

Artículo Original

**TRATAMIENTO PARA CORTES DE PERFORACIÓN
CONTAMINADOS CON DIÉSEL**

DRILL CUTS CONTAMINATED WITH DIESEL TREATMENTS

Roberto Romero Silva ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-9074-9178>

Claudia Chao Reyes ¹ <https://orcid.org/0000-0002-5414-2552>

Aimeé González Suárez ² <https://orcid.org/0000-0002-8117-4891>

Yumirka Comesañas García ¹ <https://orcid.org/0000-0001-8853-8830>

Yaima Barrios San Martín ¹ <https://orcid.org/0000-0002-8274-434X>

José María Ameneiros Martínez ² <https://orcid.org/0000-0001-5184-7568>

¹ Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), Churruca No.481, La Habana, Cuba.

² Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Calle 114 # 11901, Marianao, La Habana, Cuba.

Recibido: Febrero 27, 2020; Revisado: Mayo 6, 2020; Aceptado: Junio 10, 2020

RESUMEN

Introducción:

En el proceso de perforación de los pozos de petróleo son utilizados lodos base agua o aceite, que durante estas actividades arrastran hacia la superficie fragmentos de rocas desprendidas por la acción de la barrena perforadora, denominados cortes de perforación. El manejo inadecuado de estos cortes, genera un problema de contaminación ambiental.

Objetivo:

Evaluar un proceso de estabilización química-biológica como tratamiento de cortes de perforación contaminados con lodo base combustible diésel, en microcosmos, en un período de 90 días.

Materiales y Métodos:

La etapa de estabilización química se realizó mediante la adición de óxido de calcio (CaO) y la biológica consistió en un proceso de biorremediación, a través, de la técnica de cultivo de tierra y el método de bioestimulación. En la etapa biológica se evaluaron dos variantes experimentales como fuentes aportadoras de nutrientes, un producto mejorador de suelos (V1) y la Agromena (V2). Para la evaluación del tratamiento aplicado, se determinaron las tasas de biodegradación (TB) de grasas y aceites (G y A) e hidrocarburos totales (HCT).



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Roberto Romero, Email: robertors@ceinpet.cupet.cu



Resultados y Discusión:

Se obtuvieron TB, de 56% y 44% para las variantes 1 y 2, respectivamente, en términos de G y A; mientras que para los HCT las TB alcanzadas fueron de 72% y 43%, respectivamente.

Conclusiones:

Los resultados alcanzados demostraron que la aplicación del tratamiento propuesto es factible para el manejo seguro de estos residuos, alcanzándose los mayores niveles de degradación con el producto mejorador de suelos.

Palabras clave: biorremediación; estabilización química-biológica; lodos de perforación.

ABSTRACT

Introduction:

In drilling oil wells process, water or oil-based muds are used. During these activities drag rock fragments detached by drilling bit action, called drilling cuts, towards the surface. These cuts inadequate handling generates an environmental contamination problem.

Objective:

To evaluate a chemical-biological stabilization process as drilling cuts contaminated with diesel fuel mud treatment, in microcosm, in a 90 days period.

Materials and methods:

Chemical stabilization stage was carried out by adding calcium oxide (CaO), biological one is a bioremediation process, through soil cultivation technique and a bio stimulation method. In biological stage, two experimental variants were evaluated as sources of nutrients, a soil improver product (V1) and Agromena (V2). For applied treatment evaluation, fats and oils (G and A) biodegradation rates (TB) and total hydrocarbons (HCT) were determined.

Results and Discussion:

56% and 44% TB were obtained for 1 and 2 variants, respectively, in terms of G and A; while reached was 72% and 43% for HCT the TB, respectively.

Conclusions:

Achieved results showed that proposed treatment application is feasible for these residues safe management, reaching the highest degradation levels with soil improver product.

Keywords: bioremediation; chemical-biological stabilization; drilling mud.

1. INTRODUCCIÓN

Para perforar los pozos petroleros se requiere el uso de lodos de perforación formados a partir de diferentes formulaciones de productos químicos que son bombeados hacia el interior del pozo, para enfriar el trépano, presurizar y retornar hacia la superficie llevando consigo fragmentos de roca desprendidos durante la acción de la barrena perforadora, denominados cortes de perforación. Los lodos pueden estar constituidos en base acuosa o en base aceite (Buendía, 2016).

A nivel mundial se estima que la producción de residuos de este tipo rebasa los 350 millones de toneladas al año. En el pasado, la mala gestión o la ausencia de ella, dio lugar a un elevado número de casos de contaminación grave del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas. En Cuba se acumulan 450 toneladas al año (George, 2019). Los cortes que se generan del uso de lodos base agua presentan bajas concentraciones de hidrocarburos y son manejados y dispuestos mediante la biorremediación. La presencia de hidrocarburos en el suelo impide el intercambio gaseoso con la atmósfera iniciando una serie de procesos físico-químicos simultáneos, tales como la evaporación y la penetración, que pueden ser más o menos lentos, ocasionando una mayor toxicidad (Alvaro y col., 2016).

Cuba se encuentra en proceso de expansión de la industria petrolera para afrontar difíciles desafíos energéticos. Dicho proceso comprende la prospección de nuevos pozos de petróleo y la nueva incorporación de lodos base aceite, con el objetivo de lograr mejores resultados en la perforación y extracción del crudo, con los consecuentes impactos ambientales que traen tales actividades.

Hasta este momento las acciones han estado orientadas a la capacitación de especialistas y la experimentación, destacándose acciones en la biorremediación para el manejo de muchos de los residuos generados por la industria (Morejón, 2019). Sin embargo, aún se necesitan investigaciones para la implementación de nuevas tecnologías, debido a que las empresas de perforación no disponen de una alternativa efectiva para el manejo y disposición adecuada de los cortes de perforación contaminados con lodos base combustible diésel.

El objetivo general de la presente investigación es evaluar un proceso de estabilización química-biológica como tratamiento de cortes de perforación contaminados con lodo base combustible diésel, en microcosmos, en un período de 90 días.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Proceso de estabilización química - biológica

El proceso de estabilización química-biológica se realizó en microcosmos durante 90 días. Se emplearon 6 composteros, conformados con suelo limpio y cortes de perforación contaminados con diésel, en una proporción 2:1, según base de cálculo de 3 kg. El proceso partió de una concentración inicial estimada de G y A de 50 000 mg/kg y 25 000 mg/kg de HCT.

2.1.1. Ensayos experimentales

El proceso se dividió en dos etapas. En los primeros 30 días se realizó la estabilización química, donde se añadió en cada compostero 300 g de óxido de calcio con el objetivo de absorber e inmovilizar el contaminante, garantizando un pH básico (Leonard y Stegeman, 2010). Durante los 60 días restantes se prosiguió con la estabilización biológica que consistió en implementar un proceso de biorremediación a partir de la técnica de cultivo de tierra y el método de bioestimulación.

Al inicio de la estabilización química se procedió a la saturación del medio con agua. En la estabilización biológica se evaluaron dos variantes experimentales como fuentes aportadoras de nutrientes, un producto mejorador de suelos contaminados con hidrocarburos desarrollado por el Centro de Investigaciones del petróleo (CEINPET)

(V₁) y la Agromena (fertilizante órgano - mineral desarrollado en el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM)) (V₂). Se adicionaron 450 g de cada material para cada variante, correspondiendo al 15% de la masa total de cada compostero. Los composteros fueron expuestos a la luz solar, con aireación y humectación periódica.

2.1.2. Variables para la evaluación del proceso de estabilización química biológica

Con el objetivo de evaluar el proceso fueron realizadas mediciones de pH a partir de la (NC 32: 2009). Se realizaron los análisis químicos siguientes: grasas y aceites (G y A) e hidrocarburos totales (HCT) por el método de ensayo (APHA 5520-G, 2005). También se realizó el análisis de hidrocarburos aromáticos por espectroscopía infrarroja (IR), mediante la técnica de Reflectancia Total Atenuada Universal (UATR) según la (ASTM E 1252-98, 2007) y el análisis cualitativo de hidrocarburos saturados por CG/EM, mediante la Cromatografía de Gases con Detector Másico (CG/EM). Como parte de dicha evaluación se realizó el análisis microbiológico del conteo de microorganismos degradadores de hidrocarburos (MDHC), mediante la (ISO 8199:2018), (Wyndham, 1981). En el caso de las G y A e HCT se determinó la tasa de biodegradación, según la siguiente expresión:

$$TB = \frac{CI - CF}{CI} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

TB: tasa de biodegradación, expresada en %.

CI: Concentración inicial de grasas y aceites e hidrocarburos totales (mg/kg).

CF: Concentración final de grasas y aceites e hidrocarburos totales (mg/kg).

2.2. Determinación de la actividad microbiana

La evaluación de la actividad microbiana en el suelo se determinó mediante el ensayo de respiración microbiana aeróbica del suelo, según la (ISO 16072:2002) para la determinación del oxígeno consumido y liberación de dióxido de carbono.

2.3. Diseño experimental

El proceso se evaluó estadísticamente mediante un diseño multi-factorial categórico, con dos variables respuestas: concentraciones de G y A e HCT, empleando el programa Statgraphics Centurión versión 15.2.05. Los factores experimentales fueron el tiempo (30, 60 y 90 días), y el proceso de estabilización biológica (EB) (V₁ y V₂).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Proceso de estabilización química-biológica

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones de pH realizadas durante el proceso. Al inicio de la estabilización biológica en ambas variantes se observan altos valores de pH que alcanzan los 11,70, corroborándose lo planteado en la literatura, que al adicionarse óxido de calcio (CaO) al suelo se puede alcanzar condiciones alcalinas (Mena, 2015). Posteriormente estos valores se ubican en el intervalo de 7 a 8, lo cual es atribuible a la ocurrencia de la degradación de contaminantes, que provoca una acidificación del medio, manteniéndose en valores de pH neutros favorables, según

requerimientos de este tipo de procesos (Mena, 2015).

Tabla 1. Mediciones de pH a T = 25 °C

Tiempo (días)	Variante 1	Variante 2
30	11,70	11,69
60	7,60	7,20
90	7,12	7,01

A partir de los resultados de los análisis, se presentan los gráficos de los procesos de biodegradación para las G y A y los HCT, vinculados con el crecimiento microbiano (Figura 1). Para el caso de las G y A, las concentraciones iniciales en la estabilización biológica para ambas variantes estuvieron alrededor de los 30 000 mg/kg. Al comparar este valor con el estimado al inicio del proceso (50 000 mg/kg), se observa que con la estabilización química se logró una disminución considerable mediante la adición del óxido de calcio (CaO), que en presencia de agua provoca una reacción exotérmica que fractura el suelo en partículas muy pequeñas que se absorben a partir de su alta superficie específica y cavidades, mediante rápidas reacciones de ionización y floculación y posteriores reacciones de carbonatación, puzolánica y aparición de nuevos compuestos minerales (Méndez y col., 2013). Al finalizar el proceso las concentraciones son ligeramente superiores a los valores especificados en la (NC 819:2017) (10 000 mg/kg,) alcanzándose valores de 12 613 y 16 997 mg/kg para las variantes 1 y 2, respectivamente.

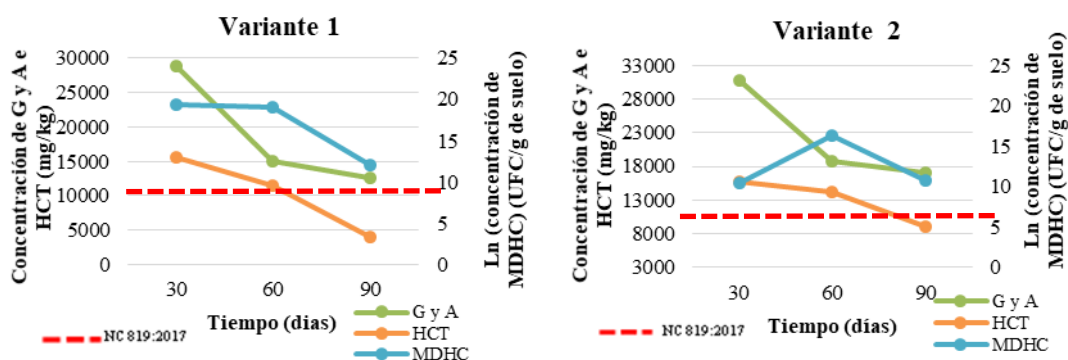


Figura 1. Procesos de degradación para las G y A y los HCT de ambas variantes

Las concentraciones iniciales de HCT en la estabilización biológica estuvieron alrededor de los 15 000 mg/kg para ambas variantes, ocurriendo igual disminución con respecto a la concentración inicial estimada del proceso (25 000 mg/kg).

Ambas variantes presentaron una tendencia a la disminución de dichas concentraciones durante todo el tiempo de la estabilización biológica evaluada, siendo este comportamiento más acentuado en la variante 1, donde se alcanzó el valor de 4 015 mg/kg. Para la variante 2, se logró una disminución del contenido de HCT hasta alcanzar el valor de 9 016 mg/kg. Con ambas variantes se lograron valores inferiores a los 10 000 mg/kg establecidos en la (NC 819:2017) de referencia. Howard (2005) en la aplicación de técnicas similares en la degradación de residuos de base aceite, reporta que es posible alcanzar concentraciones entre 10 000 y 10 500 mg/kg de hidrocarburos

totales de petróleo (HTP).

Al inicio de la estabilización biológica los microorganismos degradadores de hidrocarburos se encontraban en el orden de 10^{10} y 10^4 UFC/g de suelo para cada variante respectivamente, siendo superior a los niveles recomendados entre 10^4 - 10^8 UFC/g de suelo, que garantiza un desarrollo eficiente en procesos de biodegradación del diésel (Castro-Mancilla y col., 2013). A partir de los 60 días comenzaron a disminuir estos niveles hasta valores de 10^5 y 10^4 UFC/g de suelo respectivamente. Este comportamiento se debe al agotamiento de la fuente de sustrato utilizada por los microorganismos, lo cual ha sido confirmado por la disminución de los parámetros G y A e HCT. Además, como consecuencia de la degradación metabólica, los microorganismos generan subproductos tóxicos que pueden ocasionar su muerte (Barrios, 2011). Sin embargo, estas concentraciones siguen siendo convenientes para el buen desempeño del proceso.

3.2. Tasas de Biodegradación

Las tasas de biodegradación promedios de G y A e HCT obtenidas para las variantes experimentales, se resumen en la Figura 2. Las mayores tasas de biodegradación de G y A e HCT se obtuvieron para la variante 1 a los 90 días del proceso con un valor de 56% y 72 % respectivamente. Para la variante 2 fueron del 44% y 43% respectivamente.

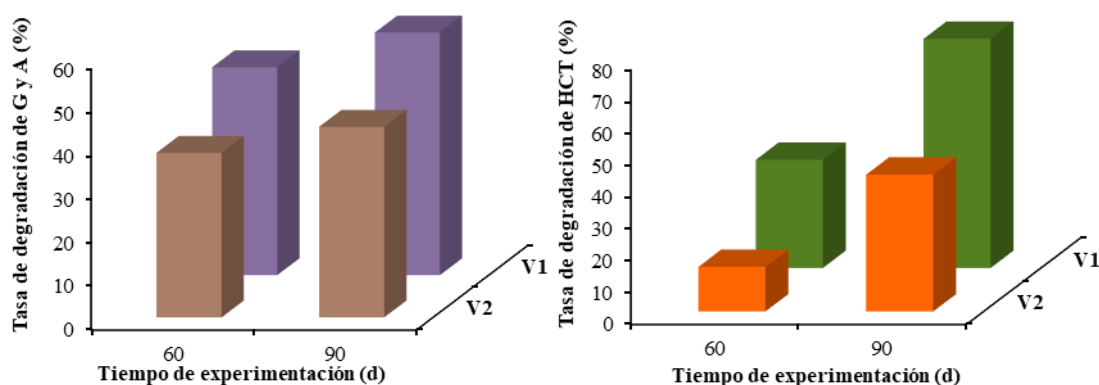


Figura 2. Tasas de biodegradación promedios para las G y A y los HCT

3.3. Análisis de la actividad microbiana del suelo

Los resultados obtenidos en el ensayo de producción de dióxido de carbono (CO_2) se muestran en la Figura 3. Se observa que al segundo día de iniciada la estabilización biológica (día 32 del proceso), existe una mayor producción de CO_2 en la variante 1, indicativo de una favorable actividad microbiana. Estudios realizados por (García y col., 2011) reportan una baja concentración de CO_2 durante los primeros 3 días, debido a una fase de adaptación en la cual los microorganismos adecúan su aparato enzimático a las nuevas condiciones del medio. Presuntamente la utilización del producto mejorador permitió una rápida adaptación del microorganismo, no así con la utilización de la Agromena.

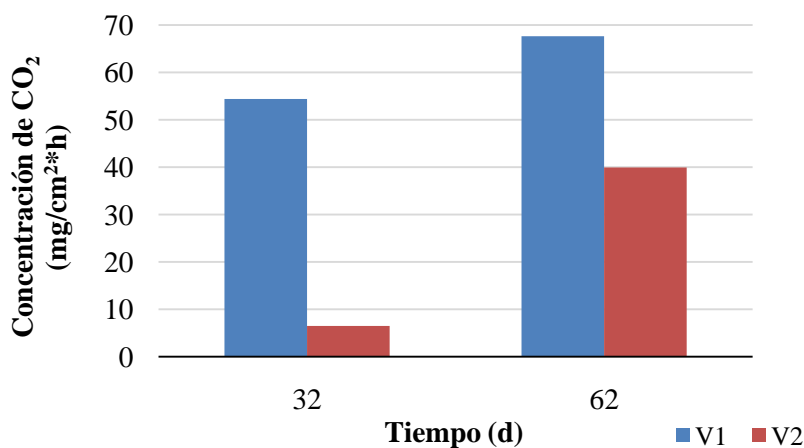


Figura 3. Concentración de CO₂ a los 32 y 62 días de la estabilización química biológica

A los 62 días la concentración de CO₂ de ambas variantes fue de 68 y 40 mg/cm²·h respectivamente. El primer valor cumple con el intervalo recomendado para este tipo de procesos de 60 a 80 mg de CO₂ /cm²·h (Mena, 2015). Sin embargo, ambos valores confirman la presencia de una actividad metabólica favorable, que propició la degradación de las G y A e HCT (Figura 1).

3.4. Análisis cualitativo de hidrocarburos saturados por CG/EM

Las figuras 4 y 5 muestran los perfiles cromatográficos de los hidrocarburos saturados para las variantes 1 y 2, respectivamente. A los 90 días se observa una disminución de la intensidad de las señales correspondientes a la familia de las n-parafinas (comprende en este caso a los hidrocarburos del C₁₉ al C₂₅), producto del proceso de biodegradación ocurrido y del aumento de la UCM, que oculta dichas señales.

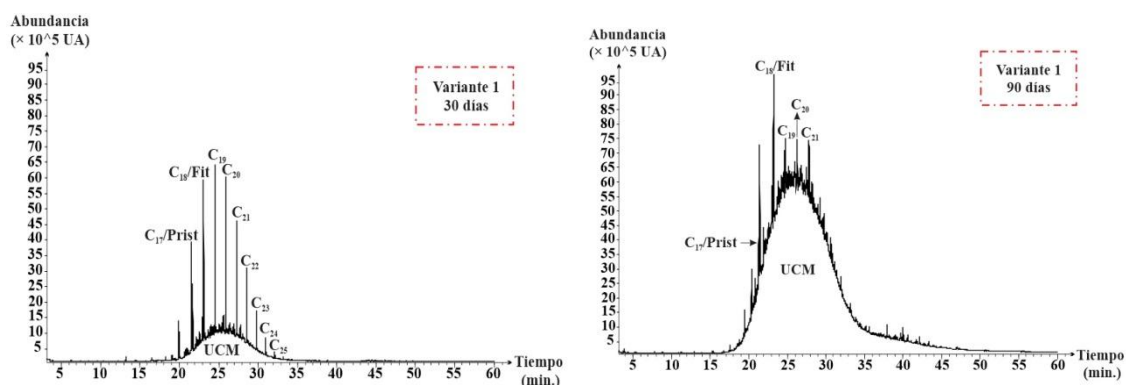


Figura 4. Perfiles cromatográficos de los hidrocarburos saturados para la variante 1

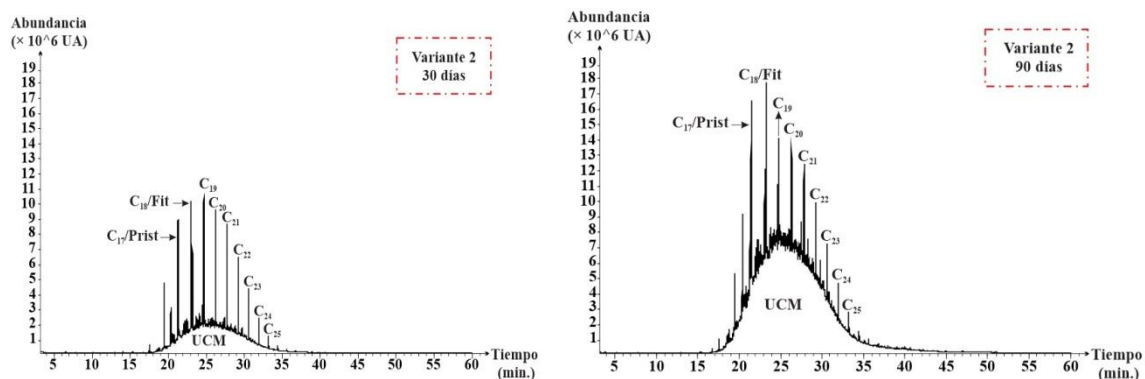


Figura 5. Perfiles cromatográficos de los hidrocarburos saturados para la variante 2

3.5. Análisis de hidrocarburos Aromáticos por IR

En la Figura 6 se presentan los espectros infrarrojos de la variante 1 y 2, a los 30 y 90 días del proceso. Con el objetivo de observar la disminución de los hidrocarburos se calcularon las áreas correspondientes a las vibraciones de tensión CH₂ y CH₃.

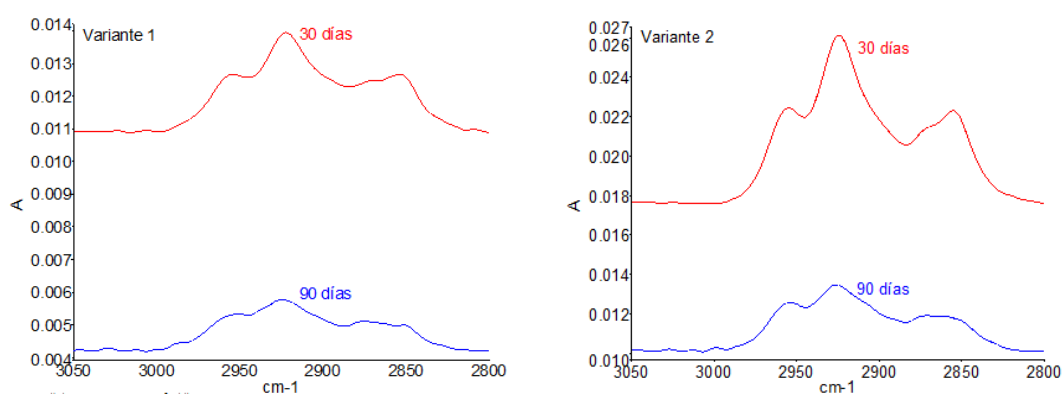


Figura 6. Espectros IR para las muestras tomadas a los 30 y 90 días

En la Tabla 2 se muestran los valores de áreas obtenidos y la razón entre ellas para cada muestra. Se observa que para las muestras tomadas a los 90 días el área disminuyó, como consecuencia de la eliminación de grupos metilos (CH₃) durante el proceso de biodegradación.

Tabla 2 Áreas obtenidas para la variante Producto

Áreas	Variante 1		Variante 2	
	30 días	90 días	30 días	90 días
A ₂₉₂₀ /A ₂₉₆₀	3,00	2,50	2,70	2,20

3.6. Análisis estadístico

3.6.1. Grasas y Aceites (G y A)

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA). La Tabla 3 reporta los valores-P para cada factor experimental. Debido a que los factores tiempo y estabilización biológica poseen valores-P menores que $\alpha=0,05$, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la concentración de G y A con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 3. Análisis de Varianza para G y A - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<i>Efectos principales</i>					
A:EB	5,05013E7	1	5,05013E7	5,30	0,0372
B:Tiempo	7,96339 E8	2	3,98169E8	41,80	0,0000
Residuos	1,33354 E8	14	9,5253E6		
Total (corregido)	9,80194E8	17			

También se realizó prueba de múltiples rangos para determinar diferencias significativas entre las concentraciones de G y A, durante el tiempo de estabilización biológica (Tabla 4). Los valores de G y A alcanzados entre los 30 y 60 días, muestran diferencias significativas. Por el contrario, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones obtenidas entre los 60 y 90 días. Se observa que las concentraciones alcanzadas entre los 30 y 90 días, existen diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para G y A por Tiempo

<i>Tiempo (días)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
90	6	14 805,0	1 259,98	X
60	6	16 908,3	1 259,98	X
30	6	29 848,3	1 259,98	X

En cuanto a la estabilización biológica, las concentraciones de G y A en cada variante muestran diferencias estadísticamente significativas (Tabla 5). Al analizar dichas concentraciones, se determinó que los menores valores se alcanzan con el Producto, confirmando dicha variante como la mejor alternativa de tratamiento.

Tabla 5. Pruebas de Múltiple Rangos para G y A en la estabilización biológica

<i>EB</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Producto	9	18 845,6	1 028,77	X
Agromena	9	22 195,6	1 028,77	X

3.6.2. Hidrocarburos Totales (HCT)

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA). En la Tabla 6 se reportan los valores-P para los factores tiempo y estabilización biológica. En ambos factores, el valor-P es menor que $\alpha=0,05$, por lo que tienen un efecto estadísticamente significativo en la concentración de HCT con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 6. Análisis de Varianza para HCT - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<i>Efectos principales</i>					
A:EB	3,16039E7	1	3,16039E7	4,79	0,0461
B:Tiempo	2,60851E8	2	1,30425E8	19,77	0,0001
Residuos	9,23547E7	14	6,59676E6		
Total (corregido)	3,84809E8	17			

Además, se realizó la prueba de múltiples rangos (Tabla 7) determinándose que entre las concentraciones obtenidas entre los 30 y 60 días, para ambas variantes, no existen diferencias estadísticamente significativas. Las concentraciones alcanzadas entre los 60 y 90 días muestran diferencias significativas. Por último, se observa que para el caso de los niveles 30 - 90 días también existen diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 7. Pruebas de Múltiple Rangos para HCT por Tiempo

<i>Tiempo (días)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
90	6	6 515,5	1 048,55	X
60	6	12 806,7	1 048,55	X
30	6	15 621,7	1 048,55	X

En cuanto a la estabilización biológica, se afirma que las concentraciones de HCT en cada variante muestran diferencias estadísticamente significativas y que la variante Producto es mejor debido a que posee la menor concentración promedio (Tabla 8).

Tabla 8. Pruebas de Múltiple Rangos para HCT por EB

<i>EB</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Producto	9	10 322,9	856,139	X
Agromena	9	12 973,0	856,139	X

4. CONCLUSIONES

1. El tratamiento aplicado mediante el proceso de estabilización química – biológica a cortes de perforación contaminados con lodo base combustible diésel, fue efectivo en la disminución de los niveles de concentración de Grasas y Aceites (12 613 y 16 997 mg/kg) e Hidrocarburos totales (4 015 y 9 016 mg/kg) de ambas variantes experimentales, respectivamente.
2. Las mayores tasas de biodegradación de Grasas y Aceites (56%) e Hidrocarburos totales (72%) se alcanzaron con la utilización del producto mejorador de suelos. Estos resultados permiten asegurar un correcto manejo y disposición final de estos residuos en el medio ambiente.

REFERENCIAS

- Alvaro, C., Arocena, A. Martínez M. & Nudelman N. Biodegradación aerobia de fracciones de hidrocarburos provenientes de la actividad petrolera en un suelo de la región Patagonia Norte, Argentina., Laboratorio de Recuperación de Suelos Regionales, Biotecnología y Energías alternativas, Univesidad Nacional del Comahue, Argentina, Vol. 33, No. 2, 2016, pp. 8-20.
- APHA 5520-G., Assotciation, A.P.H., Standard Methods for the examination of water and wastewater., in, A.P.H. Assotciation, Editor 2005, APHA _AWWA_WEF. 21 st ed: 15th Street, NW Washington, DC, United States of America, 2005, pp. 5-42.
- ASTM E 1252-98., Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis, 2007, pp. 05-21.
- Barrios, Y., Obtención de un consorcio bacteriano para la remoción de hidrocarburos

- del petróleo., Proyecto 7083, Etapa 02, Ed. Centro de Investigación del petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba, 2011, pp. 1-23.
- Buendía, T., Alternativas de tratamiento de las sustancias químicas peligrosas en los lodos de perforación., Repositorio Institucional, Universidad de América, Gestión Ambiental, Trabajo de Grado, Colombia, 2016. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/642>
- Castro-Mancilla, Y.V., Castro, B.I., de la Garza-Requena, F.R., Rivera-Ortiz, P., Heyer-Rodriguez, L., & Ortiz-Carrizales, Y.P., Variación de las poblaciones microbianas del suelo por la adición de hidrocarburos., *Terra Latinoamericana*, Vol. 31, No. 3, 2013, pp. 221-230.
- García, E., Roldán, F., & Garzón, L., Evaluación de la bioestimulación (nutrientes) en suelos contaminados con hidrocarburos utilizando respirometría., *Acta biológica*, Vol. 16, No. 1, 2011, pp. 195-208.
- George, E., Producción de residuos de la perforación., Comunicación Personal, Ed. Centro de Investigación del petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba, 2019.
- Howard, R., Proceso de estabilización química-biológica para la remediación de suelo y recortes contaminados con aceites y derivados del petróleo., Patente: WO2005082553 A1, México, 2005, pp. 01-10.
- ISO 8199:2018., Water quality – General guide to the enumeration of microorganisms by culture., in Standard, O.F. Standardization, Editor., ISO/IEC Office: Geneva, Switzerland, 2018, pp. 08-22.
- ISO 16072:2002., Standard, I., Soil quality - Laboratory methods for determination of microbial soil respiration in Determination of CO₂ release by titration in a static system., International Standard Switzerland, 2002, pp. 4-6.
- Leonard, S., & Stegeman, J., Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: Leaching studies. NCBI, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 174, No. 1-3, 2010, pp. 72-473.
- Mena, Y., Evaluación de la Biorremediación para el manejo de residuos sólidos petrolizados de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo de Majagua., Tesis presentada en opción al título de Máster en Ingeniería Ambiental, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cuba, 2015.
- Méndez, R., Gomez, P., Ledesma J., & Ceniceros C., Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco., *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, Mexico, Vol. 2, No. 4., 2013, pp. 08-16.
- Morejón, L., Propuesta de un sistema de control de sólido y la tecnología para la disposición final del lodo base aceite., Tesis presentada en opción al título de Máster en Ingeniería Ambiental, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cuba, 2019.
- NC 32:2009., Calidad del suelo. Determinación del pH y la conductividad eléctrica en el extracto de saturación., Cuba, 2009, pp. 02-09.
- NC 819:2017., Norma Cubana Manejo de Fondaje de Tanques de Almacenamiento de Petróleos y sus Derivados., (onshore), Oficina Nacional de Normalización (ONN-NC), La Habana, Cuba, 2017, pp. 02-30.
- Wyndham, R.C., MBH Medium (Modified Bushnell and Hass Salt solution)., *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 41, No. 03, 1981, pp. 783-790.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Roberto Romero Silva. Elaboró, desarrolló y dirigió la investigación. Participó en la realización de los análisis y la discusión de los resultados. Dirigió la escritura del artículo.
- Ing. Claudia Chao Reyes. Participó en la elaboración y desarrollo de la investigación, la realización de los análisis y la discusión de los resultados. Participó en la escritura del artículo.
- Dra.C. Aimeé González Suárez. Participó en el desarrollo de la investigación y la discusión de los resultados de la misma. Participó en la escritura del artículo.
- M.Sc. Yumirka Comesañas García. Realizó los análisis de las técnicas analíticas de avanzadas utilizadas y participó en la discusión de estos resultados.
- M.Sc. Yaima Barrios San Martín. Desarrolló y evaluó la data estadística experimental. Participó en la discusión de los resultados.
- Dr.C. José María Ameneiros Martínez. Participó en el desarrollo de la investigación y la discusión de los resultados obtenidos.