

Crecimiento de *Paspalum fasciculatum* en suelos arcillosos contaminados con petróleo crudo

Growth of *Paspalum fasciculatum* in crude oil-contaminated clay soils

Gabriela Karina Zurita-Valencia¹ , Jesús Alberto Ramos-Juárez^{1*} , María del Carmen Rivera-Cruz¹ , Said Cadena-Villegas¹ , Pablo Díaz-Rivera² 

¹Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N. Cárdenas - Huimanguillo, Km 3.5. CP. 86500. H. Cárdenas, Tabasco, México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. Km. 88.5 Carretera Federal Xalapa-Veracruz, Municipio de Manlio Fabio Altamirano. CP. 91690. Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: ramosj@colpos.mx

Artículo científico

Recibido: 10 de octubre 2025

Aceptado: 03 de julio 2026

RESUMEN. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de petróleo crudo (PC) en el suelo y de los días de crecimiento sobre los parámetros morfológicos y productivos de *Paspalum fasciculatum*. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4×4 , considerando cuatro dosis de PC (0, 20, 40 y 60 g kg⁻¹ de suelo) y cuatro periodos de crecimiento (15, 30, 45 y 60 días). En las variables con interacción significativa, las comparaciones de medias se realizaron mediante la opción SLICE de PROC MIXED. Se encontró interacción significativa entre la dosis de PC y los días de crecimiento para altura de planta, área foliar, biomasa aérea, materia seca (MS) y tasa de crecimiento (TC). La mejor respuesta productiva se observó con 20 g kg⁻¹ de PC a los 60 días, con mayor altura de planta (81.00 cm), área foliar (499.70 cm² planta⁻¹) y biomasa aérea (3.66 g MS planta⁻¹). La mayor MS aérea se registró con 60 g kg⁻¹ de PC a los 60 días (26.03%), mientras que la mayor TC se obtuvo con 20 g kg⁻¹ a los 15 días (2.67 cm d⁻¹). El diámetro basal y la expansión del área foliar fueron mayores con 0 y 20 g kg⁻¹ de PC. Se concluye que *P. fasciculatum* presenta adaptación y crecimiento en suelos arcillosos contaminados con PC, principalmente a 20 g kg⁻¹.

Palabras clave: Fitorremediación, hidrocarburos, tolerancia vegetal, gramíneas tropicales, biomasa aérea.

ABSTRACT. The objective of this study was to evaluate the effect of different concentrations of crude oil (CO) in soil and growth duration on the morphological and productive parameters of *Paspalum fasciculatum*. A completely randomized design with a 4×4 factorial arrangement was used, considering four CO doses (0, 20, 40, and 60 g kg⁻¹ of soil) and four growth periods (15, 30, 45, and 60 days). For variables with significant interaction, mean comparisons were performed using the SLICE option of PROC MIXED. A significant interaction between CO dose and growth duration was found for plant height, leaf area, aboveground biomass, dry matter (DM), and growth rate (GR). The best productive response was observed with 20 g kg⁻¹ of CO at 60 days, with greater plant height (81.00 cm), leaf area (499.70 cm² plant⁻¹), and aboveground biomass (3.66 g DM plant⁻¹). The highest aboveground DM was recorded with 60 g kg⁻¹ of CO at 60 days (26.03%), whereas the highest GR was obtained with 20 g kg⁻¹ at 15 days (2.67 cm d⁻¹). Basal diameter and leaf area expansion were greater with 0 and 20 g kg⁻¹ of CO. It is concluded that *P. fasciculatum* shows adaptation and growth in clay soils contaminated with CO, mainly at 20 g kg⁻¹.

Keywords: Phytoremediation, hydrocarbons, plant tolerance, tropical grasses, aboveground biomass.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por derrames de petróleo crudo (PC) representa un problema ambiental persistente en agroecosistemas tropicales de México, especialmente en el estado de Tabasco, donde se han documentado afectaciones por fugas y derrames durante la extracción y el transporte de hidrocarburos (Ruíz-Liévano *et al.* 2021). El PC, aunque es un recurso no renovable clave para la economía mundial, genera impactos ambientales desde su extracción hasta su refinamiento, principalmente por derrames accidentales que alteran la estructura y función de los suelos (Toto-Goxcon *et al.* 2025). Su composición, dominada por hidrocarburos, azufre, nitrógeno y metales como níquel y vanadio, lo convierte en una fuente de compuestos tóxicos y persistentes en el ambiente (Haider *et al.* 2021).

A nivel global, los derrames de petróleo constituyen una fuente importante de contaminación ambiental, con pérdidas estimadas de 5.88 millones de toneladas entre 1970 y 2024 (Keramea *et al.* 2026). En el suelo, el petróleo puede adsorberse a las partículas, reducir la permeabilidad y porosidad, y limitar el crecimiento vegetal y microbiano (Saharan *et al.* 2023). En Tabasco, se reportaron 1 904 ha de suelo contaminado con petróleo entre 1993 y 2002, con presencia de hidrocarburos en capas y horizontes del suelo, incluyendo horizontes superficiales de aproximadamente 0 a 25 cm (Rivera-Cruz *et al.* 2004).

Los efectos del PC sobre la vegetación han sido ampliamente documentados. Se han observado reducciones en la emergencia, crecimiento y biomasa, así como retrasos en el establecimiento y, en casos severos, alta mortalidad o deformaciones en especies indicadoras como *Leucaena leucocephala* y *Crotalaria incana* (Morales-Guzmán *et al.* 2020). Gramíneas tropicales como *Brachiaria brizantha* y *Panicum maximum* han demostrado cierta tolerancia y, una vez establecidas, pueden favorecer la atenuación natural y la degradación rizosférica de hidrocarburos, reduciendo el contenido de aceites y grasas en el suelo (Hernández *et al.* 2022, Ortega-Ramírez *et al.* 2023). Además, se ha documentado que *Leersia hexandra* presenta respuestas fisiológicas de tolerancia y posibles respuestas horméticas a los hidrocarburos totales de petróleo (HTP), lo que refuerza su interés como especie funcional en ambientes contaminados (González-Moscoso *et al.* 2017, Orocio-Carrillo *et al.* 2023).

En este contexto, *Paspalum fasciculatum*, una Poaceae nativa con baja demanda nutricional y tolerancia a condiciones adversas, destaca como una alternativa prometedora para el establecimiento vegetal en suelos contaminados por petróleo. Aunque su valor forrajero para bovinos puede ser limitado por su menor calidad nutritiva, los búfalos podrían aprovecharlo con mayor eficiencia por su capacidad para utilizar dietas con alta proporción de fibra (García-Hernández *et al.* 2026). A pesar de la existencia de estudios sobre hidrocarburos y especies forrajeras, aún existe un vacío de conocimiento sobre la dinámica de crecimiento y producción de *P. fasciculatum* bajo distintos niveles de contaminación por petróleo en suelos arcillosos. Este estudio plantea la hipótesis de que esta especie posee capacidad de adaptación en estas condiciones y tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de PC en el suelo y de los días de crecimiento sobre los parámetros morfológicos y productivos de *P. fasciculatum*. La información generada puede contribuir al desarrollo de estrategias agroecológicas para la rehabilitación de suelos contaminados y al aprovechamiento forrajero en zonas tropicales afectadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El experimento se estableció de marzo a septiembre de 2024 en un invernadero semicontrolado ubicado en la colonia Infonavit Deportiva, Cárdenas, Tabasco, México (17° 58' 36" LN y 93° 22' 7" LO). El invernadero contó con cubierta para excluir la precipitación y evitar variaciones no controladas en la humedad del suelo, ya que el agua se aplicó manualmente en igual volumen a todas las unidades experimentales; además, se colocó malla perimetral para prevenir daños por aves. Los análisis químicos y microbiológicos se realizaron en el Laboratorio de Ciencia Animal y en el Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental, respectivamente, del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, ubicado en Periférico Carlos A. Molina s/n, km 3.5, Huimanguillo, Tabasco, México (17° 58' 36.22" LN y 93° 23' 11.0" LO).

Condiciones climáticas durante el periodo experimental

Se obtuvieron datos de temperatura mínima y máxima, además de la precipitación mensual durante el periodo de estudio, de la estación climatológica de la colonia SARH Cárdenas, Tabasco ubicada a 1 km del lugar donde se realizó el experimento (Figura 1).

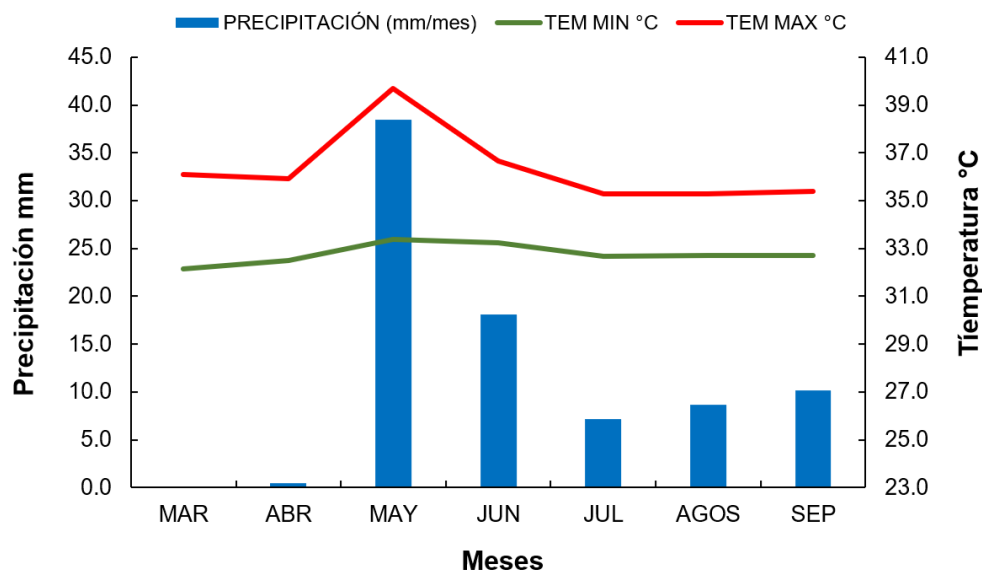


Figura 1. Datos climáticos durante el periodo de estudio

Colecta y análisis del suelo

El suelo se recolectó en el Campo Experimental Km 21 del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, ubicado en la carretera Cárdenas - Coatzacoalcos, con coordenadas geográficas 17° 59' 24" LN y 93° 36' 22" LO. Se recolectaron 300 kg de suelo arcilloso sin contaminación por petróleo, extrayéndolo a una profundidad de 15 cm. Posteriormente, el suelo se secó a temperatura ambiente durante 20 días, alcanzando un contenido final de materia seca del 95.87%; para luego tamizar con una malla de 5 mm. Los análisis físico-químicos del suelo se realizaron en el Laboratorio de Análisis Químicos de Suelos, Aguas y Plantas (LASPA) del Campus Tabasco. El pH se determinó por potenciometría en una relación suelo:agua de 1:2; la materia orgánica mediante

el método de Walkley y Black; el nitrógeno total por Kjeldahl; el fósforo disponible mediante Olsen; el potasio intercambiable utilizando acetato de amonio; y la textura del suelo mediante el método de Bouyoucos (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo utilizado en el experimento.

pH (1:2 H ₂ O)	MO (%)	N (%)	P Olsen (mg kg ⁻¹)	K (cmol kg ⁻¹)	Textura
5.14	5.6	0.18	13.92	0.43	Arcilloso

pH: Potencial de hidrógeno; **MO:** Materia orgánica; **N:** Nitrógeno; **P:** Fósforo; **K:** Potasio

Procedimiento y diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4×4 . Los factores evaluados fueron dosis de petróleo crudo (0, 20, 40 y 60 g kg⁻¹ de suelo seco; factor D) y periodos de crecimiento de *P. fasciculatum* (15, 30, 45 y 60 días; factor P). Cada combinación D $\times$ P se replicó cuatro veces, de modo que el experimento constó de 64 unidades experimentales. Cada maceta constituyó una unidad experimental.

Las dosis de petróleo crudo se seleccionaron para representar un gradiente creciente de contaminación en el suelo, desde ausencia de petróleo hasta niveles moderados y altos de exposición, con base en estudios previos en suelos tropicales contaminados con hidrocarburos, donde se han evaluado concentraciones similares para identificar respuestas de tolerancia, inhibición y posible hormesis en especies vegetales (Orocio-Carrillo *et al.* 2025).

Los periodos de 15, 30, 45 y 60 días se definieron para evaluar la respuesta temprana, intermedia y final del rebrote de *P. fasciculatum* después del corte de homogenización, permitiendo identificar cambios progresivos en crecimiento, producción de biomasa y tolerancia al petróleo durante el establecimiento vegetativo. El experimento se estableció en condiciones de invernadero semicontrolado, en un espacio de 3 m de largo por 2 m de ancho.

Se empleó petróleo ligero del campo Guaricho 509, Huimanguillo, Tabasco, con gravedad específica de 31° API y densidad de 0.85 g cm⁻³. El petróleo se mezcló homogéneamente con 2.5 kg de suelo seco; posteriormente, la mezcla se colocó en bolsas de polietileno y se transfirió a macetas plásticas de 3 L de capacidad y 20.5 cm de diámetro, sin orificio de drenaje. Cada maceta fue previamente humedecida con 900 mL de agua y en ella se sembró un tallo de *P. fasciculatum* de 6 cm de longitud mediante la técnica de esqueje, el 12 de marzo de 2024. A los 55 días de crecimiento de *P. fasciculatum* (6 de mayo de 2024), se llevó a cabo un corte de homogenización a 8 cm sobre el nivel del suelo, el cual se estableció como el inicio del experimento. Todas las macetas fueron regadas diariamente a las 18:00 h con 100 mL de agua potable.

Variables evaluadas:

Altura de la planta

Se midió desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja más alta, utilizando una regla graduada.

Diámetro de tallo basal

Se midió en el tallo principal de cada planta, a 10 cm sobre la superficie del suelo, utilizando un vernier digital de acero inoxidable (STAINLESS HARDENED; marca JUSHHZ, modelo 0-150MM; China).

Longitud de la hoja

Se midió la longitud de cada hoja con una regla graduada, desde la base hasta el ápice.

Área foliar y expansión de área foliar

El área foliar (AF) se estimó mediante la medición de la longitud y el ancho máximo de cada hoja por maceta, utilizando una regla graduada, y se calculó con la fórmula:

$$AF = L \times A$$

donde AF = área foliar (cm² planta⁻¹), L = longitud de la hoja (cm) y A = ancho máximo de la hoja (cm).

La expansión de área foliar (EAF) se calculó con la fórmula:

$$EAF = \frac{AF}{DC}$$

donde EAF = expansión de área foliar (cm² planta⁻¹), AF = área foliar (cm² planta⁻¹) y DC = días de crecimiento.

Producción de biomasa aérea

Para determinar esta variable, cada planta se cortó a 8 cm sobre el nivel del suelo y se colocó en bolsas de papel previamente pesadas e identificadas. La bolsa con la muestra se pesó en una báscula de precisión (OHAUS, modelo SPX6201, EE. UU.). Posteriormente, las muestras se secaron en una estufa de aire forzado a 62 °C hasta alcanzar peso constante.

Contenido de humedad y de materia seca del pasto

El contenido de humedad se determinó con la metodología descrita por la AOAC (2016) y la materia seca se calculó por diferencia de 100 - % de humedad.

Tasa de crecimiento (TC)

Se calculó con la siguiente fórmula:

$$TC = \frac{AP}{DC}$$

Donde: TC = tasa de crecimiento (cm d⁻¹), AP = altura de planta (cm) y DC = días de crecimiento.

Análisis estadístico

Para cada variable de respuesta se ajustó el modelo lineal: $Y_{ijk} = \mu + D_i + P_j + (D \times P)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$, donde μ es la media general, D_i es el efecto fijo de la dosis de petróleo crudo, P_j es el efecto fijo del periodo de crecimiento, $(D \times P)_{ij}$ es la interacción entre ambos factores y ε_{ijk} es el error aleatorio residual, asumido con distribución normal e independiente con media cero y varianza constante. Se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Cuando fue necesario, se aplicaron transformaciones Box-Cox. El análisis de varianza se realizó con PROC MIXED de SAS 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). La comparación de medias se efectuó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). En las

variables con interacción significativa, los efectos simples se analizaron mediante la opción SLICE, evaluando el efecto de D dentro de cada nivel de P y el efecto de P dentro de cada nivel de D. Los resultados se reportan como medias $\pm$ error estándar.

RESULTADOS

Se detectó interacción significativa ($P < 0.05$) entre la dosis de petróleo crudo y los periodos de crecimiento para altura de planta, área foliar, producción de biomasa aérea, tasa de crecimiento y materia seca. En consecuencia, los efectos simples se analizaron mediante la opción SLICE de PROC MIXED y la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

La dosis de 20 g kg⁻¹ de petróleo crudo favoreció la altura de planta, principalmente a los 45 y 60 días, periodo en el que se observó la mayor altura (55.17 y 81.00 cm, respectivamente). El área foliar también mostró mejor respuesta con 0 y 20 g kg⁻¹, mientras que las dosis de 40 y 60 g kg⁻¹ limitaron el desarrollo foliar, sobre todo al final del periodo experimental (Figura 2A-B).

En conjunto, estos resultados indican que la contaminación moderada no restringió el crecimiento vegetativo de *P. fasciculatum*, mientras que las dosis más altas redujeron la expresión de las variables morfológicas.

La producción de biomasa aérea siguió una tendencia similar a la altura y al área foliar. El mayor valor se registró con 20 g kg⁻¹ a los 60 días (3.66 g MS planta⁻¹), mientras que 60 g kg⁻¹ presentó la menor producción al final del experimento. La tasa de crecimiento fue mayor con 20 g kg⁻¹ a los 15 días (2.67 cm d⁻¹) y disminuyó conforme avanzó el periodo de evaluación, especialmente bajo las dosis más altas de petróleo (Figura 2C-D).

El porcentaje de materia seca de *P. fasciculatum* también dependió de la interacción entre la dosis de petróleo crudo y los días de crecimiento (Tabla 2). El mayor contenido de materia seca se observó con 60 g kg⁻¹ a los 60 días (26.03%), mientras que las demás dosis presentaron valores menores en ese mismo periodo.

Este patrón sugiere que, bajo mayor concentración de petróleo, el incremento en materia seca porcentual no necesariamente se relacionó con mayor producción de biomasa, sino con una posible reducción en la expansión y acumulación de tejido fresco.

El diámetro basal del tallo y la expansión de área foliar no presentaron interacción significativa entre la dosis de petróleo crudo y los días de crecimiento. En ambos casos, las mejores respuestas se observaron con 0 y 20 g kg⁻¹, mientras que las dosis de 40 y 60 g kg⁻¹ redujeron estas variables (Tabla 3). Respecto al efecto del tiempo, el diámetro basal fue mayor a los 60 días; en cambio, la expansión de área foliar no mostró diferencias estadísticas entre los periodos evaluados (Tabla 3).

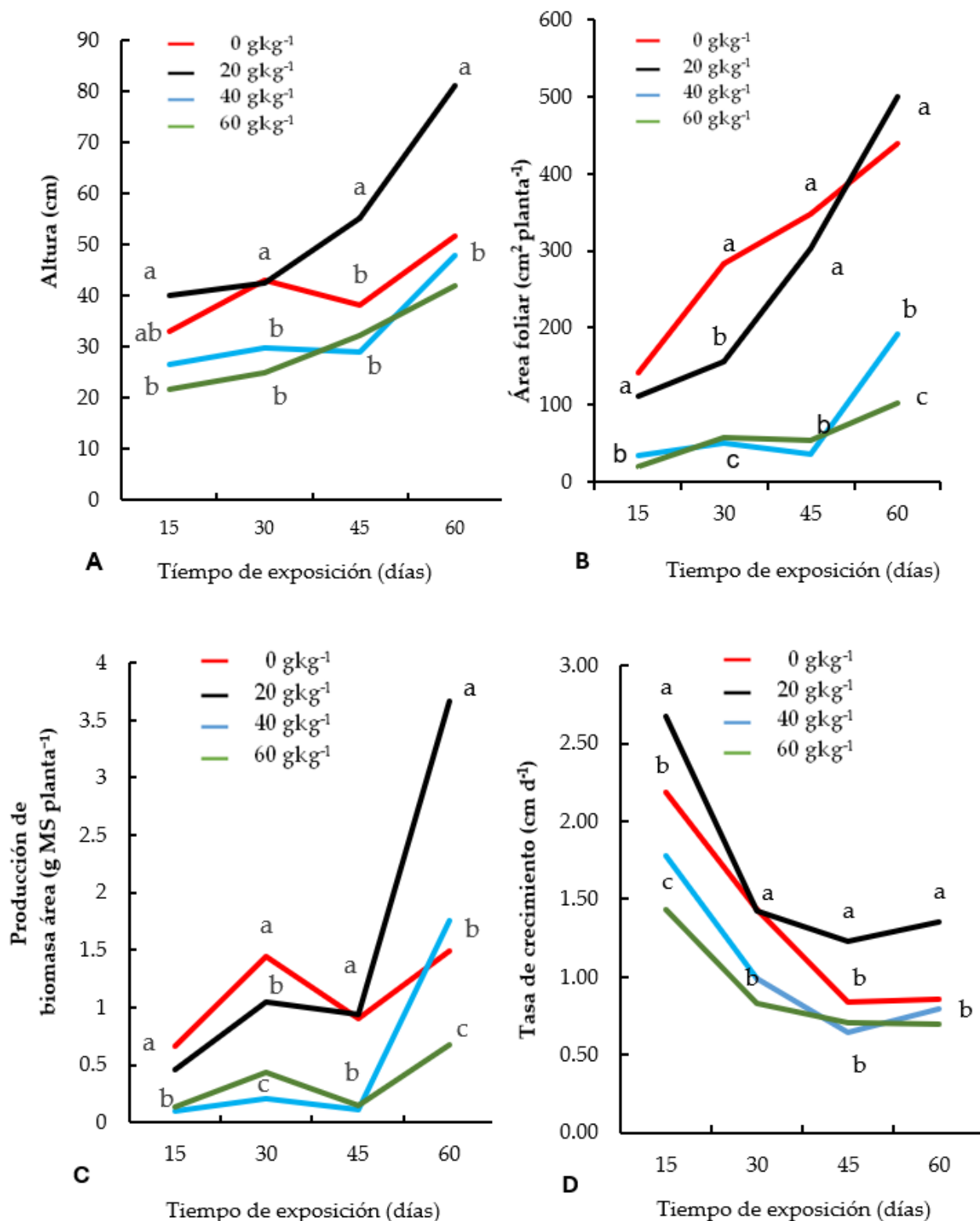


Figura 2. Efecto de la dosis de petróleo crudo y los días de crecimiento sobre la altura de planta (A), área foliar (B), producción de biomasa aérea (C), tasa de crecimiento (D) de *P. fasciculatum*.

Tabla 2. Efecto de la interacción entre los días de crecimiento y la dosis de petróleo crudo sobre el porcentaje de materia seca de *P. fasciculatum*.

Días de crecimiento	Dosis de petróleo (g kg ⁻¹ de suelo seco)	Materia seca (%)
15	0	10.72 ^c
	20	13.49 ^b
	40	15.50 ^a
	60	13.97 ^b
30	0	21.34 ^a
	20	19.51 ^b
	40	14.85 ^c
	60	17.61 ^b
45	0	21.63 ^a
	20	18.26 ^b
	40	18.92 ^b
	60	22.64 ^a
60	0	22.69 ^b
	20	21.79 ^b
	40	20.27 ^b
	60	26.03 ^a
EE±		2.151

Medias con diferente letra dentro de cada día de crecimiento son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Tabla 3. Efecto de la dosis de petróleo crudo y los días de crecimiento sobre el diámetro basal y la expansión de área foliar de *P. fasciculatum*.

Factores	Diámetro basal (mm)	Expansión de área foliar (cm ² planta ⁻¹)
Días de crecimiento		
15	2.73 ^b	5.13 ^a
30	2.98 ^b	4.55 ^a
45	2.92 ^b	4.11 ^a
60	3.27 ^a	5.14 ^a
EE±	0.1125	0.2486
Dosis de petróleo (g kg ⁻¹ de suelo seco)		
0	3.35 ^a	8.48 ^a
20	3.41 ^a	6.92 ^a
40	2.92 ^b	2.00 ^b
60	2.21 ^c	1.55 ^b
EE±	0.2764	1.7435

Medias con diferente letra dentro de cada factor y columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

La altura de *Paspalum fasciculatum* mostró una respuesta dependiente de la dosis de petróleo crudo. La mayor altura se observó con 20 g kg⁻¹ a los 60 días, mientras que las dosis más altas redujeron el crecimiento. Este comportamiento sugiere una respuesta de estimulación a dosis moderadas e inhibición a dosis elevadas, similar a lo reportado en especies expuestas a hidrocarburos totales del petróleo (HTP), donde la respuesta depende de la concentración, el tiempo de exposición y las propiedades del suelo. En *Leersia hexandra*, por ejemplo, la altura se correlacionó negativamente con la concentración de HTP ($r = -0.94$), aunque también se han descrito respuestas positivas o negativas según la dosis y el contenido de materia orgánica del suelo (Orocio-Carrillo *et al.* 2023).

La respuesta positiva de *P. fasciculatum* con 20 g kg⁻¹ contrasta con lo reportado en *Zea mays*, donde la mayor altura se presenta generalmente en plantas testigo y la contaminación reduce el crecimiento desde 15 a 35 g kg⁻¹ (Quiñones *et al.* 2003). De manera similar, en Fabaceae como *Leucaena leucocephala* y *Crotalaria incana*, el crecimiento y la altura disminuyen con concentraciones de 32 a 80 g kg⁻¹ de petróleo (Vázquez-Luna *et al.* 2010). Estas diferencias sugieren que la tolerancia al petróleo varía entre especies, posiblemente por diferencias en el sistema radical, capacidad de adaptación fisiológica y respuesta al estrés. A concentraciones elevadas, el petróleo puede formar capas hidrofóbicas que restringen la absorción de agua y nutrientes, reducen la aireación del suelo e incrementan el estrés oxidativo, lo que afecta la expansión celular y limita el crecimiento de la planta (Peralta-Pérez y Volke-Sepúlveda 2012, Olalekan 2014).

El área foliar también respondió de manera diferenciada a las dosis de petróleo crudo. En este estudio, la dosis de 20 g kg⁻¹ favoreció el área foliar a los 60 días, mientras que las dosis de 40 y 60 g kg⁻¹ la redujeron de forma importante. En Poaceae, el área foliar es una variable determinante del crecimiento, debido a su relación con la captura de luz, la fotosíntesis, la transpiración y el balance de energía de la planta (Villegas-Rivas *et al.* 2020). La reducción del área foliar en concentraciones elevadas puede atribuirse a limitaciones en la absorción hídrica y nutrimental, así como a daños celulares en la rizósfera que restringen la división y elongación celular (Orocio-Carrillo *et al.* 2019). Resultados similares han sido reportados en *Clitoria ternatea* expuesta a HTP (Morales-Guzmán *et al.* 2020) y en girasol cultivado en suelos contaminados con gasolina (Almazán-Castañeda *et al.* 2024). Aunque el petróleo puede alterar membranas celulares y afectar la función fotosintética, algunas gramíneas pueden mantener su crecimiento en rangos subletales mediante ajustes fisiológicos asociados con pigmentos y sistemas antioxidantes (Hernández-Acosta *et al.* 2006).

La producción de biomasa aérea alcanzó su valor máximo a los 60 días con 20 g kg⁻¹ de petróleo crudo, mientras que disminuyó con 60 g kg⁻¹. Este comportamiento indica una respuesta dosis-dependiente, en la que una concentración moderada puede favorecer el crecimiento, pero concentraciones altas limitan la producción de biomasa. Esta tendencia concuerda con reportes en gramíneas expuestas a hidrocarburos, donde altas concentraciones reducen el crecimiento y la acumulación de biomasa, como se ha observado en *Echinochloa polystachya* y otros pastos tropicales (Rivera-Cruz *et al.* 2004, Cartmill *et al.* 2014). En *L. hexandra*, la respuesta también depende de la concentración, el tiempo de exposición y el estado del petróleo, ya sea fresco o intemperizado; bajo ciertas condiciones, como mayor contenido de materia orgánica o presencia de surfactantes,

pueden presentarse respuestas positivas en algunos rasgos de crecimiento (Arias-Trinidad *et al.* 2017, Orocio-Carrillo *et al.* 2019).

La respuesta observada en altura, área foliar, biomasa aérea y tasa de crecimiento puede explicarse parcialmente por un efecto hormético. A dosis moderadas, los hidrocarburos pueden actuar como un factor de estrés leve que activa mecanismos de defensa y adaptación; sin embargo, a dosis elevadas predomina el efecto inhibitorio. En estas condiciones, el exceso de especies reactivas de oxígeno puede dañar membranas, pigmentos y procesos metabólicos, reduciendo la fotosíntesis y el crecimiento (Gill y Tuteja 2010, Peralta-Pérez y Volke-Sepúlveda 2012, Olalekan 2014). En *L. hexandra*, se ha observado control del peróxido de hidrógeno a dosis altas de HTP, posiblemente asociado con compuestos fenólicos y otros antioxidantes, lo que puede explicar su tolerancia relativa en ambientes contaminados (Orocio-Carrillo *et al.* 2023).

Desde una perspectiva edáfica, la inhibición del crecimiento a concentraciones altas de petróleo crudo puede estar relacionada con la presencia de fracciones recalcitrantes, como compuestos aromáticos, resinas y asfáltenos, así como con cambios fisicoquímicos del suelo. Estas fracciones pueden favorecer la formación de películas repelentes al agua en la zona radical, alterar la humedad, aireación, porosidad y capacidad de intercambio catiónico, y limitar el suministro de agua y nutrimentos a la planta (Hernández-Acosta *et al.* 2006, Cartmill *et al.* 2014). En conjunto, estos efectos pueden explicar la reducción observada en las variables morfológicas y productivas de *P. fasciculatum* a 40 y 60 g kg⁻¹.

La tasa de crecimiento fue mayor a los 15 días con 20 g kg⁻¹ de petróleo crudo, lo que sugiere una respuesta temprana de estimulación bajo una concentración moderada. Sin embargo, al aumentar la dosis, la tasa de crecimiento disminuyó, lo que confirma el efecto negativo de las concentraciones altas. En *L. hexandra*, la tasa de crecimiento varía con la dosis y el tiempo de exposición, y se ha reportado una correlación negativa con la concentración de HTP (Orocio-Carrillo *et al.* 2019). Asimismo, en estudios con petróleo y surfactante, las mayores tasas de crecimiento se registraron alrededor de los 60 días y disminuyeron posteriormente, lo que evidencia la dependencia temporal de la respuesta vegetal (González-Moscoso *et al.* 2017). Además de la contaminación, factores ambientales como temperatura, humedad y radiación interceptada también modulan la tasa de crecimiento de los pastos, como se ha observado en maralfalfa, donde la tasa máxima coincidió con aproximadamente 97% de radiación interceptada (Calzada-Marín *et al.* 2014).

En cuanto a la materia seca, el mayor valor se observó a los 60 días con 60 g kg⁻¹ de petróleo crudo. Este aumento no necesariamente representa una mejor respuesta productiva, sino que puede estar asociado con menor contenido de agua en los tejidos, reducción de la expansión celular o ajustes osmóticos inducidos por estrés abiótico. Bajo condiciones de estrés por hidrocarburos, las plantas pueden modificar su contenido de agua y la proporción de tejidos estructurales, lo que se refleja en mayores porcentajes de materia seca. Los valores observados en este estudio son comparables con rangos descritos para *Pennisetum* spp. en suelos no contaminados, donde a 60 y 63 días se reportan contenidos de materia seca cercanos a 19 y 21%, y el mayor rendimiento coincide con aproximadamente 63 días de rebrote (Márquez *et al.* 2007).

El diámetro basal del tallo fue mayor en 0 y 20 g kg⁻¹ de petróleo crudo, y disminuyó con 40 y 60 g kg⁻¹. Esta respuesta indica que, al superar un umbral de tolerancia, el petróleo puede limitar el crecimiento estructural del tallo, posiblemente por restricciones en la absorción de agua y nutrientes, así como por alteraciones físicas del suelo. De manera similar, Mujica-Blanco *et al.* (2006) reportaron en *Vigna unguiculata* mayor diámetro en plantas testigo y disminuciones al aumentar la contaminación por HTP. El incremento del diámetro basal con el tiempo también puede relacionarse con la dinámica morfológica de las gramíneas forrajeras, donde el componente tallo aumenta con la madurez de la planta (Calzada-Marín *et al.* 2014). Sin embargo, bajo altas concentraciones de petróleo, las fracciones pesadas pueden formar películas hidrofóbicas en la zona radical y limitar la absorción de agua y nutrientes, reduciendo el crecimiento del tallo (Son *et al.* 2021).

Finalmente, la expansión del área foliar fue mayor en el testigo y disminuyó conforme aumentó la dosis de petróleo crudo. Esta reducción puede atribuirse a limitaciones hídricas y nutrimentales, así como a cambios en las propiedades físicas del suelo que restringen la expansión celular y reducen el área foliar disponible para la fotosíntesis. A dosis altas, los hidrocarburos pueden aumentar la hidrofobicidad de los agregados del suelo, reduciendo la retención y transferencia de agua y gases (Vázquez-Luna *et al.* 2010). Estos efectos, junto con alteraciones en la fertilidad del suelo, pueden disminuir la expansión foliar, el crecimiento y la biomasa aérea (Arias-Trinidad *et al.* 2017). La reducción de la expansión del área foliar y del diámetro basal observada en 40 y 60 g kg⁻¹ concuerda con estudios que documentan el efecto de los suelos petrolizados sobre propiedades químicas y biológicas, así como la importancia de las relaciones agua-suelo en el desempeño vegetal después de procesos de biorremediación (Trujillo-Narcía *et al.* 2014).

CONCLUSIONES

En suelo arcilloso contaminado con petróleo crudo, la respuesta morfológica y productiva de *Paspalum fasciculatum* dependió de la dosis de petróleo y del tiempo de crecimiento. La dosis de 20 g kg⁻¹ favoreció la mayor altura de planta, área foliar, biomasa aérea y tasa de crecimiento, principalmente entre los 45 y 60 días, lo que indica una respuesta positiva de la especie bajo contaminación moderada. El diámetro basal del tallo y la expansión del área foliar fueron mayores con 0 y 20 g kg⁻¹, sin diferencias estadísticas entre estas dosis. En contraste, las dosis de 40 y 60 g kg⁻¹ redujeron la mayoría de las variables de crecimiento y producción, evidenciando un efecto limitante del petróleo crudo sobre el desarrollo de la planta. El mayor porcentaje de materia seca observado con 60 g kg⁻¹ a los 60 días puede estar asociado con menor contenido de agua en los tejidos y posibles ajustes fisiológicos frente al estrés por contaminación. En conjunto, los resultados indican que *P. fasciculatum* presenta tolerancia moderada al petróleo crudo y capacidad de establecimiento en suelos arcillosos con contaminación moderada, particularmente alrededor de 20 g kg⁻¹.

AGRADECIMIENTOS

Al colegio de Postgraduados Campus Tabasco por permitir el desarrollo de esta investigación en el Laboratorio de Ciencia Animal, en el Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental y a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Almazán-Castañeda PJ, Alarcón A, García-Barradas Ó, Mendarte-Alquisira C, 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: 251-262. <https://doi.org/10.20937/RICA.55039>
- AOAC (2016) Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 20th ed. AOAC International.
- Arias-Trinidad A, Rivera-Cruz MC, Roldán-Garrigós A, Aceves-Navarro LA, Quintero-Lizaola R, Hernández-Guzmán J (2017) Uso de *Leersia hexandra* (Poaceae) en la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo fresco e intemperizado. *Revista de Biología Tropical* 65(1): 21-30. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i1.22967>
- Calzada-Marín JM, Enríquez-Quiroz JF, Hernández-Garay A, Ortega-Jiménez E, Mendoza-Pedroza SI (2014) Análisis de crecimiento del pasto maralfalfa (*Pennisetum sp.*) en clima cálido subhúmedo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 5(2): 247-260.
- Cartmill AD, Cartmill DL, Alarcón A (2014) Controlled release fertilizer increased phytoremediation of petroleum-contaminated sandy soil. *International Journal of Phytoremediation* 16(3): 285-301. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.77328>
- García-Hernández A, Díaz-Rivera P, Mendoza-Martínez GD, Vargas-Villamil LM, Bucio-Galindo A, Ramos-Juárez JA (2026) Caracterización del sistema búfalo de agua en dos regiones del trópico húmedo de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 13(1): 1-13.
- Gill SS, Tuteja N (2010) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 48(12): 909-930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- González-Moscoso M, Rivera-Cruz MC, Delgadillo-Martínez J, Lagunes-Espinoza LC (2017) Growth analysis and plant production of *Leersia hexandra* Swartz in tropic wet Mexican in function on petroleum and surfactant. *Polibotánica* 43(22): 177-196. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.43.8>
- Haider FU, Ejaz M, Cheema SA, Khan MI, Zhao B, Liqun C, Mustafa (2021) Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research* 197: 111031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111031>
- Hernández-Acosta E, Gutiérrez-Castorena MC, Rubiños-Panta JE, Alvarado-López J (2006) Caracterización del suelo y plantas de un sitio contaminado con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana* 24(4): 463-470.

- Hernández RC, Ojeda-Quintana LJ, 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.
- Keramea P, Zodiatis G, Sylaios G (2026) Analysis of major global oil spill incidents: Part 1 – Environmental and ecological impacts. *Journal of Marine Science and Engineering* 14(2): 153. <https://doi.org/10.3390/jmse14020153>
- Márquez F, Sánchez J, Urbano D, Dávila C (2007) Evaluación de la frecuencia de corte y tipos de fertilización sobre tres genotipos de pasto elefante (*Pennisetum purpureum*). I. Rendimiento y contenido de proteína. *Zootecnia Tropical* 25(4): 253-259.
- Morales-Guzmán G, Alarcón A, Ferrera-Cerrato R, Rivera-Cruz MC, Torres-Bustillos LG, Mendoza-López MR (2020) Efecto de bacterias emulsificantes en la atenuación de la fitotoxicidad de suelos contaminados con petróleo intemperizado. *Revista de Biología Tropical* 68(2): 692-703. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i2.39327>
- Mujica-Blanco CF, Méndez-Natera JR, Pino-Morales FB (2006) Crecimiento de plántulas de frijol (*Vigna unguiculata* L. Walp.) en dos suelos contaminados con petróleo. *Revista Tecnológica ESPOL* 19(1): 17-24.
- Olalekan A (2014) The effect of palm kernel oil (PKO) biodiesel-contaminated soil on morphological and biochemical properties of *Zea mays*. *Journal of Plant Biochemistry and Physiology* 2(4): 1-6. <https://doi.org/10.4172/2329-9029.1000138>
- Orocio-Carrillo JA, Rivera-Cruz MC, Aranda-Ibañez EM, Trujillo-Narcia A (2019) Hormesis under oil-induced stress in *Leersia hexandra* Swartz used as phytoremediator in clay soils of the Mexican humid tropic. *Ecotoxicology* (28): 1063-1074. <https://doi.org/10.1007/s10646-019-02106-1>
- Orocio-Carrillo JA, Rivera-Cruz MC, Juárez-Maldonado A, Bautista-Muñoz CC, González-García Y, Chávez-Álvarez K (2023) Respuesta en el sistema de defensa antioxidante de *Leersia hexandra* Sw. a la exposición de hidrocarburos del petróleo. *Polibotánica* 55: 245-262. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.55.16>
- Orocio-Carrillo JA, Rivera-Cruz MC, Cadena-Villegas S, Bautista-Muñoz C, Juárez-Maldonado A, Chávez-Álvarez K (2025) Composición química y adaptación del pasto tropical *Leersia hexandra* Sw. expuesto a suelo con petróleo crudo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 16(1): 81-100.
- Ortega-Ramírez AT, Torres-López CA, Silva-Marrufo O, Moreno-Barriga LA (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>
- Peralta-Pérez MR, Volke-Sepúlveda TL (2012) La defensa antioxidante en las plantas: Una herramienta clave para la fitorremediación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 11(1): 75-88.
- Quiñones EE, Ferrera R, Gavi F, Fernández L, Rodríguez R, Alarcón A (2003) Emergencia y crecimiento de maíz en un suelo contaminado con petróleo crudo. *Agrociencia* 37(6): 585-594.
- Rivera-Cruz MC, Ferrera R, Sánchez P, Volke V, Fernández L, Rodríguez R (2004) Descontaminación de suelos con petróleo crudo mediante microorganismos autóctonos y pasto alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.]. *Agrociencia* 38(1): 1-12.
- Ruíz-Liévano S (2021) La responsabilidad del daño ambiental por derrame de hidrocarburos en suelos en Tabasco, México. *Revista Ciencias y Humanidades* 14(14): 135-160. <https://doi.org/10.61497/1pvy9t20>
- Saharan Y, Singh J, Goyat R, Umar A, Ibrahim AA, Akbar S, Baskoutas S (2023) Avances recientes en tecnologías de limpieza de suelos para vertidos de petróleo: una revisión sistemática. *Contaminación del Agua, el Aire y el Suelo* 234(8): 503.
- SAS Institute (2013) Base SAS (version 9.4) procedures guide: Statistics procedures. SAS Institute.

- Son AH, Lamb D, Seshadri B, Sarkar B, Cheng Y, Wang L, Bolan NS (2021) Petroleum hydrocarbon rhizoremediation and soil microbial activity improvement via cluster root formation by wild proteaceae plant species. *Chemosphere* 275: 130135. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130135>.
- Toto-Goxcon I, Rodríguez-Cabrera R, Salas-Aquino MA, Paredes-Jácome JR, Rojas-Ronquillo R (2025) Efecto del derrame permanente de petróleo en un suelo agrícola en Tihuatlán, Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 41: 521-533. <https://doi.org/10.20937/rica.55274>
- Trujillo-Narcia A, Rivera-Cruz MC, Lagunes-Espinoza LC, Palma-López DJ, Sánchez-Soto S, Ramírez-Valverde G (2014) Parámetros biológicos de la restauración de suelos contaminados por petróleo crudo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1(2): 107-122. <https://doi.org/10.19136/era.a1n2.160>
- Vázquez-Luna D, Castelán-Estrada M, Rivera-Cruz MC, Ortiz-Ceballos A (2010) *Crotalaria incana* L. y *Leucaena leucocephala* (Leguminosae): Especies indicadoras de toxicidad por hidrocarburos de petróleo en el suelo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 26(3): 183-191.
- Villegas-Rivas D, Valbuena-Torres N, Milla-Pino M, Terán Y, Pérez-Pérez Y, Villegas-Rivas S (2020) Estimación del área foliar específica en pasto Cayman (*Brachiaria híbrido*). *Zootecnia Tropical* 38: 1-7. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4044394>