

Caracterización de suelos contaminados con HAPs en el valle de Metztitlán, Hgo., y aplicación de un proceso de biorremediación con membranas limitantes de oxígeno

Eréndira Vázquez Larios^a, Brígida Ramírez Hernández^a, Perla Inés Badillo Lagunes^a, Tomas Alejandro Fregoso Aguilar^b, César Hugo Hernández Rodríguez^c y Jorge Alberto Mendoza Pérez^{a*}

Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. Av. Wilfrido Massieu, esq. Cda. Miguel Estampa S/N, U.P. Adolfo López Mateos, México D.F. México.

^aDepto. de Ingeniería en Sistemas Ambientales.

^bDepto. de Fisiología.

^cDepto. de Microbiología.

*E-mail: jorgemendoza@yaho.com

Recibido 15 de enero de 2013, Aceptado 5 de febrero de 2013

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo principal determinar los posibles impactos sobre el suelo agrícola del Valle de Metztitlán, que se tendrán con la construcción de una segunda refinería en Tula Hidalgo; de acuerdo a un estudio realizado por García *et al.*, en 2005 [1], existe la presencia de HAPs en agua y sedimento del Río y la Laguna del Valle de Metztitlán, lo cual podría estar causando un efecto negativo sobre la población, tanto en la salud como en las cosechas. Para este estudio se utilizó suelo con azolve contaminado con HAPs proveniente de una refinería. En la primera etapa, se hizo una revisión bibliográfica acerca de las enfermedades ocasionadas por estos contaminantes que ha reportado la secretaria de salud del estado de Hidalgo (SSAH) en 2009 [2]. En la segunda etapa, se realizó una caracterización fisicoquímica determinando parámetros (pH, capacidad de campo, porcentaje de humedad, materia orgánica y compuestos inorgánicos) que pudieran influir en la degradación de este contaminante mediante métodos establecidos por Cárdenas en 2003 [3] y por normas ambientales mexicanas. En la tercera etapa, se determinó el HAP más persistente y el más tóxico mediante el método para barrido de compuestos orgánicos establecido en la NOM-138-SEMARNAT-2003 [4]. Finalmente, se establecieron microcosmos en condiciones anaerobias. De estos microcosmos se tomaron 30 g de suelo donde posteriormente se aclimataron consorcios microbianos para evaluar el posible tiempo de degradación del hidrocarburo encontrado: criseno. Para estas pruebas de biodegradación se utilizó un HAP surrogado que tuviera casi las mismas propiedades fisicoquímicas que el identificado, en este caso fue el 3- y 6- hidroxicriseno, como resultado se obtuvo que este surrogado se degrada en un sistema, de membrana limitante de oxígeno (MLO) en un lapso de tiempo de 40 días.

Palabras clave: Contaminación, Suelos, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, Biorremediación, Anaerobio, Criseno.

1. Introducción

La contaminación por Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en México ha sido el principal punto de estudio de investigadores [5]. Se han analizado las causas y consecuencias de esta problemática. Además, se ha tratado de disminuir y controlar la situación con la aplicación de un proceso de biorremediación. La biorremediación comprende un conjunto de técnicas para recuperar los factores ambientales (suelo y agua). Éstos se encuentran alterados o deteriorados en la actualidad debido a la contaminación. Tal situación se ha agravado debido al crecimiento en el número de refinerías en todo el territorio mexicano. De acuerdo a estudios estadísticos, el 40 % de la contaminación en México lo ocupa las sustancias tóxicas provenientes del petróleo [6]. Otros datos estadísticos [7] señalan que en el año 1999, la

superficie de suelos impactados por la contaminación fue de 25,967 km². De acuerdo con informes de la Secretaría del Medio Ambiente, uno de los estados que ha tenido un mayor impacto en el deterioro de sus suelos es Hidalgo. En este estado, se han detectado en una mayor proporción de contaminantes provenientes del petróleo tales como los HAPs. Éstos son aquellos compuestos que están formados por dos o más anillos aromáticos unidos. Su grado de toxicidad depende del estado físico en el que se encuentren ya sea en estado gaseoso o partículas sólidas [8]. El grado de peligrosidad dependerá de sus características CRETIB; de acuerdo a lo establecido en la NOM-052-SEMARNAT-1993 [9]: existen dos tipos de HAPs los de bajo peso molecular y los de alto peso molecular, que son los más persistentes [10].



En el estado de Hidalgo, la zona del Valle de Metztitlán presenta la mayor concentración de estos HAPs. Esto es motivo de preocupación para diversos grupos ambientalistas y para la Secretaría de Salubridad del estado. El sector más afectado es el de los agricultores, vendedores, consumidores, pobladores y, las grandes hectáreas de tierra cultivable. De acuerdo a estudios previos [11], se ha demostrado que los suelos de la zona están contaminados por estos compuestos tóxicos que superan los límites máximos permisibles de acuerdo con la norma: NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 [4]. La contaminación de la zona ha sido provocada por compuestos provenientes del petróleo, sus derivados y la producción y/o manejo de los mismos. Se puede sugerir que las actividades humanas del sector de refinería en el municipio de Tula, Hgo., podrían estar involucradas. Esto debido, por un lado, a su cercanía y conexión geográfica e hidrológica. Por otro lado, se han detectado gran cantidad de HAPs en el agua y el aire que provienen y/o tiene vínculo con este lugar y la zona de estudio [12]. Los HAPs pueden ser transportados a través de diferentes medios. De esta manera, se puede explicar que el agua, utilizada también para el riego, contenga cierta concentración de HAPs, los cuales, debido a su baja hidrosolubilidad, se adhieren a partículas sólidas, tanto en suelo como en sedimento. Puesto que los contaminantes interactúan con el agua de la refinería antes de llegar a la zona de estudio, el suelo podría adsorber los HAP que son transportados por el agua, con lo que la contaminación se incrementaría con el tiempo. Ello se agrava al no existir control de descargas de aguas, y aún más si se pretenden construir más refinerías en la zona. Las descargas que son vertidas al río han modificado las propiedades fisicoquímicas de los suelos agrícolas de la zona que son alimentados por dicha agua. Esto ha causado menores cosechas y una disminución en la economía de la población que depende directa o indirectamente de la producción agrícola. Además, también se ha deteriorado la salud de la población. Estadísticas reportadas por la secretaria de salubridad [2] han detectado casos de habitantes enfermos (Tabla 2) y de habitantes fallecidos (Tabla 2) con cuadros sintomáticos que se identificaron como resultado de exposición a elevadas concentraciones de HAPs en el ambiente.

Dichas enfermedades, probablemente hayan sido provocadas por HAPs emitidos [2]. Hasta el momento, no se ha cuantificado la concentración de exposición del contaminante que pudiera haber causado estos síntomas, lo que lleva a suposiciones

y finalmente a establecer que las enfermedades reportadas pudiesen no ser provocadas precisamente por hidrocarburos o metales pesados. Por otro lado, ante esta problemática, el trabajo se enfoca en proponer, desarrollar y, aplicar un proceso de biorremediación en condiciones anaerobias utilizando membranas limitantes de oxígeno (MLO). Esta técnica ha demostrado ser útil en estas condiciones [13, 14]. Con ella, se buscará contrarrestar los efectos de estos contaminantes y mejorar las condiciones ambientales de la zona de aplicación. De esta manera, el presente trabajo se desarrolló con la finalidad de determinar los problemas ambientales que presenta el Valle de Metztitlán Hgo., originados por la contaminación con hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Se emplearon muestras de suelos como indicador geoquímico de la presencia de estos compuestos y los posibles efectos que tenga sobre la salud de los pobladores de la zona [9]. Cabe destacar que hasta la actualidad los suelos contaminados por hidrocarburos sean considerados como los mejores candidatos para aplicar la tecnología de la biorremediación. Esta tecnología puede utilizar dos estrategias distintas: la bioestimulación, basada en la activación de las poblaciones microbianas autóctonas, y el bioaumentación, basado en la inoculación de cepas o consorcios microbianos de laboratorio. En este caso se propone aplicar inyección de CO₂, lo que genera un venteo para el arrastre de oxígeno y a continuación fijar una membrana que recubre el suelo lo que aumenta y conserva la temperatura y limita la transferencia de oxígeno, generando condiciones anaerobias en vez de facultativas.

Tabla 1. Habitantes Enfermos por intoxicación de HAPs (cuadro de síntomas concordantes)

Tipo de enfermedad	Año de registro					
	2003	2004	2005	2006	2007	2008
	No de habitantes enfermos					
Conjuntivitis	180	234	107	173	222	278
Infeción respiratoria	5,394	5123	5852	5529	6511	7412
Intoxicación por plaguicidas	5	7	10	10	13	5

Tabla 2. Habitantes muertos probablemente a causa de exposición y/o intoxicación por HAPs.

Mortandad por tóxicos (HAPs)	Año de registro				
	2003	2004	2005	2006	2007
	No de habitantes enfermos				
Anencefalia y mutaciones	0	0	0	1	0
Asfixia y trauma al nacimiento	3	3	2	1	2
Enfermedad pulmonar obstructiva	5	1	3	3	3
Malformaciones del cáncer	0	2	1	0	0
Cáncer (tráquea y broncos)	3	0	0	1	1
Cáncer de cuello uterino	1	0	1	0	1
Cáncer de hígado	5	0	1	1	2
Cáncer de estomago	0	0	1	3	1

Dichas enfermedades, probablemente hayan sido provocadas por HAPs emitidos [2]. Hasta el momento, no se ha cuantificado la concentración de exposición del contaminante que pudiera haber causado estos síntomas, lo que lleva a suposiciones y finalmente a establecer que las enfermedades reportadas pudiesen no ser provocadas precisamente por hidrocarburos o metales pesados. Por otro lado, ante esta problemática, el trabajo se enfoca en proponer, desarrollar y, aplicar un proceso de biorremediación en condiciones anaerobias utilizando membranas limitantes de oxígeno (MLO). Esta técnica ha demostrado ser útil en estas condiciones [13, 14]. Con ella, se buscará contrarrestar los efectos de estos contaminantes y mejorar las condiciones ambientales de la zona de aplicación. De esta manera, el presente trabajo se desarrolló con la finalidad de determinar los problemas ambientales que presenta el Valle de Metztitlán Hgo., originados por la contaminación con hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Se emplearon muestras de suelos como indicador geoquímico de la presencia de estos compuestos y los posibles efectos que tenga sobre la salud de los pobladores de la zona [9]. Cabe destacar que hasta la actualidad los suelos contaminados por hidrocarburos sean considerados como los mejores candidatos para aplicar la tecnología de la biorremediación. Esta tecnología puede utilizar dos estrategias distintas: la bioestimulación, basada en la activación de las poblaciones microbianas autóctonas, y el bioaumentación, basado en la inoculación de cepas o consorcios microbianos de

laboratorio. En este caso se propone aplicar inyección de CO₂, lo que genera un venteo para el arrastre de oxígeno y a continuación fijar una membrana que recubre el suelo lo que aumenta y conserva la temperatura y limita la transferencia de oxígeno, generando condiciones anaerobias en vez de facultativas.

2. Objetivo

Conocer los impactos que tendrá la refinería sobre los suelos de la zona del Valle de Metztitlán, Hgo., determinar si es posible que el suelo se pueda autorremediar o es necesario aplicar una técnica de biorremediación, este con la finalidad de determinar los impactos que tendrá en la zona la construcción de una segunda refinería y, los posibles efectos que pueda tener sobre la salud de los pobladores.

3. Materiales y métodos

Se realizó muestreo de suelo con azolve siguiendo con la técnica reportada por Barrera Herrera en 2009 [15]. Se obtuvieron muestras simples utilizando un nucleador de suelos marca COLE-PARMER. Para la caracterización fisicoquímica y el análisis de HAPs las muestras fueron tamizadas y homogenizadas. El análisis fisicoquímico de la muestra de suelo se realizó con la técnica reportada por Cárdenas en 2003 [3]. Ésta consistió en determinar: textura (granulometría), humedad, capacidad de campo, pH, densidad aparente, materia orgánica (ácidos fúlvicos y ácidos húmicos), sólidos, metales pesados, nutrientes inorgánicos (nitratos, nitritos, amonio y fosfato), carbono orgánico, fósforo total y nitrógeno orgánico (Tabla 3). El análisis biológico consistió en la cuantificación de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) mediante la técnica de conteo en placas con medio de levadura-triptona-peptona-resarzurina para microorganismos anaerobios.

Para la determinación de HAPs se tomaron 20 g de suelo. Se extrajeron y concentraron los HAPs sobre la base de la NOM-AA-146-SCFI-2008 [16]. Para ello, se utilizó equipo de Soxhlet y rotovapor marca Buchí. El análisis de los extractos se hizo mediante Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (CG-EM) tomando como referencia la NOM-138-SEMARNAT-2003 [4]. Para simular condiciones ambientales próximas a situaciones de biorremediación reales, pero en condiciones óptimas de biodegradación anaeróbica, se establecieron microcosmos con 300 g de suelo tamizado, 300 ml de solución nutritiva y 30 ml de metanol. El suelo se colocó en recipientes de plásticos, el metanol se le adicionó como fuente de

Tabla 3. Métodos analíticos para la determinación fisicoquímica

Parámetro	Método y/o Norma	Unidades
Textura	Granulometría	
Humedad	Gravimetría	%
Capacidad de campo	Método Punto de marchites	%
Densidad	NOM-AA-034-SCFI-2003	g/ml
Materia orgánica (AF,AH)	Calcinación (NMX-FF-109-SCFI-2007)	%
Sólidos	NMX-AA-034-SCFI-2001	% ST
pH	NMX-AA-08-SCFI-2001	Unidades de pH
Nutrientes inorgánicos		mg/Kg ST
Carbono total		ppm
Nitrógeno	Método kjeldahl (NMX-AA-026-SCFI-2001)	%
Fosforo	NMX-AA-032-1976.	%

carbono y la solución nutritiva para ajustar a su capacidad de campo. En este caso, la norma señala que debe estar a un 60 % de su capacidad de campo. Para lograr condiciones anaerobias los microcosmos se expusieron a N₂ y CO₂ durante un mes.

La dinámica de aclimatación de consorcio microbiano se realizó mediante reactores discontinuos (batch) tomando 50 g de suelo y con concentraciones 1,5 y 10 mg de un surrogado seleccionado/kg de suelo seco, utilizando frascos de vidrio ámbar. La biodegradación se monitoreó de 20 a 30 días en cada reactor por Cromatografía de capa fina (CCF) y CG-EM. Por último, se realizó el estudio de la degradación del tóxico a partir de la selección de la concentración de mayor degradación en el estudio discontinuo (batch). Se aplicó una membrana limitante de oxígeno con el fin de disminuir el intercambio de oxígeno con el suelo para ayudar a degradar al HAP.

Para seleccionar la membrana que permitiera la mayor limitación en el intercambio de oxígeno se eligió de material residual (plásticos, corcho y comprimido de cartón entre otros). Su selección se realizó mediante estudios de membrana limitante con la técnica de arrastre de oxígeno por nitrógeno y medición del intercambio del suelo con la atmósfera mediante el monitoreo del tiempo de permanencia sin oxígeno al menos a dos profundidades.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica (ver Tabla 4) muestran las

concentraciones de aquellos factores que pueden tener influencia en la actividad microbiana, siendo los parámetros monitoreados en su mayoría de utilidad para establecer la capacidad de biodegradación de los contaminantes en estos suelos. Los resultados también demostraron la presencia de 10 HAP entre los que se encuentran: Naftaleno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno, Antraceno, Pireno, Criseno, Benzo(a) Antraceno, Benzo(a) Pireno, Dibenzo (h, a) Antraceno, de los cuales los tres últimos son considerados por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 [4]. Si bien, la concentración encontrada no rebasa los límites máximos permisibles señalados en dicha norma para suelos agrícolas (Tabla 5). De acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, los HAPs más persistente y con características carcinogénicas en humanos son los siguientes: benzo[a]pireno y benzo(a) antraceno que se encontraron presentes en las 3 muestras de suelo [17].

La densidad aparente en las muestra de suelo (Tabla 4) se encuentran entre el intervalo de 1.00-1.5 g/ml. Según Rodríguez (2008) [18], la densidad aparente de los suelos superficiales oscila entre 1.00 y 1.6 g/ml; lo que sugiere que el suelo del valle de Metztlán está dentro del rango óptimo. Cuevas en 2008 [19] define el valor pH óptimo para la reproducción microbiana el que se encuentra entre 6 y 8, si éste es menor que 6 se debe adicionar carbonatos y si excede de 8 se tiene que disminuir agregando azufre, por lo tanto, los valores solo tienen un excedente de ± 0.4 , esto favorece la disponibilidad de los nitratos, que son uno de los potenciales receptores de electrones en un proceso anaerobio [20]. Asimismo, se espera que con estos valores de pH sean las bacterias el grupo de microorganismos responsables del proceso de biodegradación de los HAPs. Cabe mencionar que si la cantidad de hidrocarburo o metales pesados está en exceso, se tendría que trabajar con un pH que mantuviera no soluble al tóxico (evitar emulsiones), ya que si el hidrocarburo comienza a mezclarse con la humedad del suelo y genera emulsiones o coloides, esto provocaría un ambiente toxico para los microorganismos.

La capacidad de campo no es la adecuada para que se lleve a cabo una degradación del contaminante en el suelo. Se debe de tener 60 % con respecto a la retención de agua, ya que uno de los valores que probablemente se tenga que disminuir la humedad fue de 66.5 % porque se sale del intervalo de porcentaje, lo que provoca que no exista una buena degradación. En relación con el alojamiento de los contaminantes, los

microorganismos toman como fuente de nutrimentos al contaminante o tóxico, en este caso el HAP presente en el suelo. Dado que los microorganismos se encuentran en una película de agua mientras que el contaminante es hidrofóbico, los microorganismos tienen que buscar generar o aprovechar algún metabolito que favorezca la transferencia de fase del contaminante, esto permite que el tóxico se vuelva relativamente soluble en agua y mediante el fenómeno de lixiviación este se arrastre y difunda, logrando estar más disponible para los microorganismos. Si en el consorcio microbiano alcanza un nivel de organización que genere procesos de cometabolismo, entonces los propios microorganismos lograrán la solubilización y mayor disponibilidad del tóxico, mediante mecanismos enzimáticos propios [21].

Tabla 4. Valores caracterización fisicoquímica

	Humedad (%)	Capacidad de campo (%)*	pH	Densidad (g/ml)
M ₁	9.95	62.00	8.10	1.15
M ₂	24.25	66.50	8.40	1.10
M ₃	32.4	62.00	8.20	1.20
Materia Orgánica (%)				
	Ácidos Húmicos		Ácidos Fúlvicos	
M ₁	3.9		5.90	
M ₂	1.97		8.44	
M ₃	1.35		7.56	
Nutrientes Inorgánicos				
	Nitratos (ppm)	Amonio (mg/Kg ST)	Fosfato (ppm)	
M ₁	66.78	800.32	45.37	
M ₂	48.53	218.47	15.35	
M ₃	27.80	166.50	16.48	
Compuestos Orgánicos				
	Nitrógeno		Carbonatos	
M ₁	1.56		98.57	
M ₂	1.23		20.68	
M ₃	1.26		19.14	
	Bacterias (UFC/g ST)		Hongos (UFC/g ST)	
M ₁	1.2x10 ⁷		2x10 ⁶	
M ₂	5.2x10 ⁷		9x10 ⁶	
M ₃	4.5x10 ⁷		7x10 ⁶	

*El suelo debe tener una capacidad de campo del 70 % para que exista transporte de nutrientes y actividad microbiana si llega a rebasar este límite provocaría una disminución en la reproducción de los microorganismos degradadores de HAPs y un déficit de materia orgánica (M.O.)

Tabla 5. HAPs que se encuentran fuera de los límites máximos permisibles establecidos por normatividad

Tipo de HAP	M ₁	M ₂	M ₃	LMP**
	mg/kg de sustancia seca			
Naftaleno	0.23	0.11	0.89	Nc
Acenafteno	0.56	0.4	0.6	
Fluoreno	0.014	--	0.016	Nc
Fenantreno	0.017	0.06	0.04	Nc
Antraceno	0.45	0.74	0.41	Nc
Pireno	0.7	0.23	0.21	Nc
Benzo(a)Antraceno*	0.12	0.34	0.28	2
Criseno	0.15	0.139	0.175	Nc
Benzo(a)pireno*	0.105	0.11	0.122	2
Dibenzo(h,a)Antraceno*	0.028	0.07	0.04	2

*HAPs considerados por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y por la U.S. EPA como hidrocarburos tóxicos y carcinogénicos.

**Límites máximos permisibles de referencia establecidos por la NOM antes mencionada, Nc: No considerado fuera de norma

La cuenta recomendada para procesos de biorremediación es de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) en el orden de 10⁷ a 10¹⁰ UFC/g suelo. En base a ello podríamos esperar que las colonias encontradas en las muestras sean suficientes para llevar a cabo un proceso de biorremediación.

El contenido de materia orgánica es alto en las tres muestras, arriba del 80 %, y puede afectar el proceso que se pretende aplicar ya que genera problemas de biodisponibilidad de los contaminantes [21]. La relación que existe entre los ácidos fúlvicos (AF) y los ácidos húmicos (AH) está en que en al abundar más los primeros se favorece la acumulación de metales pesados y si sucede el caso contrario, entonces se favorecerá la acumulación de compuestos orgánicos polares volátiles y semivolátiles. Esto último puede ser preocupante, pues sería una causa por la cual existiría un mayor impacto. Esto debido a que los contaminantes polares, no podrían ser lixiviados y difundir que es el mecanismo por el cual los microorganismos toman al contaminante para degradarlo (disminuye su biodisponibilidad). Los compuestos orgánicos no polares también son más fácilmente retenidos (acumulados) al abundar más los ácidos húmicos que los fúlvicos, debido a las largas cadenas hidrocarbonadas que llegan a presentar en su estructura, cierto tipo de AH. Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica permiten establecer la influencia que tiene cada uno de los parámetros analizados sobre la actividad microbiana, lo que es de utilidad para determinar la capacidad de biodegradación de dichos contaminantes.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 6, de los 9 metales pesados que describe la NOM-001-SEMARNAT-1996 [22], la concentración de Cd, Cr y Pb excede los límites máximos permisibles para las descargas de agua. Esto indica que existe presencia de HAP y de otras especies químicas (metales pesados) que afectan a las propiedades fisicoquímicas del suelo y del agua de riego que es la misma que la población del municipio consume. Además de alimentarse con hortalizas y frutas que fueron cultivadas y regadas con suelo y agua contaminados. Por ello, esta contaminación podría asociarse al deterioro de la salud de los pobladores. Las enfermedades más frecuentes son las infecciones intestinales y las relacionadas al hígado [23]. Aunado a esta situación, se está comprobando que realmente las aguas provenientes del río de Tulancingo están altamente contaminadas, lo que puede alterar sus factores bióticos.

Tabla 6. Metales pesados cuantificados en las diferentes muestras de sedimentos

Contaminante	Unidades	M ₁	M ₂	M ₃	*LMP
Cadmio	mg/Kg	0.4	1.5	1.4	0.4
Cromo VI	mg/Kg	1.5	1.2	1.1	1.5
Plomo	mg / Kg	2.5	2	1.6	1

*Límites máximos permisibles de la concentración de metales pesados en descargas de aguas residuales para uso de riego agrícola establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

4.1 Modelo de Degradación del Hidrocarburo Criseno aplicando surrogados: 3- y 6-hidroxicriseno

Los resultados que se presentan en las Figura 1a y 1b muestran la biodegradación de los surrogados 3- y 6- hidroxicriseno en condiciones anaerobias. Estos bioensayos se llevaron a cabo con y sin membrana limitante de oxígeno. Esta fue seleccionada de tipo polimérico (polipropileno).

La selección de la membrana se basó en los resultados con diferentes materiales residuales siendo el polímero de polipropileno el de mejor limitante al intercambio, en la Tabla 7 se presentan los resultados que dieron el criterio de selección.

Tabla 7. Datos para membrana de polipropileno para limitación de intercambio de oxígeno entre suelo y atmósfera

Profundidad (cm)	% de oxígeno	% de oxígeno después de arrastre con N ₂	Tiempo de recuperación del porcentaje de Oxígeno inicial (m)	Tiempo de recuperación del porcentaje de Oxígeno inicial con MLO (m)
10	46	0	15	40
20	25	0	60	315
30	8	0	No se recuperó	No se recuperó

La Figura 1a nos indica que la degradación de criseno sigue una tendencia de tipo lineal donde el tiempo de eliminación es muy largo comparado con el tiempo utilizando membrana limitante (Figura 1b). La tendencia de degradación del surrogado de criseno nos da un indicio que aun periodo de 60 días aún no es posible alcanzar la degradación total del compuesto. No obstante, en el experimento con membrana a los 20 días se ha alcanzado la misma degradación que a los 60 días para el isómero 6-hidroxicriseno mientras que con el otro (3-hidroxicriseno) ha llegado a eliminarse cerca de un 80 % de la concentración inicial. Esto implica que el suelo más cercano a la atmósfera puede llegar a degradar criseno y sus derivados, pero debe ser sometido a procesos auxiliares para mejorar su capacidad de eliminación mediante condiciones anaerobias [24].

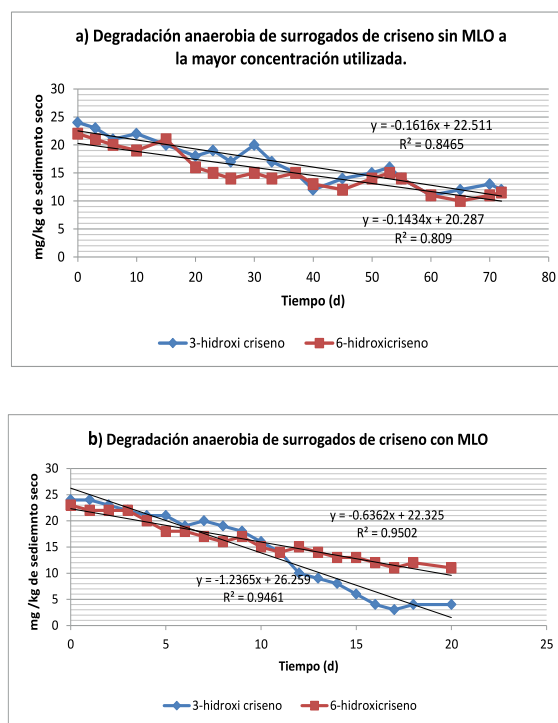


Figura 1. Estudio de degradación de los bioensayos a) degradación de los surrogados 3- y 6- hidroxicriseno en condiciones anaerobias sin membrana limitante de oxígeno. b) Degradación de los mismos surrogados con membrana limitante de oxígeno polimérica.

5. Conclusiones

En lo que se refiere al objetivo de conocer los impactos que tendrá la construcción de la segunda refinería se habla no solo de consecuencias leves sino de un problema más grave. No es una situación reciente, es una problemática que viene desde años atrás y que año con año ha afectado cada vez más a la producción de cosechas, la salud de los pobladores y las propiedades fisicoquímicas del suelo y el agua. El objetivo de este tipo de estudios es que, además de recuperar un cierto porcentaje de suelos, éstos vuelvan a su estado original. Desafortunadamente, cada vez se ve más lejana esta posibilidad, ya que en la actualidad no existe cultura del y mejoramiento ambiental. Éste es uno de los principales motivos por el cual la población tanto de los municipios afectados como del resto del país no ha creado conciencia y no ha comenzado por hacer algo al respecto. Lo anterior ha sido más notorio durante los cinco años y se verá más drásticamente con los impactos en los siguientes dos años, cuando empiecen con la construcción de la refinería. Aunado a esto son aún pocas las posibilidades de evitar el proceso de impacto y éste puede que se convierta en irreversible para cuando se desee aplicar una biorremediación o bien para que el suelo consiga autorremediarse. Esto podría conducir a graves estragos al medio y a las poblaciones. Por esta razón, es imperante el estudiar la capacidad natural de la zona para atenuar los contaminantes o las estrategias para estimular e incrementar este proceso.

De los resultados obtenidos se concluye que con la utilización reactores de suelos activados mediante la inoculación de consorcios microbianos aclimatados y la estimulación de ambientes anaerobios a escala piloto, se logra satisfactoriamente la degradación de HAPs encontrados en estas condiciones. El hidrocarburo estudiado como modelo se degrada hasta el 80 % contra el 56.1 % cuando no lleva membrana limitante el sistema. La estructura de la comunidad microbiana, así como su capacidad degradadora, se verá afectada durante el proceso de biorremediación por la adición de metales pesados, cambios en la biodisponibilidad de los HAPs y enriquecimiento del suelo con oxígeno por intercambio con la atmosfera. Por lo cual estas condiciones adversas deben ser minimizadas.

La biorremediación aerobia se considera más eficaz en cuanto a tiempo que la biorremediación anaerobia. La diferencia entre estas dos técnicas está en que la anaerobia degrada compuestos pesados que en la aerobia es a veces muy poco

probable poder eliminar. La importancia de una membrana limitante es que se puede aplicar directamente al suelo en una biorremediación *in situ*. La presencia de la membrana limita el oxígeno y permite que los microorganismos anaerobios degraden al contaminante, con lo que se desarrollan colonias anaerobias de microorganismos con afinidad al hidrocarburo. Esta investigación se realizó porque en la zona del valle de Metztitlán se han encontrado tóxicos como metales pesados presentes en el agua e hidrocarburos en suelos. Además, no existe la información suficiente para diseñar un método de biorremediación complejo en el cual se tenga que recupere la mayor parte de los factores ambientales bióticos que están dañados.

Es de mayor importancia para los Ingenieros en Sistemas Ambientales participar en la realización de normas que establezcan límites máximos permisibles de la concentración de tóxicos en suelos agrícolas (Ver clasificación de USDA/UNESCO/ISRIC [25, 26, 27]). Esto con la intención de que vuelvan a su estado de fertilidad para la producción de cosechas y además que apoyen en el desarrollo de procesos de biorremediación adecuados para cada contaminante. La presente investigación tiene como finalidad, en conjunto con algunos de los proyectos o trabajos que anteriormente se han realizado, disminuir los impactos ambientales de contaminantes que pueden originarse de la actividad refinera. Contaminantes que ya han causado daño –y que si no se remedian a tiempo– podrían seguir dañando la salud ambiental y humana.

6. Referencias

1. García, J., Gordillo, M.A. J., Pulido, F.G., Monks, S., Villagómez, I.J.R., Acevedo, S.O (2005). Evaluación de la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos en las aguas de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán [en línea]. Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo [fecha de consulta: 30/noviembre/2009].
2. Secretaría de Salud y Asistencia del estado de Pachuca, Hgo (2009). Estadísticas de enfermedades y defunciones reportadas a partir del año 2003 al año 2008. Pachuca, Hgo.
3. Cárdenas, B. (2003). Manual de caracterización fisicoquímica de compostas y suelos. Universidad Autónoma Metropolitana -Iztapalapa. México, D.F. p.1-45.
4. SEMARNAT (2003). Norma Oficial Mexicana NOM- 138-SEMARNAT-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación.
5. Alemán, A.M. (2009). Determinación de hidrocarburos totales del petróleo en suelos y sedimentos de la cuenca del río Coatzacoalcos. Universidad Veracruzana. Tesis de licenciatura.. Coatzacoalcos, Veracruz.p.70-77.

6. PROFEPA (2002). Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación [en línea], México D.F. <http://www.profeпа.gov.mx/>
7. INEGI- INE(2000).Indicadores de Desarrollo Sustentable en México [en línea]
8. http://www2.ine.gov.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=311
9. García, R. (2010). Presentación de ingreso a la Academia Mexicana de Ciencias, Artes, Tecnología y Humanidades (AMCATH) [en línea].
10. <http://cibernetica.ccadet.unam.mx/ArchivosAmcath/29-RGG.pdf>
11. SEMARNAT (1993).Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación..
12. Conte, P., Zena, A., Pilidis, G., Piccolo, A. Increased retention of polycyclic aromatic hydrocarbs in soils induced by soils treatment with humic substances. *Environ Pollution* 2001, 27:146-31.
13. Poggi Varaldo, H. F., Prieto, F., Lucho, D., Álvarez, M. Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región de Actopan Ixmiquilpan del Distrito de riego 3 Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista de Ciencia Ergo sum* 001. 2007, 64, 69-80.
14. INE-UAMI(2008) Diagnóstico de compuestos orgánicos volátiles y H₂S en aire ambiente en la zona de Tula-Vito-Apaxco. Convenio específico de colaboración entre el Instituto Nacional de Ecología y la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. No. Convenio: INE/A1-030/2008.p.1-19
15. Sepúlveda, T., Velasco, J.A. (2002). Tecnologías de biorremediación para suelos contaminados.2da ed. Instituto Nacional de Ecología. p. 62.
16. Semple, K.T.; Reid, B.J. y Fermor, T.R. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environ. Pollution*. 2001,112: 269-283.
17. Barrera Herrera, J.M (2009). Composta, lombricomposta y biofermel en medio ambiente y salud. En Hernández Morales A. (Ed.). *Ciencia al día-UAEH* 1era. Edición. p.239-249
18. SCIFI (2008).Norma Técnica Mexicana: NMX-AA-146-SCIFI-2008.Suelos-Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HAP) por cromatografía de gases/Espectrometría de masas (CG/EM) o cromatografía de líquidos de alta resolución con detectores de fluorescencia y ultravioleta visible (UV-VIS)-Método de prueba. Secretaria de Economía y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. p. 1-61.
19. International Agency for Research on Cancer-WHO. (2011). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Group 1. Carcinogenic to humans and Group 2A Probably carcinogenic to humans and 2B Possibly carcinogenic to humans. Volumes 1-106.
20. Rodríguez,M.B. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición de las plantas. En: *La fertilización de cultivos y pasturas*. R. Melgar y M Díaz Zorita. 2ª ed. Buenos Aires: Hemisferio Sur, p. 588.
21. Cuevas, B. (2008). Remoción de hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP'S) utilizando reactores de suelos activados inoculados biológicamente. Tesis de maestría. Sección de estudios de posgrado. Instituto Politécnico Nacional México D.F. p. 141.
22. Balagurysamy, N., (2005). Anaerobic bioremediation-an untapped potential. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 4: 273-287.
23. Lladó Fernández, S. (2008). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos pesados y caracterización de comunidades microbianas implicadas. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. p. 1-274.
24. SEMARNAT (1996) NOM-001-SEMARNAT-1996.- Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
25. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (1995). *Reseña toxicológica de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
26. Ahumada, B. (2009). Evaluación y selección de bacterias degradadoras de fenol por respirometría. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Microbiológicas. Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá D.C, p.104
27. USDA (2006) Claves para la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff) Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Décima Edición, p 1-331.
28. FAO/UNESCO. (1998) Base de Referencia para los Suelos del Mundo. 2da. Edición. p.1-130.
29. IUSS/ISRIC/FAO (1998) World reference base for soil resources. World soil resources reports 84. Rome, Italy. p. 1-91.