

EFFECTO DEL DERRAME PERMANENTE DE PETRÓLEO EN UN SUELO AGRÍCOLA EN TIHUATLÁN, VERACRUZ, MÉXICO

Effect of a permanent oil spillage on agricultural soil in Tihuatlán, Veracruz, Mexico

Israel TOTO-GOXCON¹, Rocío RODRÍGUEZ CABRERA¹, Mario Abraham SALAS AQUINO¹,
José Rafael PAREDES JÁCOME² y Rebeca ROJAS-RONQUILLO^{1*}

¹ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Región Poza Rica-Tuxpan, Universidad Veracruzana, km 7.5 carretera Tuxpan-Tampico, Col. Universitaria, 92860 Tuxpan, Veracruz, México.

² Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Periférico Raúl López Sánchez y Carretera Santa Fe s/n, 27010 Torreón, Coahuila, México.

*Autor para correspondencia: rebrojas@uv.mx

(Recibido: mayo de 2024; aceptado: enero de 2025)

Palabras clave: hidrocarburos totales de petróleo, propiedades físicas y químicas del suelo, germinación, fertilidad del suelo.

RESUMEN

El suelo es un ecosistema complejo con características y propiedades específicas que sirven de soporte para la agricultura. La contaminación de este medio por hidrocarburos de petróleo afecta sus cualidades y la producción agrícola. En este trabajo se tomaron muestras de un suelo agrícola que ha estado sometido al derrame constante de hidrocarburos durante más de 40 años. Se determinó la concentración de hidrocarburos totales de petróleo en puntos a distintas distancias del origen del derrame. Las propiedades físicas y químicas del suelo analizadas fueron textura, capacidad de campo, densidad real, densidad aparente, salinidad, pH, capacidad de intercambio catiónico, porosidad, conductividad eléctrica, materia orgánica y nitrógeno. Con las mismas muestras de suelo se realizaron ensayos ex situ e in situ de germinación y crecimiento de cultivos de *Arachis hypogaea* (cacahuete), *Zea mays* (maíz) y *Cucurbita argyrosperma* (pijón). Se encontraron correlaciones entre la concentración de hidrocarburos (127 120 a 151 474 mg/kg de hidrocarburos totales de petróleo) y cinco de los parámetros medidos (materia orgánica, porosidad, densidad real, capacidad de campo y contenido de arcilla). También se encontró un efecto negativo en la germinación y crecimiento a 30 días de cultivo, de forma más pronunciada en los cultivos de cacahuete y maíz. Se propone que el cultivo de pijón presenta resistencia a la toxicidad de los hidrocarburos en concentraciones de hasta 127 120 mg/kg de hidrocarburos totales de petróleo.

Key words: total petroleum hydrocarbons, soil physical and chemical properties, germination, soil fertility.

ABSTRACT

Soil is a complex ecosystem with specific characteristics and properties that support agriculture. The pollution of this environment by petroleum hydrocarbons affects its qualities and agricultural production. This work took samples from an agricultural

soil that has been subjected to constant hydrocarbon spillage for over 40 years. The concentration of total petroleum hydrocarbons at points at different distances from the source of the spill was determined. The physical and chemical properties of soil were texture, field capacity, real density, bulk density, salinity, pH, cation exchange capacity, porosity, electrical conductivity, organic matter, and nitrogen. With the same soil samples, ex-situ and in situ tests were carried out on the germination and growth of crops of *Arachis hypogaea* (peanut), *Zea mays* (corn), and *Cucurbita argyrosperma* (pipian). Correlations were found between the concentration of hydrocarbons (127 120 to 151 474 mg/kg of total petroleum hydrocarbons) and five of the parameters measured (organic matter, porosity, real density, field capacity, and clay content). A negative effect on germination and growth was also observed at 30 days of cultivation, more pronounced in peanut and maize crops. It is proposed that the pipian crop exhibits resistance to hydrocarbon toxicity at concentrations up to 127 120 mg/kg of total petroleum hydrocarbons.

INTRODUCCIÓN

El suelo puede describirse por sus características físicas, químicas y biológicas, que hacen de éste un recurso sea muy complejo y dinámico. Cada una de estas características pueden verse afectadas por factores como el clima, el relieve, la roca madre, el tiempo, los organismos y la actividad antrópica (Minasny y Hartemink 2011). Un claro ejemplo de este último factor es la dispersión de contaminantes como los hidrocarburos. Si bien es común escuchar de derrames originados en tuberías o instalaciones de la industria petrolera, la contaminación del suelo con hidrocarburos puede ocurrir por derrames naturales, es decir, que son liberados por formaciones geológicas subterráneas hasta la superficie de la tierra, sin la intervención humana (Barois et al. 2018).

Un derrame de hidrocarburos en suelo agrícola puede tener efectos negativos en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, como textura, densidad aparente (DA), densidad real (DR), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, materia orgánica (MO) y actividad microbiana, además de características como la porosidad y la aireación del suelo (Álvarez-Jiménez et al. 2019, Ahmad et al. 2020, Ali et al. 2020, Ergozhin et al. 2020). Todos estos cambios pueden disminuir la fertilidad de los suelos (Abdul-Ameer 2019).

Debido a que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden variar en cada sitio, las consecuencias de un derrame de hidrocarburos en un suelo agrícola no pueden generalizarse. La composición, extensión y dispersión del contaminante también afectarán de forma diferente. En cada caso será necesario realizar un diagnóstico para entender la magnitud de los efectos negativos y las posibles técnicas de remediación (Morales-Bautista et al. 2019).

El efecto de los hidrocarburos sobre la fertilidad del suelo puede variar no sólo por las características de éste, sino también por las especies vegetales que se consideren cultivar. En este sentido, el uso de semillas es la base para evaluar el efecto letal o toxicidad ante los derrames por hidrocarburos (Pernía et al. 2018). Se conocen plantas que no sólo son tolerantes a los hidrocarburos, sino que cuentan con la capacidad de absorberlos y, en algunos casos, en conjunto con la rizobiota, tienen la capacidad de metabolizar y extraer del suelo algunos de sus compuestos. Por ejemplo, se ha señalado que el maíz (*Zea mays*) y la calabaza (*Cucurbita pepo*) son especies que pueden mitigar la toxicidad de los hidrocarburos (Hernández et al. 2022, Ortega-Ramírez et al. 2023).

En la localidad de Poza Azul de los Reyes, del municipio de Tihuatlán, Veracruz, México, existe un derrame de hidrocarburos natural. No hay alguna tubería cercana de la industria petrolera que pudiera explicar la constante emisión del contaminante, el cual de acuerdo con los propietarios del predio, ha sido persistente durante más de cuatro décadas. Recientemente (en 2023) se hizo una solicitud a la Agencia de Seguridad de Energía y Ambiente (ASEA) del gobierno de México para ubicar este derrame con las coordenadas correspondientes (20° 37' 55.50" N y -97° 40' 05.34" W). La respuesta a esta solicitud fue que no existe información alguna sobre las características del derrame ni en el mapa de la Comisión Nacional de Hidrocarburos. Sin embargo, al visitar el lugar el derrame es claramente visible, ya que está expuesto a cielo abierto y se extiende sobre una parcela de uso agrícola en la que se cultiva, principalmente, maíz (*Z. mays*), naranja (*Citrus sinensis*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*).

Por otra parte, en relación con posibles afectaciones a la salud, no existen reportes de problemas

graves, ya que el derrame se ubica a una distancia de 3 km de la población más cercana. Es importante destacar que existe contaminación de un cuerpo de agua intermitente de orden 1 y nivel 3. En época de lluvias el derrame se expande hacia este cuerpo de agua a 270 m del sitio del derrame a causa de la pendiente del lugar en que se ubica (155.56°). Este suelo contaminado no ha sido documentado ni estudiado previamente. Además, la orografía del lugar promueve la dispersión del contaminante. Debido a lo anterior, en este trabajo se evaluó el impacto del derrame persistente de hidrocarburos sobre la fertilidad del suelo destinado a fines agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de estudio se encuentra en la localidad Poza Azul de los Reyes en el municipio de Tihuatlán, Veracruz, México, en las coordenadas $20^\circ 37' 55.50''$ N y $97^\circ 40' 05.34''$ W, a 127 msnm (**Fig. 1**) y con una

pendiente de vertimiento de 155.56° . La actividad económica principal es la agricultura de naranja (*C. sinensis*). El clima es cálido y húmedo con lluvias en verano, con una temperatura promedio de $24-26^\circ\text{C}$. El rango de precipitación pluvial es de 1100-1300 mm (CEIEG 2023).

El trabajo consistió en un muestreo del suelo del área de estudio para determinar el contenido de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) y las características físicas y químicas del suelo: textura, capacidad de campo (CC), DR, DA, salinidad, pH, CIC, porosidad, CE, MO y nitrógeno. Asimismo, se recolectaron muestras de suelo para realizar ensayos ex situ e in situ de germinación y crecimiento de tres cultivos: *Arachis hypogaea* (cacaahuete), *Z. mays* (maíz) y *Cucurbita argyrosperma* (pipián).

Muestreo

Se tomaron muestras de suelo del sitio de estudio en tres puntos contaminados (A, B y C), siguiendo la dirección del derrame observable a simple vista por la

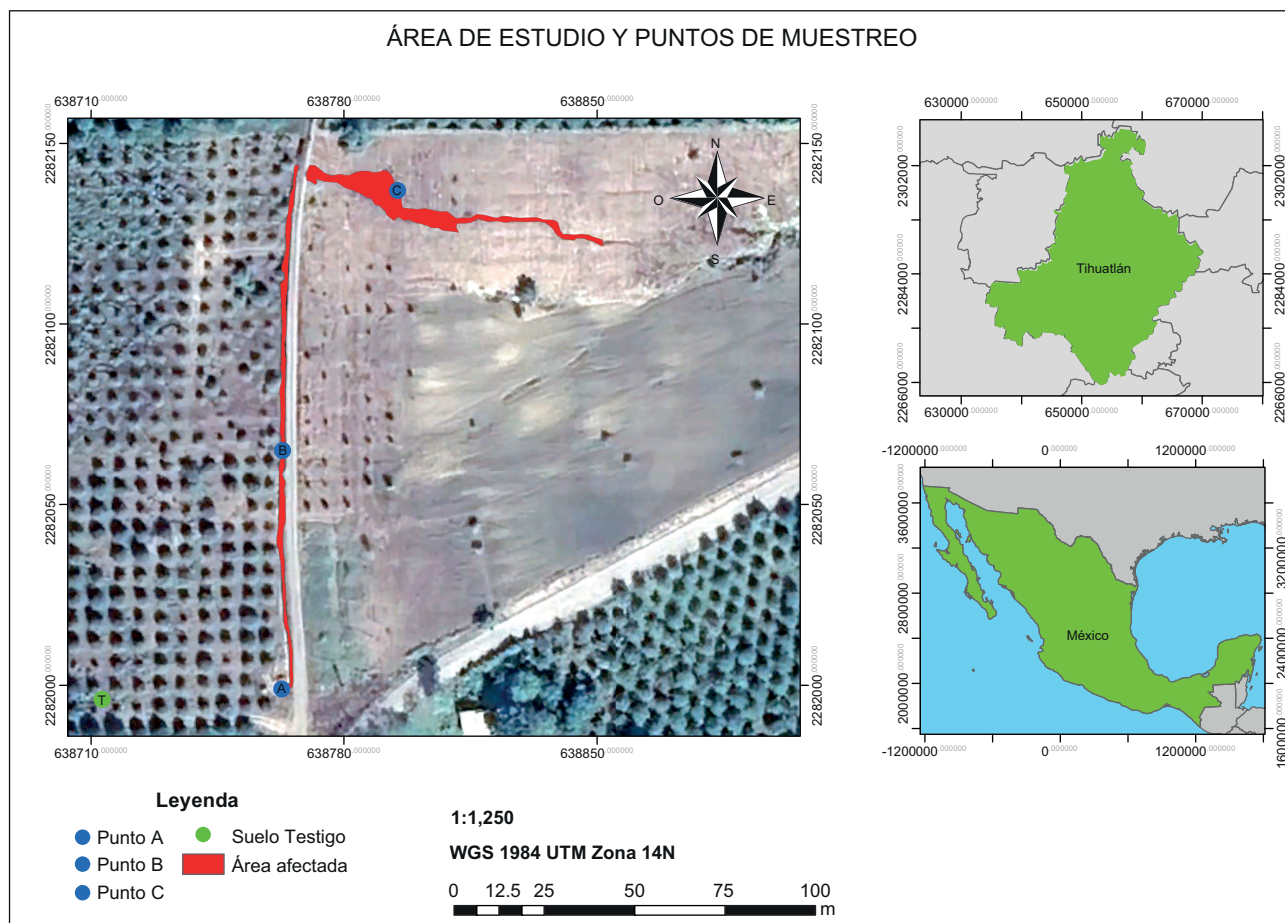


Fig. 1. Localización geográfica y puntos de muestreo del área de estudio: Poza Azul de los Reyes, Tihuatlán, Veracruz, México.

pendiente (puntos A y B al sur y C al oeste), y en un punto de mayor elevación hacia el sur a 50 m lineales del punto del derrame, como testigo (T) (**Fig. 1**). Se tomaron muestras de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm de profundidad en los cuatro puntos (**Cuadro I**).

El muestreo del suelo para medir la fertilidad se realizó de acuerdo con la metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT 2002). Se seleccionaron submuestras y se prepararon muestras compuestas de cada punto del suelo contaminado. Las muestras de suelo se obtuvieron con una pala recta y en cada punto se limpió esta herramienta para evitar contaminación cruzada. Inmediatamente se homogeneizaron las muestras para cada tratamiento hasta obtener 1.5 kg que fueron almacenados en bolsas de plástico transparente de 2 kg y etiquetados con sus respectivos datos. Todas las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente (35 °C) durante una semana en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Veracruzana. Después se molieron, se cribaron manualmente y se tamizaron con una malla de 2 mm para ser utilizadas en la determinación de parámetros físicos y químicos, así como en los ensayos de germinación y crecimiento de cultivos.

Las muestras para la determinación de la concentración de HTP se obtuvieron de acuerdo con la metodología propuesta en la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 (SEMARNAT 2013). En cada punto de suelo contaminado y a las profundidades ya mencionadas, se recolectaron 500

g de suelo. Posteriormente se lavó el material de muestreo de cada punto, se etiquetó y se preservó en frascos de vidrio de boca ancha a 4 °C.

Cuantificación de hidrocarburos totales de petróleo

Se realizó la extracción de HTP con un equipo Soxhlet (Tecni Lab, Vari Heat, México) usando el Método 3540C de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA 2015). Se colocó en el equipo Soxhlet un cartucho de celulosa con 5 g de muestra de suelo contaminado. Posteriormente en un matraz de bola se agregaron 400 mL de hexano. Enseguida se mantuvo en reflujo por 8 h (modificación de Hernández-García et al. [2016]). Posteriormente se evaporó el disolvente en una estufa durante 24 h y finalmente se calculó la concentración de los HTP usando la ecuación 1:

$$HTP = \frac{(R_B - R_A) \cdot (F_C)}{P \cdot F_H} \quad (1)$$

donde *HTP* son los hidrocarburos totales de petróleo (mg/Kg ss), R_A es el peso (mg) del recipiente vacío a peso constante, R_B el peso (mg) del recipiente con el extracto orgánico concentrado, P cantidad de suelo extraído (g), F_H el factor de corrección de humedad [$1 - (\% \text{ humedad}/100)$] y F_C el factor de corrección para transformar a kg de ss (1000).

Parámetros físicos y químicos

Se analizaron los siguientes parámetros: textura, CC, DR, DA, salinidad, pH, CIC, porosidad, CE,

CUADRO I. DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DEL MUESTREO Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO CONTAMINADO Y TESTIGO (T).

Características	Suelo testigo	Punto A	Punto B	Punto C
Profundidad	0-30 cm (T1) 30-60 cm (T2)	0-30 cm (A1) 30-60 cm (A2)	0-30 cm (B1) 30-60 cm (B2)	0-30 cm (C1) 30-60 cm (C2)
Distancia al origen del derrame	50 m	2 m	67 m	140 m
Altura con relación al derrame	4 m	0 m	-1 m	-5 m
Uso del suelo	Cultivos de naranja	Cultivos de cítricos (naranja)	Cultivos de cítricos	Cultivo de naranja y maíz
Coordenadas	20°37'55.43" N y -97°40'07.07" W	20°37'55.50" N y -97°40'05.34 W	20°37'57.65" N y -97°40'05.33 W	20°38'00.00" N y -97°40'04.22" W
Contaminación observable por hidrocarburos	Nula	Severa (contaminación lineal: punto inicial)	Severa (contaminación lineal: punto medio)	Media (contaminación lineal con pendiente: punto final)

MO, nitrógeno, de acuerdo con los procedimientos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT 2002). La medición de los parámetros se realizó por duplicado.

Ensayo de germinación y crecimiento ex situ e in situ

El ensayo experimental ex situ para evaluar el efecto de los HTP sobre la germinación y el crecimiento se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Veracruzana Región Poza Rica-Tuxpan. Consistió en rellenar nueve cajas de madera de 30 × 50 cm con 10 kg de suelo, tres de ellas con suelo testigo y seis con suelo contaminado a sus respectivas concentraciones (**Cuadro II**). Antes de la siembra, el suelo se dejó en reposo por siete días (Marín-Velásquez 2016). En cada caja se plantaron 10 semillas de cultivos nativos de la región: pipián (*C. argyrosperma*), maíz (*Z. mays*) y cacahuete (*A. hypogaea*), en un sistema de milpa intercalada. Las plantas se regaron cada tercer día, de acuerdo con los requerimientos necesarios para cada especie. Las variables que se consideraron para evaluar el crecimiento de las plantas fueron: tiempo de germinación

(días), porcentaje de germinación y altura de la planta a los días 10, 20 y 30 en el ensayo ex situ.

El diseño para el ensayo in situ consistió en seleccionar los puntos A, B y C (**Cuadro I**). En cada sitio se trazaron dos líneas paralelas de acuerdo con la distancia para cada especie. Para la primera línea, a 0 cm (dentro del área contaminada), se hicieron perforaciones de 4 cm y se sembraron 10 semillas de pipián (*C. argyrosperma*), maíz (*Z. mays*) y cacahuete (*A. hypogaea*); en la segunda línea, a 30 cm de distancia del derrame, se repitió el mismo procedimiento que en la primera línea, igual que en el suelo no contaminado ubicado a 50 m del área contaminada. El sistema de producción aplicado fue el de agricultura de temporal que depende de las condiciones climáticas y disponibilidad del agua de lluvia. Este sistema se basó en el modelo que los agricultores de la región aplican. Las variables que se registraron fueron el porcentaje de germinación y la altura, que se midieron a los 7, 14, 21, 28 y 35 días.

Análisis estadístico

Se evaluó la normalidad y homogeneidad de varianzas de todas las variables cuantitativas observadas.

CUADRO II. RESULTADOS DE CONCENTRACIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (HTP) Y PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS RECUPERADOS DE LA LOCALIDAD POZA AZUL DEL MUNICIPIO TIHUATLÁN, VERACRUZ, MÉXICO.

Propiedad	Testigo		Punto A		Punto B		Punto C	
Profundidad	0-30	30-60	0-30	30-60	0-30	30-60	0-30	30-60
HTP (mg/kg)	1 196	----	127 120	42 347	151 474	69 808	33 135	17 116
Arena (%)	10.54	11.88	8.60	7.60	61.88	13.88	20.60	18.60
Arcilla (%)	57.40	58.12	53.40	53.40	20.12	48.12	49.40	51.40
Limos (%)	32	30	38	39	18	38	30	30
Textura	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Franco arenosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
pH	6.8 ± 0.2	7.1 ± 0.1	7.2 ± 0.01	7.2 ± 0.05	7.3 ± 0.03	7.4 ± 0.06	7.3 ± 0.06	7.3 ± 0.01
Densidad aparente (g/cm ³)	1.35 ± 0.03	1.33 ± 0.0	1.29 ± 0.0	1.33 ± 0.0	1.24 ± 0.02	1.33 ± 0.0	1.22 ± 0.02	1.29 ± 0.0
Densidad real (g/cm ³)	2.25 ± 0.35	2.22 ± 0.0	2.02 ± 0.29	2.22 ± 0.0	1.29 ± 0.06	2.11 ± 0.16	2.22 ± 0.0	2.36 ± 0.20
Porosidad (%)	40.06	40	36.13	40	4.2	36.84	44.89	45.35
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.20 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.19 ± 0.00	0.22 ± 0.00	0.22 ± 0.00	0.21 ± 0.00	0.21 ± 0.00
Salinidad (CE dS/m)	0.18 ± 0.01	0.13 ± 0.00	0.17 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.20 ± 0.00	0.20 ± 0.02	0.19 ± 0.00	0.19 ± 0.02
Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)/kg)	1 ± 0.00	2 ± 0.00	1.25 ± 0.35	1 ± 0.00	1 ± 0.00	1 ± 0.00	1 ± 0.00	1 ± 0.00
Capacidad de campo (%)	53.6 ± 3.5	61.4 ± 12.6	53.9 ± 2.3	52.2 ± 0.7	10.7 ± 4.1	56.9 ± 3.4	63.8 ± 0.3	63.4 ± 2.9
Materia orgánica (%)	2.3 ± 0.04	0.9 ± 0.04	5.9 ± 0.04	4.0 ± 0.04	11.8 ± 0.0	7.4 ± 0.29	7.8 ± 0.04	5.1 ± 0.0
Nitrógeno (%)	0.11 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.29 ± 0.00	0.20 ± 0.00	0.59 ± 0.00	0.37 ± 0.01	0.39 ± 0.00	0.26 ± 0.00

Todas las variables para los parámetros físicos y químicos y altura, a 10 y 20 días, presentaron una distribución normal demostrada por medio de una prueba Kolmogorov-Smirnov ($p > 0.05$), y homogeneidad de varianzas usando la prueba de Levene ($p > 0.05$). Posteriormente se analizaron por medio de una correlación de Pearson y un análisis de varianza para la diferencia de medias ($p < 0.05$). Las variables con diferencias se analizaron usando una prueba post hoc de Tukey ($p < 0.05$). En el caso de las variables para el estudio de la fertilidad, tanto la germinación como el tiempo y la altura a 30 días no fueron normales, por lo que se realizó una prueba de Kruskal Wallis para comparar la altura de las plantas ($p < 0.05$), así como un análisis de frecuencias (χ^2) para la germinación del ensayo in situ ($p < 0.05$). Para todo lo anterior se usó el programa JASP (v. 0.17.1.0).

RESULTADOS

Parámetros físicos y químicos

La cuantificación de los HTP para cada punto se observa en el **cuadro II**. De acuerdo con los valores de referencia de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 (SEMARNAT 2013), todas las muestras de los puntos A, B y C superaron el límite máximo permitido, con excepción del punto testigo. Estos resultados corresponden al estado visible del suelo en el lugar, que presenta manchas de aceite y desprende un fuerte olor a petróleo.

Los parámetros físicos y químicos (**Cuadro II y Fig. 2**) presentaron valores similares entre los diferentes puntos. Se trata de un suelo arcilloso con pH neutro que va de 6.8 a 7.3 ($p > 0.05$). La DA tiene un comportamiento similar; por el contrario, la DR mostró disminución en la muestra con el mayor contenido de HTP, lo cual se esperaba ($p = 0.009$).

Esto concuerda con lo indicado por Martínez y López (2001) y Álvarez-Jiménez et al. (2019).

De acuerdo con Álvarez-Jiménez et al. (2019), el porcentaje de porosidad es medianamente reducido en los puntos A (0-30 cm) y B (30-60 cm), y notablemente reducido en el punto B (0-30 cm). Los suelos con menor contaminación presentaron mayor porosidad, en concordancia con la correlación negativa entre este parámetro (**Fig. 2**) y la concentración de HTP ($p = 0.024$). La CC también se vio afectada por el derrame, mostrando valores menores a concentraciones altas de HTP ($p = 0.038$). Algunos autores como Martínez y López (2001) y Álvarez-Jiménez et al. (2019), también observaron este efecto.

La MO fue el único parámetro que se correlacionó positivamente con la concentración de HTP ($p = 0.022$), un resultado común en determinaciones de este tipo, ya que la determinación se realiza al medir el carbono oxidable del suelo.

La determinación de parámetros como CE, salinidad y CIC están relacionados entre sí; por tanto, mostraron comportamientos similares con un patrón estable en todos los suelos observados. En el caso particular de la CIC todos los suelos presentan valores muy bajos, lo que indica un déficit de cationes minerales primarios, es decir, suelos poco fértiles, con baja disponibilidad de nutrientes (Álvarez-Jiménez et al. 2019). El efecto en la CIC puede ser muy variable dependiendo del tipo de suelo, siendo mayor el valor de este parámetro en suelos orgánicos y suelos arcillosos o limosos (Adams et al. 2008). La reducción de la CIC se provoca cuando los hidrocarburos se incorporan a las arcillas. Por ejemplo, en suelos con gran contenido de arcilla expandible el efecto negativo en la fertilidad puede ser menor (Álvarez-Coronel 2021). De acuerdo con la normatividad, los valores obtenidos de nitrógeno total se interpretan como muy bajos, lo que coincide con la CIC, indicando

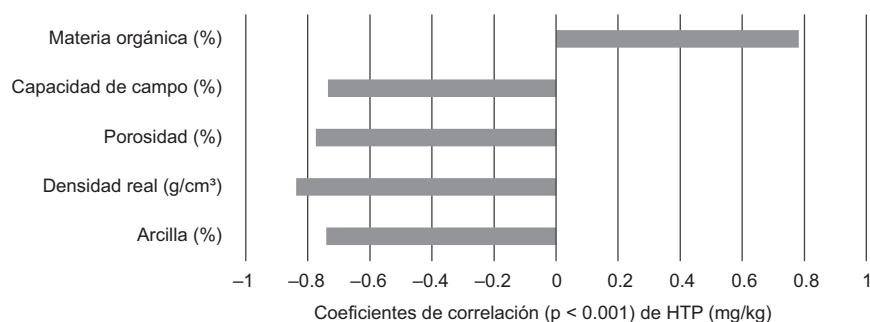


Fig. 2. Parámetros físicos y químicos correlacionados con la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (HTP).

nuevamente la presencia de suelos poco nutritivos (SEMARNAT 2002).

Ensayo de fertilidad ex situ

El ensayo de fertilidad ex situ se realizó observando la germinación de las semillas de maíz, pipián y cacahuate en los suelos contaminados (**Fig. 3**). Las diferentes concentraciones de HTP en el suelo afectaron el tiempo de germinación. En general, todas las semillas presentaron un retraso en la germinación a concentraciones muy altas de HTP ($p < 0.001$). Las semillas de pipián mostraron mayor resistencia: germinaron en seis días y sólo aumentó el tiempo de germinación a 10 días en el suelo con la mayor concentración de HTP. Las semillas de maíz tuvieron un comportamiento similar, al elevarse el tiempo de germinación de 4 a 10 días en el suelo con valores superiores a 42 347 mg/kg de HTP. Las semillas de cacahuate fueron las que más tardaron en germinar

(20 días, $p < 0.001$) en el punto más contaminado.

El porcentaje de germinación de los tres cultivos tuvo un comportamiento similar (**Fig. 4**), ya que disminuyó por las altas concentraciones del contaminante en los tres cultivos ($p < 0.001$). El pipián fue el menos afectado ($p < 0.001$) en comparación con el maíz y el cacahuate, no así para el segundo punto de concentración de HTP, donde se observó alrededor del 50 % de germinación en 10 días.

Se determinó también la altura de las plantas (**Fig. 5**), encontrándose que a los 10 días aquellas que fueron cultivadas en suelos con menor concentración de HTP alcanzaron mayor altura en comparación con las que crecieron en suelo contaminado ($p < 0.001$) y 20 días ($p < 0.001$), en los tres cultivos. El cacahuate fue el único cultivo que se mantuvo viable hasta el día 30; aunque las altas concentraciones del contaminante afectaron su altura máxima, presentó crecimiento constante en todos los suelos ($p > 0.05$).

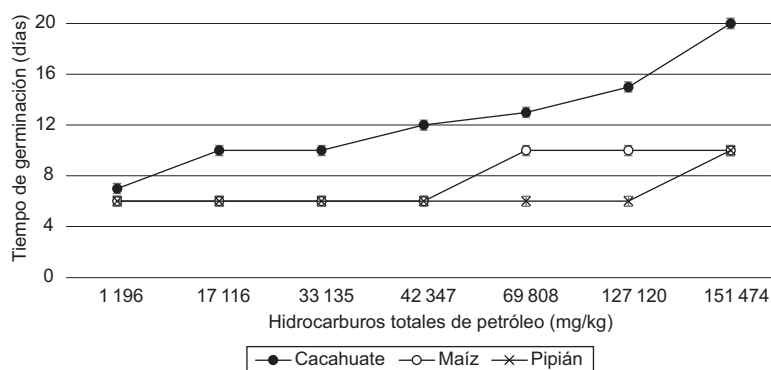


Fig. 3. Tiempo de germinación en días de las semillas de cacahuate, maíz y pipián en suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en distintas concentraciones (ensayo ex situ).

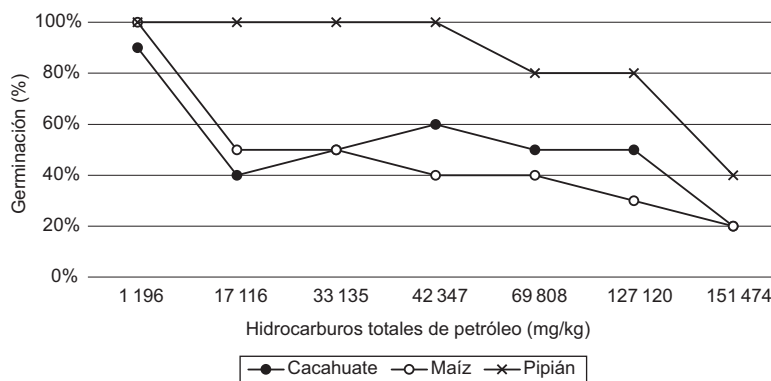


Fig. 4. Porcentaje de germinación de las semillas de cacahuate, maíz y pipián en suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en distintas concentraciones (ensayo ex situ).

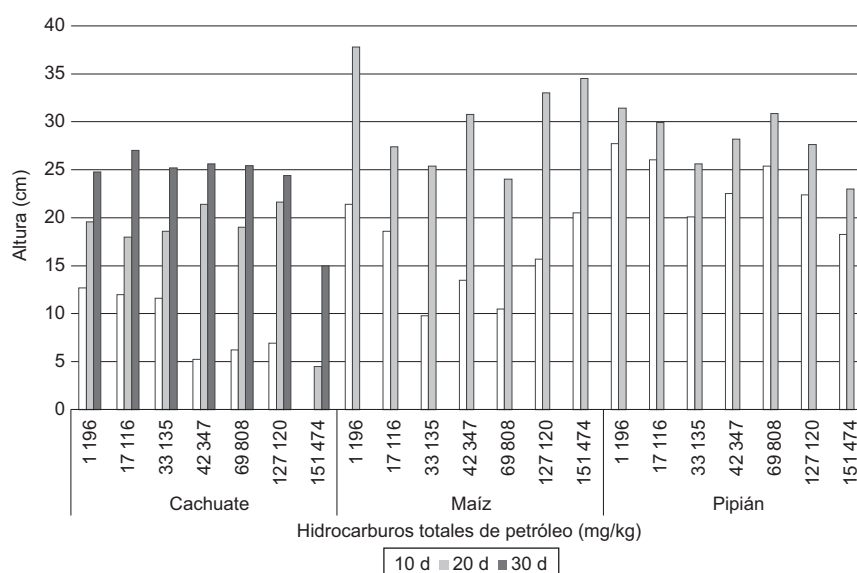


Fig. 5. Crecimiento (cm) de los cultivos de cacahuete, maíz y pipián a los 10, 20 y 30 días posteriores a la germinación, en suelos contaminados con distintas concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo (HTP; mg/kg) (ensayo ex situ). A los 30 días para el maíz y el pipián la totalidad de las plantas estaban muertas.

Ensayo de fertilidad in situ

Para el ensayo in situ se determinaron los mismos parámetros que para el ensayo ex situ. El tiempo de germinación de los tres cultivos (**Fig. 6**) presentó mayor variabilidad, lo cual es predecible, ya que no se cuenta con ningún control sobre las variables climáticas y las interacciones ecológicas del entorno. El maíz germinó únicamente en el sitio testigo (10.5 ± 7.8 d), el cacahuete sólo en el punto C y C' ($14.5 \pm$

5 d), lugar de menor concentración de hidrocarburos, y se observó nuevamente que el pipián tuvo aparentemente mayor resistencia, en comparación con los otros cultivos, alcanzando un promedio general de 10.5 ± 5.9 d de germinación en cinco puntos. Dado el bajo número de germinación, una comparación estadística sería poco confiable.

Los puntos ubicados a 30 cm del flujo del hidrocarburo con menor contaminación (A', B' y C'),

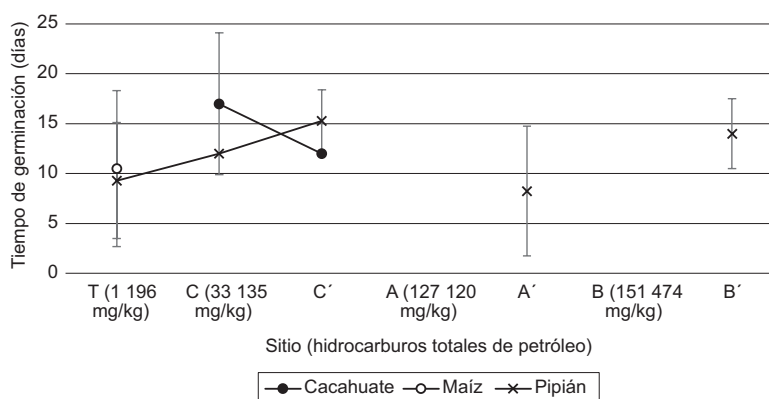


Fig. 6. Tiempo de germinación en días para las semillas de cacahuete, maíz y pipián en el sitio contaminado con hidrocarburos en los distintos puntos muestreados. T: suelo testigo; A: suelo contaminado en el punto A; B: suelo contaminado en el punto B, y C: suelo contaminado en el punto C. Los sitios marcados con comilla (e.g., A') indican la siembra realizada en una línea a 30 cm del punto original.

mostraron mayor frecuencia de germinación ($p < 0.001$) (**Fig. 7**). A la distancia de 30 cm fuera del flujo del derrame, el terreno presenta menor contaminación. El porcentaje de germinación de maíz y de cacahuate fue del 20 % en todos los casos, observándose germinación. Por su parte, el pipián alcanzó hasta 70 % de germinación y tuvo una mayor

frecuencia de germinación ($p < 0.001$) en el suelo de menor contaminación.

Se midió la altura de las plantas durante los 35 días (**Fig. 8**). El maíz sobrevivió hasta el día 21, el pipián del punto C sobrevivió hasta el día 28 y el resto de los cultivos se mantuvieron viables los 35 días. El pipián mantuvo un crecimiento constante a lo largo

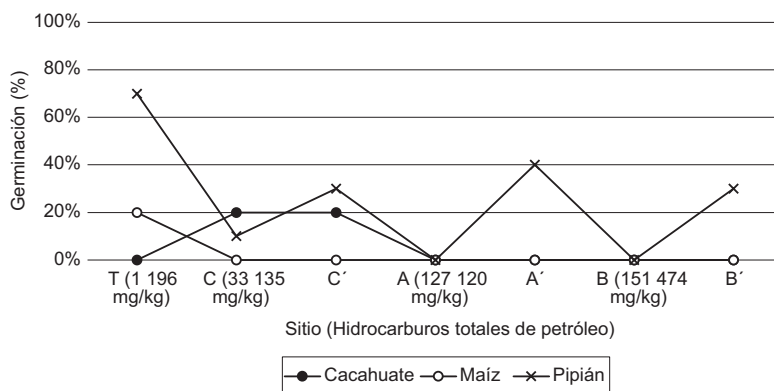


Fig. 7. Porcentaje de germinación de las semillas de cacahuate, maíz y pipián en el sitio contaminado con hidrocarburos en los distintos puntos muestreados. T: suelo testigo; A: suelo contaminado en el punto A; B: suelo contaminado en el punto B, y C: suelo contaminado en el punto C. Los sitios marcados con comilla (e.g., A') indican siembra realizada en una línea a 30 cm del punto original.

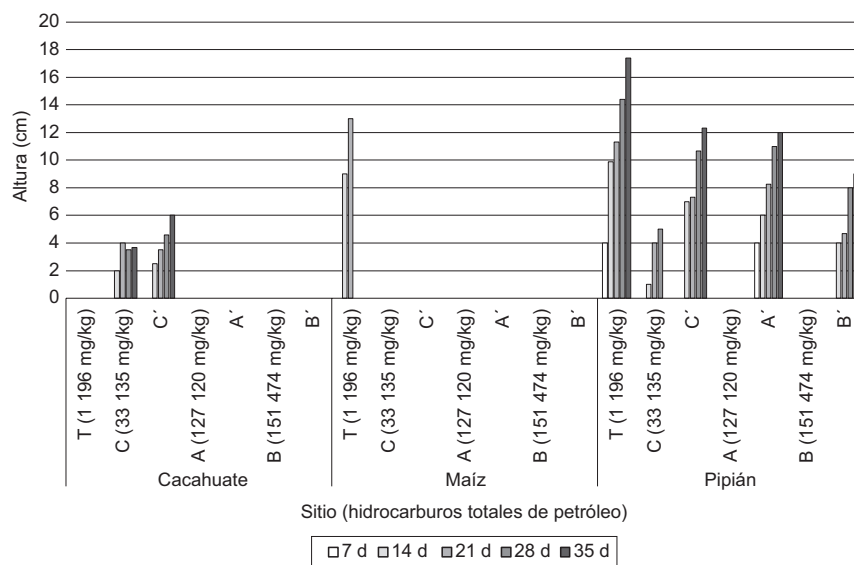


Fig. 8. Crecimiento (cm) de los cultivos de cacahuate, maíz y pipián a los 7, 14, 21, 28 y 35 días posteriores a la germinación, en el sitio contaminado con hidrocarburos en los distintos puntos muestreados. T: suelo testigo; A: suelo contaminado en el punto A; B: suelo contaminado en el punto B, y C: suelo contaminado en el punto C. Los sitios marcados con comilla (e.g., A') indican siembra realizada en una línea a 30 cm del punto original.

de los días de observación, mientras que el cacahuete mostró menor crecimiento. Debido al bajo número de plantas que lograron germinar, no fue posible realizar un análisis más extenso de estos valores.

En general los resultados del ensayo *in situ* demuestran que en los puntos altamente contaminados A y B el suelo se deterioró claramente, volviéndose infértil.

DISCUSIÓN

La parcela agrícola estudiada presentó diferentes niveles de HTP a lo largo de todos los puntos de muestreo (**Cuadro II**). Esto se debe a que el derrame estudiado se encuentra expuesto en un terreno con pendiente pronunciada (155.56°), lo cual ocasiona que se distribuya ampliamente (**Fig. 1**). Su ubicación a cielo abierto propicia que la fracción ligera del petróleo se volatilice, por lo que es muy probable que en el suelo se concentren las fracciones más pesadas (Álvarez-Jiménez et al. 2019).

Este derrame ha afectado las propiedades físicas y químicas del suelo (**Fig. 2**). El punto B, que tiene la concentración más alta de HTP, presenta una textura del suelo modificada (**Cuadro II**). En general se observó una porción menor de arcillas al aumentar el contaminante. Este efecto también se ha observado en otros estudios de suelos con altas concentraciones de HTP (Hernández-Acosta et al. 2006, Álvarez-Jiménez et al. 2019).

La DR disminuye de forma natural cuando los sólidos del suelo se impregnan de hidrocarburos con densidades menores a 1 g/cm^3 ; sin embargo, factores como la intemperización del contaminante pueden provocar que las densidades no sean tan bajas debido al aumento en la repelencia al agua, que causa compactación del suelo y por tanto mayor densidad (Morales-Bautista et al. 2016). Este comportamiento provoca disminución de la porosidad del suelo, al ocupar los hidrocarburos los espacios libres entre partículas; esto, a su vez, ocasiona pérdida de CC, debido a que el suelo tiene menor potencial de retención de agua. Sumado a la reducción de la porosidad, las características hidrofóbicas de los hidrocarburos, que evitan la infiltración del agua, afectan negativamente a la CC (Ahmad et al. 2020, Ali et al. 2020). Todos estos aspectos son determinantes para la fertilidad del suelo, ya que de estos depende el paso de nutrientes, el desarrollo radicular, la infiltración del agua, el desplazamiento de sales, la incidencia de enfermedades y la actividad fotosintética (Wang et al. 2021).

La DA no presenta variaciones importantes, ya que en su determinación se incluyen las partículas del suelo y el aire en el espacio poroso, lo cual permite que este parámetro se mantenga estable incluso con los hidrocarburos absorbidos en los sólidos (Weil y Brady 2017). En todos los puntos, este parámetro presenta valores mayores a lo esperado para la textura del suelo, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT 2002). Los valores altos de DA están relacionados con baja porosidad y aireación, aspectos que impiden que las plantas extiendan sus raíces a mayor profundidad (Akpokodje et al. 2019).

El pH, la CE, la salinidad y la CIC no fueron afectados por las altas concentraciones de HTP. Los valores bajos de salinidad y conductividad se han señalado como preferentes para la remediación de suelos de este tipo (Hernández-Acosta et al. 2006, Rodríguez-Aristizábal et al. 2022). En el caso de los valores bajos de capacidad de intercambio catiónico, como ya se mencionó, estos indican suelos poco nutritivos, aspecto que afectará la fertilidad del suelo pero que no se debe a la presencia del contaminante (Álvarez-Jiménez et al. 2019).

Se observaron valores bajos de nitrógeno, lo que corrobora el carácter poco nutritivo del suelo. Si bien este parámetro está relacionado normalmente con la MO, en este caso no se observó este comportamiento (Almazán-Castañeda et al. 2024). La MO aumentó junto con la concentración de HTP, lo que se ha documentado en otros trabajos y era de esperarse por la cantidad de carbono oxidable en la mezcla de petróleo (Koshlaf y Ball 2017, Castro-Mancilla et al. 2019); sin embargo, este carbono no está biodisponible para los cultivos.

Dado que el derrame de hidrocarburos ha modificado la fertilidad del suelo, se presumía que la germinación y el crecimiento de los cultivos se verían afectados negativamente, lo cual confirman los ensayos *ex situ* e *in situ* (Adams et al. 2008, Morales-Bautista et al. 2016, Álvarez-Jiménez et al. 2019, Álvarez-Coronel 2021).

En el caso del análisis *in situ*, el factor ambiental afectó los resultados. Se esperaba una menor germinación en comparación con el ensayo *ex situ*, pero se considera atípico que la germinación se inhibiera por completo en algunos cultivos (**Fig. 6**). Los 35 días en los que se realizaron las observaciones (septiembre a octubre de 2023) presentaron temperaturas máximas posicionadas por arriba del P95 a nivel nacional, que equivale a 5 % más cálido de lo que se tiene registro, debido a la escasez de lluvia y temperaturas superiores a 45°C (SMN 2024).

En el punto C (**Fig. 7**) crecieron tanto el cacahuete como el pipián. Esto puede deberse a la pendiente del terreno, que provoca una mayor escorrentía de agua, lo cual ayuda al suelo a retener humedad. Al contrario, en el punto testigo (suelo con menor concentración de HTP) se observó baja germinación de los cultivos de maíz y cacahuete, posiblemente por las altas temperaturas y baja captación de agua debida a la elevación del terreno. No se realizó riego para cumplir con el modelo de milpa de temporal, utilizado comúnmente en la región.

En cuanto a la germinación, el cultivo más afectado fue el maíz de forma más drástica en el campo, donde sólo germinó en el punto testigo (**Figs. 3 y 6**). La germinación del maíz se ve afectada significativamente cuando la concentración de HTP es mayor de 10000 mg/kg, lo cual reduce su germinación en un 50 % (Zand y Hoveidi 2018). Esto contradice el trabajo de Hernández et al. (2022), quienes señalan que el porcentaje de germinación se ve afectado a partir de los 45000 mg/kg. Cabe mencionar que esta observación fue realizada en un proceso de fitorremediación. En relación con el porcentaje de germinación del maíz, ésta fue del 100 % en el suelo con menor concentración de HTP (**Fig. 4**), valor reportado en otros estudios (Marín-Velásquez 2016, Hernández et al. 2019). Este comportamiento no se replicó en el ensayo in situ, donde los factores ambientales aunados al alto grado de contaminación lograron inhibir la germinación de este cultivo.

El cultivo de cacahuete también se vio afectado por la contaminación, disminuyendo el porcentaje de germinación ex situ (**Fig. 4**); no obstante, en el estudio in situ sólo germinó en dos puntos de baja contaminación. En el caso del cacahuete, hay reportes sobre el uso de esta planta en ensayos de fitorremediación por contaminación con HTP (Akpokodje et al. 2019) y bioacumulación de metales pesados (Sameena y Puthur 2021). El tiempo de germinación de este cultivo observado en otros casos es de 8 a 10 días (Bautista et al. 2005), lo que fue superado en este estudio en la mayoría de los puntos con alta contaminación por hidrocarburos.

Respecto al pipián, no existen antecedentes del efecto de la contaminación con hidrocarburos sobre su germinación y crecimiento; sin embargo, hay estudios sobre especies de la misma familia (cucurbitáceas) que han sido utilizadas como prospectos para la fitorremediación de contaminación con hidrocarburos y metales pesados (Ortega-Ramírez et al. 2023). En este contexto, no escapa a nuestro análisis la posibilidad de que el cultivo de pipián sea una especie tolerante a los hidrocarburos en altas concentraciones (> 50000 mg/kg de HTP), debido a que logra hasta un

80 % de germinación, aunque decae (20 %) cuando la concentración es mayor (151474 mg/kg de HTP) (**Fig. 7**). Aun así, continuó su crecimiento (**Fig. 6**).

Los datos obtenidos in situ sugieren que el pipián es una planta más resistente que el maíz y el cacahuete a los hidrocarburos y al clima extremo, lo cual resulta de interés. En este sentido, el pipián podría reunir las características necesarias para su implementación en la remediación de suelos contaminados con petróleo; sin embargo, esto genera preguntas sobre los mecanismos de su tolerancia. ¿Absorbe los compuestos, los volatiliza o de alguna forma ayuda al desarrollo de la microbiota en el suelo, lo cual mejora las condiciones de toxicidad? Por lo anterior es recomendable llevar a cabo más estudios con esta especie.

CONCLUSIONES

La concentración actual de los HTP en el sitio de estudio supera el límite máximo permisible de acuerdo con la normativa mexicana. La presencia de este contaminante ha afectado los parámetros físicos y químicos del suelo (proporción de arcilla, densidad real, porosidad, capacidad de campo y materia orgánica), lo que puede provocar el aumento del tiempo de germinación y la disminución del porcentaje de germinación en los tres cultivos. La presencia de hidrocarburos disminuye la fertilidad del suelo; por tanto, afecta la productividad o rendimiento de la producción agrícola. Este trabajo no tuvo como objeto de estudio la fitorremediación por transformación o acumulación de derivados del petróleo en los tejidos de los distintos cultivos; sin embargo, esta es una posibilidad que se debe seguir estudiando, principalmente con relación al cultivo de pipián (*C. argyrosperma*).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAH-CYT) de México por la beca de maestría otorgada a Israel Toto Goxcon. Asimismo, agradecemos a Rosa Villegas Hernández y Mirna Yadira Santes Lozano por conceder acceso al sitio de estudio.

REFERENCIAS

- Abdul-Ameer Ali W. (2019). Biodegradation and phytotoxicity of crude oil hydrocarbons in an agricultural soil. Chilean Journal of Agricultural Research

- 79 (2), 266-277. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000200266>
- Adams R.H., Zavala-Cruz J. y Morales-García F. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia* 33 (7), 483-489.
- Ahmad A.A., Muhammad I., Shah T., Kalwar Q., Zhang J., Liang Z., Mei D., Juanshan Z., Yan P., Zhi D.X. y Rui-Jun L. (2020). Remediation methods of crude oil contaminated soil. *World Journal of Agriculture and Soil Science* 4 (3), 1-8. <https://doi.org/10.3352/WJASS.2020.04.000595>
- Akpokodje O.I., Uguru H. y Esegbuyota D. (2019). Evaluation of phytoremediation potentials of different plants' varieties in petroleum products polluted soil. *Global Journal of Earth and Environmental Science* 4 (3), 41-46. <https://doi.org/10.31248/GJEES2019.038>
- Ali N., Dashti N., Khanafer M., Al-Awadhi H. y Radwan S. (2020). Bioremediation of soils saturated with spilled crude oil. *Scientific Reports* 10 (1), 1116. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57224-x>
- Almazán-Casteñeda P.J., Alarcón A., García-Barradas Ó., Mendarte-Alquisira C. y Ferrera-Cerrato R. (2024). Fitotoxicidad y fitorremediación de un suelo contaminado con gasolina utilizando plantas de girasol asistidas por bacterias rizosféricas nativas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 40, 351-362. <https://doi.org/10.20937/RICA.55039>
- Álvarez-Coronel G. (2021). Efecto de las arcillas en la fertilidad de suelos contaminados con petróleo crudo. Tesis de doctorado. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco. México, 160 pp.
- Álvarez-Jiménez M.F., Chávez M.J.A., Bautista C.M.M., Olán C.M. y García C.E.L. (2019). Evaluación del suelo contaminado con hidrocarburo e intemperizado en Cárdenas, Tabasco. *Journal of Basic Sciences* 5 (15), 27-38. <https://doi.org/10.19136/jobs.a5n15.3567>
- Barois I., Contreras-Ramos S.M., Hernández-Castellanos B., de los Santos M., Martínez F. y García D.R. (2018). El suelo y el petróleo: estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México. Instituto de Ecología, Xalapa, Veracruz, México, 30 pp.
- Bautista P.F., Gerritsen P.R.W., López V.M.V. y Sandoval G.C. (2005). Articulando la sostenibilidad ecológica, económica y social: el caso del cacahuete orgánico. *Economía, Sociedad y Territorio* 19, 477-497. <https://doi.org/10.22136/est002005291>
- Castro-Mancilla Y.V., de la Rosa-Manzano E., Castro-Nava S. y Martínez-Avalos J.G. (2019). Physiological responses of *Quercus oleoides* (Schltdl y Cham) to soils contaminated by diesel. *Plant Production Science* 22 (4), 519-529. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1605833>
- CEIEG (2023). Cuadernillos municipales, Tihuatlán. Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Veracruz, Veracruz, México, 13 pp.
- Ergozhin Y., Dzhusipbekov U., Teltayev B., Nurgalieva G., Shakirova A., Khudaibergenova K., Izmailova G. y Yelshibayev N. (2020). Crude oil contaminated soil: Its neutralization and use. *Sustainability* 12 (8), 3087. <https://doi.org/10.3390/su12083087>
- Hernández-Acosta E., Gutiérrez-Castorena M.C., Rubiños-Panta J.E. y Alvarado-López J. (2006). Caracterización del suelo y plantas de un sitio contaminado con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana* 24 (4), 463-470.
- Hernández-García M.A., Morales B.C.M., Méndez O.C. y Adams S.R.H. (2016). Extracción de hidrocarburo pesado en suelo acrisol. *Journal of Basic Sciences* 2 (5), 18-23. <https://doi.org/10.19136/jobs.a2n5.1478>
- Hernández R.C., Quintana L.J.O., Rodríguez O.A. y Cordero L.S. (2019). Emergencia y desarrollo del maíz (*Zea mays* L.) en un suelo contaminado con hidrocarburos totales del petróleo en fase inicial y a 340 días de biorremediación en biopilas. *Revista Científica Agroecosistemas* 7 (2), 94-102.
- Hernández R.C., Ojeda-Quintana L.J. y Bernal-Carrazana Y. (2022). Comportamiento del maíz (*Zea mays* L.) en un suelo contaminado con dosis crecientes de hidrocarburos totales de petróleo resultante de un proceso de biorremediación en biopilas con una combinación de texturizantes. *Revista Científica Agroecosistemas* 10 (2), 24-34.
- Koshlaf E. y Ball A.S. (2017). Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *AIMS Microbiology* 3 (1), 25-49. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.1.25>
- Marín-Velásquez T.D. (2016). Crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*) en un suelo contaminado con petróleo y remediado con extracto de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Enfoque UTE* 7 (3), 1-13. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.101>
- Martínez V.E. y López S.M.F. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana* 19 (1), 9-17.
- Minasny B. y Hartemink A.E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews* 106 (1-2), 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.005>
- Morales-Bautista C.M., Adams R.H., Hernández-Barajas J.R., Lobato-García C.E. y Torres-Torres J.G. (2016). Characterization of fresh and weathered petroleum for potential impacts to soil fertility. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13, 2689-2696. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1097-x>
- Morales-Bautista C.M., Lobato-García C.E., Flores-Jiménez J. y Méndez-Olán C. (2019). Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a

- un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos. *Acta Universitaria* 29, 1-14. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2154>
- Ortega-Ramírez A.T., Torres-López C.A., Silva-Marrufo O. y Moreno-Barriga L.A. (2023). Validación sintética de suelos contaminados por hidrocarburos pesados. caso de estudio. *Fuentes, El Reventón Energético* 21 (1), 83-93. <https://doi.org/10.18273/revfue.v21n1-2023006>
- Pernía B., Rojas-Tortolero D., Sena L., Sisto A.D., Inojosa Y. y Naranjo L. (2018). Fitotoxicidad de HAP, crudos extrapesados y sus fracciones en *Lactuca sativa*: una interpretación integral utilizando un índice de toxicidad modificado. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 34 (1), 79-91. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.07>
- Rodríguez-Aristizábal M., Hernández G. y Busa P. (2022). Perspectivas en biorremediación para la recuperación de suelos salinos. *Revista Guarracuco Sostenible* 1 (1), 76-92. <https://doi.org/10.52043/gs.v1i1.463>
- Sameena P.P. y Puthur J.T. (2021). Heavy metal phytoremediation by bioenergy plants and associated tolerance mechanisms. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 30 (3), 253-274. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1849017>
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre.
- SEMARNAT (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Diario Oficial de la Federación, 10 de septiembre.
- SMN (2024). Reporte anual del clima en México 2023. Servicio Meteorológico Nacional, Ciudad de México, México, 99 pp.
- USEPA (2015). SW-846 Test method 3540C: Soxhlet extraction. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EUA, 8 pp.
- Wang L., Cheng Y., Naidu R. y Bowman M. (2021). The key factors for the fate and transport of petroleum hydrocarbons in soil with related in/ex situ measurement methods: An overview. *Frontiers in Environmental Science* 9 (756404), 1-15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.756404>
- Weil R.R. y Brady N.C. (2017). The nature and properties of soils. 15a ed. Pearson, EUA, 1071 pp.
- Zand A.D. y Hoveidi H. (2018). Evaluation of the potential of burningbush (*Kochia scoparia* L. Schard) and maize (*Zea mays* L.) and the role of soil organic amendment in phytoremediation of gasoline-contaminated soils. *International Journal of Environmental Research* 12 (3), 327-336. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0083-1>