

Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos

Changes in the physical and chemical properties of a soil due to a restoration process applied to a spill of hydrocarbon

Carlos M. Morales-Bautista^{1*}, Carlos E. Lobato-García¹, Joel Flores-Jiménez¹, Candelario Mendez-Olán¹.

¹Laboratorio de Análisis de Suelos e Hidrocarburos del Cuerpo Académico Química Aplicada a la Gestión Ambiental, División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Cunduacán-Jalpa KM. 1 Col. La Esmeralda CP. 86690. Tel. (993) 3581500 Ext. 6702, 3581573 y (914) 336 09 28 Cunduacán, Tabasco.

Correo electrónico: carlos.morales@ujat.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

En México, los suelos impactados por hidrocarburos son remediados mediante diversas técnicas, algunas reducen la concentración del contaminante y otras lo estabilizan; es por ello que las condiciones finales dependerán del proceso aplicado. Al no considerar esta situación, algunas áreas restauradas con vocación de uso agrícola-ganadera presentan problemas tales como baja producción de cultivos y/o forrajes. Debido a lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar los cambios en las propiedades de un suelo post-remediación (un mes y un año), comparándolo con un testigo. Se observaron Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) debajo del límite normativo (600 mg·kg⁻¹ a 660 mg·kg⁻¹) y no varían después de un año; además, se observaron cambios en los suelos tales como pH (~6.4 a ~7.4), humedad (~14% a ~10%), densidad aparente (~1.1 g·cm⁻³ a ~1.4 g·cm⁻³) y densidad real (~2.0 g·cm⁻³ a ~2.5 g·cm⁻³), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (~26 Cmol·kg⁻¹ a ~11 Cmol·kg⁻¹) y texturas (de arcillosa a franco-arenosa) sin cambios después del año.

Palabras clave: Contaminación; remediación; fertilidad; impacto ambiental.

Abstract

In Mexico, soils impacted by hydrocarbons are remediated by various techniques; some reduce the concentration of the pollutant and others stabilize it, this is why the final conditions will depend on the applied process. When not considering this situation, some restored areas with an agricultural-livestock vocation use present problems such as low production of crops and/or forages. Based on the above, the present work aimed to evaluate the changes in the properties of a post-remediation soil (one month and one year) by comparing it with a control soil. Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) were observed below the regulatory limit (600 mg·kg⁻¹ to 660 mg·kg⁻¹) and did not vary after one year; moreover, changes in soils such as pH (~6.4 to ~7.4), humidity (~14% to ~10%), apparent density (~1.1 g·cm⁻³ to ~1.4 g·cm⁻³) and real density (~2.0 g·cm⁻³ to ~2.5 g·cm⁻³), Cation Exchange Capacity (CEC) (~26 Cmol·kg⁻¹ to ~11 Cmol·kg⁻¹) and textures (from clayey to sandy-loam), unchanged at one year.

Keywords: Pollution; remediation; fertility; environmental impact.

Recibido: 14 de julio de 2017

Aceptado: 14 de septiembre de 2018

Publicado: 6 de noviembre de 2019

Como citar: Morales-Bautista, C. M., Lobato-García, C. E., Flores-Jiménez, J., & Mendez-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, e2154. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2154>

Introducción

Hace algunos años, en México fue promulgada una reforma de ley en materia energética; el objetivo principal fue la inclusión de la iniciativa privada en este sector con el fin de maximizar el aprovechamiento de los recursos naturales, entre ellos petróleo crudo y gas natural (Vargas, 2015).

Los campos petroleros con mayor potencial de producción se encuentran en el Golfo de México y todo su litoral. En zona terrestre, las principales reservas están localizadas en la cuenca sureste que abarca los estados Tabasco, Veracruz y Campeche (Romo, 2016). Algunas investigaciones enfatizan que las actividades propias de este sector se encuentran en relación directa con los impactos negativos al medio ambiente en este territorio (Vale-Capdevila, Pérez-Silva & Ramírez-Gotario, 2016). Varias investigaciones han demostrado que con el aumento de las operaciones asociadas con la producción de petróleo crudo se potencializa el riesgo de derrames, lo que ha llevado al deterioro de los ecosistemas (Vílchez-Fernández & Ulloa-Carcasés, 2015). También, algunos trabajadores han reportado la importancia de las directrices con las que se establecen los diagnósticos en materia de contaminación por hidrocarburos, los cuales deben basarse en crear herramientas que permitan establecer sistemas adecuados que optimicen la recuperación de las áreas contaminadas, en específico, que se recobre la productividad del sector primario (Pérez, Iturbe & Flores Serrano, 2005).

Actualmente, muchos de los estudios de impacto ambiental en materia de hidrocarburos son con el fin de crear información requerida por la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (Asea), esta se basa en guías que especifican los estudios que deben de realizarse en las nuevas operaciones de exploración, producción y transformación de hidrocarburos. En estas directrices, se destaca la importancia de la implementación de una línea base ambiental (LBA) (Palomeque, Galindo, Sánchez, Maurice & Jorge, 2017). Básicamente, este documento es un informe de las condiciones en las que se recibe una instalación petrolera o un sitio donde se reactivará la producción de hidrocarburos. Con los resultados se pueden señalar las responsabilidades sobre los posibles impactos de pasivos ambientales, así como los impactos negativos que ocasionará la inserción de nueva infraestructura (Miller & Benítez, 2016). La importancia de establecer estudios en zonas donde sucedieron derrames de hidrocarburos puede contribuir en mejorar las evaluaciones realizadas en las LBA (Moreno, 2017).

Hasta la fecha, en materia de impacto ambiental por hidrocarburos en suelos, se han implementado diversos tratamientos que están regidos por la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 (DOF, 2013). Este instrumento legal establece los límites máximos permisibles (LMP) de hidrocarburos en suelos; sin embargo, existen tecnologías que permiten estabilizar e impedir la movilidad del contaminante. En estos casos, se evalúa que el suelo no muestre toxicidad mediante un análisis de riesgo en lixiviados (Adams, Guzmán-Osorio & Domínguez-Rodríguez, 2014).

De manera general, las remediaciones de suelos pueden darse por medio de métodos físicos, químicos, biológicos o sus combinaciones; en términos de operación ingenieril, pueden clasificarse en dos tipos: *in situ* y *ex situ*. En el primero, todas las actividades son realizadas en el sitio y en el segundo, el suelo es removido y llevado a tratamiento a una planta donde es tratado, para luego ser devuelto al área donde se encontraba inicialmente (Gómez-Reyes, Medina-Moreno, Jiménez-González & Lizardi-Jiménez, 2017). Algunos reportes establecen que la factibilidad de cada tecnología se basa principalmente en tres puntos (Adams, Álvarez-Ovando & Castañón, 2015); el primero es el análisis de riesgo (en el caso de los de fracción ligera, por explosividad, infiltración hacia el manto acuífero), el segundo son los costos (los sistemas biológicos suelen ser más económicos que los físico-químicos, pero requieren un mayor tiempo de tratamiento, también en este punto se considera el traslado del material contaminado y el volumen a tratar) y el tercero es el tipo de contaminante (en este último, algunos trabajos enfatizan que la fracción

ligera, mediana son más fáciles de remover) (Aguirre-García, 2017). Sin embargo, existen reportes que mencionan que en la mayoría de las remediaciones no se consideran el tipo de suelo ni el tipo de petróleo crudo; se tiene la certeza que de un suelo remediado no se recuperan la totalidad de sus horizontes ni sus características, pero existe incertidumbre en si realmente se devuelven las condiciones necesarias para desarrollar plantas que no representen una pérdida para el agricultor o ganadero (Huerta-Moreno, 2014). Con base en esta hipótesis, algunos trabajos coinciden en que el no hacer las adecuaciones necesarias al suelo tratado conlleva a que en muchas ocasiones no se logre devolver en su totalidad la vocación de uso de suelo (Morales-Bautista, Adams, Guzmán-Osorio & Marín-García, 2013).

En este contexto, algunos estudios realizados en el sureste mexicano por Zavala-Cruz *et al.* (2005) y Adams, Osorio & Cruz (2008) muestran que en áreas restauradas dentro del Activo Petrolero Cinco Presidentes se ha observado que existen diversas concentraciones de hidrocarburos residuales aún por debajo del LMP que afectaban la fertilidad. En sentido opuesto, en otros sitios, dentro del mismo activo reportados por Adams, Cerecedo-López, Alejandro-Álvarez, Domínguez-Rodríguez & Nieber (2016), se ha observado que existen plantas tolerantes a concentraciones por encima del LMP. En términos generales, estos trabajos coinciden en que estos efectos negativos sobre la fertilidad se intensifican al someter los suelos contaminados a intemperización. También observaron que, al existir la biotransformación del contaminante se presentan efectos negativos que se asocian principalmente a impactos sobre la capacidad de campo, contenido de materia orgánica y texturas. En estudios similares, Guzmán-Osorio & Adams (2015) encontraron un aumento de la densidad aparente y la disminución de conductividad hidráulica; estos problemas estaban asociados a la baja productividad primaria de cultivos. Otros trabajos reportan que la inducción de pastos mejoraba estas variables en áreas restauradas después de un lapso largo de tiempo (Morales-Bautista, Adams, Hernández-Barajas, Lobato-García & Torres-Torres, 2016).

Las incertidumbres en las estimaciones de la efectividad de los tratamientos son grandes; ya que existen pocos estudios que comparen una misma tecnología aplicada para remover el mismo contaminante en diferentes tipos de suelo. Algunos reportes como los de Morales-Bautista, Lobato García, Méndez-Olán & Alor Chávez (2016) establecen diferencias en las condiciones finales de suelos tratados mediante intercambio catiónico, y aplicando enmiendas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a suelos salinos, plantean la hipótesis de que cada suelo se comporta de manera diferente ante un mismo contaminante y que el tratamiento aplicado define las condiciones finales. También, indican que los contaminantes residuales tienen un comportamiento diferente cuando se intemperizan, por lo que es necesario evaluar el área restaurada durante un lapso de tiempo para poder definir qué planta inducir según la vocación de uso de suelo. Debido a lo anterior, el objetivo principal del presente trabajo fue evaluar cuáles fueron los cambios de algunas propiedades físicas y químicas de un área tratada comparándola con otra testigo. El estudio incluye un muestreo a un mes después de la remediación y otro a un año. Con la información se pudo determinar si los parámetros se mantenían o se recuperaban.

Antecedentes

Según los reportes de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa), en julio de 2013 se registró un derrame de diésel en un predio localizado en la comunidad rural de Miahuatlán del municipio de Cunduacán, Tabasco. La fuga se suscitó durante las labores de mantenimiento de la línea de ductos Castaños-Dos bocas. El área total impactada fue de 1500 m² con una profundidad de entre 30-40 cm. El informe indica que el hidrocarburo fluyó desde la brida hacia un canal de aguas pluviales debido a la época del año; este se encontraba seco (Triano-Coronel, 2013). En agosto del mismo año, se realizaron diversas medidas de prevención, control y remediación del sitio. Primero, se derribó la vegetación del área afectada (cacaotales y cedros); posteriormente, se acordonó el área con geomembranas y se recolectó el contaminante mediante bombeo mecánico. Para tratar el material, el suelo contaminado fue removido

(alrededor de 40 cm de espesor) y trasladado hacia una área aledaña, ahí se colocó el material sobre geomembranas para airearlo, luego se mezcló con un tenso-activo (poliacrilamida al 2%), homogenizando mediante una pala mecánica frontal. Posteriormente, se lavó con exceso de agua y se colectó el líquido drenado para darle disposición según las recomendaciones de la autoridad ambiental (*in situ off site*). Cuando se llegó a concentraciones por debajo del LMP, se acondicionó el sitio distribuyendo el material tratado en toda el área (alrededor de 40 cm de espesor) y fueron plantados especímenes de plátano (*Musa balbisiana*) (Semarnat, 2013).

Materiales y Métodos

En septiembre de 2013, se acudió al predio donde sucedió el derrame. En el recorrido se observó que en la zona restaurada existía un sembradío de plátano con ejemplares (~64 ejemplares) de entre 40 cm a 60 cm de altura, los cuales estaban divididos por pequeños canales de 30 cm de ancho y 20 cm profundidad con una pendiente ~5°; los canales se encontraban dispuestos hacia un canal de aguas pluviales localizado al norte de la zona de estudio. El área remediada quedó delimitada al este y al oeste por el plantío, al norte por un potrero con pasto chontalpo (*Bracharia Decumbens*) y al sur por un juego de válvulas y "trampas de diablo" propiedad de la paraestatal Petróleos Mexicanos (Pemex).

La recolección de la muestra se realizó mediante un muestreo dirigido en el que se tomaron estratos geológicos, empleando núcleos de acero inoxidable (8 cm de ancho por 50 cm de largo). Se obtuvieron cinco muestras para suelo testigo (a-e) y cinco de muestras problemas dentro de la zona remediada (1-5). La ubicación de los puntos de muestreo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Referencias de toma de muestras testigos y problemas.

Muestra	Coordenadas UTM
1	15Q 04668187, 1990968
2	15Q 04681892, 1991031
3	15Q 04681892, 1992043
4	15Q 04772412, 1990778
5	15Q 04782412, 1990688
a	15Q 04668201, 1909733
b	15Q 04668207, 1990976
c	15Q 04682131, 1990985
d	15Q 04682412, 1990988
5	15Q 04682473, 1990992

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar efectos sobre propiedades de los suelos, a cada una de las muestras se les determinó pH, porcentaje de humedad (%H), Densidad Aparente (DA), Densidad Real (DR), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Porosidad (%P), Conductividad Eléctrica (CE) y Texturas (Arcilla = %R, Limo = %L y Arena = %A), según los métodos referidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). Se consideró como suelo testigo al promedio de las muestras a-e (T) y como suelo remediado a los promedios de los resultados de

las muestras problemas 1-5 (T1); lo anterior, para cada una de las variables de respuesta. También, las muestras de suelo remediado se trataron según el método EPA 1664-A con el fin de determinar la concentración de Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP). Se empleó como solvente de extracción diclorometano (García, Morales-Bautista, Méndez-Olán & Adams, 2016) y ocho horas de reflujo (Martínez-Chávez, Morales-Bautista & Alor-Chávez, 2017).

En septiembre de 2014, se efectuó nuevamente el muestreo sobre los puntos referidos de suelos tratados (tabla 1) y se realizaron las mismas técnicas con el fin de evaluar los efectos de la intemperización física a un año (T2). Las condiciones a las que fue sometida el área durante el tiempo de estudio se expresan en la tabla 2.

Tabla 2. Promedio mensual de precipitaciones y temperatura durante el estudio.

Mes	Precipitaciones promedio (mm)	Temperatura promedio (°C)
Septiembre 2013	276.3	28.1
Octubre 2013	378.5	27.8
Noviembre 2013	455.8	25.8
Diciembre 2013	460.5	23.9
Enero 2014	177.7	22.3
Febrero 2014	38.8	25.8
Marzo 2014	70.5	27.3
Abril 2014	133.4	28.6
Mayo 2014	247.7	27.7
Junio 2014	264.6	28.4
Julio 2014	178.2	28.5
Agosto 2014	193.0	28.7
Septiembre 2014	372.0	27.8

Fuente: CNA (2017).

Todos los análisis se realizaron por triplicado y los datos obtenidos se analizaron mediante el método estadístico ANOVA y la comparación de media por el método Tukey para establecer las diferencias significativas.

Resultados y Discusión

Concentración de Hidrocarburos Totales del Petróleo

En cuanto a la concentración de HTP de las muestras tratadas e intemperizadas, los resultados se muestran en la figura 1.

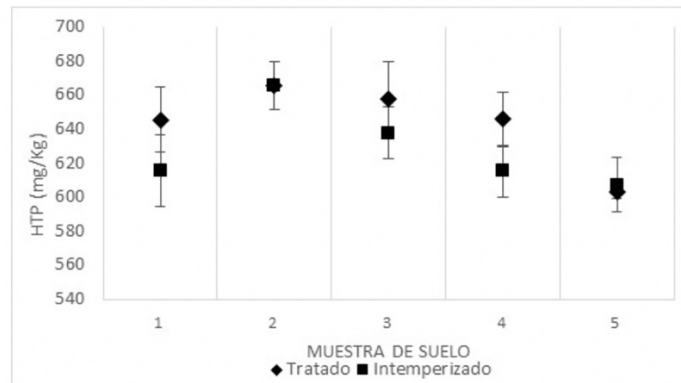


Figura 1. Concentración de HTP en muestras testigos e intemperizadas.
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los HTP de las muestras tratadas e intemperizadas, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$), también se observó que estas se encuentran entre 600 mg/kg y 660 mg/kg, lo cual está debajo del LMP. Algunos estudios como los de Marín-García, Adams & Hernández-Barajas (2016) refieren que uno de los puntos importantes a evaluar en suelo con hidrocarburos residuales es la repelencia al agua. Estos autores también mencionan que en suelos aluviales, contaminados con fracción ligera, no presentan este problema aun a altas concentraciones; sin embargo, hay que estimar que este estudio se realizó en un derrame fresco. Investigaciones como la de Guzmán-Osorio & Adams (2015) sugieren que, además del tipo de hidrocarburo y su concentración, deben considerarse los parámetros físicos y químicos del suelo, así como las condiciones que se presentan a largo plazo para establecer un diagnóstico con menores certidumbres.

En este sentido, en la mayoría de los diversos tratamientos aplicados a los suelos contaminados con hidrocarburos se homogenizan los horizontes (Chan-Quijano *et al.* 2015). En este contexto, se observó que los núcleos de suelo testigo (50 cm) presentaban un solo horizonte de color pardo oscuro con textura arcillosa y raíces abundantes de gruesas a delgadas; en cambio, los extractos de suelo tratado a un mes mostraban textura franco-arenosa como parte de la aglomeración del tenso-activo no removido e hidrocarburo residual. Del mismo modo, se observaron raíces escasas y poco profundas (10 cm) y el color de suelo fue pardo oscuro con aglomerados color negro, estos se conservaron después de un año pero en menos abundancia (Osorio & Adams, 2014). Lo anterior concuerda con los trabajos realizados por Gutiérrez & Zavala (2001) y Vázquez-Luna (2014), quienes refieren estudios que establecen que los suelos con alto contenido de arcilla suelen retener contaminantes; en cambio, los suelos arenosos favorecen el drenado de los mismos hacia otros horizontes o bien al acuífero. También establecen que la absorción de contaminantes en las arcillas permite que se aglomeren y que los suelos contaminados disminuyan este parámetro y se vea reflejado en el aumento del porcentaje de arenas (tabla 3).

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de los suelos testigo, remediado e intemperizado.

Suelo	pH	%H	%M O	DA (g/c m ³)	DR (g/c m ³)	CIC Cmol· Kg ⁻¹	%P	CE dS·c m ⁻¹	Textura		
									% R	% L	% A
Testigo	6.59	14.2	2.1 ±	1.1 ±	2.0 ±	26.6 ±	45.2	0.11	56	40	4
	±	±	0.01	0.01	0.1	0.1	±	±			
	0.30	0.36					0.1	0.01			

T1	7.24 ±0.2 0	11,1 ± 0.14	0.33 ± 0.04	1.4 ± 0.02	2.5 ± 0.1	11.2 ± 0.2	44.1 ± 0.2	0.39 ± 0.01	10	50	40
T2	7.34 ±0.1 5	10.1 ± 0.05	0.30 ± 0.03	1.5 ± 0.01	2.7 ± 0.1	11.1 ± 0.2	44.0 ± 0.2	0.40 ± 0.02	11	50	39

T = Testigo
T1 = Muestra de suelo remediado a un mes.
T2 = Muestra de suelo remediado a un año.
Fuente: Elaboración propia

Efectos sobre el pH

Gómez *et al.* (2016) establecen la importancia del pH como factor de disposición de nutrientes para el buen desarrollo y supervivencia de la planta. En la figura 2, se presentan el pH de los suelos testigo, tratados e intemperizados y su clasificación según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

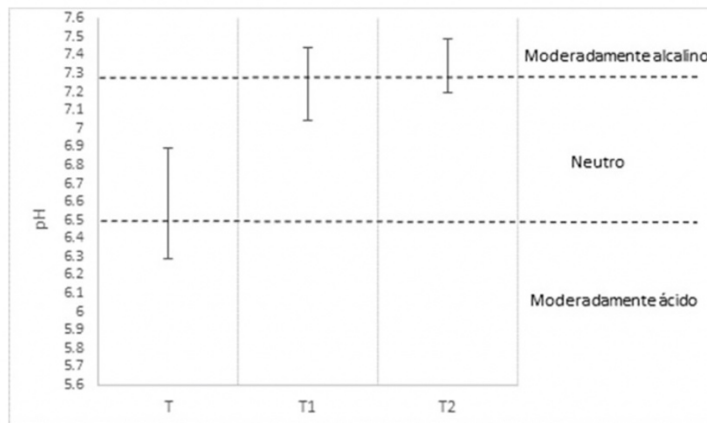


Figura 2. Variación de pH de muestras en estudio y su clasificación.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el pH de las muestras tratadas e intemperizadas no presentan diferencias entre sí ($p > 0.05$), pero al compararlas con la testigo se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$). Sin embargo, en la figura 2 se observa que, por sus incertidumbres, todas las muestras podrían ser neutras. Considerando el suelo testigo, Russell & Wild (1992) encontraron que el cacao se establece en rango de pH del suelo entre cuatro y siete, esto coincide con estas muestras, las cuales presentan un pH moderadamente ácido-neutro, comparado con el suelo tratado e intemperizado que se encuentran con pH mayores a siete (neutro-moderadamente alcalino), lo cual representaría un problema para establecer la plantación de cacao. Debido a que se cambió el tipo de plantación a plátano, Álvarez *et al.* (2013) mencionan que el pH óptimo para esta planta va de entre 5.5 y 6.5. Considerando este criterio, esta planta también puede presentar problemas para establecerse en suelos tratados e intemperizados; sin embargo, existen reportes de que esta planta puede adaptarse a estos rangos de pH (Aguilar-Lara, Noa-Carranza & Córdova-Nieto, 2016).

Cambios en el % Materia Orgánica

En algunos trabajos como los de Julca-Otiniano, Meneses-Florián, Blas-Sevillano & Bello-Amez (2006) y Martínez, Fuentes & Acevedo (2008) se considera que la materia orgánica (%MO) es un factor de fertilidad en un suelo, ya que provee de nutrientes y humedad necesarios para el buen desarrollo del cultivo. En la figura 3, se presentan los %MO para las muestras en estudio y su clasificación según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

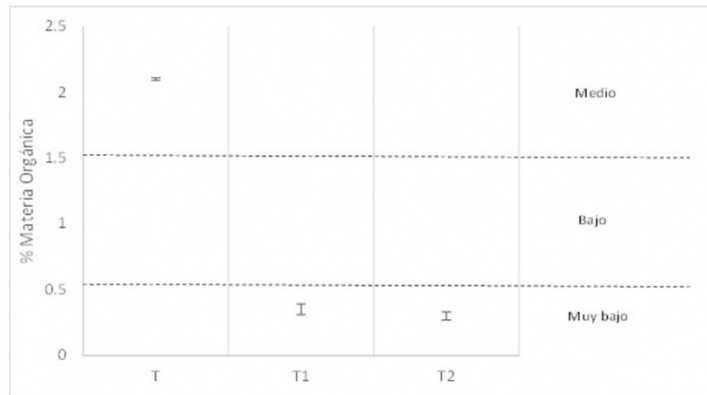


Figura 3. %MO de las muestras en estudio y su clasificación.
Fuente: Elaboración propia.

En los resultados de %MO se observó que las muestras de suelo tratado e intemperizado presentaban muy baja cantidad de materia orgánica y que no existen diferencias entre una y otra ($p > 0.05$); sin embargo, al compararlas con el suelo testigo, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), al ser esta última clasificada como medio. La materia orgánica presente en el suelo testigo probablemente se deba a que los cacaotales aportan constantemente hojarasca y sombra, lo cual permite que esta se vaya acumulando; algunos autores la refieren como un indicador de la calidad del suelo (Armida-Alcudia, Espinosa-Victoria, Palma-López, Galvis-Spinola & Salgado-García, 2005). En cuanto a los suelos tratados, se observa muy bajo porcentaje de %MO; se deduce que esto se debe a que la rizósfera fue removida durante las labores de remediación, aunado a que, en el caso de los plantíos de plátano, los productores limpian constantemente para que dicha zona esté libre de maleza y se evite la proliferación de fauna. Algunos trabajos refieren que este porcentaje está asociado con baja retención de agua, por lo que la lámina de riego aumentaría al igual que se favorece el lavado de nutrientes (Julca-Otiniano *et al.* 2006).

Variaciones en % Humedad, Densidad Aparente y Densidad Real

En la figura 4, se presentan los resultados de %Humedad para las muestras en estudio y su clasificación según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

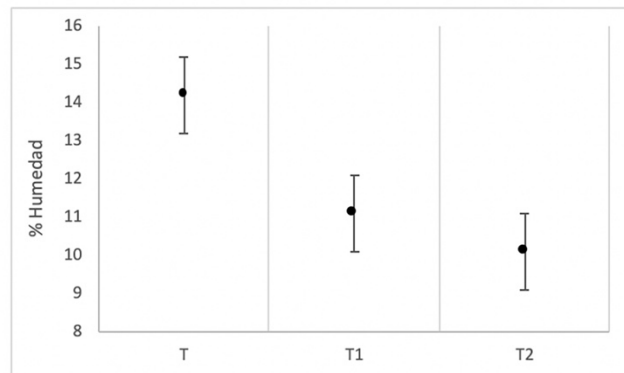


Figura 4. Porcentaje de humedad de las muestras analizadas.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la humedad, no se encontraron diferencias entre las muestras tratadas e intemperizadas ($p > 0.05$), pero sí con respecto al suelo testigo ($p < 0.05$). Comparadas con el suelo testigo se observaron disminuciones del 25% en estas muestras, lo anterior también puede relacionarse con la pérdida en el %MO (hasta del 85%) por el arrastre y homogenización de horizontes durante las obras de remediación; dicho parámetro disminuye considerablemente. En relación a estas operaciones (maquinaria y agregado de material de lavado), Méndez-Leyva (2014) observaron que la disminución de materia orgánica y paso de equipo pesado favorecen el aumento de las DA y DR y que los efectos son palpables al medir la compactación del suelo. También, Martínez (2001) establecen que DA y DR están en relación inversa con la porosidad (figura 5), impactando en un primer plano la respiración del suelo y posteriormente dificulta el anclaje o enraizamiento de las plantas.

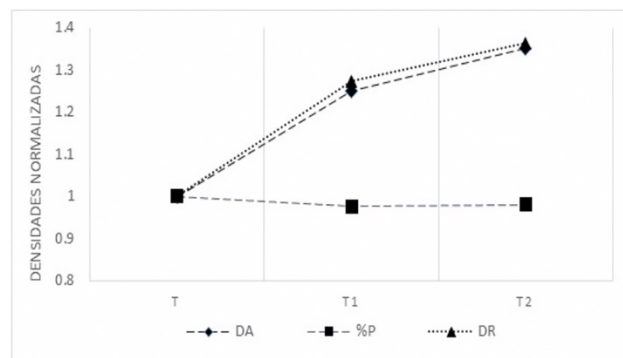


Figura 5. Relación de DA y DR con la disminución de la porosidad del suelo.
Fuente: Elaboración propia.

Capacidad de Intercambio Catiónico y variables asociadas

La CIC es una propiedad importante si se desea conocer la fertilidad del sitio. La matriz de suelo posee carga negativa proveniente de las arcillas y la materia orgánica, estas interactúan continuamente con los cationes de la disolución de suelo. Estos cationes quedan retenidos, creando un potencial catiónico que no se pierden por lavado y quedan como para los cultivos (Otero, Ortega & Morales, 1998). En la figura 6 se muestran los resultados de CIC realizados a las muestras testigo, remediada e intemperizada.

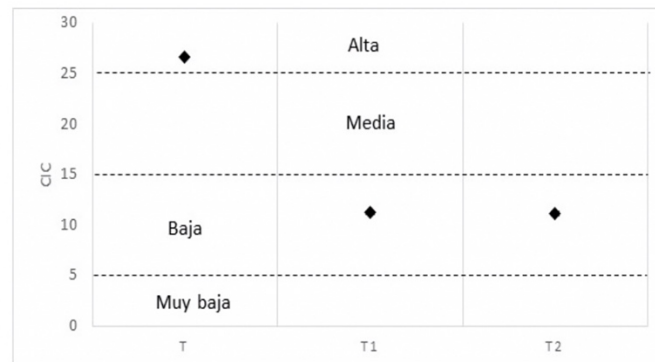


Figura 6. CIC de las muestras analizadas.
Fuente: Elaboración propia.

Comparando los resultados de CIC de las muestras de suelo tratado e intemperizado, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$); sin embargo, al contrastarlos con el suelo testigo, sí se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$). Al comparar los resultados con lo especificado en la NOM-021-SEMARNAT-2000, la muestra testigo presentó CIC alta y, al ser tratada e intemperizada, se registró una disminución de aproximadamente 40%. En este sentido, Martínez (2001) y Trujillo-Narcía *et al.* (2014) mencionan que %MO está asociado a la retención de la humedad y a la CIC. Conforme a lo anterior, se normalizaron los parámetros %MO, %H, CIC y pH a sus testigos y se contrastaron entre sí; los resultados se muestran en la figura 7.

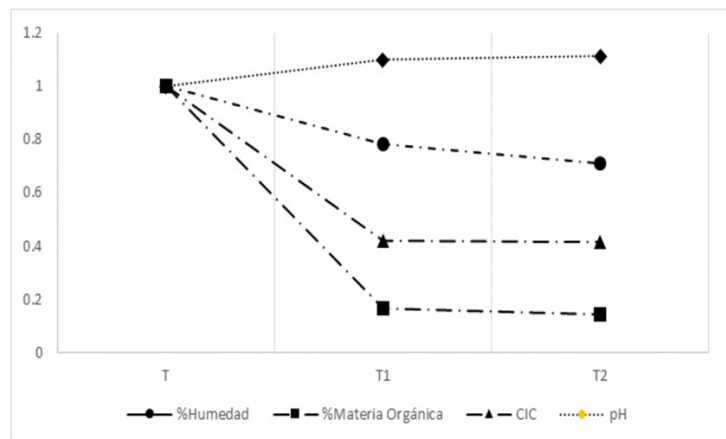


Figura 7. Relación de CIC con pH, %MO y %Humedad.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se observa que %Humedad y CIC son directamente proporcional a %MO, esto tiene similitud con lo observado por Tapia *et al.* (2008). Estos autores mencionan que la materia orgánica de un suelo tiene una CIC alta y buena retención de humedad. También se observa que la CIC es inversamente proporcional al pH, esto concuerda con lo expresado por Sanzano, Corbella, García & Fadda (2005), quienes encontraron que el pH del suelo afecta a la CIC. En el desarrollo de su investigación, los autores observaron que los suelos con pH ácidos poseen una CIC más alta con respecto a los de pH entre seis y ocho (neutro). En el caso de la CIC de las muestras analizadas, el suelo testigo presenta textura arcillosa con una CIC de 26.6 Cmol/kg, la cual es mayor que las muestra de suelo tratado e intemperizado que tienen una textura

franco-limosa y una CIC de 11 Cmol/kg y 13 Cmol/kg, respectivamente. Lo anterior coincide con lo encontrado por Armida-Alcudia *et al.* (2005), quienes establecen que la textura del suelo (concentración de arcillas) también afecta a la CIC. En su investigación encontraron que los suelos arcillosos o franco-arcillosos muestran valores altos y deseables de CIC con respecto a los que no lo son. Los resultados de los cambios en las texturas coinciden con los de Martínez (2001), donde observó que los hidrocarburos se absorben principalmente en las arcillas y forman agregados que se cuantifican como arenas, por ello se observa que el contenido de arcillas disminuye en la muestras de suelo tratado e intemperizado con respecto al testigo.

Conclusiones

El análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo remediado e intemperizado reveló que el proceso de remediación y la exposición al medio ambiente por espacio de un año permitieron llegar a valores considerados como normales de acuerdo con la norma, pero estos procedimientos no fueron suficientes para obtener valores equivalentes al compararlos con los parámetros del suelo testigo. Para la zona de estudio se realiza la siembra al temporal y con los resultados encontrados se puede mencionar que deben de agregarse material de volumen que ayude a mejorar las condiciones de retención de humedad y respiración del suelo (densidades) y que, de este modo, puedan establecerse los mismos cultivos que se tenían antes del derrame. Aspectos esenciales que definen mucho del comportamiento fisicoquímico del suelo como son la textura y el pH se ven afectados por el proceso de remediación y no se recuperan con el paso del tiempo. Así mismo, resulta evidente la pérdida en materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, que son factores que están íntimamente relacionados con la fertilidad de un suelo. En el estado de Tabasco, el riesgo a sufrir afectaciones por derrames de hidrocarburos es latente, por lo que es necesario el diseño y aplicación de procesos de remediación que permitan una recuperación real del suelo.

Agradecimientos

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por los recursos aportados al Laboratorio de Análisis de Suelos e Hidrocarburos para realizar esta investigación.

Referencias

- Adams, R. H., Álvarez-Ovando, A. L., & Castañón, N. (2015). Efecto de la concentración de hidrocarburos sobre la producción del pasto (*Brachiaria humidicola*) en Texistepec, Veracruz. *Phyton (Buenos Aires)*, *84*(1), 222-232.
- Adams, R. H., Cerecedo-López, R. A., Alejandro-Álvarez, L. A., Domínguez-Rodríguez, V. I., & Nieber, J. L. (2016). Treatment of water-repellent petroleum-contaminated soil from Bemidji, Minnesota, by alkaline desorption. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *13*(9), 2249-2260. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1058-4>
- Adams, R. H., Guzmán-Osorio, F. J., & Domínguez-Rodríguez, V. I. (2014). Field-scale evaluation of the chemical-biological stabilization process for the remediation of hydrocarbon-contaminated soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *11*(5), 1343-1352. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0321-1>
- Adams, R. H., Osorio, F. J., & Zavala, J. (2008). Water repellency in oil contaminated sandy and clayey soils. *International Journal of Environmental Science & Technology*, *5*(4), 445-454. doi: <https://doi.org/10.1007/BF03326040>
- Álvarez, E., Ceballos, G., Gañán, L., Rodríguez, D., González, S., & Pantoja, A. (2013). *Producción de material de siembra limpio en el manejo de las enfermedades limitantes del plátano. Cali, Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Publicación CIAT, (384). Recuperado de https://guzlop-editoras.com/web_des/agri01/fito/pld1668.pdf

- Aguilar-Lara, J. L., Noa-Carrazana, J. C., & Córdova-Nieto, C. (2016). Presencia de sigatokas (*mycospharella* sp.) en parcelas diversificadas de plátanos, en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz. En G. Ortiz-Ceballos & M. Escobar-Hernández (Ed.), *Manejo sostenible del cultivo del plátano* (pp. 46-61). Teziutlán, Puebla: Editorial BUAP.
- Aguirre-García G. J., & Lizardi-Jiménez, M. A. (2017). Carcinogenic hydrocarbon pollution in underwater sinkholes of Quintana Roo, south of Mexico: biotechnology as an alternative for remediation and civil participation as a prevention method. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 16(10), 227-235. doi: <https://doi.org/10.1515/ijcre-2017-0245>
- Armida-Alcudia, L., Espinosa-Victoria, D., Palma-López, D. J., Galvis-Spinola, A., & Salgado-García, S. (2005). Carbono en biomasa microbiana y carbono soluble como indicadores de calidad de vertisoles cultivados con caña azucarera. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 545-551.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (2017). *Resúmenes de Mensuales de Temperatura y Lluvia para el estado de Tabasco*. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado en febrero de 2018 en <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluviass>
- Chan-Quijano, J. G., Jarquín-Sánchez, A., Ochoa-Gaona, S., Martínez-Zurimendi, P., López-Jiménez, L. N., & Lázaro-Vázquez, A. (2015). Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Teoría y Praxis*, 17, 123-144.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (10 de septiembre de 2013). NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012. *Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación*. Secretaría del medio ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Recuperado en febrero de 2018 de <http://eca-suelo.com.pe/wp-content/uploads/2015/07/NOM138-SEMARNATSSA1-2012-HIDROCARBUROS.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (31 de diciembre de 2002). NOM. NOM-021-SEMARNAT-2000. *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. Secretaría del medio ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Recuperado en febrero de 2018 de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Gómez-Reyes, R., Medina-Moreno, S. A., Jiménez-González, A., & Lizardi-Jiménez, M. A. (2017). Aislamiento y análisis cualitativo de biomasa microbiana fúngica degradadora de hidrocarburos de un cenote de Quintana Roo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 53-61. doi: <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.05>
- Gómez-Romero, S. E., Gutiérrez-Bustos, D. C., Hernández-Marín, A. M., Hernández-Rodríguez, C. Z., Losada-Cazallas, M., & Mantilla-Vargas, P. C. (2016). Factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. *Nova. Publicación Científica en Ciencias Biomédicas*, 6(9), 76-84.
- Gutiérrez, M. C., & Zavala, J. (2001). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana*, 20(2), pp. 101-112.
- Guzmán-Osorio, F. J., & Adams, R. H. (2015). Mitigation of water repellency in the treatment of contaminated muds using the chemical-biological stabilization process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(6), 2071-2078. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0606-z>
- Hernández-García, M. A., Morales-Bautista, C. M., Méndez-Olán, C., & Adams, R. H. (2016). Extracción de Hidrocarburo Pesado en Suelo Acrisol. *Journal of Basic Sciences*, 2(5), 18-23. doi: <https://doi.org/10.19136/jobs.a2n5.1478>
- Huerta-Moreno, M. G. (2014). PEMEX y PETROBRAS: Historias de gestión petrolera con rumbos diferentes. *Gestión y Estrategia*. 45, 21-27.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Marín-García, D. C., Adams, R. H., & Hernández-Barajas, R. (2016). Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(1), 55-64. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0838-6>
- Martínez-Chávez, C. G., Morales-Bautista, C. M., & Alor-Chávez, M. D. J. (2017). Extracción de hidrocarburo pesado en suelo arenoso. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(1), 9-15.

- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez, V. E., & López, F. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana*, 19(1), 9-17. Enlace: <http://www.redalyc.org/html/573/57319102/>
- Méndez-Leyva, F. A. (2014). *Distribución vertical de carbono orgánico y densidad aparente en gleysol con petróleo intemperizado en La Venta, Tabasco*. (1st ed.). Múnich, Alemania: GRIN.
- Clavellina, J. L., & Benítez, N. P. (2016). Los cuatro pasos para entender el nuevo juego en el sector hidrocarburos. *Revista Pluralidad y Consenso*, 5(25), 68-89.
- Morales-Bautista, C. M., Adams, R. H., Guzmán-Osorio, F., & Marín-García, D. (2013). Dilution-extrapolation hydrometer method for easy determination of API gravity of heavily weathered hydrocarbons in petroleum contaminated soil. *Energy and Environment Research*, 3(1), 115-124. doi: <http://dx.doi.org/10.5539/eer.v3n1p115>
- Morales-Bautista, C. M., Lobato-García, C. E., Méndez-Olán, C., & Alor-Chávez, M. D. J. (2016). Evaluación del tratamiento del intercambio catiónico en dos suelos aluviales contaminados con aguas congénitas. *Interiencia*, 41(10), 696-702.
- Morales-Bautista, C. M., Adams, R. H., Hernández-Barajas, J. R., Lobato-García, C. E., & 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(11), 2689-2696. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1097-x>
- Moreno-Cordero, J. (2017). *Estudio comparativo de línea base para licenciamiento ambiental en Perú y Colombia, para actividades exploratorias del sector hidrocarburos* (Tesis de licenciatura). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Osorio-Bautista, E., & Adams, R. (2014). Aplicación de la poliácridamida como una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos. *Kuxulkab'*, 19(37), 69-73
- Otero, L., Ortega, F., & Morales, M. (1998). Participación de la arcilla y la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico de vertisoles de la provincia Granma. *Terra*, 16(3), 189-194.
- Palomeque de la Cruz, M. Á., Galindo-Alcántara, A., Sánchez, A. J., Maurice, E., & Jorge, M. (2017). Pérdida de humedales y vegetación por urbanización en la cuenca del río Grijalva, México. *Investigaciones Geográficas* 68, 151-172. doi: <https://doi.org/10.14198/INGEO2017.68.09>
- Pérez-Casimiro, G., Iturbe-Argüelles, R., & Flores-Serrano, R. M. (2005). Cambio en las propiedades físicas de un suelo contaminado con hidrocarburos debido a la aplicación de una tecnología de remediación. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica*, 1(1), 1-10.
- Romo, D. (2016). Refinación de petróleo en México y perspectiva de la Reforma Energética. *Problemas del desarrollo*, 47(187), 139-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2016.10.005>
- Wild, A. (Coord.). (1992). *Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russell*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Sanzano, G. A., Corbella, R. D., García, J. R., & Fadda, G. S. (2005). Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ciencia del Suelo*, 23(1), 93-100.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2013). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2012-2103*. Compendio de estadísticas ambientales. México, D.F. Consultado en línea en junio de 2018 en http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2013.pdf
- Vargas, P. V., Castellanos, J. Z., Sánchez, P., Tijerina, L., Chávez, R. M., López, R., & Ojodeagua, J. L. (2008). Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 31(4), 375-381.
- Triano-Coronel, F. (27 de julio de 2013). Ordeña en ducto causa derrame. *Tabasco Hoy*. Recuperado de <http://www.tabascohoy.com/nota/140041/ordena-en-ducto-causa-derrame>
- Trujillo-Narcía, A., Rivera-Cruz, M. D. C., Lagunes-Espinoza, L. D. C., Palma-López, D. J., 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.
- Vale-Capdevila, R. M., Pérez-Silva, R. M., & Ramírez-Gotario, M. (2016). Valoración del impacto ambiental en una productora de aceites y grasas lubricantes. *Revista Cubana de Química*, 28(2), 736-750.

- Vargas-Suárez, R. (2015). Reforma energética: De servicio público a modelo de negocios. *Política y cultura* 43, 125-145.
- Vázquez-Luna, D. (2014). Chronic Toxicity of Weathered Oil-Contaminated Soil. En M. C. Hernández-Soriano (Ed.), *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination* (pp. 8-103). InTech. doi: <https://doi.org/10.5772/57253>
- Vílchez-Fernández, O. E., & Ulloa-Carcasés, M. (2015). Evaluación del impacto ambiental por presencia de hidrocarburos en el fondo. Los Clavelitos. *Minería y Geología*, 31(3), 91-108.
- Zavala-Cruz, J., Gavi-Reyes, F., Adams-Schroeder, R. H., Ferrera-Cerrato, R., Palma-López, D., Vaquera-Huerta, H., & Domínguez-Ezquivel, J. M. (2005). Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco, México. *Terra Latinoamerica*, 23(3), 293-302. <http://www.redalyc.org/pdf/573/57323302.pdf>