplinaria en materia ambiental desde la perspectiva de la química aplicada y sus recursos con los cuales fue posible realizar este trabajo.

7. Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

8. Declaración del uso de inteligencia artificial

Los autores declaran no haber utilizado ninguna inteligencia artificial en el diseño de este artículo.

9. Resumen Gráfico

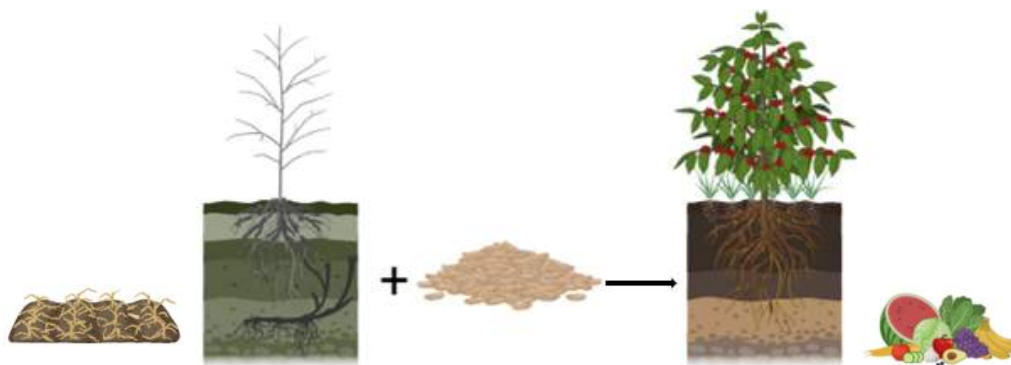


Figura 1. Efecto de residuos agroindustriales en la biorremediación de suelos

10. Referencias

- [1] DOF, *NOM-021-SEMARNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*, Segunda sección, diciembre 2002.
- [2] DOF, *NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación*, Diario Oficial de la Federación, mayo 2019.
- [3] Y. M. Cortés, “El pez diablo: una especie exótica invasora,” *Biocenosis*, vol. 23, no. 2, 2010.
- [4] B. Hannibal, A. Santillán, A. Mercy, E. Ramos, V. Paola, and A. Rincon, “Aprovechamiento del suero de leche como bebida energizante para minimizar el impacto ambiental,” *European Scientific Journal*, vol. 11, no. 26, 2015.
- [5] A. H. Hernández, L. D. Hernández, and G. H. Rivera, “Harina de plátano ‘Photarina’,” 2015.
- [6] R. A. Huertas, “Lactosuero: importancia en la industria de alimentos,” *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, pp. 4967–4982, 2009.
- [7] M. Á. Mazorra-Manzano and J. Moreno-Hernández, “Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería,” *Biotecnología y ciencias agropecuarias*, pp. 133–144, 2019.
- [8] J. A. Ossa, M. C. Vanegas, and Á. M. Badillo, “Evaluación de la melaza de caña como sustrato para el crecimiento de *Lactobacillus plantarum*,” 2010.
- [9] M. F. Uribe, *Uso de un preservante bacteriano en anchoveta (*Engraulis ringens*) en poza de recepción destinada a la producción de harina de pescado*, Tesis de Ingeniero Pesquero, Lima, Perú, 2022.
- [10] A. Preciado-Saldaña, A. Ruiz-Canizales, J. Ruiz-Canizales, M. Villegas-Ochoa, J. Domínguez-Avila, and G. González-Aguilar, “Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria. Un acercamiento a la economía circular,” *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, pp. 92–99, 2022.
- [11] M. Y. Ruiz-Aguilar, J. A. Montes-Molina, J. Castañón-González, F. Gutiérrez-Miceli, M. Hernández-Guzmán, H. López-López, ... J. Villalobos-Maldonado, “Uso de la harina del pez diablo (*Pterygoplichthys* spp.) en la fertilización orgánica del tomate (*Solanum lycopersicum* L.),” *Rev. Int. Contam. Ambie.*, pp. 159–169, 2023.

- [12] S. d. Rural, “Respalda Agricultura producción de harina de plátano verde panificable de alto valor nutricional y con potencial de reemplazar importaciones,” *Gobierno de México*, 15-dic-2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/respalda-agricultura-produccion-de-harina-de-platano-verde-panificable-de-alto-valor-nutricional-y-con-potencial-de-reemplazar-importaciones>
- [13] SAGARPA, *Melazas de caña de azúcar y su uso en la fabricación de dietas para ganado*, México: Universidad Autónoma Chapingo, 2016.
- [14] I. d. Gremaqui, M. Giménez, M. Lobo, and N. Sammán, “Propiedades químicas y físicas de harinas proteicas obtenidas por hidrólisis enzimática,” *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, pp. 229–236, 2021.
- [15] U. P. Valencia, “Determinación experimental de densidad y porosidad en alimentos sólidos y líquidos,” *RiuNet*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/144736/talens%20%20determinaci%C3%B3n%20experimental%20de%20densidad%20y%20porosidad%20en%20alimentos%20s%C3%B3lidos%20y%20l%C3%ADquidos.pdf?sequence=1>
- [16] B. E. Barragán Huerta, Y. A. Téllez Díaz, and A. Laguna Trinidad, “Utilización de residuos agroindustriales,” *Revista Sistemas Ambientales*, vol. 2, no. 1, pp. 44–50, 2008.
- [17] S. Saval, “Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro,” *BioTecnología*, vol. 16, no. 2, pp. 2–3, 2012.
- [18] I. Fuentes-Domínguez, “Enmiendas orgánicas a partir de residuos agroindustriales para aplicación a suelos con derrames de hidrocarburos,” en *La investigación en la UJAT desde la perspectiva de los Cuerpos Académicos de la DACB*, pp. 82–96, 2024.
- [19] L. J. Bayona Anton, *Biol a partir de residuos de pescado y de estiércol vacuno en la mejora del suelo para la producción de lechuga*, Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo, 2022.
- [20] A. Madrid, J. M. Madrid, and R. Madrid, “Piensos, harinas, aceites y concentrados proteínicos de pescado,” en *Piensos y alimentos para animales*, cap. 4, pp. 35–56, Mundi-Prensa Libros, 1995.

Efecto de un control basado en pasividad en un sistema celda-convertidor

Vidal-Fuentes J.R.¹, Blé G.^{1,*}, Olmos-López J. A.²

¹División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, c.p. 86690, Km. 1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México.

²División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, c.p. 86690, Km. 1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México.

*gble@ujat.mx

Resumen

En este trabajo se estudia el sistema de un convertidor elevador acoplado con una celda solar como fuente de energía. El estudio se aborda desde el análisis de estabilidad local de las tres ecuaciones diferenciales que modelan el sistema y posteriormente se aplica el control por moldeo de energía basado en pasividad para determinar la estabilidad global del sistema. Usando este control se estudia el modelo matemático y se comparan los resultados de la simulación con los obtenidos experimentalmente.

Palabras claves: control basado en pasividad; convertidor elevador; estabilidad global.

Abstract

In this work, the system of a boost converter coupled with a solar cell as a power source is studied. The study is approached from the local stability analysis of the three differential equations that model the system. Then the energy shaping control based on passivity is applied to determine the global stability of the system. Using this control, the mathematical model is studied and the simulation results are compared with those obtained experimentally.

Keywords: Passivity-based control; boost converter; global stability.

Recibido: 19 de diciembre de 2024. Aceptado: 10 de junio de 2025. Publicado: 22 de agosto de 2025.

1. Introducción

En la actualidad el uso de fuentes de energías no renovables, como aquellas que se basan en la quema de combustible, nos alientan a buscar mejores alternativas para reducir la contaminación y el impacto ambiental [9] y [13]; de esta forma contribuir con el desarrollo sustentable de nuestro planeta [12]. Por lo anterior, el uso de generadores fotovoltaicos por medio de paneles solares resulta un tema de estudio trascendental, ya que su uso ayuda a reducir el impacto ambiental [5]. Sin embargo, las variaciones de energía debido a lo que se conoce como condiciones no óptimas en las celdas solares, las cuales incluyen sombras parciales, baja incidencia solar y acumulación de polvo, motivan el estudio del efecto de control en un sistema celda-convertidor para obtener un mejor rendimiento del mismo [16]. Con la finalidad de aprovechar al máximo la irradiancia solar, se han desarrollado trabajos para seguir la trayectoria del sol [7, 11]. De igual forma se han desarrollado diferentes topologías de convertidores con el propósito de mantener un voltaje elevado estable [14, 2]. Actualmente los sistemas que aprovechan la energía fotovoltaica para alimentar diferentes equipos

utilizan controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), los cuales siguen la metodología de sintonización de Ziegler-Nichols o similares, que no requieren el modelo matemático del sistema. Sin embargo, deben ser ajustados en función de un rango de operación definido previamente, utilizando modelos matemáticos promediados [3].

Una herramienta importante para el estudio del rendimiento de los sistemas, son las ecuaciones diferenciales; ya que a través de éstas, se pueden plantear modelos matemáticos que brindan información acerca del comportamiento de los elementos del sistema fotovoltaico y con base en los resultados, se pueden tomar decisiones para diseñar el controlador a utilizar, que permita mejorar el rendimiento del sistema.

El objetivo de este trabajo es analizar la dinámica de un sistema de ecuaciones diferenciales asociado a un convertidor elevador acoplado con una celda solar como fuente de energía. Se presenta el diseño de un control basado en pasividad para el sistema, el cual garantiza la estabilidad asintótica. Así mismo éste se modifica para incrementar la velocidad de convergencia hacia el punto de equilibrio, mejorando los resultados obtenidos usando control deslizante en [1]. El modelo se adapta de tal manera que permite analizar el voltaje de salida ante variaciones en la fuente de entrada o incidencia solar. Así mismo se determina un control que permite mantener un voltaje de salida estable ante variaciones en la carga.

2. Análisis de estabilidad del modelo

2.1. Sistema en Lazo Abierto

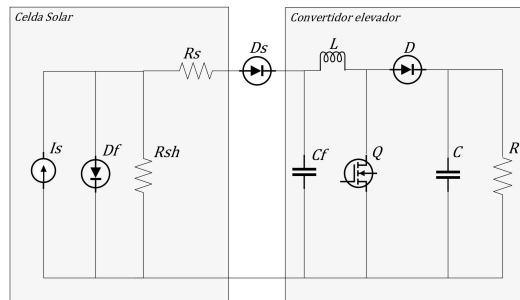


Figura 1: Diagrama esquemático de un convertidor elevador con una celda solar como fuente de energía.

El modelo matemático del diagrama anterior se obtiene aplicando la teoría electrónica de análisis de nodos y mallas al sistema estudiado. Dicho análisis para obtener las ecuaciones se puede consultar en [1] y [4].

El siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias modela el sistema de la figura 1:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{cf} &= \frac{I_{sc}}{C_f} - \frac{I_L}{C_f} - \frac{V_{cf}}{R_f C_f}, \\ \dot{I}_L &= \frac{V_{cf}}{L} - \frac{\bar{U} V_C}{L}, \\ \dot{V}_C &= \frac{\bar{U} I_L}{C} - \frac{V_C}{RC}. \end{aligned} \quad (1)$$

Donde V_{cf} es el voltaje del capacitor de acoplamiento, I_L es la corriente del inductor, V_C es el voltaje de salida del convertidor, I_{sc} es la corriente en corto circuito de la celda, C_f es el capacitor de acoplamiento, $\bar{U} = 1 - d$ es la señal de control que genera la secuencia de conmutación que enciende y apaga el interruptor Q , d es el ciclo de trabajo del modulador PWM (Pulse Wide Modulation), L es el inductor del convertidor, C es el capacitor de salida, R es la carga del sistema y $R_f = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$ donde V_{oc} es el voltaje en circuito abierto de la celda solar (todos los parámetros del sistema son no negativos).

Teniendo en cuenta que $\bar{U}$ conmuta con un ciclo de trabajo constante cuando el sistema (1) no es retroalimentado, entonces se tiene un campo vectorial lineal y su comportamiento lo determina la matriz exponencial. Para iniciar con el análisis de este sistema, se calculan los puntos de equilibrio igualando cada una de las ecuaciones a cero [10]. Por lo tanto, los puntos de equilibrio deben de satisfacer el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} 1 & R_f & 0 \\ 1 & 0 & -\bar{U} \\ 0 & \bar{U}R & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cf} \\ I_L \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sc}R_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Ya que el determinante de la matriz cuadrada de la izquierda es $\bar{U}^2 R + R_f$, tenemos una matriz no singular, y por ende un único punto de equilibrio solución del sistema (2). Resolviendo se obtiene

$$\begin{aligned} V_{cf} &= I_{sc}R_k, \\ I_L &= \frac{I_{sc}R_k}{R\bar{U}^2}, \\ V_c &= \frac{I_{sc}R_k}{\bar{U}}, \end{aligned}$$

donde

$$R_k = \left[\frac{1}{\frac{R}{R_f}\bar{U}^2 + 1} \right] \bar{U}^2 R,$$

e I_{sc} corresponde a la corriente en corto circuito de la celda solar.

Al hacer uso de R_k para simplificar las expresiones del punto de equilibrio, se puede notar que en estado estacionario el valor del voltaje de V_c es mayor al voltaje que corresponde a V_{cf} , puesto que $0 < \bar{U} < 1$. Esto se debe a la acción del convertidor elevador.

Para estudiar la estabilidad del sistema se realiza el siguiente cambio de coordenadas, el cual traslada el punto de equilibrio al origen,

$$\begin{aligned} V_{cf} &= \tilde{V}_{cf} + I_{sc}R_k, \\ I_L &= \tilde{I}_L + \frac{I_{sc}R_k}{R\bar{U}^2}, \\ V_c &= \tilde{V}_c + \frac{I_{sc}R_k}{\bar{U}}. \end{aligned}$$

Ahora las nuevas variables que aparecen con una tilde representan los cambios de corriente y voltaje alrededor del punto de equilibrio. El siguiente sistema de ecuaciones diferenciales, el cual se encuentra escrito de forma matricial se obtiene de las ecuaciones anteriores, donde las variables con tilde serán los nuevos estados del sistema

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{V}_{cf}} \\ \dot{\tilde{I}_L} \\ \dot{\tilde{V}_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_f C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 & -\frac{\bar{U}}{L} \\ 0 & \frac{\bar{U}}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_{cf} \\ \tilde{I}_L \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Análisis de Estabilidad

Una vez que se ha realizado el cambio de coordenadas, se puede observar que el sistema (3) es un sistema de ecuaciones diferenciales lineales con un punto de equilibrio en el origen, y su estabilidad se puede conocer a través del estudio de las raíces del polinomio característico asociado a la matriz jacobiana del sistema.

El polinomio característico es

$$\lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0, \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{RC + R_f C_f}{RC R_f C_f}, \\ a_1 &= \frac{L + \bar{U}^2 R R_f C_f + RC R_f}{RLC R_f C_f}, \\ a_0 &= \frac{\bar{U}^2 R + R_f}{RLC R_f C_f}. \end{aligned}$$

Para que el sistema sea estable, las raíces del polinomio característico (4) deben tener parte real negativa. Por el criterio de Routh-Hurwitz [17], las raíces del polinomio característico son negativas si se cumple que: $a_0 > 0$, $a_1 > 0$, $a_2 > 0$ y

$$a_2 a_1 - a_0 = \frac{CLR + C_f L R_f + C^2 R^2 R_f + C_f^2 R R_f^2 \bar{U}^2}{C^2 C_f^2 L R^2 R_f^2} > 0.$$

Como los parámetros del sistema corresponden a las características de los elementos electrónicos, todos son positivos. Además, ya que en las condiciones de Routh-Hurwitz solo se tiene suma de términos positivos, concluimos que el punto de equilibrio es globalmente asintóticamente estable.

2.2. Diseños de Funciones de Control

2.2.1. Sistema de control

Se denotan las variables

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, x_3]^T = [V_{cf}, I_L, V_c]^T, \\ u(x) &= \bar{U}(V_{cf}, I_L, V_c), \\ v &= I_{sc}. \end{aligned}$$

Así el sistema (1) se escribe de la siguiente forma

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{1}{C_f} \left[v - x_2 - \frac{x_1}{R_f} \right], \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{L} [x_1 - u(x)x_3], \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{C} [u(x)x_2 - \frac{x_3}{R}].\end{aligned}$$

Para analizar la dinámica local del sistema se encuentran sus puntos de equilibrio, los cuales son,

$$v = \frac{x_1}{R_f} + x_2, \quad (5)$$

$$x_1 = u(x)x_3, \quad (6)$$

$$\frac{x_3}{R} = u(x)x_2, \quad (7)$$

donde $0 < u(x) < 1$. Esta restricción se da debido a los valores que puede tomar el ciclo de trabajo. Además, $v > 0$ ya que se está considerando el modelo donde la celda solar siempre entrega energía.

2.2.2. Control por moldeo de energía basado en pasividad

La metodología del diseño del control, como se describe en [8], se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Representar el sistema real como $D\dot{x} + Cx + Rx = u$, donde D y R son matrices diagonales y C es antisimétrica.
2. Definir el sistema deseado $D\dot{x}_d + Cx_d + Rx_d = u_d$.
3. Obtener la ecuación de error $D\dot{e} + Ce + Re = u - u_d$ empleando la definición del error $e = x - x_d$.
4. Mostrar que la función $V(e) = \frac{1}{2}e^T De$ es una función de Lyapunov para el sistema.
5. Encontrar el control u basado en pasividad que garantice que $\dot{V}(e) = e^T D\dot{e} < 0$.

En esta sección, aplicaremos la misma metodología descrita en [8] para el diseño del control del sistema (1).

Empleando la formulación de Euler-Lagrange, el sistema puede expresarse como

$$D\dot{x} + Cx + Rx = u, \quad (8)$$

para el cual las matrices D , C y R están dadas por

$$D = \begin{bmatrix} C_f & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & \bar{U} \\ 0 & -\bar{U} & 0 \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} I_{sc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

donde $x_1 = V_{cf}$; $x_2 = I_L$; $x_3 = V_C$ son los estados del sistema, y $\dot{\mathbf{x}}$ el vector de sus derivadas respectivamente. Se tiene que $D, C, R \in \mathbb{M}_{3 \times 3}$, como las matrices D y R son diagonales con entradas positivas, se tiene que son matrices simétricas definidas positivas. Además, la matriz D contiene a los elementos que almacenan energía mientras que R contiene a los elementos que disipan energía. Por otra parte, la matriz C contiene a los elementos que no aportan ni disipan energía (interruptores) y es antisimétrica, es decir, $C = -C^T$. Por último, u es un vector de fuerzas externas (en este caso corresponde a la corriente I_{sc}).

Observación 2.1. Sea $A \in \mathbb{M}_{n \times n}$ y $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$. Si A es antisimétrica entonces $\mathbf{x}^T A \mathbf{x} = 0$.

De acuerdo a la metodología descrita en [8], se desea modificar la dinámica del sistema (8), llevándolo a un estado deseado (con subíndice d), regido por el siguiente sistema

$$D\dot{x}_d + Cx_d + Rx_d = u_d. \quad (9)$$

Si los sistemas (8) y (9) no son iguales, entonces existe un error dado por la expresión

$$D\dot{e} + Ce + Re = u - u_d, \quad (10)$$

en donde: $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_d$, $e = x - x_d$. La ley de control se diseña, de tal manera que el sistema sea estable, por lo que se propone la siguiente función de Lyapunov

$$V(e) = \frac{1}{2} e^T D e. \quad (11)$$

Para mostrar que la función (11) satisface el teorema de estabilidad de Lyapunov, se debe cumplir que: $V(0) = 0$; $V(e) > 0$; $\dot{V}(e) \leq 0$; lo cual asegura que (11) tiene un punto de equilibrio estable (si $\dot{V}(e) \leq 0$) o asintóticamente estable (si $\dot{V}(e) < 0$). Ya que D es diagonal con entradas positivas, se tiene que $V(0) = 0$ y $V(e) > 0$. Derivando (11) se tiene

$$\dot{V}(e) = e^T D \dot{e}. \quad (12)$$

Despejando $D\dot{e}$ de (10) y sustituyendo en (12) se llega a

$$\dot{V}(e) = -e^T C e - e^T R e + e^T [u - u_d].$$

Como C es antisimétrica, $e^T C e = 0$. Dado que R es definida positiva, $-e^T R e < 0$. Por lo que

$$\dot{V}(e) = -e^T R e + e^T [u - u_d], \quad (13)$$

es semidefinida negativa si $e^T [u - u_d] = 0$. Es decir, basta que $u = u_d$ para que el punto de equilibrio sea asintóticamente estable; por lo que la ley de control resulta

$$u = D\dot{x}_d + Cx_d + Rx_d - R_{am}e, \quad (14)$$

donde, para aumentar o apresurar la convergencia del sistema al punto de equilibrio, se ha añadido la matriz de inyección de amortiguamiento R_{am} ; tal que $R_{am} \in \mathbb{M}_{3 \times 3}$ y además es definida positiva [8]. Los vectores y las matrices de (14) están definidos por

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{sc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_f & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1d} \\ \dot{x}_{2d} \\ \dot{x}_{3d} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & \bar{U} \\ 0 & -\bar{U} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1d} \\ x_{2d} \\ x_{3d} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1d} \\ x_{2d} \\ x_{3d} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{1am}} & 0 & 0 \\ 0 & R_{2am} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{3am}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_{1d} \\ x_2 - x_{2d} \\ x_3 - x_{3d} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

Los elementos que resultan del producto R_{am} con los errores $x_k - x_{kd}$, $k \in \{1, 2, 3\}$ deben tener congruencia con las unidades de la ecuación que participan, por tal motivo la matriz R_{am} se define como aparece en (15), teniendo en cuenta que los productos $\frac{1}{R_{1am}}(x_1 - x_{1d})$ y $\frac{1}{R_{3am}}(x_3 - x_{3d})$ son corrientes, mientras que el producto $R_{2am}(x_2 - x_{2d})$ corresponde a voltaje. Nótese que la introducción de R_{am} permite escribir la expresión (13) como $\dot{V}(e) = -e^T R_{eq} e + e^T [u - u_d]$, donde $R_{eq} = R + R_{am}$, lo cual implica que $\dot{V}(e) < 0$ si $e^T (u - u_d) = 0$, es decir, se tiene un punto de equilibrio asintóticamente estable.

Con las expresiones obtenidas de los valores deseados del sistema, se puede obtener la ley de control de manera explícita de la segunda ecuación del sistema (15), la cual queda expresada como

$$u(x) = [x_{1d} - L\dot{x}_{2d} + R_{2am}(x_2 - x_{2d})] \frac{1}{x_{3d}},$$

Explicaciones más extensas sobre la aplicación de este control pueden consultarse en [8] y [6].

3. Simulación

3.1. Sistema en lazo abierto

En esta sección, se muestra la simulación del sistema en lazo abierto (sin retroalimentación) después de haber obtenido los parámetros del mismo. Las soluciones de las ecuaciones diferenciales

se han obtenido a través del uso de Función S, las cuales son subrutinas vinculadas dinámicamente, que el motor de ejecución de MATLAB puede cargar y ejecutar automáticamente, además de trabajar en conjunto con bloques en el entorno de Simulink, y se ha trabajado con un orden de paso de 1×10^{-8} ya que permite obtener simulaciones estables y más apegadas a la realidad.

En las figuras 2, 3 y 4, se pueden observar los valores que toman las tres variables estudiadas en este sistema desde su estado inicial hasta llegar al equilibrio, que en este caso corresponden a 30.5V, 1.22A y 61V respectivamente para V_{C_f} , I_L y V_C en el sistema promediado. Sin embargo, ya que el convertidor elevador requiere una conmutación para elevar el voltaje de salida, se puede observar un rizo tanto en las variables I_L como V_C , que son las variables del sistema que corresponden al convertidor. En la figura 5 se puede ver la señal de control $u(x)$ generando una conmutación con un ciclo de trabajo constante, y además, se puede analizar que aún al tener esta señal como constante el sistema alcanza el equilibrio en poco tiempo, por lo que se espera obtener mejoras en la disminución de las oscilaciones y estabilidad global del sistema al implementar las leyes de control estudiadas.

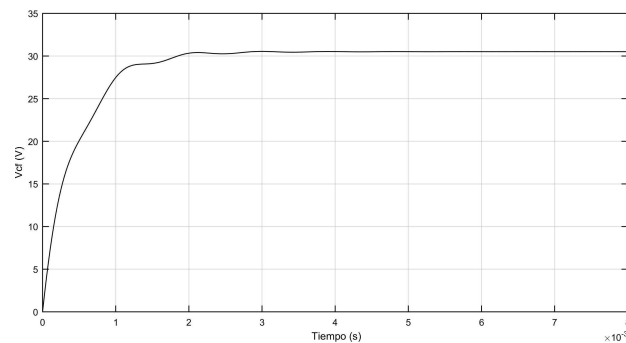


Figura 2: V_{C_f} en lazo abierto.

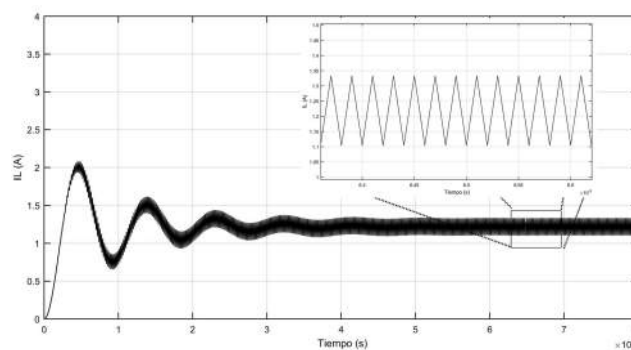
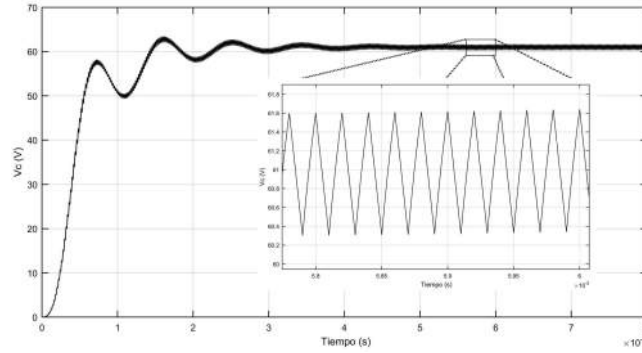
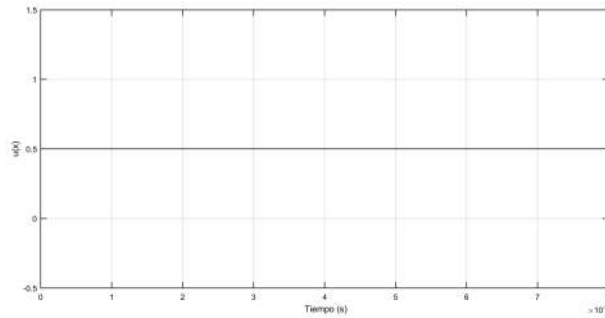


Figura 3: I_L en lazo abierto.

Figura 4: V_C en lazo abierto.Figura 5: Señal de control $u(x)$ constante en lazo abierto.

3.2. Control por moldeo de energía basado en pasividad

La metodología para el diseño de control basado en pasividad se encuentra descrita y desarrollada en la subsección 2.2.1, donde se obtiene la ley de control

$$u(x) = [x_1 - L\dot{x}_{2d} + R_{am}(x_2 - x_{2d})] \frac{1}{x_{3d}}.$$

Para esta ley de control se requiere un menor esfuerzo que al aplicar control por modo deslizante, esto a causa de que el esfuerzo en la ley de control, corresponde directamente al error en el seguimiento de un valor de referencia para tender asintóticamente a la estabilidad. Para la simulación de esta ley de control, se han utilizado los mismos parámetros que en los casos anteriores, y se ha empleado implícitamente la definición de error para garantizar la estabilidad como se desarrolla en la subsección 2.2.2. Los resultados obtenidos para el voltaje de referencia V_{C_f} , la corriente I_L , el voltaje V_C y la señal de control $u(x)$, se muestran en las figuras 6, 7, 8 y 9, respectivamente.

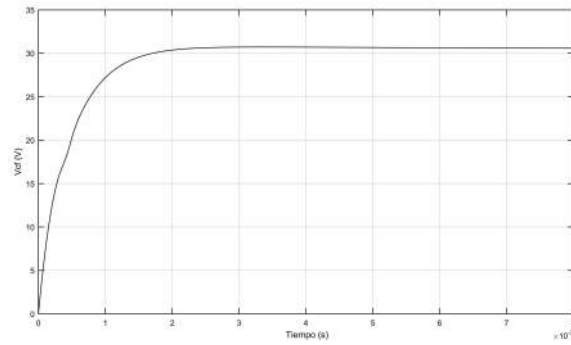


Figura 6: V_{C_f} con control basado en pasividad.

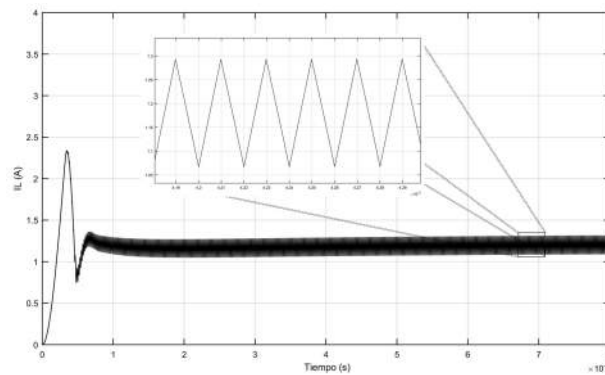


Figura 7: I_L con control basado en pasividad.

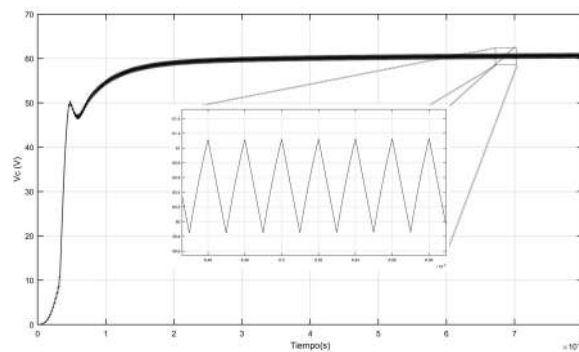


Figura 8: V_C con control basado en pasividad.

3.3. Respuestas ante variaciones en la carga del sistema

La figura 10, muestra el comportamiento de la variable V_C al perturbar dos veces el sistema haciendo un cambio en el valor de la carga, la primera perturbación corresponde al 80 % de la carga inicial, mientras que la segunda perturbación corresponde al 120 % de la carga inicial; lo que se observa en la figura 10 es que se genera un pequeño pico o valle al momento de la perturbación, pero después de un momento regresa al voltaje deseado ($V_d = 61V$), por lo que este control tiene un buen comportamiento para estabilizar el voltaje de salida ante perturbaciones en la carga.

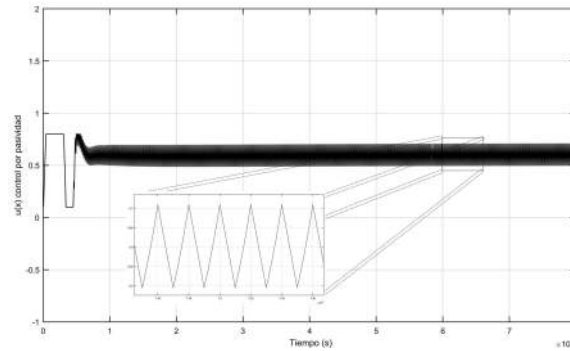


Figura 9: Señal de control $u(x)$ con control basado en pasividad.

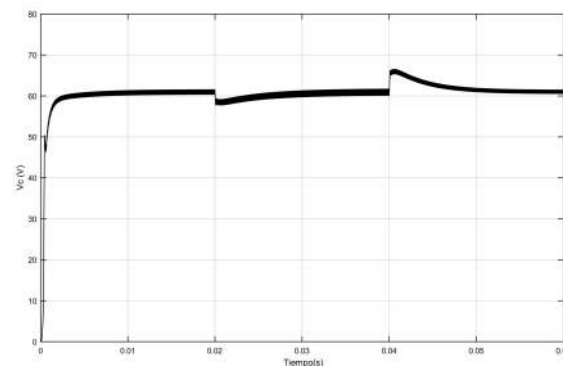


Figura 10: V_C con control basado en pasividad con variación en la carga.

4. Resultados

Para comparar los resultados numéricos con los experimentales se elaboró un prototipo (véase [15] para más detalles del prototipo) y se le aplicó un control basado en pasividad; los resultados obtenidos se muestran en la figura 11 y puede observarse que para la variable V_{C_f} se tiene una perturbación mayor en sus valores, incluso quedan por debajo de los 30V tanto por las variaciones en la carga como en la fuente, mientras que la variable V_C se mantiene en el valor deseado (61V) aún cuando se tienen perturbaciones en la carga. Una diferencia notable con los casos anteriores es que al inicio se observa una pequeña cresta que se mueve con suavidad al valor deseado debido al control. Esta misma situación se observa al crear alteraciones en la carga, se generan pequeños picos que con suavidad se mueven al valor deseado, es decir, el voltaje de salida se mantiene ante perturbaciones en la carga. Cabe destacar que este control depende en gran medida de las mediciones en el sensor de corriente del inductor, por lo que su correcto funcionamiento es indispensable para llegar a estos resultados. Por último, al igual que en los casos anteriores, tanto el comportamiento como la forma de la corriente es el esperado para la primera carga, como se observa en la última gráfica de la figura 11.

5. Conclusión

Los resultados matemáticos, numéricos y reales obtenidos permiten hacer una comparación entre la similitud que tienen estos resultados entre sí y las adaptaciones que se deben tomar en con-

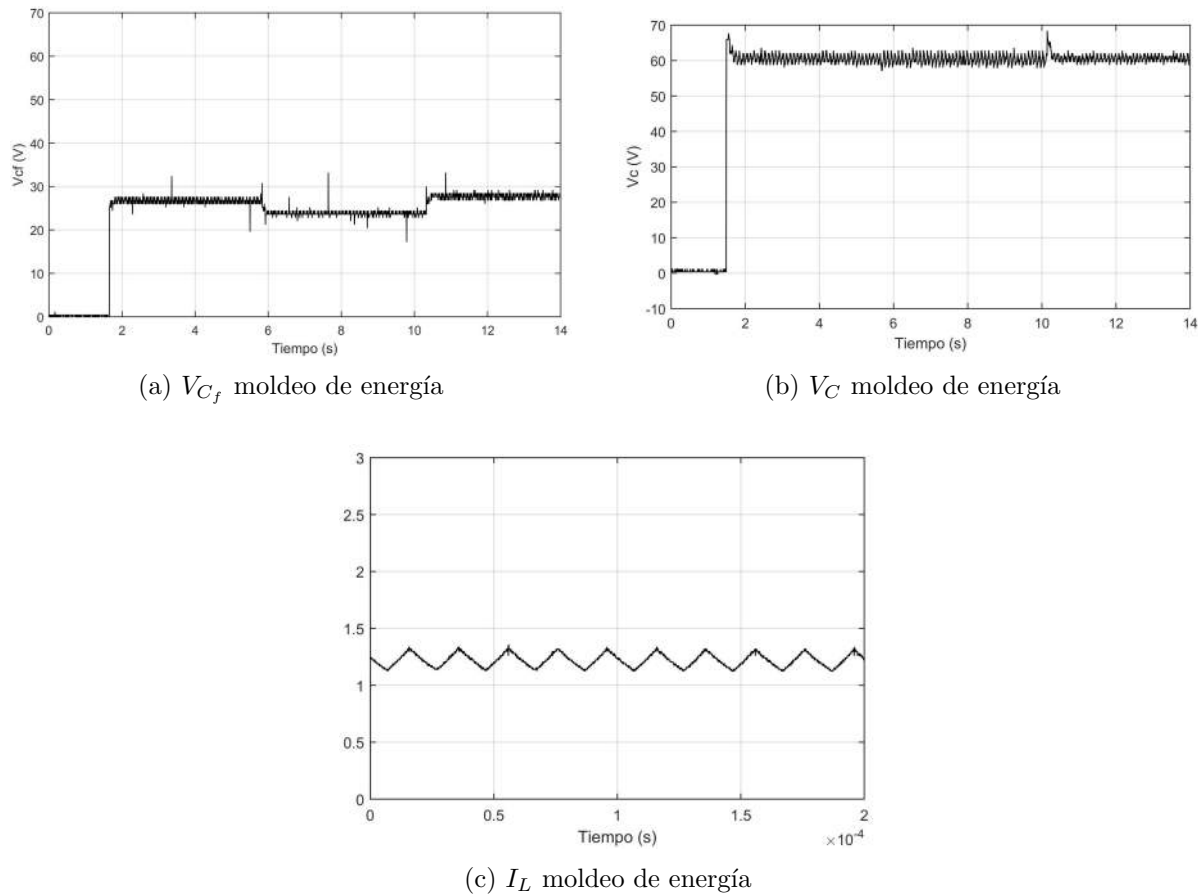


Figura 11: Resultados en moldeo de energía con variaciones en la carga.

sideración para estudiar un sistema real a través de su modelo matemático. La caracterización de la celda solar usando la aproximación lineal de la exponencial permitió obtener resultados numéricos bastante aceptables comparado con los reales. Al comparar el control basado en pasividad con el control por modos deslizantes [1], cuando se tienen variaciones tanto en la fuente como en la carga, se observó que el control basado en pasividad presenta mejores resultados; ya que, a pesar de que el control por modos deslizantes funciona para llegar al estado estable, el punto de equilibrio se mueve al tener las variaciones antes mencionadas, esto debido a que los parámetros I_{sc} y R afectan directamente al equilibrio. Mientras el control basado en pasividad, nos permite mantener el voltaje de salida en un valor estable con base a una referencia ante las perturbaciones en la carga y la fuente.

6. Agradecimientos

El primer autor agradece al CONAHCYT por el apoyo otorgado a través de la Beca para Estudios de Maestría CVU 1079821.

Los autores agradecemos a los revisores las observaciones y comentarios hechas a este trabajo que ayudaron a mejorarlo.

7. Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de intereses

8. Declaratoria de uso de Inteligencia Artificial

Los autores declaran que no han utilizado ninguna aplicación, software, páginas web de inteligencia artificial generativa en la redacción del manuscrito, en el diseño de tablas y figuras, ni en el análisis e interpretación de los datos.

Referencias

- [1] Argote, H. (2019). Análisis de estabilidad y control de un sistema celda convertidor. Tesis de Maestría, UJAT.
- [2] Babaa, S. E., El Murr, G., Mohamed, F., y Pamuri, S. (2018). Overview of boost converters for photovoltaic systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(4), 16-31.
- [3] Elshaer, M., Mohamed, A., y Mohammed, O. (2010, November). Smart optimal control of DC-DC boost converter in PV systems. In 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T & D-LA) (pp. 403-410). IEEE.
- [4] Erickson, R. W., y Maksimovic, D. (2007). Fundamentals of power electronics. Springer Science & Business Media.
- [5] Fraas, L. y L. Partain (2010). Solar Cells and Their Applications. Wiley, New Jersey.
- [6] H. Sira-Ramirez y R. Ortega (1995). Passivity-based controllers for the stabilization of DC-to-DC power converters, Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, 1995, pp. 3471-3476 vol.4.
- [7] Kumari, R., Pyakurel, P., Bhattacharya, D., Rai, B., Pandit, M., y Sherpa, K. S. (2023). Design of smart autonomous solar panel with cascaded SEPIC-boost converter for high voltage renewable applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 1066-1078.
- [8] Olmos, J.A. (2012). Análisis de Técnicas de Control por Moldeo de Energía Basado en Pasividad Aplicadas en Convertidores Tipo Elevador Entrelazados para su Uso en Sistemas de Alimentación Distribuida. Tesis Doctoral, CENIDET.
- [9] PROMÉXICO (2017). La Industria Solar Fotovoltaica y Fototérmica en México.
- [10] Perko, L. (2013). Differential equations and dynamical systems (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- [11] Rajavel, A., y Rathina Prabha, N. (2021). Fuzzy logic controller-based boost and buck-boost converter for maximum power point tracking in solar system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(4), 945-957.
- [12] Sahu, B. , P. K. Jena y B. Rathore (2016). Design and Implementation of Inverter for PV array feeding AC Grid. *International Journal of Engineering Development and Research*, 4(3), 862-869.

- [13] Secretaría de Energía (2018). Prospectiva de Energías renovables 2018-2032 (1).
- [14] Sutikno, T., Samosir, A. S., Aprilianto, R. A., Purnama, H. S., Arsadiando, W., y Padmanaban, S. (2023). Advanced DC-DC converter topologies for solar energy harvesting applications: a review. *Clean Energy*, 7(3), 555-570.
- [15] Vidal, J.R. (2025) Comparación del efecto de control en un sistema celda convertidor. Tesis de Maestría, UJAT.
- [16] Xiao, W., N. Ozog y W. G. Dunford (2007). Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54(3), 1696-1704.
- [17] Yang, X. (2002). Generalized form of Hurwitz–Routh criterion and Hopf bifurcation of higher order. *Applied Mathematics Letters*, 15(5), 615-621.