

Ensayo piloto de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Fase II

Bioremediation Pilot Test of Hydrocarbon Polluted Soils. Phase II

Gloria Lucía Camargo Millán*
Nury Esleen Acero Pérez**

Resumen

El estudio de la biodegradación de los hidrocarburos compuestos, altamente contaminantes y tóxicos, es de interés para la descontaminación de ambientes afectados por derrames de petróleo. Aunque este proceso se presenta de manera natural, es demasiado lento, razón por la que se hace necesario el uso de técnicas de biorremediación para facilitar la acción microbiana sobre los contaminantes. A nivel experimental este proceso se realiza por etapas o ensayos, ya sean de laboratorio, pilotos, de campo o implementación. Previamente a este estudio se trabajó una etapa a nivel de laboratorio, donde se observó la remoción de hidrocarburo en un suelo contaminado de manera inducida, aislándose bacterias capaces de su degradación, lo que mostró que el proceso es factible. El presente estudio corresponde a la etapa a nivel piloto, cuyo objetivo era cuantificar la tasa de remoción de hidrocarburo en muestras de suelo contaminadas con crudo de castilla proveniente de diez terrarios, a los cuales se les inoculó bacterias totales y bacterias *Pseudomonas aeruginosa*.

Palabras clave: Biorremediación, Suelos, Hidrocarburos.

Abstract

The biodegradation study of the compound, highly polluting and toxic hydrocarbons, are of interest for the decontamination of environments affected by petroleum spills. Although this process appears in a natural way, it works too slowly, reason for which it becomes necessary the use of the bioremedial techniques to facilitate the microbial action on the pollutants. At experimental level this process is carried out by stages: the laboratory stage, the pilot stage and field stage or implementation. Previous to this study, a stage was done at laboratory level where it was observed the hydrocarbon removal in a polluted soil, induced by isolating the bacteria capable to remove it by which the feasibility of the process was concluded. The present study corresponds to a pilot stage, with the objective to quantify the rates of hydrocarbon removal, in ground contaminated samples with the Castilla's crude, coming from ten fields, which were inoculated with total bacteria as well as *Pseudomonas aeruginosa* bacteria.

Key Words: Bioremediation, Soils, Hydrocarbons.

* Ingeniera Química, Universidad Nacional de Colombia, 1996. Magister en Ingeniería Civil, Área Ambiental, Universidad de los Andes, 2001. Docente de planta adscrita a la Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Miembro fundador del GIGA (Grupo de Investigación en Geomática y Ambiente), Coordinadora Línea de Investigación: Gestión ambiental y control de la contaminación. gcamargomillan@yahoo.es.

** Ingeniera Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2008. nuryacero@hotmail.com.

1. Introducción

La industria petrolera de Colombia, en desarrollo de sus actividades de explotación, transformación y transporte de hidrocarburos, genera residuos que contaminan el medio natural, ocasionando la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, principalmente, lo cual disminuye su capacidad productiva. Los procesos de biorremediación de suelos son una alternativa de descontaminación, por lo que han sido estudiados, principalmente, por empresas petroleras; sin embargo, la academia debe involucrarse en estos estudios, considerando que la universidad es un ente formador de conocimiento, con el compromiso social de mejorar la calidad de vida mediante el desarrollo de investigación y extensión.

El presente artículo recopila los resultados obtenidos del seguimiento a algunas variables que influyen en el proceso de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos; seguimiento que fue adelantado a través de un proyecto que tuvo como objetivo general: realizar un ensayo de biorremediación a escala piloto de un suelo sometido a contaminación inducida con hidrocarburo, con el objeto de determinar el grado de remoción del contaminante, y como objetivos específicos: a) cuantificar la tasa de remoción de hidrocarburo, a escala piloto, en muestras de suelo inoculadas con bacterias totales y bacterias *Pseudomonas aeruginosa*, y a las que se les ha adicionado crudo de castilla como contaminante, con el fin de concluir sobre la eficiencia del proceso de biorremediación, y b) determinar la actividad microbiana en el proceso de biorremediación mediante la técnica de respirometría.

2. Metodología

Previo a este estudio se trabajó la etapa de laboratorio, donde se observó la remoción de hidrocarburo en un suelo contaminado de manera inducida, aislándose bacterias capaces de su degradación, lo que permitió concluir que el proceso es factible.

El presente estudio corresponde a un ensayo a escala piloto y tiene como objetivo cuantificar las tasas de remoción de hidrocarburo en muestras de suelo contaminadas con crudo de castilla, provenientes de diez terrarios, a los cuales se les inoculó bacterias totales y bacterias *Pseudomonas aeruginosa*, con el fin de concluir sobre la eficiencia del proceso (ver fotografía 1).



Fotografía 1. Terrario tipo

Fuente: Montaje casa de mallas – UPTC.

2.1 Diseño experimental

Se aplicó un tratamiento control y dos réplicas para cada tratamiento (ver tabla 1). La concentración de hidrocarburo se fijó en 7,5%, valor obtenido del estudio preliminar[1]. Se aplicaron cuatro tratamientos:

- Tratamiento de control.
- Tratamiento con *Pseudomonas aeruginosa* con [P] (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 %.
- Tratamiento con bacterias totales del suelo [B] (UFC/ml) y *Pseudomonas aeruginosa* ([P] UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo [HC] de 7,5 %.
- Tratamiento con bacterias totales del suelo con [B] (UFC/ml) y con [HC] de 7,5%.

Las variables por evaluar son:

- Tiempo de avance del ensayo
- Tipo de bacteria: totales del suelo, *Pseudomonas aeruginosa* o en consorcio.
- % de remoción de hidrocarburos
- Actividad biológica en cada periodo de tiempo

Tabla 1. Diseño experimental

Tratamiento	Terrarios	Tiempo (días)						
		0	15	30	45	60	90	120
Tratamiento control	Terrario T ₀	0	15	30	45	60	90	120
[B] con [HC]	Terrario T ₁	0	15	30	45	60	90	120
	Terrario T ₂	0	15	30	45	60	90	120
	Terrario T ₃	0	15	30	45	60	90	120
[B] y [P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	Terrario T ₁	0	15	30	45	60	90	120
	Terrario T ₂	0	15	30	45	60	90	120
	Terrario T ₃	0	15	30	45	60	90	120
[P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	Terrario T ₁	0	15	30	45	60	90	120
	Terrario T ₂	0	15	30	45	60	90	120
	Terrario T ₃	0	15	30	45	60	90	120

2.2 Métodos de análisis

2.2.1 Método gravimétrico por extracción Soxhlet.

El porcentaje de remoción de hidrocarburo se determina por el método de extracción Soxhlet. Método 5520 combustibles y aceites aprobado por el comité del Standard Methods. 1991. En el proceso de extracción Soxhlet se utiliza como solvente n-hexano, que se emplea para muestras donde el contenido de hidrocarburo es alto, después este es sometido a un proceso de secado concentrado para determinar el contenido de hidrocarburo por diferencia de peso.

Procedimiento método gravimétrico por extracción Soxhlet

- Tarar (105 °C), pesar el balón de fondo plano y registrar su peso (W₁).
- Pesar 2 g de suelo contaminado con hidrocarburo en un papel filtro y adicionar 0,3 ml de ácido clorhídrico del 37% (w/w).
- Pesar 2 g de sulfato de sodio anhidro previamente secado a 105 °C durante 4 horas, adicionarlo a la muestra anteriormente pesada y envolverla en el papel filtro de forma que no se pierda el contenido.
- Colocar la muestra en la cámara de extracción.
- Adicionar 50 ml de n-hexano en el balón de fondo plano.
- Realizar el montaje de extracción Soxhlet (ver fotografía 2).
- Controlar la temperatura de la plancha entre 170-175 °C, de igual forma controlar la temperatura del refrigerante entre 13-17 °C.

- Realizar el proceso de extracción durante 4 h; luego retirar el balón de fondo plano del montaje de extracción Soxhlet.
- Roto-evaporar el solvente contenido en el balón de fondo plano hasta obtener que el hidrocarburo quede en el fondo del balón (ver fotografía 3).
- Adicionar nitrógeno a la muestra de 1 a 2 minutos.
- Secar el contenido del balón en una estufa a 40 °C durante 1 hora, luego llevar al desecador por 1 hora y pesar para obtener (W₂).
- Tarar una cápsula de porcelana y registrar su peso (H₁), luego pesar 2 g de muestra y colocarla en la cápsula para someterla a secado durante 24 horas a 105 °C, después desecarla durante 1 hora y registrar su peso (H₂), con el fin de obtener la humedad del análisis (W₃).

Determinación del peso seco:

$$W_3 = H_2 - H_1 \text{ (g)} \quad (1)$$

Donde:

W₃ = peso de la muestra en gramos en base seca

H₁ = peso cápsula tarada (g)

H₂ = peso de la cápsula más muestra seca (g)

Determinación de % de hidrocarburo:

$$\%Hc = w_2 - w_1 / w_3 * 100 \quad (2)$$

Donde:

W₁ = peso inicial del balón (g)

W_2 = peso del balón con hidrocarburo (g)
 W_3 = peso de la muestra en gramos en base seca (g)



Fotografía 2. Montaje método extracción Soxhlet



Fotografía 3. Montaje roto-evaporador

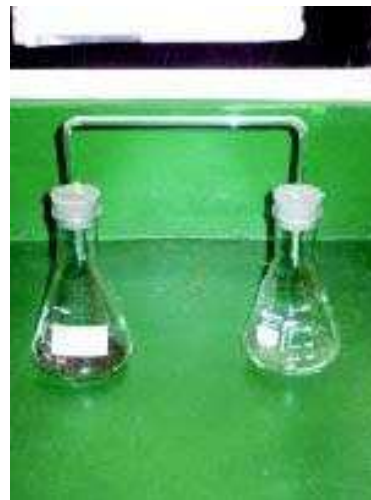
2.2.2 Método de respirometría

Para evaluar la actividad microbiana en el suelo se llevó a cabo una serie de ensayos respirométricos, que consistieron en la generación y cuantificación del CO_2 producido por la población microbiana. Para

realizar los ensayos se utilizaron 30 g de suelo, hidróxido de potasio (KOH) 2N, ácido clorhídrico (HCl) 1N, 6 erlenmeyer de 250 ml cada uno, dos balones de 100 ml, tapones de caucho, varillas dobladas en U y una bureta.

Procedimiento método de respirometría

- Preparar hidróxido de potasio (KOH) en una concentración 2N, en un balón de 100 ml.
- Adicionar a un erlenmeyer 20 ml de hidróxido de potasio, y a otro, 10 g de suelo.
- Armar el montaje con los dos erlenmeyer unidos por una varilla de vidrio doblada en U y en los extremos de esta un tapón de caucho con el fin de evitar pérdidas en el proceso (ver fotografía 4).
- Dejar el montaje alrededor de 8 días para conocer la producción de CO_2 .
- Titular con ácido clorhídrico, (HCl) 1N, una solución de bicarbonato de potasio ($KHCO_3$), obtenida a partir de la reacción entre el hidróxido de potasio (KOH) y dióxido de carbono (CO_2) producido por la actividad microbiana, adicionando fenolftaleína como indicador (ver fotografía 5). La fenolftaleína es incolora en forma ácida, predominando a pH=8, y rosada en forma básica, predominando a pH=9.6.



Fotografía 4. Montaje método de respirometría



Fotografía 5. Titulación

3. Resultados

3.1 Composición y características fisico-químicas del crudo de castilla

El petróleo crudo es un líquido de color negro, viscoso, conformado principalmente por hidrocarburos (50-98%) (ver tabla 2.). La composición elemental de un crudo es: 84-87% de C, 11-14% de H, 0-8% de S y 0-4% de O y N y metales como el níquel y el vanadio (ver tabla 3.).

Tabla 2. Composición de las fracciones químicas contenidas en un crudo de petróleo.

Fracción	Composición
Saturados	n-alcanos, alcanos de cadena ramificados e isoprenoides, y cicloparafinas o cicloalcanos.
Aromáticos	Hidrocarburos monoaromáticos, diaromáticos, aromáticos policíclicos (HAP).
Resinas	Agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos y amidas.
Asfáltenos	Agregados de HAP, ácidos nafténicos, sulfuros, ácidos grasos, fenoles polihidratados.

Fuente: Viñas [2].

Tabla 3. Características fisico-químicas del crudo castilla.

Propiedades físicas crudo castilla	
Densidad 15 °C g/cc	0,98
Cenizas % p	0,093
Carbón Conradson %p	15,17
Insolubles n-C7 % p	15,5
Insolubles n-C5 % p	18,98
Nitrógeno total ppm	4664
Viscosidad a 80 °C cSt	144,6
Viscosidad a 100 °C, cSt	58
Índice de refracción, 20 °C	1,57
Azufre Horbida-D 4294	2,16
Vanadio	311,7
Níquel	78,2
Presión de Vapor (20 °C) (Psig)	0,7
Gravedad Específica (API)	13,2

Fuente: Unión Temporal Llano grande.

3.2 Caracterización físico-química de suelo

La muestra de suelo caracterizada fue tomada en

predios de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Caracterización de suelo

Muestra 1	Valor encontrado	Valor de referencia
Laboratorio No	571	—
Profundidad (cm.)	25	—
% Arena	77	—
% Limo	16	—
% Arcilla	7	—
Clase textural	Arenoso franco	—
pH	4,7	5,6–7,3
% M.O.	13,8	5–10 Clima frío
P (ppm)	6,08	20–40
Al (meq/100 g de suelo)	1,2	1–2
Ca (meq/100 g de suelo)	2,04	3–6
Mg (meq/100 g de suelo)	0,24	1,5–2,5
K (meq/100 g de suelo)	0,17	0,2–0,4
Na (meq/100 g de suelo)	1,42	0–1
C.I.C	5,07	10–20
S (ppm)	—	8–12
Conductividad	0,72	0–2
Otros Elementos		
Al (%)	23,7	< 15
Na (%)	28	< 7

Fuente: Laboratorio suelos y aguas FACIAT, UPTC Tunja.

De los resultados de la caracterización se observa que la clase textural es arenoso franco (arena 77%, limo 16%, arcilla 7%), lo que implica que existe facilidad para el flujo de agua y la generación de lixiviados, como consecuencia de la precipitación o el riego. El contenido de materia orgánica fue de 13,8%, el cual se encuentra por encima del rango (5-10%) para clima frío, posiblemente se debe a la presencia de humus proveniente de microorganismos y plantas, indicando que el suelo cuenta con actividad microbiana.

El pH encontrado fue de 4,7, lo que indica que el suelo es fuertemente ácido y se encuentra por debajo del rango estipulado (5,6-7,3), con presencia de aluminio intercambiable en cantidades moderadas a altas (1,2 meq/100 g de suelo), con deficiencia de

fósforo (6,08 ppm) y baja disponibilidad de bases: calcio (2,04 meq/100 g de suelo), magnesio (0,24 meq/100 g de suelo) y potasio (0,17 meq/100 g de suelo), excepto por el sodio con 1,42 (meq/100 g de suelo).

La CICE (Capacidad de Intercambio Cationico Efectivo) es de 5,07 meq/100 g de suelo y se localiza fuera del rango de referencia (10-20 meq/kg), lo cual podría deberse a la lixiviación de las bases presentes en el suelo cuando existe precipitación o riego, disminuyendo el pH del suelo.

3.3 Remoción de hidrocarburo

Los resultados de la extracción de hidrocarburo se encuentran consignados en la tabla 5.

Tabla 5. Remoción de hidrocarburos totales.

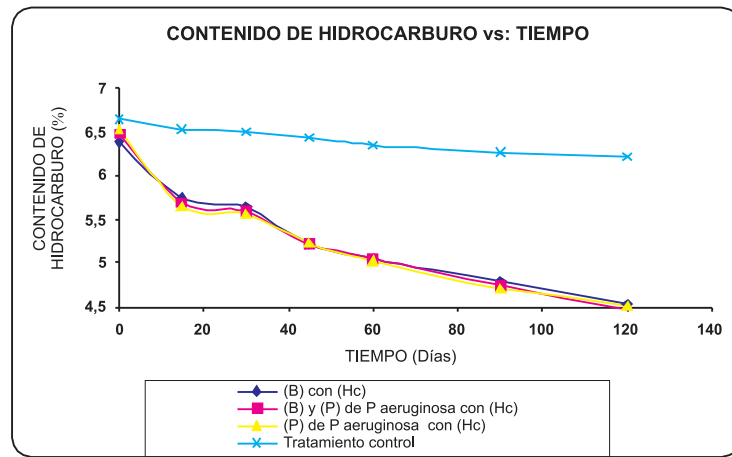
Tratamiento	Terrario	%HTC	% re- moción	%HTC	% re- moción	%HTC	% re- moción	%HTC	% re- moción	%HTC	% re- moción	%HTC	% re- moción	%HTC	% re- moción
		Tiempo en días		Tiempo en días		Tiempo en días		Tiempo en días		Tiempo en días		Tiempo en días		Tiempo en días	
		0		15		30		45		60		90		120	
Tratamiento control	Terrario T ₀	6,64	0	6,52	1,9	6,49	2,3	6,42	14,7	6,35	4,4	6,27	5,6	6,22	6,3
[B] con [HC]	Terrario T ₁	6,11	0	5,75	6	5,67	7,2	5,21	19,4	5,05	17,3	4,82	21,1	4,6	24,7
	Terrario T ₂	6,49	0	5,76	11,2	5,66	12,8	5,23	20,6	5,07	21,9	4,76	26,7	4,52	30,4
	Terrario T ₃	6,56	0	5,75	12,4	5,63	14,3	5,21	22,8	5,04	23,2	4,8	26,8	4,51	31,3
[B] y [P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	Terrario T ₁	6,76	0	5,76	14,7	5,66	16,2	5,22	19,2	5,05	25,3	4,75	29,7	4,45	34,2
	Terrario T ₂	6,46	0	5,61	13,2	5,53	14,5	5,22	15,8	5,06	21,7	4,8	25,7	4,48	30,7
	Terrario T ₃	6,21	0	5,71	8,1	5,6	9,9	5,23	21,3	5,04	18,5	4,69	24,5	4,48	27,9
[P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	Terrario T ₁	6,63	0	5,71	14	5,62	15,2	5,22	14,3	5,01	24,4	4,75	28,4	4,53	31,7
	Terrario T ₂	6,1	0	5,63	7,7	5,56	8,9	5,23	23,2	5,05	17,2	4,73	22,5	4,5	26,2
	Terrario T ₃	6,82	0	5,61	17,8	5,53	19	5,24	3,3	5,02	26,4	4,66	31,7	4,52	33,7

Por cada tratamiento se trabajaron tres terrarios, con excepción del tratamiento control; se calculó el promedio de los valores obtenidos para cada

tratamiento, referentes al contenido de hidrocarburo, con el fin de encontrar una medida de la tendencia central (ver tabla 6 y gráfica 1).

Tabla 6. Promedio del contenido de hidrocarburos totales

Tratamiento	HTC%						
	Tiempo en días						
	0	15	30	45	60	90	120
Tratamiento control	6,64	6,52	6,49	6,42	6,35	6,27	6,22
[B] con [HC]	6,38	5,75	5,65	5,22	5,05	4,79	4,54
[B] y [P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	6,48	5,69	5,6	5,22	5,06	4,74	4,52
[P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	6,52	5,65	5,57	5,23	5,02	4,71	4,47



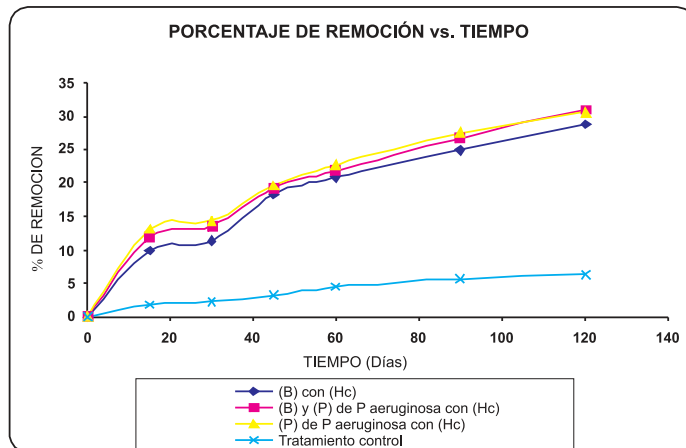
Gráfica 1. Contenido de hidrocarburo vs. tiempo

Se calculó de igual forma el promedio de los valores obtenidos para cada tratamiento, referentes al porcentaje de remoción de hidrocarburo, con el fin

de encontrar una medida de la tendencia central y así observar la disminución de hidrocarburo con respecto al tiempo (ver tabla 7 y gráfica 2).

Tabla 7. Promedio del porcentaje de remoción de hidrocarburos

Tratamiento	Remoción %						
	Tiempo en días						
	0	15	30	45	60	90	120
Tratamiento control	0	1,9	2,3	3,3	4,4	5,6	6,3
[B] con [HC]	0	9,87	11,43	18,23	20,8	24,86	28,8
[B] y [P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	0	12	13,54	19,26	21,83	26,63	30,53
[P] de <i>P.aeruginosa</i> con [HC]	0	13,16	14,37	19,6	22,66	27,53	30,93



Gráfica 2. Porcentaje de remoción de hidrocarburos

Como se evidencia en las tablas y gráficas anteriores, hasta el día 45 se observó que el tratamiento con *Pseudomonas aeruginosa* con [P] de $6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 % presentó una mayor remoción de contaminante (19,6%), seguido por el tratamiento con bacterias totales y *Pseudomonas aeruginosa* [B] y [P] de $7 \cdot 6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 % (19,26%), luego se encontró el tratamiento con bacterias totales [B] de $6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 % (18,23%), y por último el tratamiento control (3,3%), siendo este el más demorado en el proceso de biorremediación.

Finalmente, para los días 90 y 120 aumentó la remoción de hidrocarburo, luego de la adición de nutrientes y modificación de la humedad, manteniéndose la misma tendencia, es decir, el tratamiento con *Pseudomonas aeruginosa* con [P] de $6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 % obtuvo la máxima remoción de contaminante en el día 120 (30,93%), seguido por el tratamiento con bacterias totales y *Pseudomonas aeruginosa* [B] y [P] de $7 \cdot 6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 % (30,53%), luego se encontró el tratamiento con bacterias totales [B] de $6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 %

(28,80%), y finalmente el tratamiento control (6,3%), lo que implica que para conseguir una rápida recuperación del suelo contaminado se necesita hacer uso de técnicas de biorremediación.

3.4 Resultados del ensayo de respirometría

Debido a que el tratamiento con *Pseudomonas aeruginosa* presentó la mayor remoción de hidrocarburo (30,93%), se tomó la determinación de medir en las muestras correspondientes la cantidad de gas carbónico, CO_2 generado por la actividad bacteriana, mediante el ensayo de respirometría anteriormente expuesto.

Cálculos cantidad de dióxido de carbono generado.



Se parte de la base del proceso de titulación; el bicarbonato de potasio (KHCO_3) reacciona con el ácido clorhídrico (HCl) para obtener cloruro de potasio (KCl), gas carbónico (CO_2) y agua (H_2O). En la titulación se busca obtener que el número de equivalente gramo (#eq-g) de la sustancia A sea igual al número de equivalente gramo (#eq-g) de la sustancia B (fin de la titulación), entonces:

$$\#eq - gA = \#eq + gB \quad (5)$$

$$\frac{N}{A} \frac{V}{A} = \frac{N}{B} \frac{V}{B} \quad (6)$$

Datos: $N_B = 1N$ y $V_B = 26$ ml (terrario uno)

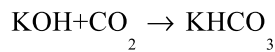
$$\#eq - gA = N_B V_B \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \#eq - gKHCO_3 &= \frac{N}{HCl} \frac{V}{HCl} = 1N * 0.026L \\ &= 0.026eq - gHOH_3 \end{aligned}$$

Ahora la cantidad de $eq-g$ KOH inicial es conocida, siendo esta,

$$\begin{aligned} \#eq - gKHCO_3 &= \frac{N}{KOH} \frac{V}{KOH} = 2N * 0.02L \\ &= 0.04eq - gKOH \end{aligned}$$

Revisando la ecuación (3) y aplicando estequiometría;



Recordando que:

$$1eq - gKOH = PM = 56g \quad (8)$$

$$1eq - gKHCO_3 = PM = 100g \quad (9)$$

Pasando los valores obtenidos a gramos y finalmente a moles:

Para el KOH:

$$\rightarrow 0.04eq - gKOH * \left(\frac{56g}{1eq - g} \right) * \left(\frac{1mol}{56g} \right) = 0.04molKOH$$

Para el $KHCO_3$:

$$\rightarrow 0.026eq - gKHCO_3 * \left(\frac{100g}{1eq - g} \right) * \left(\frac{1mol}{100g} \right) = 0.026molKHCO_3$$

La ecuación (3) está balanceada, por tanto, 1 mol de KOH reacciona con 1 mol de CO_2 para obtener 1 mol de $KHCO_3$, en este caso no es así, por lo que el

reactivo límite es el CO_2 , por lo que se va a considerar que se reaccionó con 0,026mol CO_2 .

$$0.026molCO_2 * \left(\frac{44g}{1molCO_2} \right) = 1,14gCO_2$$

El mismo procedimiento se hizo para los terrarios dos y tres, obteniéndose los siguientes valores:

Terrario dos (2)

Datos: $N_B = 1N$ y $V_B = 27$ ml (terrario dos)

$$0.027molCO_2 * \left(\frac{44g}{1molCO_2} \right) = 1,18gCO_2$$

Terrario tres (3)

Datos: $N_B = 1N$ y $V_B = 23$ ml (terrario tres)

$$0.023molCO_2 * \left(\frac{44g}{1molCO_2} \right) = 1,01gCO_2$$

Se encontró un valor central, a partir del promedio de las cantidades de CO_2 obtenidas, de 1,11 g CO_2 , lo que indica la existencia de actividad microbiana.

4. Conclusiones y recomendaciones

- El estudio de la biodegradabilidad de los hidrocarburos es de interés para la descontaminación de ambientes. La biodegradación se presenta de manera natural mediante un proceso lento, del orden de decenas de años. Existen algunas técnicas de biorremediación que facilitan la acción microbiana sobre los contaminantes, entre las más utilizadas se encuentra el Land Farming (presente estudio), debido a su economía, bajos lapsos y fácil implementación. Las consideraciones por tener en cuenta son: el suministro de nutrientes, de microorganismos y la generación de las condiciones medioambientales para el proceso, dando un manejo adecuado a los lixiviados generados.

- El tratamiento con *Pseudomonas aeruginosa* con [P] de $6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 %, para el día 90 obtuvo la máxima remoción frente a los demás tratamientos (27,53%), seguido por el de bacterias totales y *Pseudomonas aeruginosa* [B] y [P] de $2 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 % (26,63%), lo que confirma la eficiencia de este tipo de bacteria para la remoción de hidrocarburos.
- Se comprobó que la biodegradación, como proceso natural, ocurre lentamente (decenas de años), pues el tratamiento control obtuvo una remoción del 5,6%, para el día 90, mientras con *Pseudomonas aeruginosa* con [P] de $6 \cdot 10^{15}$ (UFC/ml) y un contenido de hidrocarburo en peso [HC] de 7,5 %, para el mismo lapso de tiempo, alcanzó una remoción del 27,53%. Al hacer una comparación porcentual de la remoción de ambos tratamientos se encontró que el de *Pseudomonas aeruginosa* es un 79,6% más eficiente que el de control.
- Las condiciones de trabajo fueron: temperatura ambiente de 13 °C, presión atmosférica de 0,71 atm, profundidad del suelo tratado 14 cm, pH neutro, humedad en el rango ideal (20–50%), suministro de oxígeno a partir de volteo periódico del suelo en tratamiento.
- Otra unidad utilizada para la cuantificación de hidrocarburos, además de la HTC (Concentración de Hidrocarburos Totales, expresada en %), es la TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo, expresada en mg/L). Su determinación implica

realizar un seguimiento temporal de la densidad de la matriz suelo-hidrocarburo en cada terrario, por lo que se recomienda para estudios posteriores considerar este parámetro con el fin de obtener la TPH en mg/L o ppm y la tasa de remoción de hidrocarburos totales expresada en mgTPH/día*m².

- Según King Publishing Group (1993), el costo de la biorremediación para el primer año es de US \$125 por yarda cúbica, al segundo año es de US \$27 por yarda cúbica y para el tercer año es de US \$20 por yarda cúbica, para un total de US \$172 por yarda cúbica para el proceso total. En nuestro caso el valor obtenido es de aproximadamente \$120 000,00 pesos para un volumen de 0,265 m³, equivalente a los nueve terrarios donde se aplicó tratamiento bacteriano.
- La academia es un actor fundamental para la adaptación y generación de conocimiento en diferentes campos, el cual permite solucionar diversas problemáticas de la sociedad y del ambiente, razón por la que se requiere de su participación en esta clase de estudios.

Referencias

- [1] E. Mendoza y W. Torres, *Ensayo piloto de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos (fase I)*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2005
- [2] M. Viñas, *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: Caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 2005.

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2006

Fecha de aprobación: 31 de mayo de 2007

