



Biorremediación de un suelo contaminado con aceite residual automotriz empleando compost para su futura utilización en la agricultura

Yajaira Rosales*, Yudith Acosta, Maziad El Zauahre

Laboratorio de Investigaciones y Servicios Ambientales (LISA). Universidad del Zulia, LUZ Núcleo Punto Fijo. Av. Táchira. 4125. Estado Falcón, Venezuela

RESUMEN

El estudio consistió en evaluar un proceso de biorremediación con compost, aplicado a un suelo contaminado con aceite residual automotriz, en la Península de Paraguaná del estado Falcón. A los efectos, se muestrearon el suelo contaminado (SC) y el suelo no contaminado (SNC). Para llevar a cabo la bioestimulación y tratamiento del SC en el proceso de biorremediación, se utilizaron dos (2) tipos de compost, uno a base de estiércol de cerdo (CC) y otro de estiércol de chivo y pollo (CG), los cuales se aplicaron a las muestras de SC en dosis del 0 (control), 10% y 15%. Se determinaron parámetros fisicoquímicos como: hidrocarburos totales (HT) y humedad (mediante gravimetría); pH (potenciometría); conductividad eléctrica (CE) (conductimetría); nitrógeno total (NT) (destilación/alcalimetría); fósforo total (PT) y carbono orgánico total (COT) (espectrofotometría). Los resultados demostraron que la biorremediación fue efectiva para la remoción de HT luego de 90 días de tratamiento, alcanzando 54,01% y 41,40% para CG a dosis de 15% y 10%, respectivamente. En contraste, el tratamiento con CC mostró una remoción menor (26,06% y 28,32% a dosis de 15% y 10% respectivamente) comparado con CG. Las muestras presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos a los 0 días y, para los tiempos evaluados, los tratamientos CC al 10% y CG al 15%, incluyendo el suelo control. Adicionalmente para el tratamiento CG al 15%, los resultados de: pH, CE, COT, NT y PT fueron: 7,69; 0,37 mS.cm⁻¹; 0,421%; 21,57%; 0,147% respectivamente garantizando las condiciones necesarias para el desarrollo del proceso de biorremediación. De esta forma es posible sugerir el uso de la biorremediación con compost, ya que es una técnica efectiva, económica y aceptable ambientalmente, con el propósito final de darle uso en la agricultura.

Palabras clave: abono, agricultura, biodescontaminación, contaminación.

Rev. Fac. Agron. (UCV) Vol. 50(2): 73-88 (2024)

ORCID: 0000-0002-0905-9426
0000-0002-1464-702X
0009-0006-4351-4097

Depósito Legal: PI200502AR2252
ISSN: 0041-8285
e-ISSN 1856-5573

Autor de correspondencia: Yajaira Rosales
E-mail: yajairaayarlem@gmail.com; Telf: +58 04126665661
Recepción: 20-06-2024
Aceptado: 10-01-2025.
Publicado: enero 2025

Esta Revista se publica bajo el auspicio del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, UCV

Bioremediation of contaminated soil using organic compost for future use in agriculture

ABSTRACT

The study consisted of evaluating a bioremediation process with compost, applied to soil contaminated with residual automotive oil, in the Paraguaná Peninsula of Falcón state. For this purpose, the contaminated soil (SC) and the uncontaminated soil (SNC) were sampled. To carry out the biostimulation and treatment of SC in the bioremediation process, two (2) types of compost were used, one based on pig manure (CC) and another on goat and chicken manure (CG), which were applied to the SC samples at doses of 0 (control), 10% and 15%. Physicochemical parameters were determined such as: total hydrocarbons (HT) and humidity (through gravimetry); pH (potentiometry); electrical conductivity (EC) (conductimetry); total nitrogen (TN) (distillation/alkalimetry); total phosphorus (TP) and total organic carbon (TOC) (spectrophotometry). The results demonstrated that bioremediation was effective for the removal of TH after 90 days of treatment, reaching 54.01% and 41.40% for CG at doses of 15% and 10%, respectively. In contrast, treatment with CC showed lower removal (26.06% and 28.32% at doses of 15% and 10% respectively) compared to CG. The samples presented significant differences ($p < 0.05$) between treatments at 0 days and, for the times evaluated, the 10% CC and 15% CG treatments, including the control soil. Additionally, for the 15% CG treatment, the results of: pH, EC, COT, NT and PT were: 7.69; 0.37 mS.cm⁻¹; 0.421%; 21.57%; 0.147% respectively, guaranteeing the conditions necessary for the development of the bioremediation process. In this way it is possible to suggest the use of bioremediation with compost, since it is an effective, economical and environmentally acceptable technique, with the final purpose of using it in agriculture.

Key words: agriculture, biodecontamination, fertilizer, pollution

INTRODUCCIÓN

Los derrames de petróleo son una fuente de contaminación tanto de suelo como de agua (Santos, 2020). En el suelo, se crea en la superficie una capa muy fina que imposibilita el crecimiento de plantas o animales, generando cambios fisicoquímicos como variaciones en materia orgánica, cambios en la estructura, incremento de densidad real, entre otros (Ruiz, 2019).

Asimismo, los aceites lubricantes para automóviles (derivados del petróleo) después de su uso pierden sus características volviéndose inadecuados para continuar su utilización con el mismo propósito (Rosales, 2008), convirtiéndose en aceite residual automotriz, que contiene compuestos como hidrocarburos aromáticos policíclicos, benceno, disolventes a base de cloro, PCB, entre otros; metales pesados (cromo, cadmio, arsénico, plomo, etcétera) que tienen un impacto directo en la salud humana (Akindele *et al.*, 2018).

En el suelo, el aceite residual automotriz es insoluble, forma una película impermeable que impide el intercambio gaseoso con la atmósfera (Abdulsalam y Omale, 2009), inhibe la actividad microbiana heterotrófica aerobia nativa que participa en los ciclos biogeoquímicos de la vida y en el reciclaje de la materia orgánica, causando pérdida en la fertilidad del suelo (Margesin *et al.*, 2007). A tal efecto, se conoce, que los aceites provenientes de algunos talleres que efectúan cambio de lubricante en los automóviles, son vertidos directamente en terrenos urbanos del Municipio Carirubana, estado Falcón, causando la degradación del suelo y el incumplimiento de las políticas de control de disposición final del aceite (Acosta *et al.*, 2011).

Al respecto, la contaminación y los procesos de degradación del suelo actúan de manera simultánea en ambientes altamente vulnerables como las zonas áridas de la Península de Paraguaná del estado Falcón-Venezuela (Mogollón *et al.*, 2015) causando la pérdida de materia orgánica y la baja fertilidad (Mogollón *et al.*, 2017), así como la poca capacidad de retención de humedad y la excesiva pérdida de nutrientes por efecto de la percolación (Caravaca y Roldan, 2003), además, los daños a plantas, animales y humanos pero principalmente sobre las poblaciones de microorganismos, los cuales representan parte importante del ecosistema y son claves para los procesos biogeoquímicos (Vasudevan y Rajaram, 2001).

En relación a lo anterior, la biorremediación, es una técnica que estimula la actividad microbiana acelerando el proceso natural de degradación del contaminante (Alanya *et al.*, 2023) depurando ambientes naturales mediante la capacidad metabólica de microorganismos y plantas, de forma parcial a formas menos tóxicas, o de forma total a dióxido de carbono (procesos aerobios) o agua y metano (condiciones anaerobias) (Moreno, 2009).

Asimismo, los residuos orgánicos cuando se manejan adecuadamente, pueden convertirse en un recurso valioso como el abono (compost) rico en nutrientes (Ruiz, 2023), demostrando su utilidad en términos de economía y eficiencia a través del uso de enmiendas de nutrientes en la agricultura y reduciendo la carga ambiental (Ventorino *et al.*, 2019). Además, el compost maduro producido por compostaje aeróbico mejora la fertilidad del suelo y aumenta el rendimiento en los cultivos, dependiendo de la fuente de residuos utilizados (Cui *et al.*, 2021).

Esta investigación consistió en evaluar el proceso de biorremediación empleando dos composts de diferente naturaleza, en un suelo contaminado con aceite residual automotriz en el Municipio Carirubana, Península de Paraguaná, estado Falcón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron un total de 18 muestras de suelo completamente al azar, tomadas a 20 cm de profundidad, en sitios diferentes de un terreno aproximadamente de 300 m² afectado por el vertido incontrolado de aceite residual automotriz, ubicado en la comunidad de La Puerta Maraven, Parroquia Punta Cardón del Municipio Carirubana, estado Falcón. Estas muestras fueron mezcladas para formar una muestra compuesta y se pasaron a través de un tamiz de 2 mm de abertura. Las muestras de suelo se describieron de acuerdo con el sistema de notación y color Munsell (Domínguez *et al.*, 2012) de la siguiente manera: una muestra de suelo no contaminado (SNC) de color naranja (7,5YR6/6) y una muestra de suelo contaminado (SC) de color negro parduzco (5YR2/1). Asimismo, para la recolección de las muestras contaminadas con el combustible se consideró su color, olor y aspecto (Flores, 2010). De esta manera, se seleccionaron las muestras que visualmente presentaron un color oscuro y una textura aceitosa. El SNC se utilizó solo para comparar los resultados fisicoquímicos obtenidos respecto al SC.

Los residuos orgánicos empleados en la elaboración de los composts fueron: residuos vegetales frescos, hojas secas de los árboles y estiércoles. Los residuos vegetales frescos (residuos de alimentos) fueron recolectados en el comedor estudiantil de la Universidad del Zulia, Núcleo LUZ Punto Fijo; las hojas secas correspondían a plantas de mamón (*Melicoccus* spp) y matapalos (*Ficus* spp) provenientes de las áreas verdes de la misma institución; los estiércoles (cerdo, chivo y pollo) se obtuvieron de los criaderos de la localidad rural de Adaure, ubicada en la Península de Paraguaná.

Con los materiales anteriormente descritos se prepararon dos composts; uno, de estiércol de cerdo (CC) (30 kg de residuos vegetales + 30 kg de estiércol seco de cerdo + 40 kg de hojas secas) y otro, de estiércol de chivo y pollo (CG) (30 kg de residuos vegetales + 15 kg de estiércol seco de chivo y 15 kg de estiércol seco de pollo + 40 kg de hojas secas), los cuales se utilizaron como tratamiento del suelo contaminado durante el proceso de biorremediación.

Para llevar a cabo el proceso de biorremediación, la muestra de suelo contaminado (SC), fue tratado con los composts orgánicos CC y CG a dosis del 10% y 15% en peso. El tratamiento se aplicó mezclando uniformemente la muestra de SC con cada una de estas dosis hasta homogeneizarla lo más posible. Posteriormente, de cada mezcla se prepararon tres (3) réplicas y se colocaron 8 kg de cada muestra (suelo + compost) en macetas quedando estas de la siguiente manera: seis (6) macetas con la dosis del 10% de cada uno de los compost, y seis (6) macetas más, con la dosis del 15% para un total de doce (12). Asimismo, y paralelamente, se colocaron tres (3) macetas más con SC sin tratamiento el cual fue utilizado como control del proceso (Cuadro 1).

Posteriormente todas las macetas se ubicaron en un lugar adecuado (vivero), bajo techo, para evitar la exposición directa al sol y lluvia, y cercado con malla, para evitar la presencia de animales. Las macetas fueron regadas con una periodicidad de 8 días con el fin de mantener la humedad a la capacidad de campo, en un rango del 40 al 60%, conforme a lo indicado por Volke y Velasco (2003) para la biorremediación, por un período de noventa (90) días.

Cuadro 1. Diseño experimental del proceso de biorremediación empleando compost como tratamiento del suelo contaminado.

Suelo contaminado (SC) (control)			Tratamientos aplicados	Muestras de suelo contaminado (SC) con tratamiento		
SC ₁	SC ₂	SC ₃	Compost de estiércol de cerdo (CC) al 10%	SC+CC1 (10%)	SC+CC2 (10%)	SC+CC3 (10%)
			Compost de estiércol de cerdo (CC) al 15%	SC+CC1 (15%)	SC+CC2 (15%)	SC+CC3 (15%)
			Compost de estiércol de chivo y pollo (CG) al 10%	SC+CG1 (10%)	SC+CG2 (10%)	SC+CG3 (10%)
			Compost de estiércol de chivo y pollo (CG) al 15%	SC+CG1 (15%)	SC+CG2 (15%)	SC+CG3 (15%)

SC: suelo contaminado. CC: compost de estiércol de cerdo. CG: compost de estiércol de chivo y pollo.

El análisis estadístico de los resultados consistió en un análisis descriptivo para la caracterización fisicoquímica de los suelos y composts. Este análisis incluyó el cálculo de medias y desviaciones estándar para cada variable medida. No se aplicaron pruebas de significancia estadística, ya que el objetivo principal era describir las propiedades fisicoquímicas de las muestras y no comparar tratamientos específicos.

Para el tratamiento de los resultados experimentales se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías. Para evaluar si los tratamientos difieren significativamente entre sí en cuanto a sus medias, se utilizó el test de Tukey en este ANOVA, con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia del 5%, mediante el programa STATISTICA 10.

A continuación, en el Cuadro 2, se muestra, en resumen, los métodos de referencias empleados para la caracterización inicial del suelo (contaminado y no contaminado), los composts CC y CG y los tratamientos (suelo + compost) aplicados al inicio y final de la biorremediación.

Cuadro 2. Resumen de métodos y técnicas a emplear en la caracterización fisicoquímica del suelo, residuos orgánicos y tratamientos en el proceso de biorremediación.

Parámetro	Método	Técnica/equipo	Referencia
* Humedad (%)	Gravimétrico secado a 1 g de muestra a temperatura de 105°C durante 4 h	Estufa	(Fernández <i>et al.</i> , 2006)
* pH	Potenciométrico con electrodo de vidrio combinado 10 g de muestra en 25 mL de H ₂ O destilada	Lectura en pH-metro	(Gilbert <i>et al.</i> , 2015)
CE (mS cm ⁻¹)	Conductímetro (10 g de muestra en 50 mL de H ₂ O destilada)	Lectura en un Conductímetro	(Gilbert <i>et al.</i> , 2015)
COT (%)	De combustión húmeda Walkley-Black modificado	Espectrofotometría visible $\lambda=600$ nm	(Fernández <i>et al.</i> , 2006)
PT (%)	Del azul de molibdeno	Espectrofotometría visible $\lambda=880$ nm	(Gilbert <i>et al.</i> , 2015)
NT (%)	Kjeldahl	Destilación/ Alcalimetría	(Fernández <i>et al.</i> , 2006)
*Cu, Pb, Ni, Zn (mg kg ⁻¹)	Digestión: 0,05 a 0,2 g de muestra + 12 mL de HNO ₃ concentrado + 5 mL HClO ₄ (180°C/ 2h)	Espectroscopia de fluorescencia rayos X de reflexión total (TXRF)	(Towett <i>et al.</i> , 2013)
*HT (mg kg ⁻¹)	Gravimétrico: 2 g de muestra en 10 mL de cloroformo	Extracción con disolvente	(EPA, 2000)
* Textura	Bouyoucos Modificado	Granulometría	(Gilbert <i>et al.</i> , 2015)

* Parámetros fisicoquímicos aplicados específicamente al suelo. CE: conductividad eléctrica. COT: carbono orgánico total. NT: nitrógeno total. PT: fósforo total. HT: hidrocarburos totales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 3, se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica de los composts CC y CG aplicados como tratamiento al suelo contaminado. A tal efecto, los valores de humedad para CC y CG se encontraron en un rango óptimo, ya que un valor por arriba del 40% a 60% puede provocar condiciones de anaerobiosis, una degradación lenta de los contaminantes y la producción de malos olores; mientras que valores por debajo de este rango pueden inhibir la actividad microbiana (Volke y Velasco, 2003).

En cuanto a los valores de pH, estos se encontraron ligeramente por encima de lo indicado por la Norma Chilena Oficial (NCh), que establece la clasificación y los requisitos de calidad del compost producido a partir de residuos orgánicos y de otros materiales orgánicos generados por la actividad humana, tales como residuos agroindustriales, agrícolas, forestales, ganaderos, pesqueros, de mercados y ferias libres en que se comercializan productos vegetales. Al respecto, Bonilla y Mosquera (2007), expresan que, en el compostaje se consideran óptimos los valores de pH comprendidos entre 5 y 8. En relación a los valores de CE, los mismos se encontraron entre los límites permisibles según la norma chilena mencionada.

Cuadro 3. Valores promedios (\pm desviación estándar, $n=3$) obtenidos para los parámetros fisicoquímicos en muestras de residuos orgánicos empleadas en el estudio y el rango ideal según la Norma Técnica Colombiana (NTC) y Norma Chilena Oficial (NCh).

Parámetro	CC	CG	Rango ideal
Humedad (%)	54,08 \pm 0,850	51,82 \pm 0,868	40-60
pH	9,58 \pm 0,168	8,68 \pm 0,059	5,0 – 8,5
CE (mS cm ⁻¹)	2,18 \pm 0,049	2,44 \pm 0,210	< 3
COT (%)	31,96 \pm 4,997	21,88 \pm 2,148	\geq 15%
NT (%)	2,44 \pm 0,233	2,17 \pm 0,154	\geq 1 > 0,5
PT (%)	0,81 \pm 0,131	1,31 \pm 0,282	0,2 - 2
Relación C/ N	13,09	10,08	< 30:1

CE: conductividad eléctrica. COT: carbono orgánico total. NT: nitrógeno total. PT: fósforo total. CC: compost de estiércol de cerdo. CG: compost de estiércol de chivo y pollo.

Por otra parte, Vento (2000), expresa que uno de los aspectos más utilizados para dar criterio a la calidad del compost maduro, es el contenido de COT y NT donde los mismos deben estar de 8 a 50% y de 0,4 a 3,5 % respectivamente; al respecto estos fueron óptimos para CC y CG (Cuadro 3). Los composts CC y CG presentaron una relación C/N óptima, tal efecto se debió a que se utilizó un buen balance de materia orgánica marrón, que es la fuente primordial de C y materia orgánica verde, que es la fuente primordial de N (Soto y Meléndez, 2004). El PT se encontró dentro de lo establecido por Rodríguez (2009), y Vento (2000), plantea que el mismo debe estar dentro de los valores 0,1 a 1,6%. Las condiciones mencionadas para los composts garantizan condiciones adecuadas para iniciar el proceso de biorremediación.

En el Cuadro 4, se muestran los resultados de la caracterización físico-química del suelo contaminado y no contaminado. Al respecto, el parámetro de humedad es mayor en el suelo contaminado SC a diferencia del suelo no contaminado SNC, lo que indicó que a medida que la contaminación aumenta este parámetro se eleva, resultados similares a lo reportado por Alba *et al.*, (2010). En cuanto al pH del suelo SNC resultó ser mayor que el reportado para el SC. En la mayoría de los suelos, indicados como típicos de regiones semiáridas, los valores de este parámetro superan en todos los casos la neutralidad, variando de 7,8 a 8,70 (Acosta *et al.*, 2011). El pH es una propiedad que disminuye en los suelos afectados con hidrocarburos debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos (Unzueta, 2008).

Cuadro 4. Valores promedios (\pm desviación estándar, $n=3$) obtenidos para los parámetros evaluados en la caracterización del suelo (contaminado y no contaminado).

Parámetro	Suelo no contaminado (SNC)	Suelo contaminado (SC)
Humedad (%)	32,050 \pm 0,724	35,128 \pm 0,587
pH	7,65 \pm 0,026	6,37 \pm 0,462
CE (mS.cm ⁻¹)	0,145 \pm 0,021	0,626 \pm 0,021
COT (%)	0,410 \pm 0,229	28,735 \pm 0,783
NT (%)	0,082 \pm 0,022	0,084 \pm 0,022
PT (%)	0,182 \pm 0,113	0,077 \pm 0,030
HT (mg.kg ⁻¹)	4 383,251 \pm 446,589	36 225,18 \pm 3 853,743
Cobre (mg.kg ⁻¹)	20,500 \pm 0,755	26,767 \pm 3,992
Níquel (mg.kg ⁻¹)	8,345 \pm 0,000	19,000 \pm 0,000
Plomo (mg.kg ⁻¹)	< 1,372	67,267 \pm 0,551
Zinc (mg.kg ⁻¹)	225,00 \pm 0,000	651,20 \pm 0,000
Textura	Franco arenoso (81,97% de arena)	

CE: conductividad eléctrica. COT: carbono orgánico total. NT: nitrógeno total. PT: fósforo total. HT: hidrocarburos totales.

El SNC se utilizó únicamente como control respecto al SC, para comparar los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la caracterización.

Por otra parte, la CE en el SNC fue inferior al reportado para el SC, lo que se atribuye a que los hidrocarburos presentan contenido de sales en su composición (Cevallos y García, 2018); sin embargo, el suelo objeto de estudio fue considerado no salino por poseer CE entre 0 - 2 mS cm⁻¹ (Fernández *et al.*, 2006).

En cuanto a los resultados para COT, se obtuvo una diferencia importante, debido a que el contaminante es compuesto de carbono presentándose elevado en el SC, donde se asume la mayor cantidad del aceite residual automotriz. Los suelos afectados por el derrame de hidrocarburos producen el aumento del COT, ya que el 75% del carbono del petróleo es oxidable (Unzueta, 2008). En relación al NT se presentó un ligero incremento en el suelo SC respecto al suelo SNC. Normalmente el contenido de N varía de 0,05 a 2% en el suelo en sus diferentes formas. En cuanto al PT este se encontró en mayor proporción en el suelo SNC que en el suelo SC, el mismo es considerado alto por ser > 0,001% . (Fernández *et al.*, 2006).

Las concentraciones de Cu y Ni para el SNC y SC (Cuadro 4), se encontraron dentro de los valores establecidos (<100 mg.kg⁻¹ para Cu y <50 mg.kg⁻¹ para Ni) (Aguilar *et al.*, 1999). La concentración de Pb también estuvo dentro del límite permisible (150 mg.kg⁻¹) según las normas para el control de la recuperación materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos (Gaceta N° 5245, 1998).

Sin embargo, la concentración de Zn en el suelo SC, superó el valor permisible (<300 mg.kg⁻¹) establecido por Aguilar *et al.*, 1999 y el límite (300 mg.kg⁻¹); el SNC, se encontró dentro del rango de acuerdo a lo expuesto por Aguilar *et al.*, 1999 y en las Normas según Gaceta N° 5245, (1998).

En cuanto al contenido de HT en el SNC y SC se encontró dentro del rango permisible (10 000-100 000 mg.kg⁻¹) (Gaceta N° 5245, 1998). En este contexto, la contaminación por hidrocarburos tiene efectos negativos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo ya que impide o retarda el crecimiento de la vegetación sobre el área contaminada (Acosta *et al.*, 2011).

En el Cuadro 5, se muestran los resultados obtenidos en el proceso de biorremediación y, la remoción para HT a los 90 días de tratamiento. El parámetro de humedad es uno de los de mayor importancia

durante la biorremediación. La misma presentó una reducción significativa al final (90 días) con respecto del inicio (0 días) incluyendo el suelo control. Asimismo, las muestras fueron diferentes significativamente ($p < 0,05$) para los tiempos evaluados. Además, la humedad se mantuvo en un rango del 25% al 36% durante los 90 días del proceso, lo cual es inferior al recomendado (40% al 60%) para la humedad de campo en procesos de biorremediación que permite una alta biodegradabilidad de los hidrocarburos (Eweis, 1999).

Sin embargo, los resultados concuerdan con los señalados por Ortiz *et al.* (2005), quienes evaluaron la biorremediación en suelos contaminados con 10% de diferentes hidrocarburos, y la humedad fue controlada semanalmente a un 20%. Asimismo, Riojas *et al.* (2010), evaluaron un proceso biológico en suelos contaminados con diesel controlando la humedad en un rango del 30% a 70%.

La variación de pH en las muestras de SC mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos a los 0 días, excepto el suelo control y la dosis del 10% de CC. A los 90 días, solo el suelo control y la dosis del 15% de CG presentaron diferencias significativas. En cuanto a los tiempos de evaluación, todos los tratamientos fueron diferentes excepto el 10% de CC. En los suelos tratados con 15% de CC y CG, se observó una disminución del pH al final del proceso respecto del inicio, sin embargo, es considerado óptimo, debido a que se encuentra entre 6,0 y 7,5 garantizando un buen equilibrio de nutrientes disueltos y precipitados y, por ende, no limitará el crecimiento de las plantas (Corradini y Godoy, 2023). En contraste, para CC y CG al 10%, el pH se incrementó al inicio del proceso, debido a que la adición de materia orgánica de origen animal vuelve el suelo alcalino por la descomposición de residuos animales que genera productos ricos en nitrógeno (Pasaye, 2011).

Por otra parte, aunque el suelo control no recibió ningún tratamiento, pero se evaluaron sus propiedades químicas, presentó un comportamiento similar a los suelos tratados con CC y CG al 15%, disminuyendo su pH al final del proceso respecto al inicio (Cuadro 5). En este contexto, el pH obtenido tanto al inicio como al final del proceso de la biorremediación se mantuvo dentro del rango adecuado, ya que el recomendado para una buena degradación aeróbica de hidrocarburos en el suelo oscila entre 5 y 9, con un óptimo de 7 (Dragun y Barkach 2000).

La CE mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) a los 0 y 90 días de evaluación en todas las muestras tratadas. Entre tratamientos, las muestras de suelo con dosis del 10 y 15% de CC fueron diferentes significativamente a los 0 y 90 días, respectivamente. Este parámetro disminuyó al final del proceso respecto del inicio en las muestras tratadas, excepto en el SC con CG_{10%}, lo cual se atribuye a que el tratamiento aplicado ya contiene sales solubles productos de los materiales compostados, como los estiércoles.

Estos resultados (Cuadro 5) son menores a los presentados por Fernández *et al.* (2009), quienes evaluaron este parámetro por 30 días, en un suelo de textura franco arenoso, al cual aplicaron surfactantes, obteniendo un valor de conductividad de $7,59 \text{ mS.cm}^{-1}$, lo que indica una alta presencia de sales minerales. También, Araujo *et al.* (2006), evaluaron fisicoquímicamente un suelo franco arenoso, obteniendo un valor de $0,21 \text{ mS.cm}^{-1}$, cercano a los señalados en este estudio para el suelo con los tratamientos CC y CG al 15 y 10% respectivamente. De igual manera, Viñas (2005), caracterizó 2 suelos contaminados con hidrocarburos de diferentes procedencias, evaluando la CE y obtuvo valores de $0,16$ y $0,09 \text{ mS.cm}^{-1}$, respectivamente, siendo el primero igual al reportado para el suelo tratado con CC al 15% al final del proceso.

El COT redujo su concentración al final del proceso en comparación con el inicio en las muestras de suelo tratadas con CC y CG al 10 y 15%. Estas muestras presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) a los 0 y 90 días de evaluación. El suelo control mostró una tendencia similar, aunque en menor proporción. Entre tratamientos, las muestras de CG al 10 y 15% son diferentes significativamente al inicio y final del proceso.

Como era de esperarse, el contenido de materia orgánica fue más alto en todos los tratamientos

Cuadro 5. Resultados de los parámetros evaluados al inicio y final del proceso de biorremediación y, remoción (%) de HT a los 90 días.

Parámetro	Tratamiento	Inicio (0 Días)	Final (90 Días)
Humedad (%)	SC(Control)	35,910±0,276 a A	34,167±4,347 a B
	SC+CC _{10%}	36,144±0,356 a A	34,140±0,590 a B
	SC+CC _{15%}	36,425±0,385 a A	27,730±5,560 b B
	SC+CG _{10%}	35,089±0,734 a A	26,477±3,749 b B
	SC+CG _{15%}	35,600±1,058 a A	25,090±5,319 b B
pH	SC(Control)	7,950±0,067 a A	7,133±0,100 a B
	SC+CC _{10%}	7,820±0,062 a A	8,333±0,540 b A
	SC+CC _{15%}	8,037±0,875 b A	7,703±0,142 b B
	SC+CG _{10%}	7,513±0,015 c A	8,313±0,426 b B
	SC+CG _{15%}	9,803±0,126 d A	7,697±0,080 c B
Conductividad eléctrica (mS.cm ⁻¹)	SC(Control)	0,426±0,021 a A	0,316±0,102 a A
	SC+CC _{10%}	0,541±0,043 b A	0,343±0,136 a B
	SC+CC _{15%}	0,252±0,175 a A	0,160±0,017 b B
	SC+CG _{10%}	0,281±0,070 a A	0,437±0,081 a B
	SC+CG _{15%}	0,384±0,068 a A	0,377±0,116 a B
Carbono orgánico total (%)	SC(Control)	28,735±0,783 a A	24,432±0,480 a B
	SC+CC _{10%}	29,125±0,781 a A	20,830±5,108 b B
	SC+CC _{15%}	29,958±0,625 a A	19,363±4,887 b B
	SC+CG _{10%}	42,894±3,477 c A	20,203±1,733 b B
	SC+CG _{15%}	32,227±6,003 b A	21,570±0,964 b B
Nitrógeno total (%)	SC(Control)	0,084±0,022 a A	0,078±0,000 a B
	SC+CC _{10%}	0,087±0,023 a A	0,120±0,046 b B
	SC+CC _{15%}	0,114±0,031 a A	0,123±0,081 c B
	SC+CG _{10%}	0,211±0,046 b A	0,130±0,026 b B
	SC+CG _{15%}	0,106±0,046 c A	0,147±0,087 b A
Fósforo total (%)	SC(Control)	0,111±0,051 a A	0,128±0,022 a B
	SC+CC _{10%}	0,197±0,049 a A	0,313±0,002 b B
	SC+CC _{15%}	0,328±0,107 a A	0,359±0,056 c B
	SC+CG _{10%}	0,283±0,106 a A	0,446±0,003 d B
	SC+CG _{15%}	0,153±0,022 a A	0,421±0,021 c B
Hidrocarburos totales (mg.kg ⁻¹)	SC(Control)	36 225,18±3 853,743 a A	35 581,68±8 038,602 a B
	SC+CC _{10%}	35 235,53±2 349,035 b A	25 257,61±6 101,780 a B
	SC+CC _{15%}	34 604,80±6 811,053 c A	25 587,59±4 810,204 a A
	SC+CG _{10%}	35 946,66±8 894,490 d A	21 063,92±7 314,944 a A
	SC+CG _{15%}	33 643,89±27 266,180 e A	15 473,86±2 818,815 a B
Remoción de HT (%)	SC(Control)		0
	SC+CC _{10%}		28,32
	SC+CC _{15%}		26,06
	SC+CG _{10%}		41,40
	SC+CG _{15%}		54,01

SC: suelo contaminado. **CC:** compost de estiércol de cerdo. **CG:** compost de estiércol de chivo y pollo. Las letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Letras minúsculas distintas indican diferencias entre tratamientos (columnas); letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre los tiempos de evaluación (filas). Los valores son, la media \pm desviación estándar ($n = 3$).

al inicio del proceso (0 días) debido a la adición del compost y al tiempo de descomposición. Esto indica que el carbono presente en las muestras iniciales fue utilizado como fuente de energía durante la biorremediación, disminuyendo por la acción de los microorganismos del suelo, los cuales transforman y metabolizan aeróbicamente los hidrocarburos y otros compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono, agua y fuentes de alimento para sustentar su crecimiento y reproducción. En otras palabras, la biodegradación ocurre de manera natural (Torres y Zuluaga, 2009).

En relación con el NT, se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en los tiempos evaluados incluyendo el control, excepto el CG al 15%. Asimismo, las muestra CG al 10 y 15% difieren significativamente entre tratamientos al inicio del proceso; al final del mismo, solo el tratamiento CC al 15% y el suelo control mostraron diferencias significativas. La concentración de N en el suelo control y en el tratamiento CG al 10% disminuyó significativamente al final respecto del inicio del proceso. Esta pérdida se atribuye a que una cantidad significativa del N se perdió por lixiviación, debido a la frecuencia de riego en las muestras considerando que el suelo es de textura arenosa y de pobre estructura (Cassman *et al.*, 2002).

En cuanto al suelo tratado con CC en dosis del 10% y 15% así como para la muestra de suelo tratada con la dosis de CG al 15% el porcentaje NT se incrementó al final del proceso respecto del inicio, debido a la aplicación de los compost como tratamiento del suelo contaminado los cuales contienen residuos vegetales frescos, que según, Rodríguez (2008), las fuentes de nitrógeno lo constituyen los rastrojos verdes, leguminosos, estiércol y sangre, los cuales contribuyen significativamente a mejorar los niveles de nitrógeno en el suelo.

Al respecto, Gómez *et al.* (2009), aplicaron biorremediación a un suelo contaminado con mezcla de combustibles para evaluar la bioestimulación con nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio) frente a la atenuación natural (reducción de contaminantes con la microbiota nativa del suelo) y la bioaumentación (inoculación de microorganismos degradadores apropiados), reportando valores de 0,26; 0,24 y 0,38% de NT respectivamente, mientras que para el control obtuvieron un valor de 0,28 %.

Este comportamiento es similar al obtenido para las muestras de suelos tratadas, ya que se presentó más N en estas que en el suelo control. Montenegro (2007), evaluó NT en tres suelos contaminados mediante biorremediación aplicando cepas bacterianas por un periodo de 30 días, reportando un valor en el suelo testigo igual al encontrado para el suelo en esta investigación al inicio del proceso, mientras que el resto de los valores estuvieron en el rango de 0,31% - 0,33%, menores a los reportados en esta investigación.

Para el PT, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los tiempos evaluados, incluyendo el control. Además, entre los tratamientos al final del proceso, todos fueron significativamente diferentes, excepto el tratamiento con CC y CG al 15%. Todas las muestras tratadas incrementaron la concentración de este parámetro al final del proceso en comparación con el inicio, incluyendo el suelo control. Este incremento se atribuye a la mejora de la fertilidad del suelo, que se observó aumentada en todas las muestras, con y sin tratamiento. La retención de nutrientes se evidencia en el aumento del fósforo (Fernández *et al.*, 2006) debido a la adición de los composts CC y CG aplicados, que contienen estiércoles y son ricos en P. Además, el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son comúnmente encontrados en mayores cantidades en los abonos orgánicos (Salazar *et al.*, 2003).

En la Figura 1, se muestran los resultados de los HT al inicio y final del proceso de biorremediación. Las muestras presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos a los 0 días. En relación a los tiempos evaluados, el suelo control y los tratamientos CC al 10% y CG al 15% mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$). Se evidencia la reducción de los HT al final del proceso con respecto del inicio; los mismos disminuyeron desde 36 225,18 hasta 15 473, 86 mg.kg⁻¹ en los tratamientos y el

suelo control. Este comportamiento es similar a lo estudiado por Balderas y Sánchez (2015); quienes emplearon la bioestimulación con solución mineral a un suelo contaminado con aceite residual automotriz, iniciando con una concentración de $75\,000\text{ mg.kg}^{-1}$ y reportando una reducción hasta $35\,600\text{ mg.kg}^{-1}$ después de 30 días de tratamiento, de igual manera; Juárez y Sánchez (2014), aplicaron lombricompost en dosis del 3% y 6% a un suelo contaminado con $10\,000\text{ mg.kg}^{-1}$ de HT obteniendo una reducción hasta $8\,630\text{ mg.kg}^{-1}$ al final del experimento.

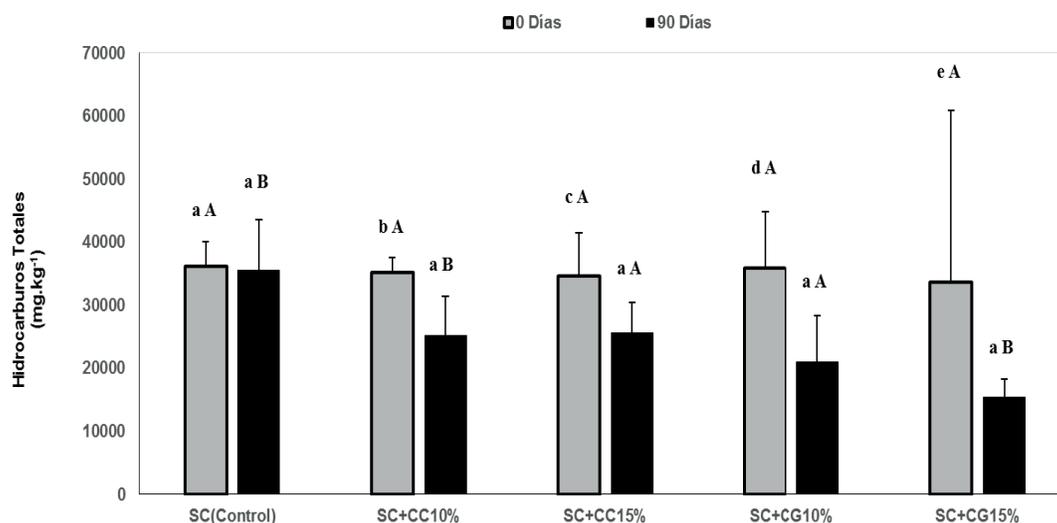


Figura 1. Variación en los valores promedios obtenidos para HT en muestras de suelo contaminado (SC) tratadas con CC y CG al inicio y final del proceso de biorremediación. Las letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Letras minúsculas distintas indican diferencias entre tratamientos; letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre los tiempos de evaluación. Las barras de error representan \pm la desviación estándar, para $n = 3$.

Al respecto, Rodríguez (2008), expresa, que la degradación del contaminante es gracias a la acción de la microbiota del suelo, principalmente a las bacterias y a la estimulación constante de su crecimiento mediante el control de las variables abióticas. Cabe destacar, que en esta investigación se controló la humedad como variable importante durante los 90 días de tratamiento.

El porcentaje de remoción (Cuadro 5) se obtuvo de la diferencia en la concentración final obtenida (90 días) e inicial (0 días), dividida entre la concentración final por cien (100). Aunque los compost CC y CG utilizados como tratamientos disminuyeron la concentración de HT al final del proceso con respecto a la inicial, el más efectivo para el saneamiento del suelo contaminado fue el compost CG, ya que con este se obtuvo la mayor remoción de HT con 54,01 y 41,40% a dosis del 15 y 10% respectivamente a diferencia del tratamiento CC, donde la remoción de HT fue de 28,32 y 26,06% a dosis del 10 y 15% respectivamente, quedando en el orden de $SC+CG_{15\%} > SC+CG_{10\%} > SC+CC_{10\%} > SC+CC_{15\%}$. Esto indica, que el suelo tratado con las dosis aplicadas de CG, mejoró su calidad debido a que se redujo la cantidad de HT respecto al tratamiento CC.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Pasaye (2011), quien utilizó la adición de compost de lombriz por 180 días a un suelo contaminado con aceite residual automotriz e indicó una remoción de HT de 56,14% cercana a la encontrada en esta investigación para el tratamiento CG al 15%.

También, Iturbe *et al.* (2002), aplicaron biorremediación con estiércol de caballo a suelos contaminados con hidrocarburos durante 154 días, reportando una concentración inicial de HT de 30 000 mg.kg⁻¹ cercanas a las encontradas en este estudio y una alta remoción de 80%. Asimismo, Cunningham y Philip (2000), evaluaron biorremediación mediante compost en suelos contaminados con diesel durante 45 días iniciando con 50 000 mg.kg⁻¹ de HT la cual es superior a la presentada en el suelo objeto de estudio, y obtuvieron un 88% de remoción.

De igual manera, Alba *et al.* (2010), evaluaron biorremediación a suelos contaminados con hidrocarburos aplicando bagazo y cachaza y al término de 15 días, obtuvieron una remoción de 44,4% para HT cercana a la del suelo tratado con CG al 10% en esta investigación, también Rodríguez (2008), aplicó dos compost con estiércol bovino a suelos contaminados con hidrocarburos por un periodo de 120 días y obtuvo porcentajes para la remoción de HT de 64 y 65% respectivamente.

CONCLUSIONES

Los composts, estiércol de cerdo (CC) y estiércol de chivo y pollo (CG) empleados en el proceso de biorremediación presentaron condiciones adecuadas para promover el mismo. Durante el proceso, la dosis del tratamiento más efectivo para la remoción más alta de HT fue del 15% del compost CG, compuesto por residuos vegetales, estiércol seco de chivo, estiércol seco de pollo y hojas secas. Se comprobó, que la aplicación de los compost CC y CG disminuyeron la concentración de los HT presentes en el suelo contaminado después de 90 días de aplicado el proceso.

Por otra parte, se encontró, que la humedad se mantuvo en un rango adecuado para el proceso y el COT disminuyó significativamente al final respecto del inicio debido a la descomposición de la materia orgánica presente en el suelo impactado.

Parámetros como pH, CE y el NT fueron variables durante el proceso, mientras que el P se incrementó significativamente en las muestras tratadas al final del experimento lo que indicó una mejora en algunas de las propiedades del suelo. A tal efecto, considerando el tipo de suelo empleado en el estudio, cuyo ecosistema es frágil por pertenecer a una zona árida, la biorremediación es una alternativa para la descontaminación del mismo y su posterior uso en la agricultura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, Y.; M. El Zauahre; N. Reyes; H. García; C. Morales; A. Revilla. 2011. Metales pesados en un suelo afectado con aceite proveniente de motores de combustión interna. *Multiciencias*. 11 (1); 26-34.
- Abdulsalam, S.; A. Omale. 2009. Comparison of Biostimulation and Bioaugmentation Techniques for the Remediation of Used Motor Oil Contaminated Soil. *Braz Arch Biol Techno*. 52: 747-754.
- Akindele, A.; N. Lotanna; A. Esther; S. Oluwatobi; A. Nabatunde. 2018. El uso combinado de lombrices de tierra (*Alma millsoni*) y bacterias (*Bacillus* sp.) mejoró la biorremediación del suelo contaminado con aceite de motor usado. *Chemistry and Ecology*, 34: 532-547. Disponible: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02757540.2018.1472247>
- Aguilar, J.; C. Dorronsoro; E. Galán; A. Gómez. 1999. Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Andalucía, la metodología y técnica de toma de muestras y análisis para su investigación. En "Investigación y Desarrollo Medioambiental en Andalucía". Universidad de Sevilla: OTRI. 257 p.

- Alanya, V.; O. Clemente; C. Castañeda; C. Ancassi; V. Ramos. 2023. Uso de estiércol y aserrín en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, Huancavelica, Perú. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1): 785-801. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4430
- Alba, G.; D. Castellanos; M. García; M. Cuevas; E. Bustos. 2010. Estudio comparativo de tres diferentes métodos de remediación de suelo contaminado con hidrocarburo. XXV Congreso de la sociedad mexicana de electroquímica. México. 1144-1150.
- Araujo, I.; M. Montilla; C. Cárdenas; L. Herrera; N. Angulo; G. Morillo. 2006. Lodos estabilizados y cepas bacterianas en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Venezuela. *Interciencia*. 31(004): 268-275.
- Balderas, I.; J. Sánchez. 2015. Biorremediación de suelo contaminado con 75000 ppm de aceite residual automotriz por bioestimulación y fitorremediación con *Sorghum vulgare* y *Bacillus cereus* y/ o *Burkholderia cepacia*. *Journal of the Selva Andina Research Society*. 6 (1): 23-32.
- Bonilla, M.; M. Mosquera. 2007. Seguimiento de la presencia de rotavirus a un proceso de compostaje realizado a partir de residuos orgánicos domiciliarios y contenido ruminal. Universidad Javeriana. Bogotá. Disponible en: <https://n9.cl/1dhpm>. 124 p.
- Caravaca, F.; A. Roldan. 2003. Effect of Eisenia Foetida earthworms on minerlization Kinetics, microbial biomasa, enzyme activities, respiration and labile C fractions of three soils treated with a composted organic residue. *Biol. Fertil. Soils*.38: 45-51.
- Cassman, K.; A. Dobermann; D. Walter. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31: 132-140.
- Cevallos, T.; J. García. 2018. Evaluación de la biodegradación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando *Aspergillus niger*, *Pleurotus ostreatus* y *Pseudomonas aeruginosa*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Ecuador. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15681/1/UPS-QT12819.pdf>. 124 p.
- Corradini, S.; P. Godoy. 2023. Rangos de pH esperados en la Región Metropolitana y su relación con el uso de fertilizantes. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Disponible en: [Rangos de pH esperados en la Región Metropolitana Correccion 4](#). 3 p.
- Cui, H.; Y. Ou; L. Wang; B. Yan; Y. Li; M. Bao. 2021. Additive grain-size: An innovative perspective to investigate the transformation among heavy metal and phosphorus fractions during aerobic composting. *Journal of Environmental Management*, 292 (May), 112768.
- Cunningham, C.; J. Philip. 2000. Comparison of bioaugmentation and biostimulation in ex situ treatment of diesel contaminated soil. *Land Contamination and Reclamation*, 8(4): 261-269.
- Domínguez, J.; A. Román, F. Prieto, O. Acevedo. 2012. Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1): 141-155. Disponible en: [Redalyc.Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos](#)
- Dragun, J.; J. Barkach. 2000. Fate of Petroleum in Soil systems. En: Assessment and remediation of oil contaminated soils. Arab School on Science and Technology. State of Kuwait. 18-22 March 1995. Amherst, MA: Amherst Scientific Publications.

- EPA. 2000. Environmental Protection Agency (EPA). Introduction to Phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory, Ohio, Estados Unidos. (EPA-600-R-99-107). 112 p.
- Eweis, J. 1999. Principios biorrecuperación, tratamientos para la descontaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y físico – Químicos. España: McGraw-Hill. 327 p.
- Fernández, C.; M. Llobregat; H. Bastidas; B. Sien. 2009. Influencia de la *Eisenia foetida* y de sustratos orgánicos como agentes bioestimulantes en la biodegradación de un suelo contaminado con petróleo pesado. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela. Información Tecnológica. 20(5): 19-30.
- Fernández, L.; N. Rojas; T. Roldán; M. Ramírez; H. Zegarra; R. Uribe; R. Reyes; D. Flores; J. Arce. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. México. Disponible en: <https://studylib.es/doc/5490810/manual-de-t%C3%A9cnicas-de-an%C3%A1lisis-de-suelos-aplicadas-a-la-r>. 184 p.
- Flores, A. 2010. Degradación de hidrocarburos en suelos contaminados mediante el proceso de electroquímica. Disponible en: <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/./51.pdf>.
- Gaceta Oficial República de Venezuela. 1998. Normas para el control de la recuperación materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos, (Gaceta oficial extraordinaria No 5245). Caracas. 80 p.
- Gilabert, J.; I. Arrieche; M. León; I. López. 2015. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia. Maracay, Venezuela, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. p. 215.
- Gómez, W.; J. Gaviria; S. Cardona. 2009. Evaluación de la bioestimulación frente a la atenuación natural y la bioaumentación con una mezcla de gasolina-diesel. Dyna. 76 (160): 83-93.
- Iturbe, R.; C. Flores; C. Chávez; A. Roldán. 2002. Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas. Ingeniería, Investigación y Tecnología III, 1: 25-35.
- Juárez, G.; J. Sánchez. 2014. Biorrestauración de suelo contaminado con aceite residual automotriz por bioestimulación con lombricomposta y fitorremediación con *Sorghum vulgare* inoculado con *Bacillus cereus* y *Rhizobium etli*. Selva Andina Biosphere, 2(1): 15-22.
- Margesin, R.; M. Hämmerle; D. Tschërko. 2007. Microbial Activity and Community Composition during Bioremediation of Diesel-Oil-Contaminated Soil: Effects of Hydrocarbon Concentration, Fertilizers, and Incubation Time. Microbial Ecology. 53(2): 259–269. Disponible en: <https://10.1007/s00248-006-9136-7>.
- Mogollón, P.; W. Rivas; B. Muñoz; A. Martínez; E. Márquez; L. Arrieta; L. Lemus; M. Colmenares. Y. Campos; S. Hernández. 2015. Calidad del suelo como indicador de desertificación en la Península de Paraguaná, estado Falcón, Venezuela. Croizatia. 16: 7-24. Disponible en: <http://croizatia.fundacite-falcon.gob.ve/images/volumenes/volumen16n1y2/art1vol16n1y2.pdf>.
- Mogollón, P., W. Rivas; J. Rivas; A. Martínez. 2017. Procesos de degradación de suelos asociados a la desertificación en la península de Paraguaná, Venezuela. Ágora de heterodoxias, 3(2): 94-110.
- Montenegro, F. 2007. Aislamiento y selección de cepas bacterianas nativas de suelos de la XII región de Chile, para la degradación de crudos de petróleo. Trabajo especial de Grado. Universidad Austral de Chile. 108 p.

- Moreno, B. 2009. Estrategias de recuperación de suelos contaminados por tricloroetileno basadas en el uso de vermicompost de alperujo y especies vegetales con potencial fitorremediador. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. (E.d. Granada, Editor).
- Norma Chilena Oficial (NCh). 2004. Producción de compost. 2880. 102 p. Disponible en: <http://digibug.ugr.es/flexpaper/hane/10481/2224/17950065.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Chile.
- Norma Técnica Colombiana (NTC). 2004. Materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos. 5167. Bogotá. 43 p. Disponible en: <http://library.co/document/yn9xo4jc-ntc-5167-2004.html>.
- Ortiz, E.; R. Núñez; A. Fonseca; J. Oramas; V. Almazán; Y. Cabranes; A. Miranda; O. Barban; C. Martínez; Y. Díaz; G. Borges. 2005. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Revista Contribución a la Educación y la Protección del Medio Ambiente. 6: 51-60.
- Pasaye, L. 2011. Biorremediación de un Suelo Agrícola Impactado con Aceite Residual Automotriz. Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. Disponible en: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/4666/FIQ-M-2011-0043.pdf?sequence=1.
- Riojas, H.; P. Gortáres; I. Mondaca; J. Balderas; L. Torres. 2010. Evaluación de la biorremediación aplicando mezclas de surfactante-solvente en suelo contaminado con diesel. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 6(2): 100-109.
- Rodríguez, J. 2009. Manual de Compostaje Experiencias realizadas años 2004 – 2008. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, España. 45 p.
- Rodríguez, L. 2008. Evaluación de dos sustratos en la técnica de *landfarming* para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 158 p.
- Rosales, L. 2008. Biorremediación de suelos contaminados con aceite usado de automóvil con el hongo de la pudrición blanca *Pleurotus ostreatus* (SETAS) en Durango. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango: Disponible en: <http://www.itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/3622/1/BiorremediacionSuelos.pdf>.
- Ruiz, A. 2019. Efecto del biocarbón en la inmovilización de hidrocarburos en suelos contaminados. 1–126. Disponible en: <https://n9.cl/xp9j9v>.
- Ruiz, A. 2023. Recuperación de suelos degradados mediante el uso de residuos orgánicos de origen urbano. Trabajo Especial del Grado. Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”. Perú. 72 p.
- Santos, K. 2020. Evaluación de bacterias degradadoras de hidrocarburos aisladas a partir de un contenedor de aceite usado de motor. Trabajo de Grado. Universidad Técnica del Norte Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientale. Carrera de Ingeniería en Biotecnología, Ibarra Ecuador. 67.
- Salazar, E.; M. Fortis; A. Vázquez; C. Vázquez. 2003. Abonos orgánicos y plasticultura. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, 233. ISBN: 968-6404-63-5.

- Soto, G.; G. Meléndez. 2004. Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología. Costa Rica, 72: 91-97.
- StatSoft, Inc. STATISTICA (Sistema de software de análisis de datos). 2011. Versión 10. Disponible en: www.statsoft.com.
- Torres, K.; T. Zuluaga. 2009. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 45 p.
- Towett, E.; K. Pastor; G. Cadisch. 2013. Cuantificación de las concentraciones totales de elementos en suelos mediante espectroscopia de fluorescencia total de rayos X (TXRF). Ciencia del Medio Ambiente Total. 463-464. 374-388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.068>.
- Unzueta, J. 2008. Tratamiento de suelo contaminado con HTP's en un sistema de electro biorremediación con recirculación. Maestría. Instituto Tecnológico de Durango. Disponible en: <http://tecno.cruzferro.com/cursos/2008a/miq-seminario/unzueta-protocolo.pdf>.
- Vasudevan, N.; P. Rajaram. 2001. Bioremediation of soil sludge-contaminated soil. Environment International 26: 409-411.
- Vento, M. 2000. Estudio sobre la preparación del compost estático y su calidad. Maestría. Universidad Camagüey, Instituto de Suelos, Cuba. 55 p.
- Ventorino, V.; A. Pascale; M. Fagnano; P. Adamo; V. Faraco; C. Rocco; N. Florentino; O. Pepe. 2019. Soil tillage and compost amendment promote bioremediation and biofertility of polluted area. Journal of Cleaner Production, 239(426): 118087. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118087>
- Viñas, M. 2005. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica. Tesis doctoral. Barcelona, España. 100 p.
- Volke, T.; J. Velasco. 2003. Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo. Centro Nacional de Investigación Ambiental INE-SEMARNAT. México. 34 pp.