



Evaluación del peróxido de hidrógeno en la disminución de PCBS en suelos del taller de transformadores de CNEL, Manabí, Manta

Evaluation of hydrogen peroxide in the reduction of PCBS in soils of the CNEL transformer workshop, Manabí, Manta

Avaliação do peróxido de hidrogênio na redução de PCBS em solos da oficina de transformadores CNEL, Manabí, Manta

Israel Tello Sasahuay ^I

jrsteven_92@hotmail.es

<https://orcid.org/0000-0002-5190-5366>

Jonathan Chicaiza Intriago ^{II}

jonathan.chicaiza@espam.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0402-6596>

Gabriel Navarrete Schettini ^{III}

gnavarrete@espam.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2173-0160>

Correspondencia: jrsteven_92@hotmail.es

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 30 de octubre de 2023 * **Aceptado:** 25 de noviembre de 2023 * **Publicado:** 14 de diciembre de 2023

- I. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Manabí, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Manabí, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Manabí, Ecuador.

Resumen

El presente trabajo tuvo como finalidad evaluar la concentración de Peróxido de Hidrógeno en suelos contaminados con PCBs del taller de transformadores de CNEL EP en la ciudad de Manta. Inicialmente para determinar la situación actual se analizó las características físicas y químicas del suelo obteniendo una resistencia de 1,49 N, porosidad 4,66%, pH 7,93, densidad real 0,95 g/cm³, densidad aparente 0,91 g/cm³ y PCBs 0,12 mg/kg. Bajo un diseño completamente al azar se aplicó tres tratamientos con 4 repeticiones por cada uno; T1=20% H₂O₂, T2= 30% H₂O₂ y T3= 40% H₂O₂ utilizando 100 ml de oxidante por 4 días y como catalizador se utilizó 10 g el sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄7H₂O). Los resultados estadísticos cumplieron con las pruebas de normalidad y homocedasticidad de varianza, demostrando por medio de la prueba de Tukey al 5% de error que no existió una diferencia significativa entre los parámetros, sin embargo, en el T3 presentó diferencia estadísticamente significativa (sig=0,000) en la variable PCBs ubicándose el T3 en el primer subconjunto con una media de 0,24289 mg/kg, con un 51% de reducción del contaminante PCBs cumpliendo con la tabla 2 del anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097-A de la Normativa Ambiental del Ecuador.

Palabras Clave: Oxidación química; Bifenilos policlorados; Remediación; Peróxido de hidrogeno; Normativa ambiental.

Abstract

The purpose of this work was to evaluate the concentration of Hydrogen Peroxide in soils contaminated with PCBs from the CNEL EP transformer workshop in the city of Manta. Initially, to determine the current situation, the physical and chemical characteristics of the soil were analyzed, obtaining a resistance of 1.49 N, porosity 4.66%, pH 7.93, real density 0.95 g/cm³, apparent density 0.91 g/cm³ and PCBs 0.12 mg/kg. Under a completely randomized design, three treatments were applied with 4 repetitions for each one; T1=20% H₂O₂, T2= 30% H₂O₂ and T3= 40% H₂O₂ using 100 ml of oxidant for 4 days and 10 g of ferrous sulfate heptahydrate (FeSO₄7H₂O) was used as a catalyst. The statistical results complied with the tests of normality and homoscedasticity of variance, demonstrating through the Tukey test at 5% error that there was no significant difference between the parameters, however, in T3 there was a statistically significant difference (sig= 0.000) in the PCBs variable, placing T3 in the first subset with an

average of 0.24289 mg/kg, with a 51% reduction of the PCBs contaminant, complying with table 2 of annex 2 of the Ministerial Agreement 097-A of the Regulations Environmental of Ecuador.

Keywords: Chemical oxidation; PCBs; Remediation; Hydrogen peroxide; Environmental regulations.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a concentração de Peróxido de Hidrogênio em solos contaminados com PCBs da oficina de transformadores CNEL EP da cidade de Manta. Inicialmente, para determinar a situação atual, foram analisadas as características físicas e químicas do solo, obtendo-se resistência de 1,49 N, porosidade 4,66%, pH 7,93, densidade real 0,95 g/cm³, densidade aparente 0,91 g/cm³ e PCBs 0,12 mg. /kg. Em delineamento inteiramente casualizado, foram aplicados três tratamentos com 4 repetições cada; T1=20% H₂O₂, T2= 30% H₂O₂ e T3= 40% H₂O₂ utilizando 100 ml de oxidante por 4 dias e 10 g de sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄·7H₂O) foi utilizado como catalisador. Os resultados estatísticos obedeceram aos testes de normalidade e homocedasticidade de variância, demonstrando através do teste de Tukey ao erro de 5% que não houve diferença significativa entre os parâmetros, porém, em T3 houve diferença estatisticamente significativa (sig= 0,000) no Variável PCBs, colocando T3 no primeiro subconjunto com média de 0,24289 mg/kg, com redução de 51% do contaminante PCBs, atendendo tabela 2 do anexo 2 do Acordo Ministerial 097-A do Regulamento Ambiental do Equador.

Palavras-chave: Oxidação química; PCB; Remediação; Peróxido de hidrogênio; Regulamentos ambientais.

Introducción

La industria eléctrica se encuentra en continuo desarrollo por el crecimiento de la población y por la demanda de energía eléctrica, lo que ha generado optar por productos químicos que mejoren el rendimiento de los equipos eléctricos. Beltrán (2013) considera que la utilización de hidrocarburos clorados como los Bifenilos Policlorados (PCBs) son útiles como aislante de aceites dieléctricos por su aislamiento térmico aumentando la vida útil de los equipos, esto debido a su resistencia a la oxidación y a la rigidez dieléctrica. Por otro lado, los PCBs son una familia de sustancias químicas orgánicas cloradas de alta toxicidad y persistentes en el medio ambiente, fueron utilizados ampliamente en el mundo desde 1929 hasta 1978 en equipos eléctricos como transformadores,

condensadores, sistemas hidráulicos, así como también en la fabricación de pinturas, plásticos e insecticidas que han ocasionado contaminación al suelo, al aire y a la salud de las personas (Arbeli, 2009).

El Ministerio de Ambiente del Ecuador (MAE, 2015) menciona que se generaron a nivel mundial cerca de 1.324 millones de toneladas de PCBs desde 1930 hasta 1993, considerándose que la mayor productora fue la empresa Monsanto de Estados Unidos con casi un 50% de la producción total. En este sentido, los PCBs se consideraron excelentes por sus propiedades dieléctricas y de resistencia por ello las empresas eléctricas lo utilizan como aditivo en el aceite dieléctrico de los transformadores.

Por muchos años las empresas del sector eléctrico ecuatoriano han reportado derrames y fugas accidentales de PCBs en el suelo, estos se mantienen inmóviles en los suelos donde el carbono orgánico actúa como sumidero natural de las sustancias lipofílicas no polares (Tusso y Valero, 2018). En investigación realizada por Morales (2017) en la empresa eléctrica CNEL Los Ríos determinó que de 121 pruebas de campo en transformadores de distribución el 10% de las mismas se encontraron contaminadas con PCBs que con relación al año de fabricación van desde 1996 hasta el año 2007 por lo que se puede evidenciar que existen transformadores contaminados y muchos de ellos se encuentran en operación.

Dentro del informe de gestión de CNEL Manabí (2020) menciona que de 600 muestras realizadas 197 resultaron contaminadas con PCBs y que durante los análisis de suelos realizados en la bodega y taller de transformadores se evidencia su presencia por encima de la normativa ambiental.

La presente investigación busca reducir la contaminación de los suelos producido por la presencia de PCBs, debido a que son considerados como desechos peligrosos y de gran importancia, reconocidos en el listado de sustancias tóxicas prohibidas del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes cual objetivo es proteger la salud y el medio ambiente, obligando a los países que forman parte del tratado, tomar medidas para eliminar y reducir la emisión de los Compuesto Orgánicos Persistentes, por tal razón la investigación se sustenta en lo siguiente.

Desde el punto de vista teórico la presente investigación planteará una propuesta de tratamiento por oxidación química mediante una reacción tipo Fenton, ingresando un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y un catalizador (hierro) al suelo (Huling y Pivetz, 2006), para transformar los agentes contaminantes en productos menos tóxicos y reducir la concentración de

Bifenilos policlorados en el suelo disminuyendo la contaminación significativamente beneficiando a la calidad de las poblaciones y bienes ambientales que están relacionados con la problemática que se investiga.

Metodología

El presente trabajo se realizó en el del taller de transformadores de la Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP ubicado en la ciudad de Manta de la provincia de Manabí y tuvo una duración de 9 meses.



Figura 1. Ubicación del proyecto de investigación, taller de transformadores

El factor en estudio en la investigación fue la concentración de peróxido de hidrógeno, siendo sus niveles los siguientes:

- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 20%
- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30%
- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 40%

Las concentraciones de peróxido de hidrógeno fueron seleccionadas en relación al análisis de la información bibliográfica proporcionada por la investigación de Méndez et ál. (2010) y Villacreces (2012). Se utilizó para cada tratamiento 10 ml de Sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) como valor constante en la reacción, esto basado en estudios anteriores de Malíková et ál. (2009). Con un tiempo de reacción de cada ensayo de 4 días donde se evaluó la concentración final de PCBs luego del tratamiento (Páez, 2019).

Tabla 1. Dispersión de cada unidad experimental.

Tratamiento	Repeticiones	Agente Oxidante	% p/p	Volumen Agente Oxidante	Catalizador	Volumen en Cat.	Peso de la muestra
T ₁	4	Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	20	100 ml	FeSO ₄ .7H ₂ O	10 g	0,5 kg
T ₂	4	Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	30	100 ml	FeSO ₄ .7H ₂ O	10 g	0,5 kg
T ₃	4	Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	40	100 ml	FeSO ₄ .7H ₂ O	10 g	0,5 kg

Fuente: Elaboración propia.

Diseño experimental

El desarrollo de la investigación se realizó en un ambiente controlado con homogeneidad de la muestra de suelo, se realizó un diseño completamente al azar (DCA) donde cada unidad experimental tiene igual probabilidad de asignación en los tratamientos (Gutiérrez y De la Vara, 2008), con tres tratamientos y cuatro repeticiones, obteniendo un total de 12 unidades experimentales, eligiendo la prueba múltiple de media de Tukey con el 5% de error. Se verificó el cumplimiento de los supuestos, antes de aplicar el análisis de varianza (ANOVA) siendo estos: la normalidad y la homogeneidad de varianza (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

Se recolectó 6 kg de muestra de suelo contaminado con PCBs como peso total la cual fue homogenizada y dividida para cada tratamiento es decir 0,5 kg por cada una. Las unidades experimentales estuvieron constituidas por una cama de vidrio tipo reactor (Páez, 2019) que pueda resistir al calor que se produzca por la reacción química, cada cama estuvo constituida por

las siguientes dimensiones de 0,12 m de largo, 0,12 m de ancho y 0,08 m de alto, obteniendo un total de 12 unidades experimentales.

Manejo del experimento

Fase I. Determinación de las propiedades físico químicas del suelo en el taller de transformadores de CNEL Manabí

La recolección de la muestra de suelo se realizó en el taller de transformadores de CNEL Manabí, siguiendo la Guía para el Muestreo de Suelo del Ministerio del Ambiente de Perú (2014) en la cual se tomó una muestra compuesta formada por 5 submuestras, a una profundidad de 25 cm (Estrada et ál., 2017) y en recorridos en forma de zig-zag en el terreno (Mendoza y Espinoza, 2017). Obtenido una muestra homogenizada. Se analizó la muestra de suelo extraída para verificar el estado y tipo de suelo y se utilizó como referencia la Guía de interpretación de análisis de suelos de Garrido (1993) y la tabla 1 del Anexo 2 del libro VI del TULSMA, en base a los parámetros descritos en tabla 2.

Tabla 2. Parámetros a medir en la fase uno.

Parámetro	Unidad	Método
Resistencia	N	Texturómetro
Porosidad	%	Método por diferencia porcentual
pH	U. de pH	Potenciométrico, relación suelo-agua
Materia orgánica	%	Método ignición
Densidad real	g/cm ³	Método picnómetro
Densidad aparente	g/cm ³	Método de cilindro

PCBs mg/kg Method: 8082^a
totales

Fase II. Identificación de la concentración de peróxido de hidrógeno que disminuya el contenido de PCBS en suelos del taller de transformadores de CNEL Manabí.

Para esta actividad se obtuvo 12 envases de vidrio resistentes al calor que cumplieron la función de camas, en cada cama se agregaron 0,5 kg de suelos contaminando que previamente fueron homogeneizados en la fase I, con un total de 6 kg dividido en las 12 unidades experimentales. Se realizó el tratamiento químico que se basa en una técnica de oxidación tipo Fenton. Se aplicaron 3 tratamientos utilizando 100 ml de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) a diferentes concentraciones 20%, 30% y 40%. y un catalizador con valor constante en la reacción de 10 g de Sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄.7H₂O) en 0,5 kg de masa de suelo contaminado (Huling y Pivetz, 2006). Se dejó reaccionar a cada ensayo por un tiempo de 4 días para evaluar la concentración final de PCBs luego de cada tratamiento (Páez, 2019).

Se realizó la aplicación del ANOVA y la prueba de Tukey al 5 % de error de los parámetros: resistencia, porosidad, pH, materia orgánica, densidad real, densidad aparente y PCBs, adicionalmente se utilizó como referencia la concentración inicial del suelo para obtener el porcentaje de remoción de PCBs, para el cálculo se utilizará la Ecuación 2. porcentaje de remoción del contaminante (Paz, 2019; Wensheng, 2003). Y ver su cumplimiento de acuerdo a la normativa Ministerial 097-A.

$$\% \text{ de remoción} = 1 - \frac{\text{Pcb's Final}}{\text{Pcb's inicial}} * 100 \quad (1)$$

Resultados y discusión

Determinación de las propiedades físico químicas del suelo en el taller de transformadores de CNEL Manabí

A continuación, se presenta los resultados de las propiedades físico químicas del suelo del taller de transformadores de CNEL Manabí y su cumplimiento con referencia a la tabla 2 del anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097-A de Normativa Ambiental del Ecuador.

Tabla 3 Caracterización físico químico del suelo del taller de transformadores.

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	LÍMITE MÁXIMO	CUMPLIMIENTO A.M 097 A
Resistencia	N	1,49	-	CUMPLE
Porosidad	%	4,66	-	CUMPLE
pH	U.	7,93	6 a 8	CUMPLE
Materia orgánica	%	14,94	-	CUMPLE
Densidad real	g/cm ³	0,95	-	CUMPLE
Densidad aparente	g/cm ³	0,91	-	CUMPLE
PCB	mg/kg	0,12	0.1	NO CUMPLE
Aceites y grasas	mg/kg	20104	4000	NO CUMPLE
Mercurio	mg/kg	0,1	0,1	CUMPLE
Hidrocarburos totales	mg/kg	20,20	0,1	NO CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

Es importante indicar que el uso de suelo que ocupa el taller de transformadores es de uso industrial en el cantón Manta. Los parámetros y valores de Resistencia 1,49 N, porosidad 4,66%, Materia orgánica 14,94%, densidad real 0.95 g/cm³, densidad aparente 0,91 g/cm³ no se encuentran contemplados en la normativa, mientras que el pH 7,93 se encuentra dentro del rango. Por otra parte, el PCBs objeto de estudio se encuentra en 0,12 mg/kg por fuera de los límites permisibles en base al Acuerdo Ministerial 097-A del Ministerio del Ambiente del Ecuador.

En estudios similares por Pacheco (2020) reportó valores de pH de 8.03 determinado que se encuentra un suelo alcalino con una densidad real y aparente de 2.39 g/cm³ y 1.4 g/cm³ respectivamente, mientras que la porosidad se encuentra en 1.4% y la materia orgánica con un 5.87%, sin embargo, recomienda que para la aplicación de reacciones fentón se utilicen suelos con pH neutro, por otra parte investigaciones de Simbaña (2016) menciona que la influencia de hidrocarburos en el suelo no tienen mucha incidencia en el pH y densidad aparente, donde demuestra valores de pH de 7,42 y una materia orgánica de 2.70%.

Cabe mencionar que la materia orgánica obtenida es alta en el suelo contaminado y es un componente importante debido a que absorbe los oxidantes y surfactantes Pacheco (2020).

Como parámetros adicionales se analizó aceite y grasas 20104 mg/kg, Hidrocarburos totales 20,20 mg/kg que se encuentra fuera del límite permisible en base al Acuerdo Ministerial 097-A de la Normativa Ambiental del Ecuador, mientras que el mercurio 0,1 mg/kg se encuentra al límite del rango.

Identificación de la concentración de peróxido de hidrógeno que disminuya el contenido de PCBS en suelos del taller de transformadores de CNEL Manabí.

A continuación, se presenta el análisis estadístico de la concentración de peróxido de hidrogeno en relación con la disminución del contenido de PCBs en suelo como factor de estudio, declaradas en la metodología. Para verificar la distribución de los datos se realizó el análisis estadístico de normalidad y homogeneidad de varianza necesario para el análisis de ANOVA.

Es importante destacar que, para el cumplimiento de las pruebas de normalidad y homocedasticidad, se aplicó una transformación de datos por medio de raíz cuadrada a la variable de PCBs. Los datos de las variables dependientes: densidad real, densidad aparente, porosidad, resistencia, pH, Materia orgánica y PCBs demuestran una significancia mayor a 0,05 por lo que se pude determinar que existe una distribución normal de los datos, por lo que se procede a realizar el análisis de homogeneidad de varianza.

Tabla 4. Prueba de homogeneidad de varianza.

Variable dependiente	Estadístico			Sig.
	de Levene	gl1	gl2	
DENSIDAD				
REAL	0,363	2	9	0,705
DENSIDAD				
APARENTE	0,139	2	9	0,872
POROSIDAD	0,701	2	9	0,521
RESISTENCIA	0,396	2	9	0,684
pH	3,067	2	9	0,960
MATERIA				
ORGANICA	0,911	2	9	0,436
PCBs	4,237	2	9	0,051

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 4 haciendo uso del test de Levene y basándose en la media de las variables dependientes los resultados son iguales presentando una homogeneidad de varianza con valores de significancia ($p > 0,05$) aceptando la hipótesis nula para los supuestos de homocedasticidad, por lo que se procede a realizar el análisis de varianza con pruebas paramétricas.

Densidad real

En referencia con la densidad real al aplicar el ANOVA, se determina que no existe diferencia significativa con un valor mayor a 0,05 ($\text{sig} = 0,597$). Al aplicar la prueba múltiple de Tukey los tratamientos son semejantes. En la figura 2, se puede observar que los tratamientos T₁, T₂ y T₃ se encuentra con un valor similar de acuerdo al promedio de la densidad real con 0,98, 0,97 y 1,00 g/cm³ respectivamente.

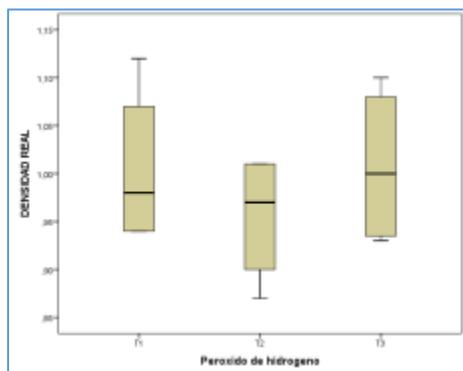


Figura 2 Gráfico de cajas densidad real.

En base a los resultados se considera que el suelo es de tipo orgánico ya que se encuentra por debajo de 2,4 g/cm³ (Duckman y Brady, 1993); (Ansorena,1994). Pacheco (2020) encontró valores similares en suelo contaminados de hidrocarburos con 2,39 g/cm³ y Simbaña (2016) menciona que los hidrocarburos afectan varias propiedades del suelo sin embargo dentro de sus estudios la densidad no mostro variación. Villaseñor (2016) menciona que el valor de la densidad real puede ser mayor al promedio por la presencia de metales pesados y la contaminación, y que el valor de la densidad real varían dependiendo de su composición mineralógica.

Densidad aparente

El ANOVA aplicado a la densidad aparente, señala que no existe diferencia significativa con un valor mayor a 0,05 ($\text{sig} = 0,538$) Al aplicar la prueba múltiple de Tukey los tratamientos son semejantes y se forman en un mismo subgrupo. En el gráfico 4-2 se puede observar que los tratamientos T_3 ($0,94 \text{ g/cm}^3$) tiene una mayor densidad aparente basado en la media, seguida del tratamiento 1 ($0,92 \text{ g/cm}^3$) y el tratamiento 2 ($0,89 \text{ g/cm}^3$) sin embargo no es una diferencia significativa.

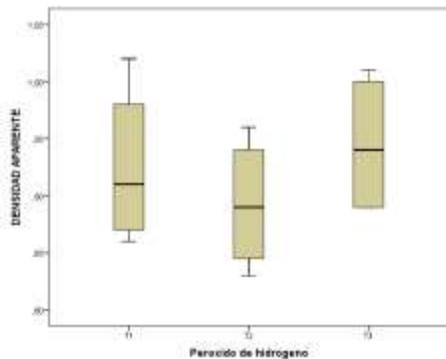


Figura 3 Gráfico de cajas densidad aparente.

Se considera un parámetro importante y de gran utilidad para el transporte de materiales y sustancias ya que incorpora el peso del suelo incluyendo el agua y aire dependiendo de la cantidad de agua y humedad (Van Deuren et al, 1997). En base al promedio de la densidad aparente puede considerar un suelo orgánico que se encuentra entre de 0.8 a 0.9 g/cm^3 esto guarda relación con el porcentaje de materia orgánica encontrada (Shoji et al. 1993).

Porosidad

El ANOVA aplicado para este parámetro determinó que no existe diferencia significativa con valores superiores a 0,05 ($\text{sig} = 0,360$). Así mismo al realizar la comparación múltiple se demostró que este parámetro es similar en los tres tratamientos agrupándose en un mismo conjunto. Para establecer la incidencia de niveles en esta variable, se aplicó un gráfico de cajas basado en la media de los niveles donde se determinó que el tratamiento T_3 al 40% de H_2O_2 tiene una menor porosidad con 5,8%, mientras que el tratamiento T_1 al 20% de H_2O_2 tiene una mayor porosidad con un 7,7%, y el tratamiento 2 al 30% de H_2O_2 presento una porosidad de 6,5%, tal como se muestra en la figura 4.

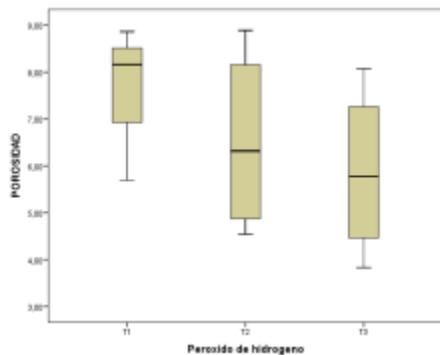


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.. Gráfico de cajas Porosidad.

La porosidad se define como el espacio entre los poros, en suelos de textura fina el porcentaje de poros es mucho más alto y esto favorece la retención de humedad. Es importante indicar que a medida que la densidad aparente aumenta disminuye la porosidad influyendo en la aireación de suelo esto guarda relación con los restos obtenidos (INTAGRI, 2017). Martínez y López (2001) menciona que la porosidad no varía significativamente cuando está contaminado con gasolina o diésel, sin embargo, con combustóleo puede llegar a reducirse considerablemente de 44.39% hasta el 7.14%.

Resistencia

Se aplicó el ANOVA para el parámetro resistencia, donde se indica que no existe una diferencia significativa con un valor mayor a 0,05 (sig = 0,324), es decir que la interacción entre factores no demostramos diferencias. Por lo que se puede concluir que el efecto de los tratamientos no surge efecto en la resistencia. Haciendo uso de la prueba de Tukey se determina que los tratamientos se ubican en un mismo subconjunto. Por medio de un gráfico de cajas de cajas (figura 5) se representa los datos de la resistencia de los tres tratamientos en estudio en el que se determina que el tratamiento T₃ al 40% de H₂O₂ posee mayor resistencia con un valor medio de 1,45 N, seguido del tratamiento T₂ al 30% de H₂O₂ que obtuvo un promedio de 0,78 N y el T₁ al 20% de H₂O₂ con una resistencia menor de 0,73 N.

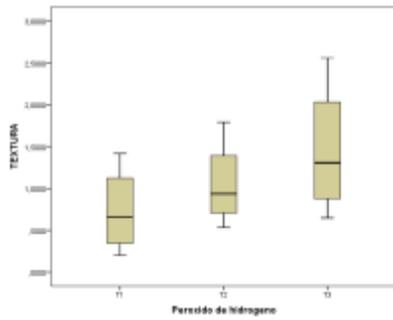


Figura 5. Gráfico de cajas Resistencia.

Dado que es una propiedad que no puede alterarse se le ha considerado como la propiedad fundamental del suelo que determina en cierto grado su valor económico (Pritchett, 1990)

- **pH**

El resultado del ANOVA aplicado a la variable pH muestra que no existe diferencia estadísticamente significativa con un valor sig=0,983 entre los tratamientos, por medio de la prueba de Tukey se guarda concordancia indicando que los tres tratamientos son similares. De acuerdo a la figura 6 la variable pH en referencia a los tres tratamientos aplicados el valor promedio es muy semejante entre si encontrándose para el T₁ un valor de 7,3 y para los T₂ y T₃ valores de 7,29.

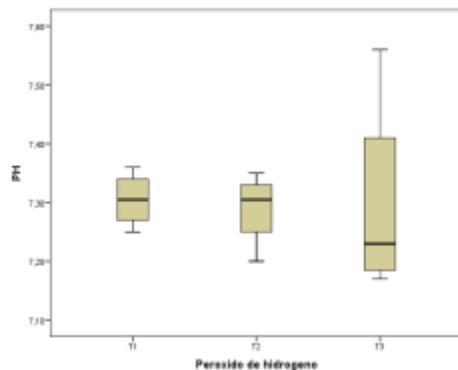


Figura 6. Gráfico de cajas pH.

El análisis demostró que no existe una diferencia entre los tratamientos y que los valores de pH se redujeron levemente, aunque Ojeda y Juárez (2019) indican que para llevar a cabo una oxidación química de forma óptima se debe mantener un pH de 3 a 4 debido a que esta condición es necesaria para activar el catalizador ferroso y dentro de sus estudios registro un pH inicial de 6.4 y después de la aplicación del tratamiento por Oxidación con H₂O₂ demostró que el pH se mantuvo estable en las pruebas. Esto guarda relación con los estudios de Villalba et al (2014) donde demostraron que los sistemas tratados con H₂O₂/Fe los valores de pH no varían con respecto al control biológico.

Materia orgánica

Del análisis ANOVA la materia orgánica no demuestra una diferencia significativa con un $\text{sig}=0,766$ demostrando que el grado de peróxido de hidrógeno utilizadas en el experimento no índice sobre la materia orgánica y su interacción. Mediante la prueba de Tukey se categorizó las medias de los tratamientos en un subconjunto. Para representar la relación de los niveles de peróxido de hidrogeno sobre la variable materia orgánica, se aplicó un gráfico de cajas (figura 7) representando las medias de los tratamientos, donde se observa que los tratamientos T₁, T₂ y T₃ son similares con un 14,2%, 14,3% y 14,7% respectivamente.

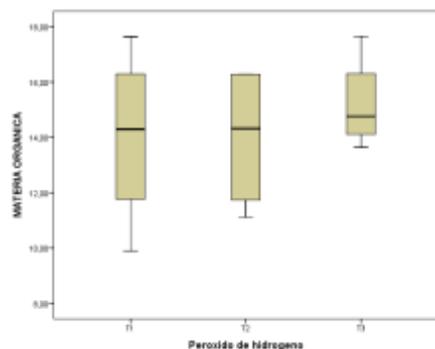


Figura 7 Gráfico de cajas Materia orgánica.

Villacreces (2012) en la aplicación de oxidación química en suelos obtuvo valores entre 12 y 16% aproximadamente. Por otro lado, Goi (2005) demostró que la reacción fentón en suelos orgánicos requiere mayor concentración de H_2O_2 para una degradación más efectiva del contaminante. Villalba (2013) menciona que la velocidad de las reacciones de oxidación depende de varias variables incluyendo la materia orgánica que puede actuar como un desactivador de los oxidantes, debido a que el oxidante reacciona con el MO en lugar del contaminante. En base a los resultados se obtiene que el suelo presenta un alto porcentaje de materia orgánica, siendo un factor de la descomposición del agua oxigenada.

- **PCBs**

En la tabla 5 del análisis del ANOVA para la variable PCBs demostró una diferencia estadísticamente significativa donde en la interacción entre grupos mostraron una significación menor a 0,05 ($\text{sig}=0,000$) tanto en separado como en conjunto, demostrando que los niveles de concentración (tratamientos) con peróxido de hidrógeno utilizados indicen en el resultado de PCBs.

Tabla 5. ANOVA de la variable PCBs.

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	de gl	Media cuadrática	F	Sig
Tratamientos	0,898	2	0,449	406,568	0,000
Error	0,010	9	0,001		
Total	0,908	11			

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar las diferencias estadísticas se realizó la prueba de Tukey al 5% de error, misma que categorizó las medias de la concentración de PCBs en 3 subconjuntos para $\alpha = 0,005$, donde T₃ se encuentra en el primer subconjunto con una media menor de 0.24289 mg/kg, seguido del T₁ con 0.75904 mg/kg categorizado en el subconjunto dos y el tratamiento T₂ con 0.87113 mg/kg en el subconjunto tres. En este sentido y como se aprecia en la tabla 6 el tratamiento con mayor concentración de peróxido de hidrógeno (T₃) presenta una concentración de PCBs más baja.

Tabla 6 Prueba Tukey de la variable PCBs.

HSD Tukey ^a			
Subconjunto para alfa =			
Peróxido	0,05		
de			
hidrogeno	N	1	2
T3 (40%)	4	0,24289	
T1 (20%)	4		0,75904
T2 (30%)	4		0,87113
Sig.		1,000	1,000

Se muestra las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,000

Riaza (2005) aplicó una remediación de suelos con PCBs combinando dos tratamientos por medio de desorción y oxidación química avanzada y con este proceso obtuvo porcentajes de degradación del 100% de PCBs en 30 minutos en una disolución acuosa.

Domènech et al. (2004) mencionan que el proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos de PCBs y que las ventajas de este método son varias ya que el Hierro no es tóxico y

el peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y ambientalmente benigno, es decir que no se forman compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes, y no existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo.

En otros estudios por Figueroa (2020) aplicó un consorcio bacteriano Decon para la biorremediación de suelos contaminados con aceites dieléctricos encontrándose entre los principales hallazgos el 100% de remoción del contaminante (PCBs) en el suelo en un periodo de 90 días.

- Se aplicó la siguiente fórmula N°2 (Wensheng, 2003) para obtener el porcentaje de remoción de PCBs del tratamiento T₃ (40% H₂O₂) que obtuvo el mejor rendimiento en base a la media.

$$\% \text{ de remoción} = 1 - \frac{Pcb's \text{ Final}}{Pcb's \text{ inicial}} * 100$$

$$\% \text{ de remoción} = 1 - \frac{(0,059 \text{ mg/kg})}{(0,12 \text{ mg/kg})} * 100$$

$$\% \text{ de remoción} = 51\%$$

En base a la formula se determinó que existió un 51% de remoción del contaminante PCBs. En la figura 8 se puede visualizar la remoción de PCB, donde inicialmente se obtuvo un valor en PCBs de 0.12 mg/kg y que luego del tratamiento T₃ disminuyó alcanzado un valor promedio de 0.059 mg/kg que se encuentra por debajo del límite permisible y cumple con la normativa ambiental del Ecuador.

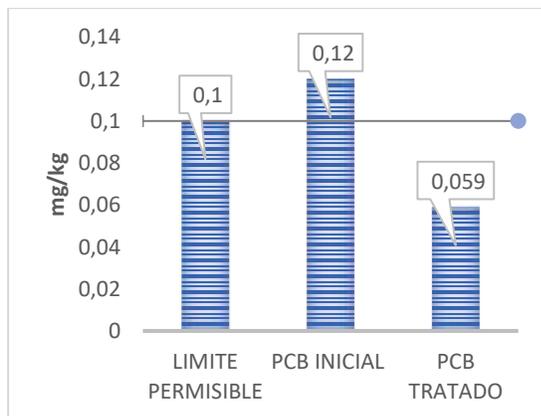


Figura 2. Remoción de PCBs.

Conclusiones

- El análisis físico químico que se realizó al suelo del taller de transformadores, determinó que el mismo se encuentra contaminado obteniendo un pH de 7,8; con una porosidad de 4,66% y una materia orgánica de 14,94%; sin embargo el parámetro de PCBs se encuentra en 0,12 mg/kg que sobrepasa el límite permisible de la normativa ambiental, adicionalmente se presentaron niveles elevados de aceites, grasas e hidrocarburos totales con 20104 mg/kg y 20,20 mg/kg respectivamente, por lo que se requiere una alternativa de remediación.
- En base a la experimentación se determina que el tratamiento T₃ (H₂O₂ al 40%) obtuvo mejores resultados con un volumen de 100 ml y como catalizador 10 g de sulfato ferroso heptahidratado en una muestra de 500 g, presentando una reducción del 51% de PCBs, del cual se determina que cumple con los límites permisibles y normativa ambiental, por lo que puede ser reintegrado a su origen para el uso de suelo industrial.
- Se acepta la hipótesis de investigación donde la variable PCBs demostró un efecto significativo en la reducción del contaminante en el suelo, y que por otro lado la relación de H₂O₂ 40%/ FeSO₄.7H₂O funciona en la remediación de suelos contaminados con PCBs.

Referencias

- Arbeli, Z. (2009). Biodegradación de compuestos orgánicos persistentes (COP): I. El caso de los bifenilos policlorados (PCB). *Acta Biológica Colombiana*, 14(1), 57-88. <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v14n1/v14n1a04.pdf>
- Beltrán, O., Berrío, L., Agudelo, E. y Cardona, S. (2013). Tecnologías de tratamiento para la tierra fuller contaminada con aceite dieléctrico. *Revista EIA*, 10(19), 33–48. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n19/n19a04.pdf>
- Domènech, X., Jardim, W. y Litter, M. (2004). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. *Academia*, 7-34. https://www.researchgate.net/publication/237764122_Procesos_avanzados_de_oxidacion_para_la Eliminacion_de_contaminantes
- Estrada, R., Hidalgo, C., Guzmán, R., Almaraz, J., Navarro, H. y Etchevers, J. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813–831. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000800813
- Figueroa, R. (2020). Evaluación de la eficacia de un consorcio bacteriano para la biorremediación de suelos contaminados por aceites dieléctricos. [tesis de grado, Universidad de Guayaquil].

Repositorio institucional UG.
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/49878/1/tesis%20Ray%20aprobada%20por%20revisor%2012.10.2020.pdf>

- Goi, T. (2005). *Advanced Oxidation Processes For Water Purification And Soil Remediation.* . Thesis on Chemistry and Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Technology, Department of Chemical Engineering, Tallinn University of Techonology.
- Gutiérrez, H., y De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos.* 2da ed. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Huling, S. y Pivetz, B. (2006). *In-Situ Chemical Oxidation.* Engineering Issue. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=156513
- INTAGRI. (2017). *Propiedades Físicas del Suelo y el Crecimiento de las Plantas.* Consultado el 09 de septiembre de 2022. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas> - Esta información es propiedad intelectual de INTAGRI S.C., Intagri se reserva el derecho de su publicación y reproducción total o parcial.
- Malíková, P., Hajduková, J., y Nezvalová, L. (2009). Oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fenton reaction oxidace polycyklických aromatických uhlovodíků fentonovou reakcí. *23 GeoScience Engineering*, 67(4). <http://gse.vsb.cz>
- Martínez, V. y López, F. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Revista Tierra latinoamericana*, 19(1), 9-17. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319102.pdf>
- Méndez, R., Pietrogiovanna, J., Santos, B., Sauri, M., Giácoman, G., y Castillo, E. (2010). Determinación de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-Adsorción. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(3), 211-220. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000300004
- Mendoza, R y Espinoza, A. (2017). *Guía Técnica para muestreo de suelos.* <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Ministerio del Ambiente (2015). *Guía técnica para la gestión ambientalmente racional de PCB.* Consultado el 10 febrero de 2021. <https://www.latinamerica.undp.org/content/rblac/es/home/library/poverty/guia-tecnica-para-la-gestion-ambientalmente-racional-de-pcb.html>

- Ministerio del Ambiente (2015). Acuerdo Ministerial 097-A. Refórmese el Texto Unificado de Legislación Secundaria. Registro Oficial N°387
- Ministerio del Ambiente de Perú. (2014). Guía para muestreo de suelo. Consultado el 16 agosto de 2021 <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
- Ojeda M., Juárez, I. (2019). Biorremediación mejorada con preoxidación química de suelos. *Revista Journal of basic sciences*, 5(15), 82-93. <https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs/article/view/3570/2726>
- Pacheco, M. (2020). Remediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante los métodos de oxidación química y lavado de suelo. [tesis de posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/17272/3/Tesis.pdf>
- Páez, M. (2019). Evaluación del método Fenton aplicado a suelos contaminados con hidrocarburos procedentes de pasivos ambientales del bloque 61. [tesis de grado, Universidad internacional SEK]. Repositorio institucional uisek. <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3473>
- Pritchett, W. (1990). Suelos forestales. Editorial Limusa. 364 pp.
- Shoji, S., Nanzyo, M. y Dahlgren R. (1933) Volcanic ash soils. Genesis properties and utilization. Elsevier science publishers. 288p.
- Simbaña, C. (2016). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de la parroquia Taracoa en Francisco de Orellana, mediante el hongo pleurotus ostreatus. [tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio institucional ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4916/1/236T0192.pdf>
- Tusso, J. y Valero, S. (2018). Exposición a Bifenilos policlorados: efectos en la salud y en ambiente. Revisión de la literatura, 2000 a 2017. <http://repository.urosario.edu.co/handle/10336/14237>
- Van Deuren, J., Wang, Z. y Ledbetter, J. Remediation (1997) Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Technology Innovation.
- Villalba, N. (2013). Remediación de suelos contaminados con fenantreno por oxidación química. [tesis de maestría, Universidad Nacional de Asunción]. Repositorio institucional. <https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/TES-BN-004.pdf>

- Villalba, N., Peluffo, M., Martin. M., y Mora, V. (2014). Remediación de suelo contaminado con fenantreno empleando reactivo fenton. Revista Reportes científicos, 5(1), 29-37. https://www.researchgate.net/publication/326812434_Remediacion_de_Suelo_contaminado_con_Fenantreno_empleando_Reactivo_Fenton
- Villacreces, L. (2012). Evaluación a nivel de laboratorio de oxidación química asistida con detergente para tratar suelos contaminados con petróleo. Revista ciencia. <http://ciencia.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2013/05/VID62.pdf>
- Villaseñor, D. (2016). Fundamentos y procedimientos para análisis físico morfológicos de suelos. Consultado el 28 de agosto de 2022. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/10690/1/FUNDAMENTOS%20Y%20PROCEDIMIENTOS.pdf>

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).