Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido:09/03/2025 Aprobado:10/04/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n1.103

Remoción de hidrocarburos mediante electro-fitorremediación con mangle blanco (laguncularia racemosa)

Karla Carolina Morales López
Karlamorales072001@gmail.com
https://orcid.org/0009-0005-2150-2581
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Tabasco-México

Yolanda Córdova Bautista
yolanda.cordova@ujat.mx
https://orcid.org/0000-0001-5680-9640
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Tabasco-México

Marcia Eugenia Ojeda Morales
marcia.ojeda@ujat.mx
https://orcid.org/0000-0003-0360-4654
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Tabasco-México

José de los Santos López Lázaro
jose.lazaro@ujat.mx
https://orcid.org/0000-0002-6461-1623
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Tabasco-México

Irene Fuentes Domínguez
212A28002@alumno.ujat.mx
https://orcid.org/0000-0002-2638-6592
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Tabasco-México

RESUMEN

Los manglares en los últimos años han sido afectados por los derrames de petróleo. Estos ecosistemas tienen funciones ecológicas diversas y económicamente valiosas. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia en la remoción de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) y el desarrollo de las plántulas de mangle blanco (Laguncularia Racemosa) aplicando la electro-fitorremediación. Plántulas de mangle blanco y suelo se recolectaron del sureste de México. Bajo condiciones de invernadero se estableció un experimento completamente al azar que consistió de mesocosmos. Los tratamientos fueron: fitorremediación (FT), electro-fitorremediación a 1.5V (EF_1.5), electro-fitorremediación a 2V (EF_2) y planta sin suelo sin petróleo (T). En el tratamiento con aplicación de 2V se presentó la mayor remoción de HTP (95%) y una mayor población microbiana en comparación con la fitorremediación tradicional donde se alcanzó el 56% de remoción de HTP.

***Palabras clave**:* fitorremediación, remoción, electro-fitorremediación, laguncularia racemosa

Removal of hydrocarbons by electro-phytoremediation with white mangrove (laguncularia racemosa)

ABSTRACT

Mangroves in recent years have been affected by oil spills. These ecosystems have diverse and economically valuable ecological functions. The objective of this work was to evaluate the removal efficiency of total petroleum hydrocarbons (TPH) and the development of white mangrove (Laguncularia Racemosa) seedlings by applying electro-phytoremediation. White mangrove seedlings and soil were collected from southeastern Mexico. A completely randomized experiment consisting of mesocosms was set up under greenhouse conditions. The treatments were: phytoremediation (FT), electro-phytoremediation at 1.5V (EF_1.5), electro-phytoremediation at 2V (EF_2) and soil-less plant without oil (T). The treatment with 2V application showed the highest TPH removal (95%) and a higher microbial population compared to traditional phytoremediation where 56% TPH removal was achieved.

Keywords phytoremediation, removal, electro-phytoremediation, laguncularia racemosa

INTRODUCCIÓN

El sector petrolero juega un papel estratégico en el desarrollo económico y productivo del país. En México, Petróleos Mexicanos (PEMEX) es responsable de la exploración, producción, refinación y distribución de petróleo y sus derivados, proporcionando energía y productos esenciales que contribuyen a la economía nacional (Adams et al., 2020; Sovilla et al., 2021). El golfo de México se caracteriza por tener uno de los yacimientos de petróleo con mayor potencial de producción, representando alrededor del 83% de la producción de hidrocarburos al país (Morales-Bautista et al., 2019). Durante 2023, la producción de petróleo fue de 1,855 millones de barriles/día. Sin embargo, el mal manejo durante las operaciones de exploración, producción y transporte marítimo han causado accidentes por derrame de petróleo. Por ejemplo, el incidente de Ixtoc 1 en 1979 que derramó alrededor de 3 millones de barriles de petróleo y la explosión de la plataforma marina Deepwater Horizon (DWH) en 2010 donde aproximadamente 149,000 km2 fueron cubiertos por petróleo (Day et al., 2024; Pulster et al., 2020). Se estima que 3800 millones de litros de crudo entran cada año a los océanos, causando impacto negativo en los ecosistemas marinos. Cuando el petróleo derramado se introduce en el entorno marino experimenta cambios químicos y transformaciones físicas (advección, dispersión y biodegradación) influenciadas por diferentes factores ambientales (temperatura, el viento y las corrientes marinas). La exposición al petróleo afecta negativamente a las zonas costeras donde el petróleo se disipa más lentamente y puede persistir durante varios años aumentando el riesgo de contaminación en los ecosistemas acuáticos y la salud humana (Pulster et al., 2020; Quispe-Villanueva, 2022).

Uno de los principales ecosistemas afectado por los derrames de petróleo en zonas costeras son los manglares. El mangle se distingue por tener altas tasas fotosintéticas, adaptaciones morfologías y fisiológicas que les permite crecer en sedimentos poco consolidados, altamente salinos, poco oxigenados y total o parcialmente inundado. Además, son importantes zonas de reproducción de aves, peces, crustáceos, moluscos, reptiles y mamíferos (Sol-Sánchez et al., 2022).

La superficie de manglares en México es de 905,086 hectáreas y se distribuye entre los 19 estados de la república donde predominan seis especies y una variedad de mangles: *Rhizophora mangle, Avicennia germinans, Conocarpus erectus, Conocarpus erectus var. sericeus, Laguncularia racemosa, Avicennia bicolor* y *Rhizophora harrisonii* estos dos últimos endémicos de Chiapas. En Tabasco la cobertura de manglares es de 49,225 hectáreas, cubriendo el 68% de la costa de Tabasco. Según la NOM-059-SEMARNAT-2010 los manglares en México se encuentran en categoría de amenaza. Con base en tal situación, se han realizado estudios sobre los efectos de los derrames de hidrocarburos en el desarrollo de diferentes especies de mangle. Así como el uso de las plantas de mangle en la fitorremediación de áreas impactadas por actividades petroleras (Domínguez-Domínguez et al., 2019).

La fitorremediación se considera un tratamiento biológico y se caracteriza por ser una estrategia pasiva y amigable con el medio ambiente ya que utiliza plantas para remover o erradicar contaminantes del suelo o cuerpos de agua, brindando así beneficios naturales y económicos. Los procesos de fitorremediación se pueden realizar tanto in situ como ex situ (Khan et al., 2023). Alguna de las limitaciones que presenta la fitorremediación es la dificultad para movilizar los contaminantes hacia las raíces. En los últimos años se ha desarrollado una combinación de tratamientos biológicos y electroquímicos, una de ellas es la electro-fitorremediación. Esta se basa en la aplicación de un campo eléctrico de baja intensidad por medio de un par de electrodos insertados en el suelo que funcionan como ánodo y cátodo (Siyar et al., 2019). La aplicación de un campo eléctrico aumenta la biodisponibilidad del contaminante en el suelo favoreciendo el flujo de masa en regiones resistentes al transporte advectivo ya sea por difusión o convección. Estudios realizados por Cameselle et al. (2018) muestran que la capacidad fitorremediadora fue mejorada al aplicar un gradiente de voltaje de 0,67 a 1 VDC/cm. Mientras que Li et al. (2020) mencionan que a un voltaje de 2V/cm la biomasa microbiana y la eficiencia en la degradación de hidrocarburos es mayor. Así que la aplicación de un gradiente de voltaje favorece la remoción de compuestos orgánicos inmóviles y persistentes en el suelo (Saini et al., 2021).

Existen reportes sobre el tratamiento de suelos empleando la fitorremediación con mangle blanco (Laguncularia Racemosa), pero no hay estudios sobre el efecto en la eliminación de hidrocarburos totales utilizando la electro-fitorremediación usando mangle blanco. Por esta razón el objetivo de este estudio es evaluar la remoción de hidrocarburos de un suelo mediante electro-fitorremediación con la especie Laguncularia racemosa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Trabajo de campo

Las muestras de sedimentos se recolectaron en la Ranchería Las Flores en Paraíso, Tabasco, México ubicado en las coordenadas geográficas 18°25'25.8"N 93°15'09.5"W. El muestreo de suelo se realizó con base en la Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002). Se recolectó suelo libre de contaminante siguiendo un patrón de zig-zag a la profundidad de 0-30 cm. Las plántulas de mangle de tres meses de crecimiento se recolectaron de acuerdo a Verâne et al. (2020) Finalmente, las muestras de suelo se depositaron en botes estériles etiquetados y se resguardaron en hielera 4°C y las plántulas se mantuvieron en condiciones de vivero previo al montaje del experimento.

Tratamiento y caracterización de suelo libre de contaminante

El suelo libre de contaminante se caracterizó de acuerdo con lo que establece la NOM-021-RECNACT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002). Primero, el suelo fue secado bajo sombra a temperatura ambiente durante 7 días. Después, se trituró con un martillo para romper terrones, seguidamente el suelo triturado se molió en molino de mano. Y, finalmente se tamizó con un tamiz de acero inoxidable de 10 mm. Al suelo se le determinaron los siguientes parámetros: pH (AS-02), conductividad eléctrica (AS-18), materia orgánica (AS-07), nitrógeno inorgánico (AS-08), fosforo extraíble en suelo (AS-10), capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (AS-12), determinación de micronutrientes disponibles (AS-14), contenido de boro (AS-15), determinación de cationes solubles (AS-19). Las pruebas físicas fueron: densidad aparente (AS-03), densidad real (AS-04), textura (AS-09), capacidad de campo (AS-21).

°API petróleo crudo

El petróleo empleado en el desarrollo del experimento se obtuvo de la línea 6 del campo Yaxché ubicado en las aguas territoriales del Golfo de México. Los grados °API de petróleo se determinaron por la técnica del hidrómetro con base al método de ensayo ASTM-D1298-12b (2017). Este consistió en introducir un hidrómetro (KESSLER modelo H-825-380, USA) en una probeta Pyrex de vidrio de borosilicato graduada de 500mL que contenía muestra de crudo. Una vez tomada la lectura se procedió a realizar la corrección de grados API por temperatura de acuerdo a tabla de correcciones según ASTM-D1298-12b. De igual manera se determinaron las fracciones SARA aplicando la técnica cromatografía de adsorción arcilla-gel de acuerdo al método de ensayo ASTM-D3279 (2019).

Diseño experimental

Con el fin de mejorar la transferencia de masa en la remoción de los HTP, el suelo utilizado se mezcló con arena en una relación 1:1(Wang et al., 2020) y después, se contaminó a 60 000 ppm con petróleo crudo. Para el bioensayo se estableció un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos por triplicado: fitorremediación (FT), Electro-fitorremediación a 1.5 V (EF_1.5), Electro-fitorremediación a 2 V (EF_2) y el testigo Planta en suelo sin petróleo (T). El experimento consistió de mesocosmos a condiciones controladas en invernadero y cada unidad experimental consistió de una maceta de policloruro de vinilo (PVC) de 30 cm de alto y 10 cm de diámetro con 2 kg de sedimento y una plántula de mangle blanco (Tabla 1). Para electro-fitorremediación se ocuparon electrodos de grafito conectados a una fuente de alimentación marca DC Power Supply modelo QW-MS305D USA. El experimento se mantuvo durante 90 días y los datos fueron analizados por un análisis de varianza y prueba de medias Tukey al 95% de confianza en el software Rstudio-2024.04.0-735.

Tabla 1. Diseño experimental unifactorial para evaluar la remoción de HTP

Tratamiento	Composición
EF_2V	Suelo contaminado + planta + voltaje
EF_1.5V	Suelo contaminado + planta + voltaje
FT	Suelo contaminado + planta
T	Suelo + planta

Caracterización fisicoquímica en tratamientos

Análisis de hidrocarburos de Fracción Pesada (HFP) y fracción SARA

La fracción pesada de hidrocarburos de determinó de acuerdo a la NMX-AA-134-SCFI-2006 (SEMARNAT, 2006) y la fracción SARA de acuerdo a la norma ASTM-D3279 (ASTM International,2019). La técnica se basa en la adsorción selectiva sobre una fase estacionaria y una fase móvil. Se prepararon por triplicado columnas de cromatografías con papel filtró, algodón, sílice gel malla 60-200 mm, y sulfato de sodio anhidro). Así mismo, se prepararon mezclas de soluciones con relación 1:1 de hexano-tolueno (saturados), tolueno-metanol (aromáticos) y metanol-cetona (resinas). Después, el extracto de hidrocarburos se lavó con las mezclas y el lixiviado se recuperó en vasos de precitados de 25 mL previamente a peso constante. Finalmente se llevaron al horno (Quincy lab modelo QUIN10055 USA) a 110 °C para la evaporación del solvente y después realizar la cuantificación por gravimetría. Una vez determinada la concentración de hidrocarburos en los tratamientos, se calculó la eficiencia en la remoción del hidrocarburo mediante la ecuación 1.

$$\%\ \boldsymbol{Remoción} = \mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{HTP_{Residual}}}{\boldsymbol{HTP_{Inicio}}} * \mathbf{100} \quad \text{Ec. 1}$$

Cultivo de bacterias totales de la rizosfera

La población de bacterias totales se determinó mediante el sembrado en placas por diluciones seriadas (Madigan et al., 2021). A las raíces del mangle blanco se les removió el exceso de suelo. Después, se cortaron y se pesaron 10 g de raíces. Posteriormente, se preparó una dilución madre con los 10 g de raíces adicionados en 90 mL de agua destilada estéril. De la solución madre se prepararon diluciones desde 10^{-1} hasta 10^{-6}. La siembra se realizó en cajas Petri que contenían medio agar nutritivo. Después de la siembra las cajas se incubaron durante 72 horas en incubadora YAMATO IC403C USA a 35 ± 2 °C. Para el conteo de células se seleccionó la dilución que presentara entre 30 y 250 unidades formadoras de colonias (UFC/mL).

Clorofila

A los 90 días del experimento se determinó la clorofila a y b por el método espectrofotométrico empleando acetona al 80% grado reactivo como solvente de extracción (Arshad et al., 2023). Muestras

de 5 g de hojas previamente maceradas en mortero se llevaron a centrifugación a 2000 rpm durante 10 min en una centrífuga marca LABNET C1801-230 USA. Posteriormente, se filtró el sobrenadante con papel filtro poro mediano y se llevó a espectrofotómetro (THERMO modelo 4001/4 USA) para lectura a 663 y 645 nm. El contenido de clorofila se determinó utilizando las ecuaciones 1 y 2 descritas por Arshad et al. (2023)

$$Clorofila\ A = (12.7 * Abs663) - (2.69 * Abs645)\ Ec.1$$

$$Clorofila\ B = (22.9 * Abs645) - (4.68 * Abs663)\ Ec.2$$

Biomasa seca

El peso de la biomasa seca se determinó de acuerdo al método empleado por Gonzáles et al. (2019). A los 90 días de la siembra de las plántulas se recolectaron las hojas de cada unidad experimental y se secaron en horno de secado (Ecoshel modelo 90553A U.S.A) a 70 °C durante 72 horas y después se registró el peso en balanza analítica VELAB modelo VE-30 USA.

pH y CE

Durante el experimento se monitoreo semanalmente el pH y la CE de acuerdo con la norma mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002). Esto con el fin de evaluar los cambios en suelo por efecto del tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del suelo

En la tabla 2 se muestra la caracterización fisicoquímica del suelo de manglar. De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) el pH es medianamente alcalino con efectos despreciables de salinidad, alto en contenido de materia orgánica y alto en niveles de fósforo, boro, potasio, calcio, sodio y magnesio. En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico y los micronutrientes disponibles (Cu, Fe, Zn, Mn) se encuentran en concentraciones adecuadas para un suelo fértil. Dentro de los parámetros físicos el suelo presento una textura franco arcillosa, una capacidad de campo del 50.49%, la densidad real presento un valor de 1.48 g/mL mientras que la

densidad aparente de 0.46 g/mL. Aunado a las características fisicoquímicas y de acuerdo Domínguez et al. (2011) el suelo es de tipo Solonchak Gleyico (Arcillico).

Tabla 2. Características físicas y químicas del suelo

Determinación	Resultado	Unidad	Interpretación
pH	8.45	-	Medianamente alcalino
CE	0.461	dS/m	Efectos despreciables de salinidad
Capacidad de campo	50.49	%	-
Mo	3.43	%	Alto
N	0.20	%	Muy bajo
Textura	Arcilla:30 Limo:30 Arena:40	%	Franco arcillosa
Fósforo (P)	64	mg/k	Alto
Boro (B)	4.8	mg/k	Muy alto
Hierro (Fe)	29	mg/k	Adecuado
Cobre (Cu)	4	mg/k	Adecuado
Cinc (Zn)	2	mg/k	Adecuado
Manganeso (Mn)	18	Cmol/kg	Adecuado
CIC	23.89	Cmol/kg	Media
Potasio (K)	2.18	Cmol/kg	Alta
Calcio (Ca)	12.10	Cmol/kg	Alta
Sodio (Na)	6.50	Cmol/kg	Alta
Magnesio (Mg)	8.24	Cmol/kg	Alta
Densidad real	1.48	g/mL	-
Densidad aparente	0.46	g/mL	-

°API de petróleo

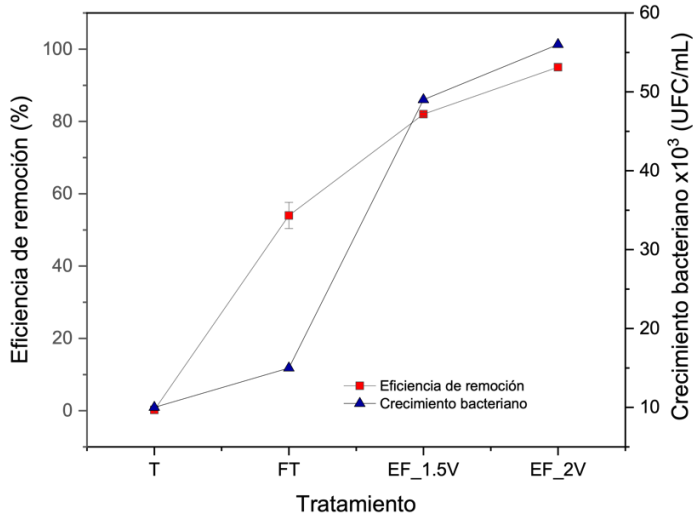
El petróleo presentó una gravedad de 15.13° API y se identificó como crudo pesado conforme a los estándares establecidos por el Instituto Americano de Petróleo, este tipo de petróleo se caracteriza por presentar una alta viscosidad, un bajo rendimiento de fracción de combustible de bajo punto de

ebullición y en comparación con el petróleo ligero cuenta con un alto contenido de heteroátomos (Dembicki, 2022).

Actividad microbiana y remoción

Las condiciones de operación adecuadas para la actividad microbiana hidrocarbonoclasta son imprescindibles para la degradación de hidrocarburos. La figura 1 muestra que el tratamiento (EF_2V) con la aplicación de voltaje de 2V presenta la mayor eficiencia de remoción con un 95% en comparación con el tratamiento de 1.5V (EF_1.5V) de 82%. Mientras que, en la fitorremediación (FT) un 56% de remoción. La población de microorganismos fue mayor en el tratamiento EF_2V con una población de bacterias totales de $56x10^3$ UFC/mL. Mientras que, en la fitorremediación convencional la población microbiana fue de $15x10^3$ UFC/mL. La eficacia de los tratamientos con la aplicación de un campo eléctrico se atribuye a cambios en la propiedad del suelo (pH, temperatura, iones solubles y conductividad) esto se debe a las reacciones de oxidación y reducción que ocurren en los electrodos, dando como resultado una variedad de oxidantes químicos (H_2OH_2, OH, ClO, HClO) que permiten eliminar los contaminantes orgánicos y a su vez provoca cambios en la comunidad y composición microbiana (Li et al., 2020; Fan et al., 2020). El voltaje 2V se reconoció como el valor óptimo para la remoción de hidrocarburos y una mayor actividad microbiana, esto coincide con Li et al. (2020) quienes identificaron el gradiente de voltaje 2V como la intensidad óptima de campo eléctrico para mejorar la degradación de petróleo y actividad microbiana.

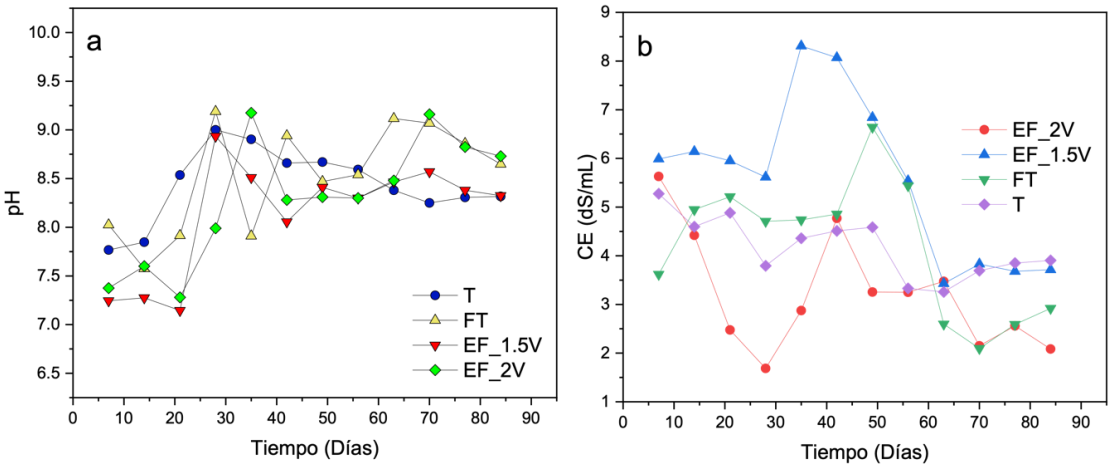
Figura 1. Eficiencia de remoción y crecimiento microbiano en los diferentes tratamientos



Comportamiento pH y CE

El pH y la CE son propiedades fisicoquímicas que influyen en la extracción de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. De acuerdo a la figura 2a el pH entre tratamientos (T, FT, EF_1.5V y EF_2V) el comportamiento del pH fue variable presentando valores medianamente alcalinos (7.4-8.5) de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).Los altos valores de pH registrados en los tratamientos (EF_2V y EF_1.5V) se debe al agotamiento de ácidos orgánicos, la formación de compuestos intermedios alcalinos y a la acumulación de bicarbonato resultante de la descomposición del petróleo generada por las reacciones electroquímicas (Neina, 2019) . Mientras que en los tratamientos (T y FT) se le atribuye al consumo de iones HCO_3 produciendo CO_2 y OH^- generando así una alta actividad fotosintética por parte de la planta (Beltrán-Rocha et al., 2017). Al respecto, estudios afirman que la tasa de liberación de NH_4^+ (principal forma de nitrógeno orgánico en el suelo) está relacionado con el pH, cuanto mayor es la liberación de $NH4^+$ se obtienen valores de pH más altos (Reddy et al., 2021).

Figura 2. *a) Perfil del comportamiento del pH. b) Perfil del comportamiento de la CE*



De acuerdo a la figura 2b al inicio del experimento los tratamientos (T, FT, EF_1.5V y EF_2V) presentaron valores de conductividad eléctrica característicos de un suelo salino (4.1-8.0 dS/mL) esto de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000. Al finalizar los 90 días de tratamiento el contenido de sales disminuyo en todos los tratamientos mostrando un suelo moderadamente salino (2.0-4.1 dS/mL) este efecto hace referencia a propiedades del mangle blanco ya que a través de glándulas ubicadas en la superficie de

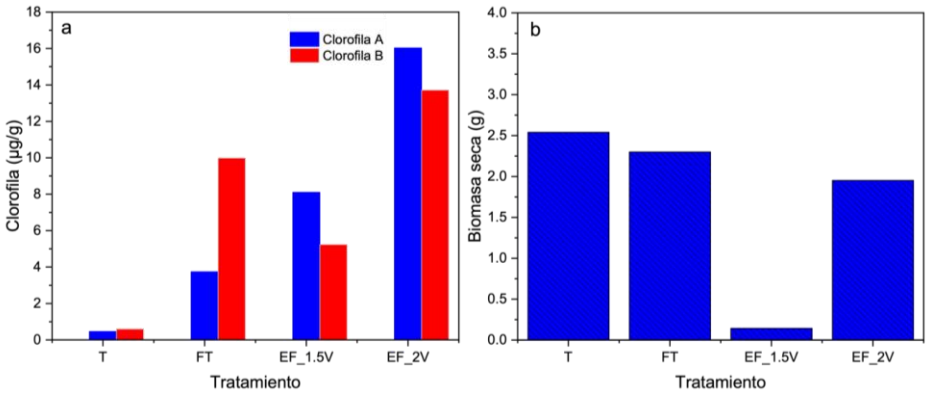
sus hojas secreta el exceso de sal. Los altos valores de conductividad eléctrica durante el experimento se deben a la liberación de iones solubles (Ca^+, K^+, Na^+, Mg^+) en el suelo aumentando así la concentración de sales (Lonard et al., 2020).

Clorofila y biomasa seca

La concentración de clorofila es un indicador del estrés nutritivo de las plantas, la fotosíntesis y periodos de crecimiento. De acuerdo a la figura 3a la clorofila a y b vario entre los cuatro tratamientos. El tratamiento con aplicación de voltaje (EF_2V) mostró una mayor concentración de clorofila a (16.03 µg/g) y b (13.71 µg/g) en comparación con el tratamiento de 1.5V (EF_1.5V) con un contenido menor de clorofila a (8.10 µg/g) y b (3.04 µg/g). Mientras que los tratamientos de fitorremediación (FT) y testigo (T) presentaron valores altos de clorofila b y bajos de clorofila a. La alta concentración de clorofila se debe principalmente a una mejor capacidad para captar la energía lumínica, esto nos indica que la planta tiene mayor actividad en el proceso fotosintético. Mientras que los bajos valores se puede explicar por una deficiencia de macronutrientes como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K) siendo estos los más fundamentales para el desarrollo de la planta. De igual manera una deficiencia de hierro influye en los mecanismos bioquímicos y fisiológicos esenciales para la producción de clorofila y proteínas (Dookie et al., 2022; Porcar-Castell et al., 2021).

Conforme a la figura 3b los tratamientos (T, FT, EF_2V) presentaron rangos similares en peso seco mientras el tratamiento con aplicación de voltaje (EF_1.5V) mostro un peso menor, estudios demuestran que el nutriente limitante para el crecimiento y acumulación de masa seca es una deficiencia de nitrógeno (N) (Larramendi et al., 2021).

Figura 3. a) Clorofila a y b. b) Biomasa seca a los 90 días en cada tratamiento



Fracciones SARA

La fracción SARA permitió determinar los cambios en el proceso del fraccionamiento de cada uno de los componentes conforme al tratamiento aplicado. En la tabla 2 se muestran las fracciones SARA a los 90 días de tratamiento. En la fitorremediación y el tratamiento con voltaje de 1.5V (EF_1.5V) hubo un mayor porcentaje de remoción de la fracción aromática con 86.90% y 85.50% respectivamente. Mientras que, en el tratamiento con voltaje de 2V (EF_2V) se registró el menor porcentaje con 51.78%. En la fracción de saturados los tratamientos EF_1.5V y EF_2V mostraron una disminución del 36.07% y 5.54% respectivamente. Por el contrario, los tratamientos EF_2V y FT redujeron la fracción de asfáltenos en un 40.55% y 72.03% respectivamente. En la fracción resinas hubo un incremento significativo en los tres tratamientos. Estos efectos se deben principalmente al proceso de hidroxilación como primera etapa en la ruta de degradación en cada una de las fracciones. La degradación de asfáltenos está asociada con la aparición de grupos funcionales hidroxilo y carbonilo. El incremento de saturados se debe a un aumento en la degradación de aromáticos. Cabe señalar que la biodegradación depende de la capacidad de los microorganismos para emplear los compuestos del petróleo como sustrato para su crecimiento. Y, entre mayor número de anillos en su estructura química el rendimiento microbiano disminuye. Por tal razón es que los saturados son los primeros en oxidarse seguido de los aromáticos siendo las resinas y asfáltenos los de mayor complejidad (Nzila et al;2021)

Tabla 2. Porcentaje y remoción de la fracción SARA en tratamientos

Fracción	T	FT	Remoción	EF_1.5V	Remoción	EF_2V	Remoción
Saturados (%)	55.8	77.04	-	35.66	36.07	52.70	5.54
Aromáticos (%)	14.525	1.32	86.90	2.10	85.50	7.00	51.78
Resinas (%)	0.575	5.28	-	4.01	-	13.71	-
Asfáltenos (%)	29.1	17.29	40.55	58.21	-	8.13	72.03

CONCLUSIONES

La combinación de dos técnicas en una, permitió alcanzar una mayor remoción de hidrocarburos, En esta investigación la electro-fitorremediación presenta mayor eficiencia en la remoción de hidrocarburos ante una fitorremediación. Cuando se aplica voltaje entre 1.5 - 2V se favorece el crecimiento microbiano que es esencial para la remoción del hidrocarburo y el crecimiento de las plántulas de mangle. Se recomienda para futuros trabajos evaluar el efecto de la adición de surfactantes para la mejora en la degradación del hidrocarburo por electro-fitorremediación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, R. H., Ojeda-Castillo, V., Guzmán-Osorio, F. J., Álvarez-Coronel, G., & Domínguez-Rodríguez, V. I. (2020). Human health risks from fish consumption following a catastrophic gas oil spill in the Chiquito River, Veracruz, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(12). https://doi.org/10.1007/s10661-020-08742-z

Arshad, M., Kamaruddin, S. A., & Abd, K. N. (2023). Quantification of chlorophyll content in leaves of *Avicennia germinans, Laguncularia racemosa, Durio zibethinus, Garcinia mangostana, Spinacia oleracea, Piper betle, Piper sarmentosum* and *Centella asiatica*. *International Journal of Innovation and Industrial Revolution, 5*(14), 125–132. https://doi.org/10.35631/IJIREV.514009

ASTM International. (2017). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method (ASTM D1298-12b)*. ASTM International.

ASTM International. (2019). *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity) (ASTM D3279-19)*. ASTM International.

Beltrán-Rocha, J. C., Guajardo-Barbosa, C., Barceló-Quintal, I. D., & López-Chuken, U. J. (2017). Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO_2. *Revista de Biología Marina y Oceanografía, 52*(3), 417–427. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572017000300001

Cameselle, C., & Gouveia, S. (2018). Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current. *Journal of Hazardous Materials*, *361*, 95–102. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.062

Day, J. W., Rivera-Arriaga, E., Del Carmen Peña-Puch, A., & Hunter, R. G. (2024). Sustainability of Gulf of Mexico Coastal Estuaries and Lagoons: Interactions with Hydrocarbon Production—A Review with a Look to the Future. *Sustainability*, *16*(19), 8601. https://doi.org/10.3390/su16198601

Dembicki, H. (2022). *Practical petroleum geochemistry for exploration and production*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2021-0-01572-8

Domínguez-Domínguez, M., Zavala-Cruz, J., & Martínez-Zurimendi, P. (2011). *Manejo forestal sustentable de los manglares de Tabasco*. Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental / Colegio de Postgraduados.

Domínguez-Domínguez, M., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., & Martínez-Zurimendi, P. (2019). Management Strategies for the conservation, restoration and utilization of mangroves in Southeastern Mexico. *Wetlands*, *39*(5), 907–919. https://doi.org/10.1007/s13157-019-01136-z

Dookie, S., Jaikishun, S., & Ansari, A. A. (2022). Soil and water relations in mangrove ecosystems in Guyana. *Geology Ecology and Landscapes*, *8*(3), 445–469. https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2142186

Fan, R., Ma, W., & Zhang, H. (2020). Microbial community responses to soil parameters and their effects on petroleum degradation during bio-electrokinetic remediation. *Science of the Total Environment, 748*, 142463. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142463

González, E. E. G., Romero, A. R., Volta, R., & Daranas, B. M. (2019). *Variación temporal de la productividad foliar de "Thalassia testudinum" K. D. Koenig en una pradera del Rincón de Guanabo, Cuba*. Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9429712

Khan, S., Masoodi, T. H., Pala, N. A., Murtaza, S., Mugloo, J. A., Sofi, P. A., Zaman, M. U., Kumar, R., & Kumar, A. (2023). Phytoremediation prospects for restoration of contamination in the natural ecosystems. *Water*, *15*(8), 1498. https://doi.org/10.3390/w15081498

Larramendi, L. a. R., Salas-Marina, M., Hernández-Garcia, V., Campos-Saldana, R., Cruz-Macias, W., De La Cruz Morales, M., Gordillo-Curiel, A., & Guevara-Hernandez, F. (2021). EFECTO FISIOLÓGICO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA y NITRÓGENO EN PLANTAS DE GUAYABA. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *24*(1). https://doi.org/10.56369/tsaes.3391

Li, F., Guo, S., Wang, S., & Zhao, M. (2020). Changes of microbial community and activity under different electric fields during electro-bioremediation of PAH-contaminated soil. *Chemosphere*, *254*, 126880. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126880

Li, F., Guo, S., Wu, B., & Wang, S. (2020). Pilot-scale electro-bioremediation of heavily PAH-contaminated soil from an abandoned coking plant site. *Chemosphere, 244*, 125467. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125467

Lonard, R. I., Judd, F. W., DeYoe, H. R., & Stalter, R. (2020). Biology and ecology of the halophyte *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. f.: A review. En *Springer eBooks* (pp. 1–16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17854-3_71-2

Madigan, M. T., Aiyer, J., Buckley, D. H., Wiser, M., & Stahl, D. A. (2021). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson Educación Superior.

Morales-Bautista, C. M., Lobato-García, C. E., Flores-Jiménez, J., & 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

Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science, 2019*, 1–9. https://doi.org/10.1155/2019/5794869

Nzila, A., & Musa, M. M. (2021). Current knowledge and future challenges on bacterial degradation of the highly complex petroleum products asphaltenes and resins. *Frontiers in Environmental Science*, *9*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.779644

Porcar-Castell, A., Malenovský, Z., Magney, T., Van Wittenberghe, S., Fernández-Marín, B., Maignan, F., Zhang, Y., Maseyk, K., Atherton, J., Albert, L. P., Robson, T. M., Zhao, F., Garcia-Plazaola, J., Ensminger, I., Rajewicz, P. A., Grebe, S., Tikkanen, M., Kellner, J. R., Ihalainen, J. A., . . . Logan, B.

(2021). Chlorophyll a fluorescence illuminates a path connecting plant molecular biology to Earth-system science. *Nature Plants*, *7*(8), 998–1009. https://doi.org/10.1038/s41477-021-00980-4

Pulster, E. L., Gracia, A., Armenteros, M., Toro-Farmer, G., Snyder, S. M., Carr, B. E., Schwaab, M. R., Nicholson, T. J., Mrowicki, J., & Murawski, S. A. (2020). A first comprehensive baseline of hydrocarbon pollution in Gulf of Mexico fishes. *Scientific Reports*, *10*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-62944-6

Quispe-Villanueva, M. S. (2022). Más tránsito de hidrocarburos en nuestro mar: ponen en peligro nuestros alimentos de origen marino. *Revista De Investigaciones De La Universidad Le Cordon Bleu*, *9*(1), 125–131. https://doi.org/10.36955/riulcb.2022v9n1.011

Reddy, Y., Kumar, P. S., Raj, R. P., & Nair, V. R. (2021). Assessment of bioavailable nitrogen and phosphorus content in the sediments of Indian mangroves. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(31), 42051–42069. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13638-7

Saini, A., Bekele, D. N., Chadalavada, S., Fang, C., & Naidu, R. (2021). Electrokinetic remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil (I). *Environmental Technology & Innovation*, *23*, 101585. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101585

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2002). NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=698362&fecha=31/12/2002

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2006). *NMX-AA-134-SCFI-2006. Para la determinación de hidrocarburos de fracción pesada por extracción y gravimetría: Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación.

Siyar, R., Ardejani, F. D., Farahbakhsh, M., Norouzi, P., Yavarzadeh, M., & Maghsoudy, S. (2019). Potential of Vetiver grass for the phytoremediation of a real multi-contaminated soil, assisted by electrokinetic. *Chemosphere*, *246*, 125802. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125802

Sol-Sánchez, A., Hernández-Melchor, G. I., & Hernández-Hernández, M. (2022). Desarrollo bioeconómico y manglares en América Latina. *Revista Iberoamericana De Bioeconomía Y Cambio Climático*, *8*(16), 2007–2017. https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15162

Sovilla, B., Gómez-Ramírez, E., & Sánchez-Pérez, M. (2021). La reforma energética y el problema petrolero en México. *Revista CEA*, *7*(13). https://doi.org/10.22430/24223182.1631

Verâne, J., Santos, N. C. D., Da Silva, V. L., De Almeida, M., De Oliveira, O. M., & Moreira, Í. T. (2020). Phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mangrove sediments using Rhizophora mangle. *Marine Pollution Bulletin*, *160*, 111687. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111687

Wang, H., Cui, Y., Lu, L., Jin, S., Zuo, Y., Ge, Z., & Ren, Z. J. (2020). Moisture retention extended enhanced bioelectrochemical remediation of unsaturated soil. *The Science of the Total Environment*, *724*, 138169. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138169