

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE
PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61**

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS
AMBIENTALES DEL BLOQUE 61”**

Realizado por:

MICHAEL ANDRÉS PÁEZ HOFFMANN

Director del proyecto:

KATTY CORAL

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Quito, 01 de agosto de 2019

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL
BLOQUE 61**

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

DECLARACIÓN JURAMENTADA

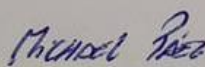
Yo, MICHAEL ANDRÉS PÁEZ HOFFMANN, con cédula de identidad # 172099471-2, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Yo, MICHAEL ANDRÉS PÁEZ HOFFMANN, con cédula de identidad # 172099471-2, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



FIRMA

172099471-2

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL
BLOQUE 61**

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL
BLOQUE 61”**

Realizado por:

MICHAEL ANDRÉS PÁEZ HOFFMANN

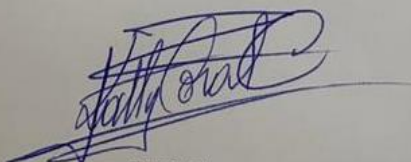
como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO AMBIENTAL

ha sido dirigido por la profesora

KATTY CORAL

quien considera que constituye un trabajo original de su autor

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Katty Coral', with a stylized flourish extending to the right.

FIRMA

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL
BLOQUE 61**

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

JOHANNA MEDRANO

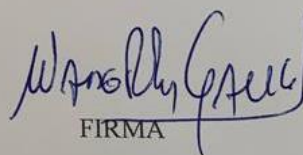
WALBERTO GALLEGOS

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador


FIRMA


FIRMA

Quito, 01 de Agosto de 2019

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

El presente Trabajo de Fin de Carrera ha sido realizado dentro del Programa de Investigación
de la Universidad Internacional SEK denominado:

BIODIVERSIDAD Y RECURSOS NATURALES APLICADOS A LA GESTIÓN AMBIENTAL Y LA BIOTECNOLOGÍA

Perteneciente a la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales.

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL
BLOQUE 61**

DEDICATORIA

Dedicado a todo el personal de la Universidad Internacional SEK.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

AGRADECIMIENTO

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS
AMBIENTALES DEL BLOQUE 61**

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

RESUMEN

En la región amazónica del Ecuador existen pasivos ambientales constituidos principalmente por suelos contaminados con hidrocarburos que se originan de emergencias producto de la extracción y producción del petróleo. Se determinó la eficiencia de la reacción Fenton (H_2O_2 : Fe), como una alternativa química para reducir tiempos de remediación o a su vez remplazar tratamientos biológicos ineficientes y de períodos largos. Para ello, se obtuvo una muestra de suelo remediado del Bloque 61, y se procedió a mezclarlo con 10 000 ppm y 2000 ppm de crudo pesado proveniente de Lago Agrio, teniendo dos datos iniciales de TPH. Se realizaron estándares de concentración de TPH mediante el Método de la EPA 418 "Total Hydrocarbons Analyzer" utilizando el equipo HACH DR 2800, para su respectiva calibración para alto y bajo rango. Las muestras se sometieron a procesos de tratamiento con concentraciones establecidas en investigaciones anteriores de H_2O_2 , con el fin de identificar la dosis óptima de la reacción Fenton que permita disminuir considerablemente las concentraciones de hidrocarburos. Una vez aplicada la reacción en las muestras de suelo, se identificó que el tratamiento con mejores resultados fue T_2 (H_2O_2 al 20% p/p). Como resultado principal se obtuvo que dicho tratamiento permitió reducir en un 86% la concentración de TPH. En relación al análisis económico, se identificó que el método Fenton aplicado a la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos requiere costos mayores en comparación a los tratamientos convencionales de biorremediación, sin embargo, se determinó que su aplicación permite optimizar tiempos de tratamiento.

Palabras clave: Fenton, hidrocarburos, suelos contaminados, remediación, oxidación.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

ABSTRACT

In the Amazonian region of Ecuador, there are environmental liabilities constituted mainly by soils contaminated with hydrocarbons that originate from emergencies because of oil extraction and production. The efficiency of the Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}$) reaction was determined as a chemical alternative to reduce remediation times or to replace inefficient and long-term biological treatments. Obtained a sample of remediated soil from Block 61 and mixed with 10,000 ppm and 2,000 ppm of heavy crude from Lago Agrio, with two initial TPH data. TPH concentration standards performed by the EPA Method 418 "Total Hydrocarbons Analyzer" using the HACH DR 2800 equipment, for its calibration for high and low range. The samples subjected to treatment processes with concentrations established in previous investigations of H_2O_2 , to identify the optimum dose of the Fenton reaction that allows reducing the hydrocarbon concentrations considerably. Once the response applied in the soil samples, determined that the treatment with the best results was T2 (H_2O_2 at 20% w/w). As a main result, it obtained that said treatment allowed to reduce the TPH concentration by 86%. About the economic analysis, identified that the Fenton method applied to the remediation of soils contaminated with hydrocarbons requires higher costs compared to conventional bioremediation treatments. However, it was determined that its application allows optimizing treatment times.

Keywords: Fenton, hydrocarbons, contaminated soils, remediation, oxidation.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

INTRODUCCIÓN

La aseveración de la existencia de yacimientos de petróleo en el país surgió en 1911, dándose a cabo la perforación del primer pozo ubicado en la península de Santa Elena nombrado "Ancón 1". El crecimiento de las exportaciones de crudo, en la década los 70 fue un pilar fundamental en la historia de la economía ecuatoriana (EP PETROECUADOR, 2013). Desde entonces, la industria hidrocarburífera y petroquímica realizan procesos de transporte, refinación y comercialización del petróleo, generando diversos tipos de residuos, los cuales se han difundido sobre los suelos durante varios años, debido a un manejo no adecuado e insuficiente sensibilización ambiental (Becerra, E.Paichard, & Sturma, 2013).

Durante este tiempo de aprovechamiento hidrocarburífero en el Ecuador, han ocurrido un sin número de derrames de petróleo de diferentes fuentes, ya sea en etapas de extracción, producción, refinación, transporte y almacenamiento e incluso comercialización (Salomón, 2016). Dichos eventos, con el transcurso de los años, se han convertido en fuentes de contaminación, con la respectiva afectación de la composición natural del suelo, como una de sus consecuencias. Dichos suelos han perdido considerablemente su microfauna, dejándolos deteriorados e ineficientes para cualquier tipo de actividad en relación al uso que se quiera realizar (Gomez, 2014).

Actualmente se realizan técnicas de restauración de suelos mediante la elaboración de biopilas usando bioestimulación y bioaumentación como procesos de apoyo en la remediación, así como el compostaje y la aireación, etc. (Flores & Mendoza, 2017). Dichas técnicas son accesibles económicamente para las empresas, debido a su bajo costo de aplicación, pero con el inconveniente de que su desarrollo en términos de

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

tiempo no es eficiente. Es por ello que inclinarse por otras líneas como son los métodos químicos de oxidación con tiempos menores de remediación, representa una alternativa de mayor viabilidad (Plata Quinteros, 2012).

Las empresas hidrocarburíferas establecen actividades de restauración ambiental, a través de las cuales se intervienen los pasivos ambientales constituidos por volúmenes de suelo contaminado para ser remediados (Riesco, 2012); se ha identificado la necesidad de realizar la evaluación de alternativas químicas aplicables a suelos contaminados con hidrocarburos, para optimizar tiempos y dar apoyo a los procesos de remediación vigentes.

Según Toledo (2009), se usan varios tipos de tratamiento de suelos, dependiendo de las necesidades de la empresa encargada; en la Tabla 1. se establece el período de remediación y costo.

En la actualidad las técnicas de tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos son numerosas. La aplicación de tecnologías biológicas en las cuales se maneja principalmente procesos de bioaumentación y bioestimulación requieren costos bajos y de fácil control. Por otro lado tecnologías fisicoquímicas, requieren de la aplicación de solventes y procesos de oxidación avanzada (Beltrán Pérez et al., 2013).

Tabla 1. Tipos de Tratamiento de suelos contaminados con Hidrocarburos. Tiempo y costo aproximado.

Tipo de tratamiento	Tiempo	Costos (USD/m³)
Tratamiento fisicoquímico	Desde una semana hasta 8 meses	350
Extracción por fluidos	De 2 a 6 semanas	238
Biorremediación	Mayor a 6 meses	150
Fitorremediación	Mayor a 6 meses	120
Solidificación	Horas o semanas	110
Lavado de suelos	4 meses	35
Inyección de aire	2 meses	25

Fuente: Toledo (2009). **Elaborado por:** Michael Páez

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Entre los procesos de oxidación avanzada se encuentra la Oxidación Fenton, la cual se lleva a cabo por la reacción química entre el peróxido de hidrógeno y el sulfato ferroso. Henry J. Fenton reportó por primera vez que el peróxido de hidrógeno se activaba con iones ferrosos para oxidar ácido tartárico. El objetivo de esta reacción es la formación de radicales hidroxilos con elevado potencial de oxidación de compuestos orgánicos (Pignatello et al., 2006).

El Método Fenton ha sido usado como proceso de oxidación de contaminantes orgánicos desde 1960, y su eficacia lo ha llevado a ser aplicado en tratamiento de suelos contaminados con Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (Martens & Frankenberger, 1995). Dicha reacción depende del pH del medio (agua o suelo); debido a que la eliminación completa del peróxido de hidrógeno se da en pH ácidos de 3 (Jung, Lim, Park, & Kim, 2009). La reacción Fenton puede ocurrir a temperatura ambiente, a pesar de que un aumento de la misma favorecería a la oxidación (Homem, Dias, Santos, & Alves, 2009). En el caso de que el peróxido de hidrógeno sea sometido a altas temperaturas, en un rango de 30 a 70 °C, éste perderá estabilidad y aumentará su velocidad de degradación (Malíková, Hajduková, & Nezvalová, 2009).

La Reacción Fenton se ha utilizado para procesos de remediación de suelos contaminados con varios contaminantes orgánicos como Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH), logrando la oxidación de distintos tipos hidrocarburos (Bogan, Trbovic, & Paterek, 2003). Flotron et al., (2005), establecieron que la validez de la reacción Fenton depende de características como el contenido de carbono orgánico y del nivel de contaminación, sugiriendo para sólidos contaminados, tratamientos de oxidación avanzada para los HAPs. Por otro lado, Villacreces, (2012), determinó que el método Fenton, aplicado en muestras de suelo contaminadas con crudo, en concentraciones de

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

H₂O₂ de 5% p/p y 15% p/p, obtuvo remociones de TPH representativas entre 21% y 90%.

Además, identificó que la adición de ácido cítrico para reducir el pH tuvo influencia mínima. Las combinaciones de técnicas biológicas con procesos de oxidación avanzada para remediación de suelos contaminados es eficiente, a pesar de que la adición de oxidantes químicos, puede transitoriamente reducir la carga bacteriana aerobia y anaerobia; sin embargo, se restaura con el tiempo (Siegrist, Crimi, Simpkin, & Borden, 2011). Farzadkia, Dehghani, & Moafian, (2014), usaron el método de Taguchi para determinar las condiciones óptimas en la reducción de la tasa de TPH. Identificaron a la vez variables indispensables para la eficiencia de la reacción como la relación másica Suelo: H₂O₂, relación molar Fe(II):H₂O₂, pH y tiempo de reacción.

La presencia de petróleo en el suelo es más común de lo que se espera, debido a la variedad de eventos ocurridos en la industria hidrocarburífera como derrames, fugas, etc. Es por ello que el análisis químico de TPH y la selección de metodologías rápidas y confiables, juegan un papel crucial en la evaluación y tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), ha publicado una serie de métodos para cuantificar TPH en matrices sólidas. La Tabla 2 detalla información sobre cuatro metodologías que se usan para la detección final de hidrocarburos: cromatografía de gases, gravimetría, espectroscopia infrarroja e inmunoensayos.

Cronológicamente, los métodos gravimétricos fueron los primeros en ser aplicados, y con el tiempo fueron remplazados por métodos espectroscópicos y cromatográficos debido a su grado de apreciación de hidrocarburos medidos (Villalobos, Avila-Forcada, & Gutierrez-Ruiz, 2008).

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Tabla 2. Métodos EPA para cuantificación de TPH en varias matrices (Tomado de: Weisman, 1998.).

Método de detección	# EPA	Solvente de extracción y especies de HC extraídas	Límite de detección mg/kg (suelo)	Ventajas	Desventajas
Cromatografía de gases	8015 C	Metanol, 2-propanol. Normalmente entre C6 y C25 o C36 para alto rango	10	Sensitivo; especificaciones químicas son posibles.	Normalmente no detecta compuestos por debajo de C6.
Infrarrojo (IR)	8440 - 418.1	La mayoría de compuestos excepto fracciones volátiles y pesadas.	10	Rápido, sencillo y barato	Falta de especificidad. Pobre extracción de hidrocarburos de alto peso molecular.
Gravimetría	9071 B	n-Hexano. La mayoría de compuestos excepto fracciones volátiles	50	Rápido, sencillo y barato	Baja sensibilidad y pérdida de volátiles. Usado solo para cuantificación total.
Inmunoensayos	4030	El solvente depende del kit comercial. Hidrocarburos aromáticos (BTEX, HAPs)	10-500	Rápido, sencillo y barato	Baja sensibilidad. Usado solo para cuantificación total.

Distintas metodologías se aplican para, en primer lugar, identificar el contenido de contaminante, y por otro lado, para que fuentes de contaminación existentes o pasivos ambientales sean remediados y cumplan con la legislación vigente otorgada en cada país. En el Reglamento Ambiental de Operaciones Hidrocarburíferas del Ecuador RAOHE 1215, para suelos contaminados con hidrocarburos se establecen parámetros y límites permisibles en función del uso posterior a su remediación. La Tabla 3 indica lo expresado anteriormente (RAOHE, 2001).

Tabla 3. (Tabla 6 del RAHOE)-"Límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados en todas las fases de la industria hidrocarburífera, incluidas las estaciones de servicios."

Parámetro	Expresado en	Unidad 1)	Uso agrícola 2)	Uso industrial 3)	Ecosistema sensible 4)
Hidrocarburos totales	TPH	mg/kg	<2500	<4000	<1000
Hidrocarburos aromáticos	C	mg/kg	<2	<5	<1
Cadmio	Cd	mg/kg	<2	<10	<1
Níquel	Ni	mg/kg	<50	<100	<40
Plomo	Pb	mg/kg	<100	<500	<80

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Fuente: Reglamento Ambiental de Operaciones Hidrocarburíferas RAOHE 1215, (2001)

Elaborado por: Michael Páez

¹⁾ Expresado en base de sustancia seca (gravimétrico; 105°C, 24 horas).

²⁾ Valores límites permisibles enfocados en la protección de suelos y cultivos.

³⁾ Valores límites permisibles para sitios de uso Industrial (construcciones, etc.).

⁴⁾ Valores límites permisibles para la protección de ecosistemas sensibles tales como Patrimonio Nacional de Áreas Naturales y otros identificados en el correspondiente Estudio Ambiental.

En estudios efectuados anteriormente, se ha comprobado que la aplicación del método Fenton reduce la concentración de TPH en sólidos contaminados con hidrocarburos en menor tiempo, en relación a tratamientos biológicos vigentes; es por ello que evaluarlo como proceso de oxidación avanzada aplicado a suelos contaminados con hidrocarburos para reducir tiempos de remediación forma parte de facilidades ambientales para las industrias.

METODOLOGÍA

El proyecto se realizó en los laboratorios de la Universidad Internacional SEK en el campus de Carcelén.

Se obtuvo una muestra compuesta de suelo contaminado con hidrocarburos del Bloque 61 intervenido por una empresa petrolera. Este suelo presentaba concentraciones inferiores a los máximos establecidos por el RAOHE, 200 ppm de TPH, por lo que se procedió a, utilizando el mismo suelo, preparar muestras con crudo pesado proveniente de Lago Agrio, con concentraciones de 10 000 ppm y 2000 ppm. Mediante el Método EPA 418 "Total Hydrocarbons Analyzer", se procedió a calibrar el equipo HACH DR 2800; para ello fue necesario desarrollar dos nuevos programas usando una longitud de onda de 450 nm, obteniendo dos curvas de calibración a través de la elaboración de patrones con concentraciones de petróleo establecidas para bajo y alto rango. Para alto rango las concentraciones utilizadas fueron 10 000 ppm, 8000 ppm, 5000 ppm, 3000 ppm

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

y 1000 ppm, mientras que para bajo rango fueron de 2000 ppm, 1500 ppm, 1000 ppm y 500 ppm.

Se usó para cada tratamiento 5 mL de Sulfato ferroso heptahidratado como valor constante en la reacción, esto basado en estudios anteriores de Malíková et al., (2009). Se realizó la preparación de 250 mL de agua oxigenada al 10% p/p, 250 mL al 20% p/p y 250 mL 30% p/p. A partir de H_2O_2 concentrada al 30% p/p, se obtuvieron las otras dos concentraciones requeridas.

La investigación tuvo como factor a considerar principalmente la concentración de H_2O_2 . La muestra de suelo contaminada con hidrocarburo fue tratada con diferentes concentraciones de agua oxigenada. Los reactivos necesarios para preparar el reactivo Fenton fueron Sulfato Ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) al 30% p/p. Las concentraciones de peróxido de hidrógeno fueron seleccionadas en relación al análisis de la información bibliográfica proporcionada por la investigación de Méndez et al., (2010) y Villacreces, (2012).

De la muestra con concentración de 10 000 ppm, se tomó un kilogramo de suelo contaminado, el cual fue dividido en 4 reactores, conteniendo cada uno una masa de 250 g. Se añadieron los reactivos en cada una de las muestras para dar paso a la reacción, esto es, en 250 g de suelo, se agregaron 50 mL de H_2O_2 con su respectivo porcentaje en peso (10, 20 y 30 % p/p) con 5 mL de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, obteniéndose tres ensayos diferentes. Se dejó reaccionar a cada ensayo por 4 días y se evaluó la concentración final de TPH, luego del tratamiento.

Para la extracción de TPH de las muestras tratadas, se aplicó la misma metodología que para la preparación de los estándares, es decir a las muestras atacadas por el Reactivo Fenton se añadieron 10 mL del reactivo S-316 marca Horiba para la

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

extracción de TPH como detalla el Método EPA 418 Total Hydrocarbons Analyzer.

Posteriormente se realizó la medición de contaminante en ppm mediante el equipo HACH DR 2800. Se detalló cada reactor mediante la nomenclatura descrita en la Tabla 4. Se realizaron cinco repeticiones de cada tratamiento para validar los resultados, disminuyendo así el error de medición.

Tabla 4. Porcentaje de concentración de los tratamientos aplicados

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Volumen H ₂ O ₂ (mL)	FeSO ₄ .7H ₂ O (mL)	Masa de suelo tratada (g)
Muestra sin tratamiento (MST)	-	-	-	-
Tratamiento 1 (T1)	10	50	5	250
Tratamiento 2 (T2)	20	50	5	250
Tratamiento 3 (T3)	30	50	5	250

Elaborado por: Michael Páez

Para el cálculo de la eficiencia de remoción de contaminante se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de remoción} = 1 - \frac{TPH_{final}}{TPH_{inicial}} * 100$$

Ecuación N° 1 Porcentaje de remoción del contaminante (Wensheng, 2003).

Se realizó la aplicación estadística del Método Hanssen con el fin de identificar la correlación, dispersión y error que pueden tener los datos experimentales y relacionarlos con los calculados; para así evaluar su probabilidad de ocurrencia.

RESULTADOS

Mediante la metodología detallada anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados:

Se realizó cinco pruebas de laboratorio del método Fenton, siendo cada una de ellas experimentada en cinco repeticiones, con el fin de reducir el error de medición y validar los datos.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 1 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 10 000 ppm (alto rango), se obtuvieron concentraciones finales detalladas en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Aplicación de Fenton 1 en la muestra de suelo contaminado a 10 000 ppm

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	4328,5	4013,7	4163,4	4322,8	4251,3	4216
T2	20	1492,1	1395,2	1478,7	1668,7	1435,6	1494
T3	30	2115,3	1831,2	2219,4	1777,4	1901,5	1969
MST	0	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Remoción (%)					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	56,7	59,9	58,4	56,8	57,5	58
T2	20	85,1	86,1	85,2	83,3	85,6	85
T3	30	78,8	81,7	77,8	82,2	80	80

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 1, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H₂O₂. Para el T1 (H₂O₂ al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 58% de contaminante, para el T2 (H₂O₂ al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 85% de contaminante, y por último para el T3 (H₂O₂ al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 80% de contaminante. En el Gráfico 1 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

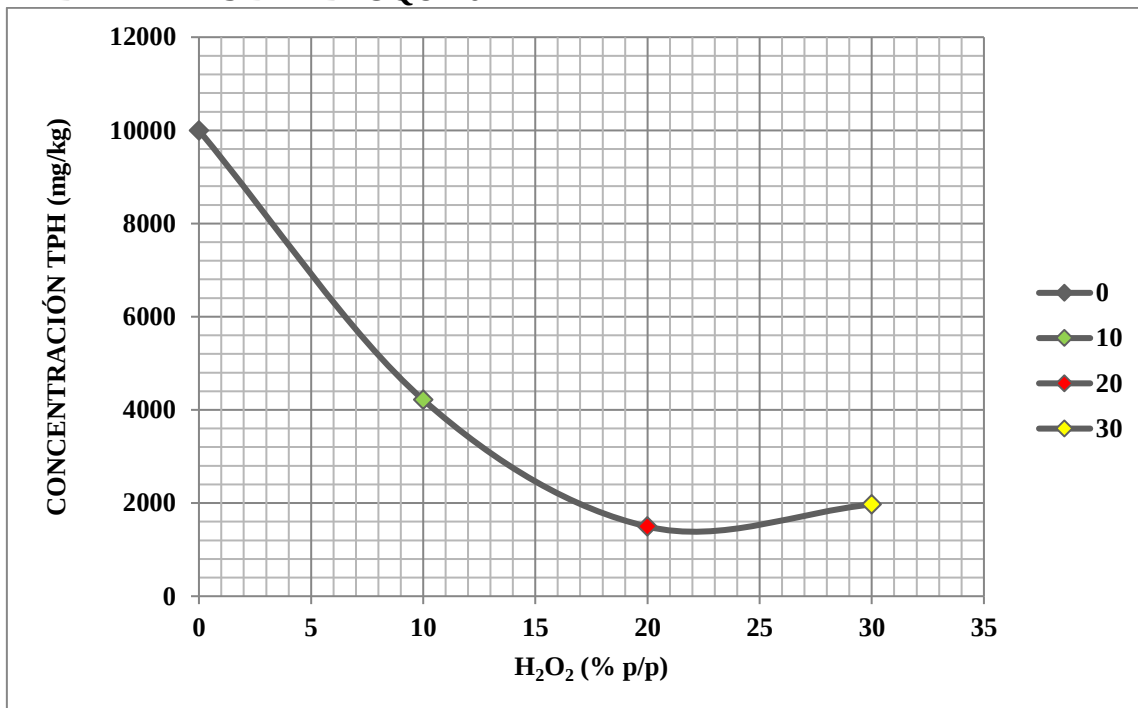


Gráfico 1. Valores promedio de TPH en Fenton 1 a concentraciones de H₂O₂ establecidas

Elaborado por: Michael Páez

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 2 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 10 000 ppm (alto rango), se obtuvieron concentraciones finales detalladas en la Tabla 6.

Tabla 6. Aplicación de Fenton 2 en la muestra de suelo contaminado a 10 000 ppm

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	4512,3	4218,2	4356,1	4416,3	4436,7	4388
T2	20	1745,2	1581,4	1502,6	1671,7	1715,4	1643
T3	30	2314,7	2104,8	1903,5	1845,2	2089,5	2052
MST	0	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	54,9	57,8	56,4	55,8	55,6	56
T2	20	82,5	84,2	85,0	83,3	82,8	84
T3	30	76,9	79,0	81,0	81,5	79,1	79

Elaborado por: Michael Páez

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

En los datos obtenidos del experimento Fenton 2, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H_2O_2 . Para el T1 (H_2O_2 al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 56% de contaminante, para el T2 (H_2O_2 al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 84% de contaminante, y por último para el T3 (H_2O_2 al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 79% de contaminante. En el Gráfico 2 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

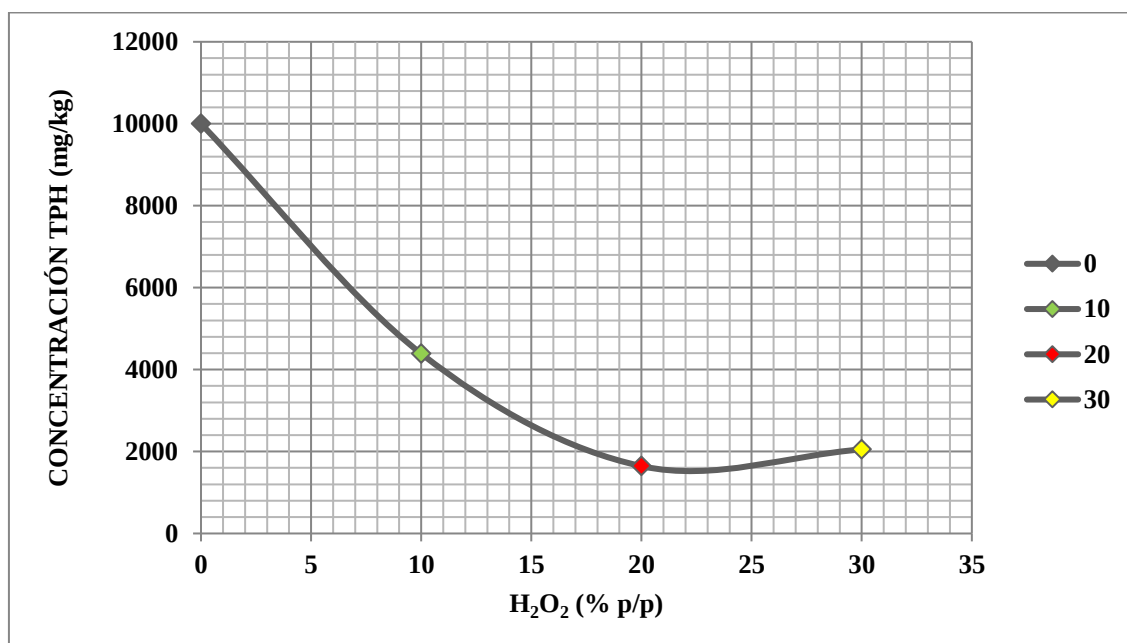


Gráfico 2. Valores promedio de TPH en Fenton 2 a concentraciones de H_2O_2 establecidas

Elaborado por: **Michael Páez**

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 3 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 10 000 ppm (alto rango), se obtuvieron concentraciones finales detalladas en la Tabla 7 .

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Tabla 7. Aplicación de Fenton 3 en la muestra de suelo contaminado a 10 000 ppm

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	4132,9	4512,6	4102,8	4492,9	4216,4	4292
T2	20	1432,7	1501,8	1238,1	1671,7	1219,4	1413
T3	30	2441,2	2022,5	2254,7	1961,3	2394,5	2215
MST	0	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	58,7	54,9	59,0	55,1	57,8	57
T2	20	85,7	85,0	87,6	83,3	87,8	86
T3	30	75,6	79,8	77,5	80,4	76,1	78

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 3, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H₂O₂. Para el T1 (H₂O₂ al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 57% de contaminante, para el T2 (H₂O₂ al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 86% de contaminante, y por último para el T3 (H₂O₂ al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 78% de contaminante. En el

Gráfico 3 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

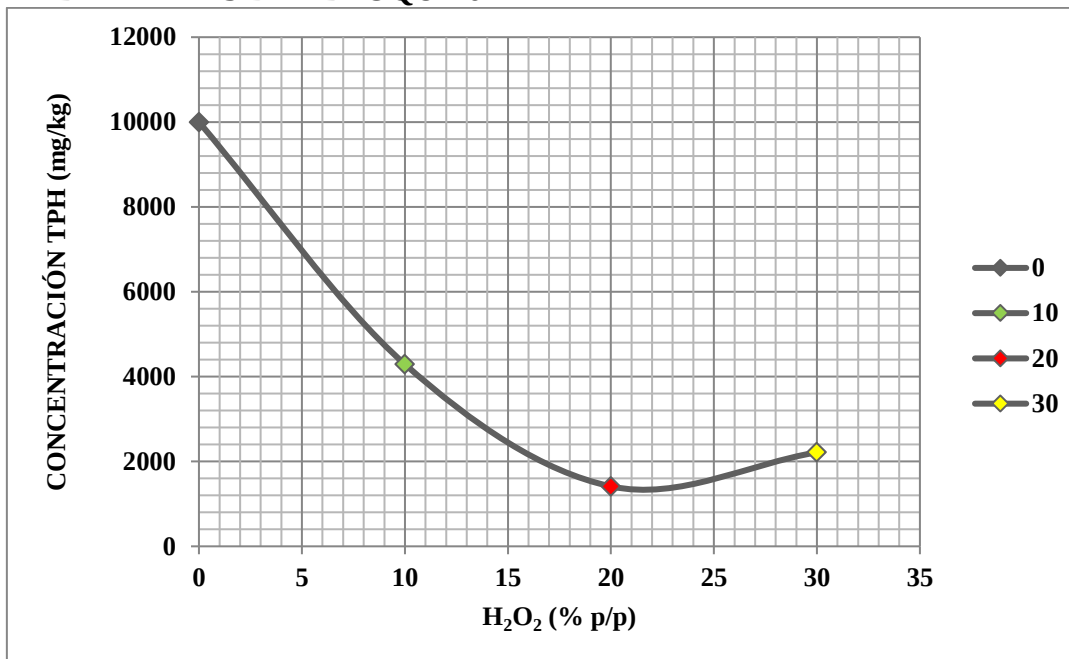


Gráfico 3. Valores promedio de TPH en Fenton 3 a concentraciones de H₂O₂ establecidas

Elaborado por: Michael Páez

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 4 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 10 000 ppm (alto rango), se obtuvieron remociones detalladas en la Tabla 8.

Tabla 8. Aplicación de Fenton 4 en la muestra de suelo contaminado a 10 000 ppm

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	4477,1	4905,1	5000,5	3549,5	4281,2	4443
T2	20	1572,6	1911,6	1577,1	1591,8	1513,2	1633
T3	30	1781,7	1682,4	2376,1	1991,5	2040,8	1975
MST	0	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	55,2	50,9	50,0	64,5	57,2	56
T2	20	84,3	80,9	84,2	84,1	84,9	84
T3	30	82,2	83,2	76,2	80,1	79,6	80

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 4, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

concentraciones previamente establecidas de H_2O_2 . Para el T1 (H_2O_2 al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 56% de contaminante, para el T2 (H_2O_2 al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 84% de contaminante, y por último para el T3 (H_2O_2 al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 80% de contaminante.

En el Gráfico 4 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

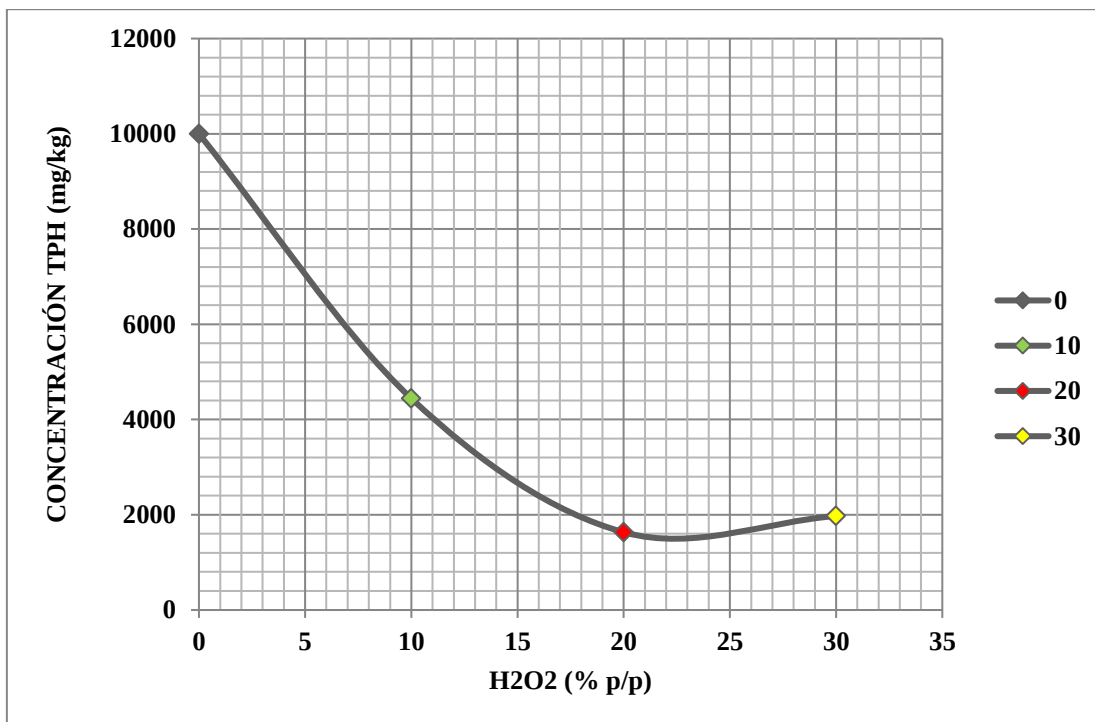


Gráfico 4. Valores promedio de TPH en Fenton 4 a concentraciones de H_2O_2 establecidas

Elaborado por: Michael Páez

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 5 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 10 000 ppm (alto rango), se obtuvieron concentraciones finales detalladas en la Tabla 9.

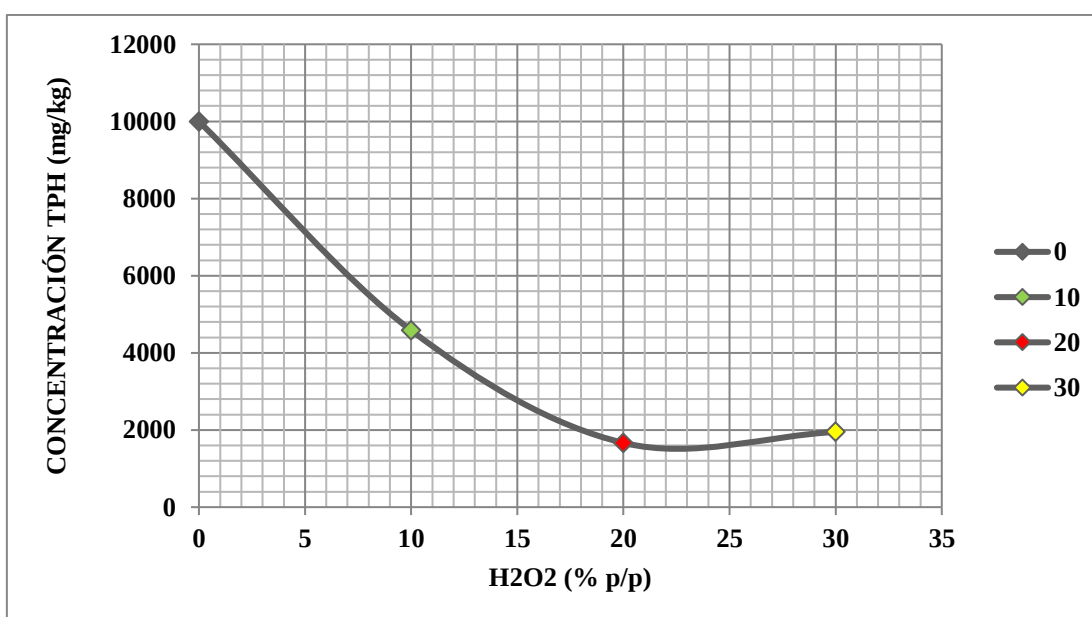
EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Tabla 9. Aplicación de Fenton 5 en la muestra de suelo contaminado a 10 000 ppm

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	3338,9	4912,8	5061,1	5099,6	4498,6	4582
T2	20	1951,9	1576,7	1577,9	1601,4	1621,8	1666
T3	30	2046,7	2377,8	1729,1	1774,7	1818	1949
MST	0	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	66,6	50,9	49,4	49,0	55,0	54
T2	20	80,5	84,2	84,2	84,0	83,8	83
T3	30	79,5	76,2	82,7	82,3	81,8	81

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 5, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H₂O₂. Para el T1 (H₂O₂ al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 54% de contaminante, para el T2 (H₂O₂ al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 83% de contaminante, y por último para el T3 (H₂O₂ al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 81% de contaminante. En el Gráfico 5 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.



EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Gráfico 5. Valores promedio de TPH en Fenton 5 a concentraciones de H₂O₂ establecidas

Elaborado por: Michael Páez

El cumplimiento de la Normativa vigente (RAOHE 1215), para la muestra inicial de suelo con 10 000 mg/kg (alto rango) y sin previo tratamiento (MST), se ve expresado en el

Gráfico 6.

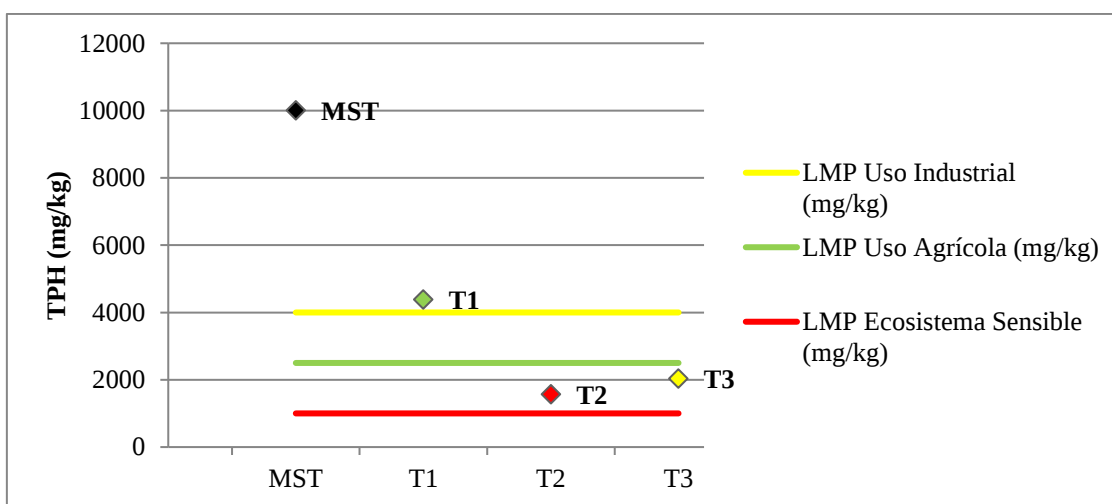


Gráfico 6. Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 10 000 mg/kg.

Elaborado por: Michael Páez

En la Tabla 10 se puede observar el promedio de concentración de contaminante por tratamiento y su cumplimiento o no cumplimiento del RAOHE 1215. Se observa que ninguno de los tratamientos cumple con el Límite máximo permisible para Ecosistema Sensible; el T1 no cumple con ninguno de ellos.

Tabla 10. Tratamientos realizados y su cumplimiento con el RAOHE 1215.

Tratamientos del Suelo (10 000 ppm)	Concentración (mg/kg)		
	T1	T2	T3
Fenton 1	4216	1494	1969
Fenton 2	4388	1643	2052

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Tratamientos del Suelo (10 000 ppm)			Concentración (mg/kg)		
			T1	T2	T3
Fenton 3			4292	1413	2215
Fenton 4			4443	1633	1975
Fenton 5			4582	1666	1949
Promedio			4384	1570	2032
Uso Industrial	mg/kg	4000	No cumple	Cumple	Cumple
Uso Agrícola		2500	No cumple	Cumple	Cumple
Ecosistema Sensible		1000	No cumple	No cumple	No cumple

Elaborado por: Michael Páez

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 1 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 2000 ppm (bajo rango), se obtuvieron remociones detalladas en la Tabla 11.

Tabla 11. Aplicación de Fenton 1 en la muestra de suelo contaminado a 2 000 ppm

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	732,58	1224,5	880,89	1405,9	1219,2	1093
T2	20	389,99	319,47	351,69	382,79	394,65	368
T3	30	581,55	539,24	584,24	802,6	593,88	620
MST	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	63,4	38,8	55,9	29,7	39,0	45
T2	20	80,5	84,0	82,4	80,9	80,3	82
T3	30	70,9	73,0	70,8	59,9	70,3	69

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 1, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H₂O₂. Para el T1 (H₂O₂ al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 45% de contaminante, para el T2 (H₂O₂ al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 82% de contaminante, y por último para el T3 (H₂O₂ al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 69% de contaminante. En el Gráfico 7 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

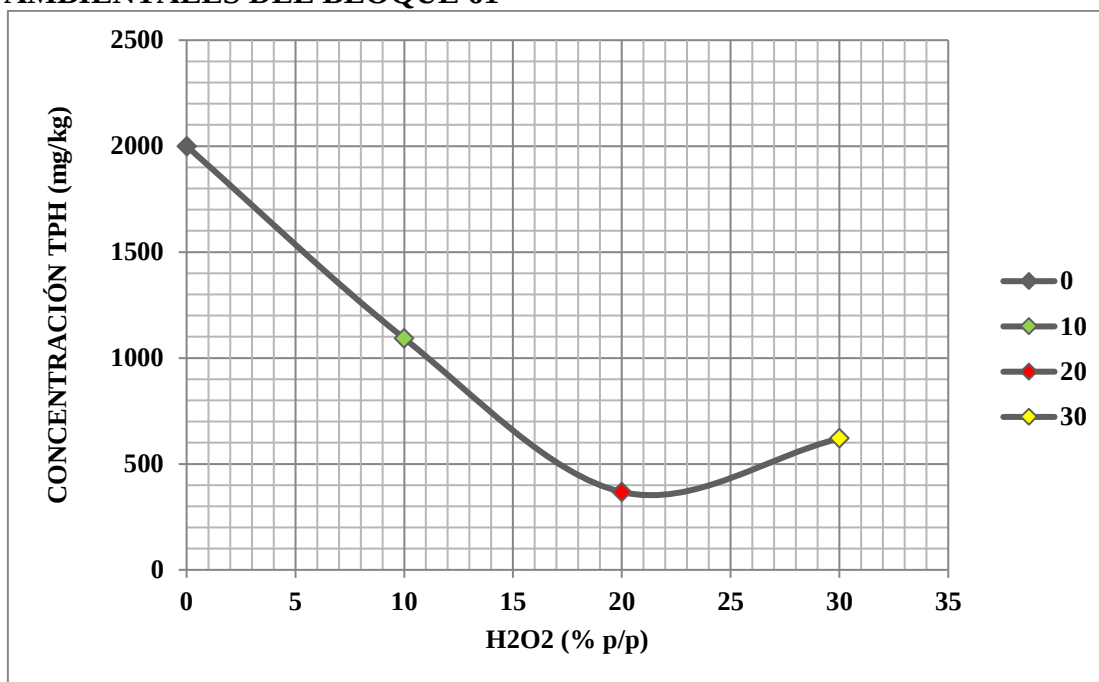


Gráfico 7. Valores promedio de TPH en Fenton 1 a concentraciones de H₂O₂ establecidas

Elaborado por: Michael Páez

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 2 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 2000 ppm (bajo rango), se obtuvieron remociones detalladas en la Tabla 12.

Tabla 12. Aplicación de Fenton 2 en la muestra de suelo contaminado a 2000 ppm

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	1396,7	879,36	876,68	1226,9	748,37	1026
T2	20	390,33	352,89	323,63	354,88	387,63	362
T3	30	580,99	706,8	791,85	608,78	802,15	698
MST	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	30,2	56,0	56,2	38,6	62,6	49
T2	20	80,5	82,4	83,8	82,3	80,6	82
T3	30	70,9	64,7	60,4	69,6	59,9	65

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 2, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H_2O_2 . Para el T1 (H_2O_2 al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 49% de contaminante, para el T2 (H_2O_2 al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 82% de contaminante, y por último para el T3 (H_2O_2 al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 65% de contaminante. En el Gráfico 8 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

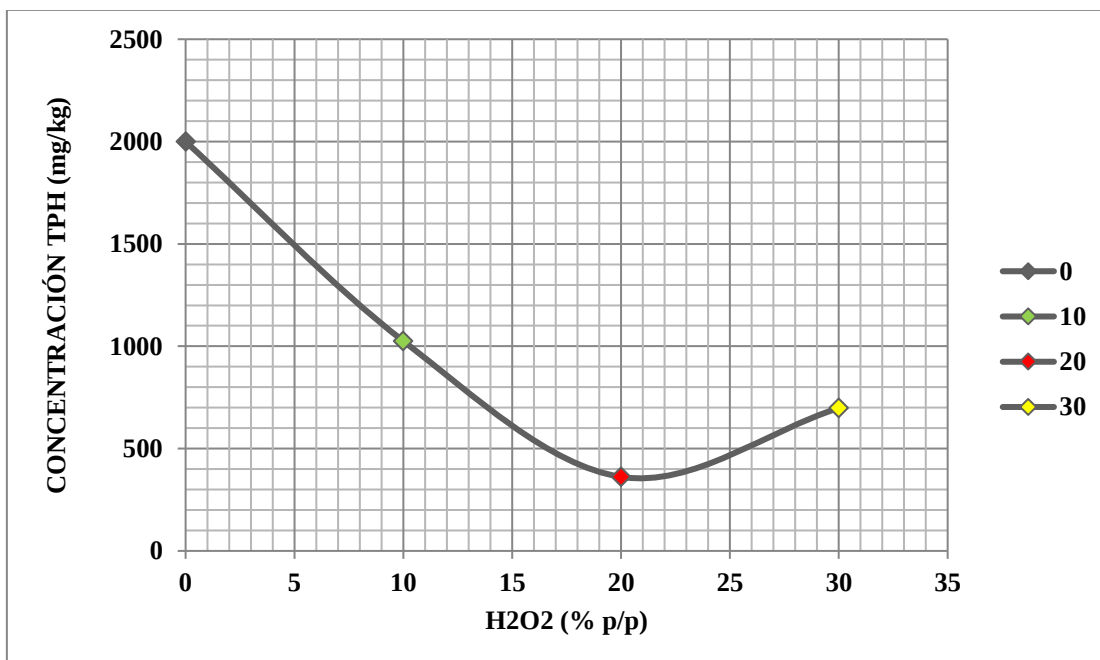


Gráfico 8. Valores promedio de TPH en Fenton 2 a concentraciones de H_2O_2 establecidas

Elaborado por: Michael Páez

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 3 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 2000 ppm (bajo rango), se obtuvieron remociones detalladas en la Tabla 13.

Tabla 13. Aplicación de Fenton 3 en la muestra de suelo contaminado a 2000 ppm

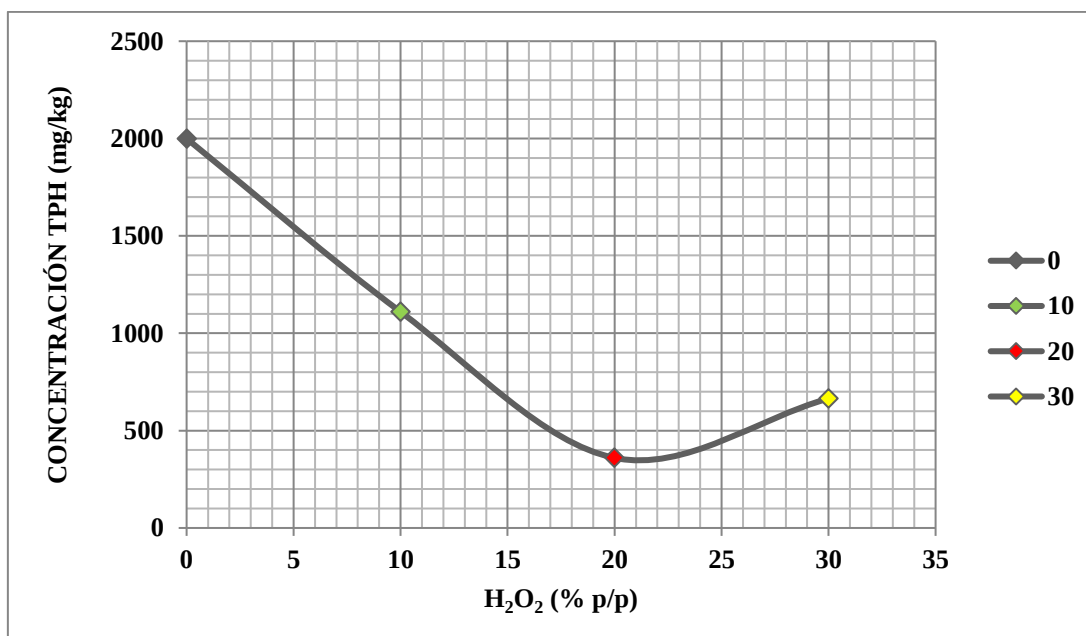
		Valor final de TPH (mg/kg)	
--	--	----------------------------	--

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio (mg/kg)
T1	10	1422,9	876,21	1243,8	759,7	1247	1110
T2	20	402,81	356,74	324,33	328,6	386,98	360
T3	30	585,84	531,88	788,63	594,82	824,01	665
MST	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	28,8	56,2	37,8	62,0	37,7	45
T2	20	79,8	82,2	83,8	83,6	80,6	82
T3	30	70,7	73,4	60,6	70,2	58,8	67

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 3, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H₂O₂. Para el T1 (H₂O₂ al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 45% de contaminante, para el T2 (H₂O₂ al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 82% de contaminante, y por último para el T3 (H₂O₂ al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 67% de contaminante. En el Gráfico 9 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.



EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Gráfico 9. Valores promedio de TPH en Fenton 3 a concentraciones de H₂O₂ establecidas

Elaborado por: **Michael Páez**

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 4 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 2000 ppm (bajo rango), se obtuvieron remociones detalladas en la Tabla 14.

Tabla 14. Aplicación de Fenton 4 en la muestra de suelo contaminado a 2000 ppm.

Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	1440,1	874,94	1349,7	779,01	791,05	1047
T2	20	408,92	389,36	377,65	394,77	321,48	378
T3	30	595,31	548,42	595,59	691,79	799,17	646
MST	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	27,9	56,2	32,5	61,0	60,4	48
T2	20	79,5	80,5	81,1	80,2	83,9	81
T3	30	70,2	72,5	70,2	65,4	60,0	68

Elaborado por: Michael Páez

En los datos obtenidos del experimento Fenton 4, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H₂O₂. Para el T1 (H₂O₂ al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 48% de contaminante, para el T2 (H₂O₂ al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 81% de contaminante, y por último para

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

el T1 (H_2O_2 al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 68% de contaminante.

En el Gráfico 10 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

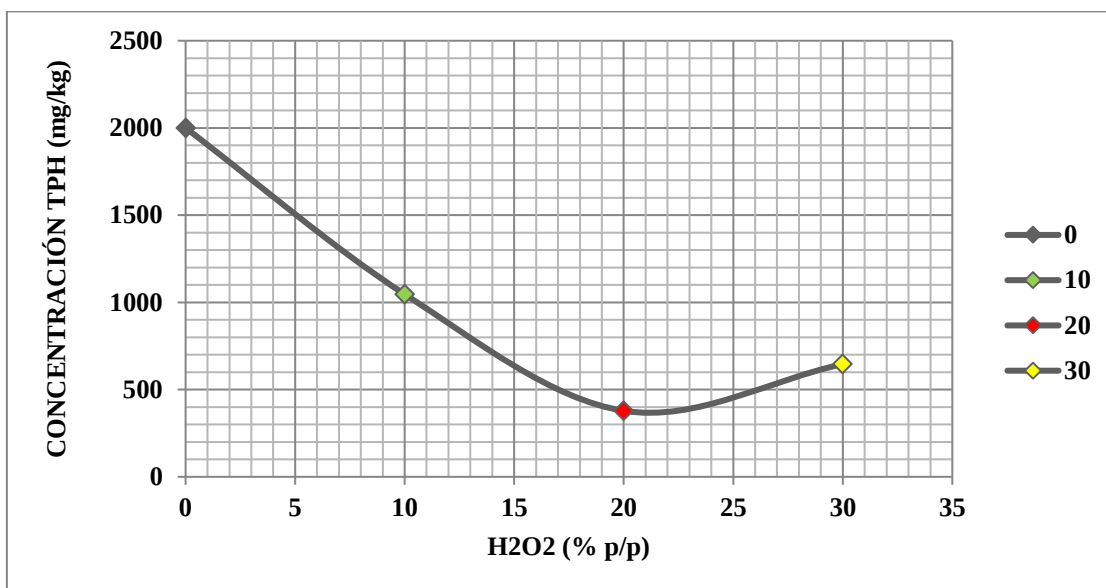


Gráfico 10. Valores promedio de TPH en Fenton 4 a concentraciones de H_2O_2 establecidas

Elaborado por: **Michael Páez**

En la aplicación de la reacción Fenton experimental 5 de los distintos tratamientos a la muestra de suelo contaminada con TPH inicial de 2000 ppm (bajo rango), se obtuvieron remociones detalladas en la Tabla 15.

Tabla 15. Aplicación de Fenton 5 en la muestra de suelo contaminado a 2000 ppm.

Tratamientos	H_2O_2 (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	1481,1	894,17	879,19	1252,89	864,33	1074
T2	20	404,99	398,62	505,8	322,87	387,56	404
T3	30	539,56	585,85	787,69	792,15	588,98	659
MST	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Tratamientos	H_2O_2 (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	25,9	55,2	56,0	37,3	56,7	46
T2	20	79,7	80,0	74,	83,8	80,6	80
T3	30	73,0	70,7	60,6	60,3	70,5	67

Elaborado por: Michael Páez

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

En los datos obtenidos del experimento Fenton 5, se puede observar que existe una reducción de TPH representativa en cada uno de los tratamientos a las concentraciones previamente establecidas de H_2O_2 . Para el T1 (H_2O_2 al 10% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 46% de contaminante, para el T2 (H_2O_2 al 20% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 80% de contaminante, y por último para el T3 (H_2O_2 al 30% p/p) se obtiene como promedio la reducción del 67% de contaminante. En el Gráfico 11 se puede observar la reducción promedio de TPH en cada tratamiento.

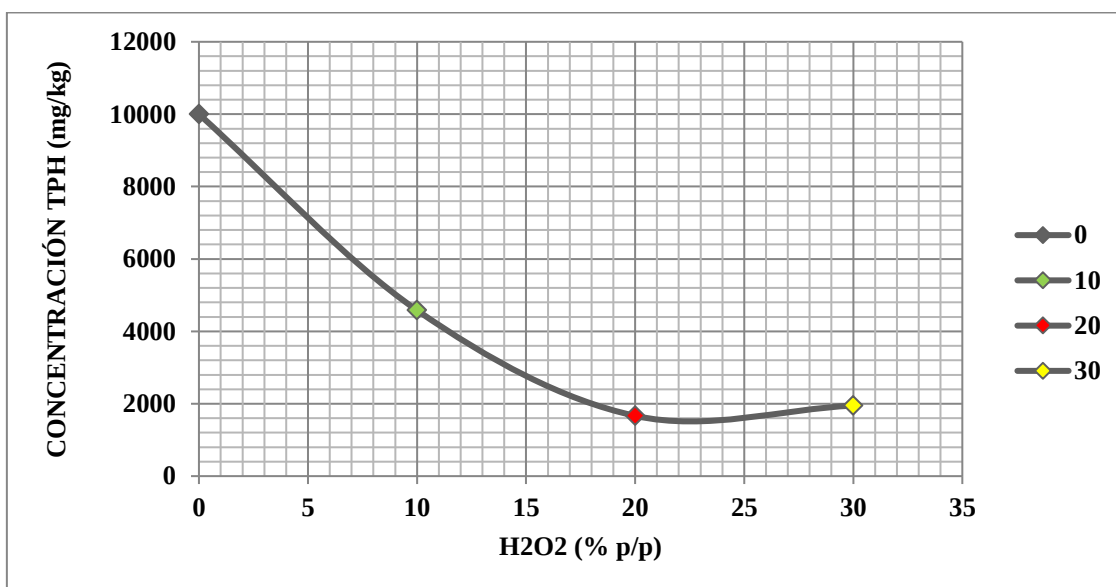


Gráfico 11. Valores promedio de TPH en Fenton 5 a concentraciones de H_2O_2 establecidas

Elaborado por: Michael Páez

El cumplimiento de la Normativa vigente (RAOHE 1215), para la muestra inicial de suelo con 2000 mg/kg (bajo rango) y sin previo tratamiento (MST), se ve expresado en el Gráfico 12; siendo considerado solamente el Límite máximo permisible para Ecosistemas Sensibles.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

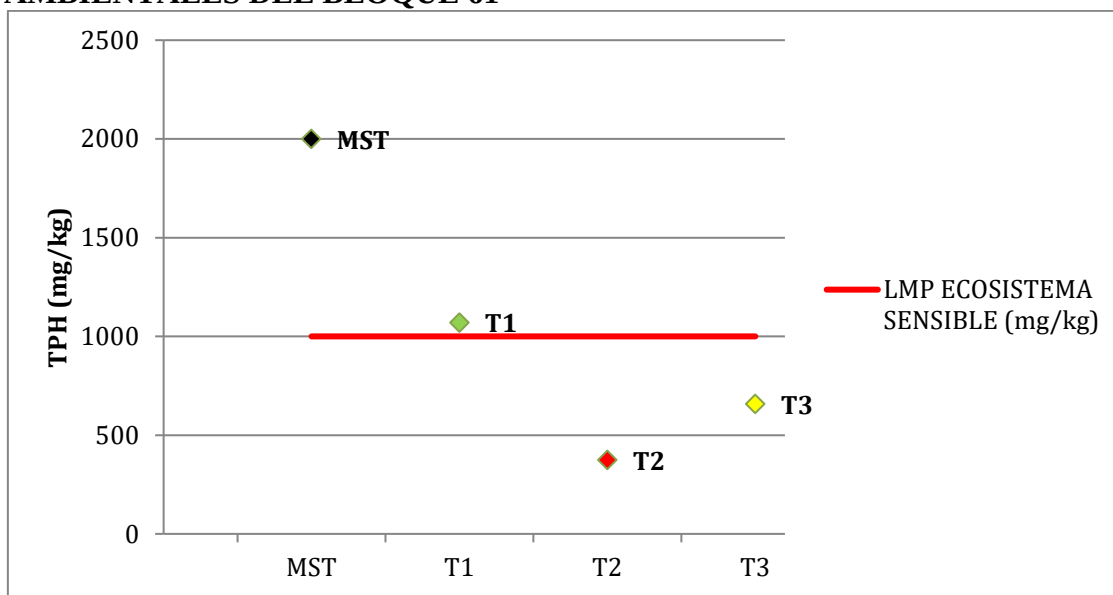


Gráfico 12. Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 2000 mg/kg.

Elaborado por: **Michael Páez**

En la Tabla 16 se puede observar el promedio de concentración de contaminante por tratamiento y su cumplimiento o no cumplimiento del RAOHE 1215. En el Gráfico 13 se comparan las remociones promedio a alto y bajo rango.

Tabla 16. Tratamientos realizados y su cumplimiento con el RAOHE 1215.

Tratamientos del Suelo (2000 ppm)			Concentración (mg/kg)		
			T1	T2	T3
Fenton 1			1093	368	620
Fenton 2			1025,60	361,87	698,11
Fenton 3			1109,92	359,89	665,03
Fenton 4			1046,96	378,43	646,05
Fenton 5			1074,33	403,96	658,84
Promedio			1070	374	658
Ecosistema Sensible	mg/kg	1000	No cumple	Cumple	Cumple

Elaborado por: Michael Páez

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

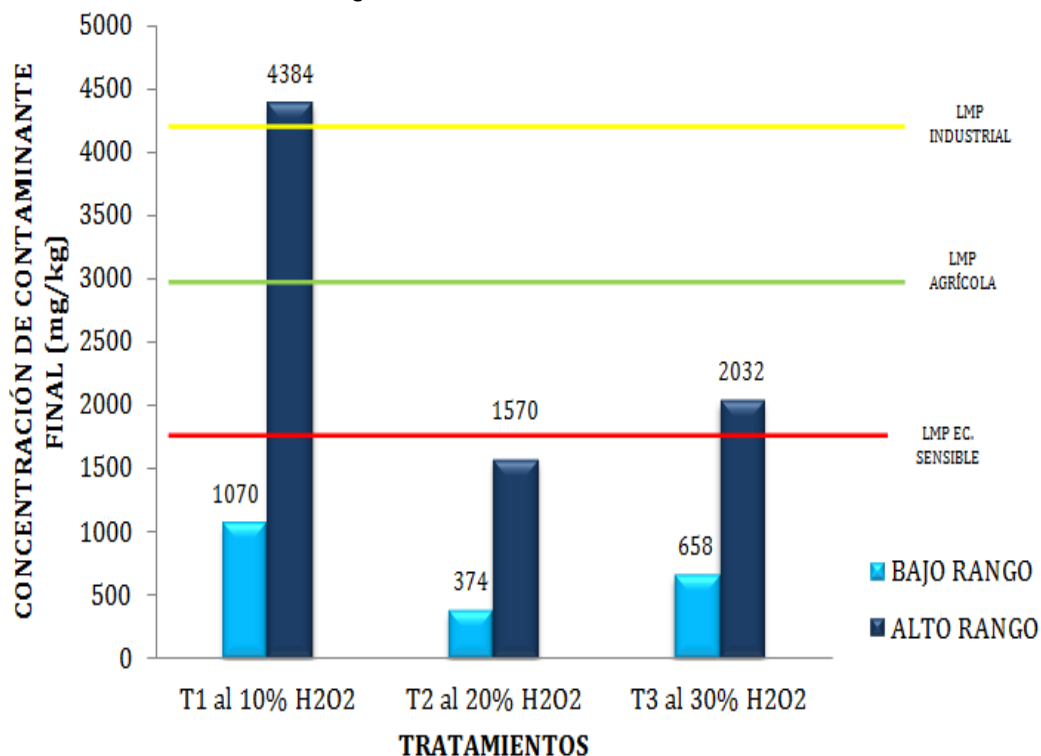


Gráfico 13. Comparación de los Tratamientos aplicados en Alto y Bajo rango.

Elaborado por: Michael Páez

DISCUSIÓN

Para el T1 (H_2O_2 al 10% p/p) aplicado al suelo contaminado con 10 000 mg/kg, no cumple con el Límite Máximo Permisible del RAOHE para Uso Industrial (<4000 mg/kg), Agrícola (<2500 mg/kg) y Ecosistema sensible (<1000 mg/kg), debido a que el valor promedio de los cinco tratamientos realizados de Fenton a dicho suelo, fue de 4384 mg/kg.

Para el T2 (H_2O_2 al 20% p/p) aplicado al suelo contaminado con 10 000 mg/kg, cumple con el Límite Máximo Permisible del RAOHE para Uso Industrial (<4000 mg/kg) y Agrícola (< 2500 mg/kg), mientras que para Ecosistema sensible (<1000 mg/kg) no cumple debido a que el valor promedio de los cinco tratamientos realizados de Fenton a dicho suelo, fue de 1570 mg/kg.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Para el T3 (H_2O_2 al 30% p/p) aplicado al suelo contaminado con 10 000 mg/kg, cumple con el Límite Máximo Permisible del RAOHE para Uso Industrial (<4000 mg/kg) y Agrícola (<2500 mg/kg), mientras que para Ecosistema sensible (<1000 mg/kg) no cumple debido a que el valor promedio de los cinco tratamientos realizados de Fenton a dicho suelo, fue de 2032 mg/kg.

Para el T1 (H_2O_2 al 10%) aplicado al suelo contaminado con 2000 mg/kg, no cumple con el Límite Máximo Permisible del RAOHE para Ecosistema sensible (<1000 mg/kg), debido a que el valor promedio de los cinco tratamientos realizados de Fenton a dicho suelo, fue de 1070 mg/kg.

Para el T2 (H_2O_2 al 20% p/p) aplicado al suelo contaminado con 2000 mg/kg, cumple con el Límite Máximo Permisible del RAOHE para Ecosistema sensible (<1000 mg/kg) cumple debido a que el valor promedio de los cinco tratamientos realizados de Fenton a dicho suelo, fue de 374 mg/kg.

Para el T3 (H_2O_2 al 30% p/p) aplicado al suelo contaminado con 2000 mg/kg, cumple con el Límite Máximo Permisible del RAOHE para Ecosistema sensible (<1000 mg/kg) cumple debido a que el valor promedio de los cinco tratamientos realizados de Fenton a dicho suelo, fue de 658 mg/kg.

Se observa que el T2 y T3 cumplen con el Límite máximo permisible para Ecosistema Sensible; el T1 no lo cumple. Los resultados de laboratorio evidencian la efectividad del proceso de oxidación, y que técnicas distintas como compostaje o bioestimulación, permiten la eliminación del hidrocarburo presente en el suelo, pero tardan demasiado en hacerlo (> 6 meses); por otro lado, se identifica que los tratamientos químicos realizados requieren un período relativamente corto, de 3-5 días.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Para estudiar la influencia de la concentración de oxidante, se tomaron en cuenta tres tratamientos distintos, se evaluó la variación de la concentración de peróxido de hidrógeno sobre el suelo, manteniendo fijas las concentraciones iniciales del catalizador (sulfato ferroso heptahidratado). Se observó que la relación Concentración de Oxidante/TPH_{final} no es directamente proporcional, debido a que el tratamiento 1 y 3 con peróxido de hidrógeno al 10% p/p y al 30 % p/p respectivamente, remueven el contaminante en menor proporción que el tratamiento 2 con peróxido de hidrógeno al 20 % p/p.

CONCLUSIONES

El reactivo Fenton demostró ser eficiente en la eliminación de hidrocarburos de suelos contaminados con petróleo, especialmente en el tratamiento al 20% p/p de peróxido de hidrógeno. Se logró una reducción de hidrocarburos de un 86% en 4 días, lo que confirma la efectividad del oxidante químico utilizado en términos de tiempo y remoción de hidrocarburos.

La aplicación del tratamiento al 10% p/p de peróxido de hidrógeno presenta menor eficacia, debido a que a pesar de que su eficiencia de remoción de TPH es del 56%, el contenido final de contaminante no cumple con los límites permisibles vigentes para ningún tipo de uso de suelo.

El costo del tratamiento es aproximadamente 267 USD/m³, siendo este elevado en relación a tratamientos biológicos, pero con menores tiempos de aplicación.

A pesar de que los valores de remoción del tratamiento 1 y 3 son cercanos en sus porcentajes, se denota una optimización de la reacción identificando que, el peróxido de hidrogeno al 20% p/p es una alternativa viable en remediación de pasivos; y en el caso de

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

esta investigación, representa la mejor opción para el tratamiento de un suelo contaminado con crudo a escala de laboratorio, eliminando un 86% de TPH.

La aplicación del tratamiento 2 (H_2O_2 al 20% p/p) y 3 (H_2O_2 al 30% p/p) permite cumplir los límites establecidos por el RAHOE 1215 para uso de suelo, teniendo valores menores a 2500 ppm en ambos tratamientos, cumpliendo el límite de TPH en suelos para uso agrícola e industrial, mientras que para ecosistema sensible fue necesario la realización de una segunda aplicación del tratamiento Fenton. El tratamiento 1 (H_2O_2 al 10% p/p) no cumplió con ninguno de los límites establecidos por la normativa, siendo el valor final obtenido superior a 4000 ppm.

RECOMENDACIONES

Combinar la oxidación Fenton con la aplicación de quelantes, para mejorar la disposición del hierro en la reacción, o a su vez usar surfactantes para remover el contaminante libre del suelo. Añadir procesos de separación de fases para identificar la posible recuperación del hidrocarburo en suelo.

Aplicar la oxidación Fenton a escala real como prueba piloto para determinar la eficiencia en campo, con volúmenes mayores de suelo y/o contaminante, ya sea *in situ* o *ex situ*.

Para el caso de una remediación en campo es factible usar procesos previos a la adición del oxidante, como por ejemplo la extracción multifásica del hidrocarburo libre en el suelo o a su vez un lavado del mismo con adición de surfactantes.

Mejorar el proceso de adición del oxidante, para intensificar el contacto entre el oxidante y el suelo contaminado, ya sea mediante goteo o ducha.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

Literatura citada

- Becerra, S., E. Paichard, & Sturma, A. (2013). VIVIR CON LA CONTAMINACIÓN PETROLERA EN EL SANITARIO Y CAPACIDAD DE RESPUESTA. *Revista Lider*, 23, 102–120.
- Beltrán Pérez, C., Darío, Ó., Giraldo, B., Ivette, L., Alexander, É., Gallo, C., & Alonso, S. (2013). Tecnologías de Tratamiento para la tierra Fuller contaminada con Aceite Dieléctrico. *Revista EIA*, 10, 33–48. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149228694004>
- Bogan, B. W., Trbovic, V., & Paterek, J. R. (2003). Inclusion of vegetable oils in Fenton's chemistry for remediation of PAH-contaminated soils. *Chemosphere*, 50(1), 15–21. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00490-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00490-3)
- EP PETROECUADOR. (2013). *El Petróleo en el Ecuador. La Nueva Era*.
- Farzadkia, M., Dehghani, M., & Moafian, M. (2014). The effects of Fenton process on the removal of petroleum hydrocarbons from oily sludge in Shiraz oil refinery, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 31. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-31>
- Flores, S., & Mendoza, J. (2017). *Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos por derrames de la estación de servicio en el campamento de Guarumales-Celec*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27211/1/tesis.pdf>
- Flotron, V., Delteil, C., Padellec, Y., & Camel, V. (2005). Removal of sorbed polycyclic aromatic hydrocarbons from soil, sludge and sediment samples using the Fenton's reagent process. *Chemosphere*, 59(10), 1427–1437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.065>
- Gomez, F. (2014). *Assessment and Optimization of Ex-Situ Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil under Cold Temperature Conditions*. Retrieved from https://ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/30565/3/Gomez_Francisco_2014_Thesis.pdf
- Homem, V., Dias, Z., Santos, L., & Alves, A. (2009). Preliminary Feasibility Study of Benzo(a)Pyrene Oxidative Degradation by Fenton Treatment. *Journal of Environmental and Public Health*, 2009, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2009/149034>
- Jung, Y. S., Lim, W. T., Park, J., & Kim, Y. (2009). Effect of pH on Fenton and Fenton-like oxidation. *Environmental Technology*, 30(2), 183–190. <https://doi.org/10.1080/09593330802468848>
- Malíková, P., Hajduková, J., & Nezvalová, L. (2009). OXIDATION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS BY FENTON REACTION OXIDACE POLYCYKlických Aromatických Uhlíkovodíků FENTONOVOU REAKCÍ. *23 GeoScience Engineering, LV(4)*. Retrieved from <http://gse.vsb.cz>
- Martens, D. A., & Frankenberger, W. T. (1995). Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil treated with an advanced oxidative process — Fenton's Reagent. *Journal of Soil Contamination*, 4(2), 175–190. <https://doi.org/10.1080/15320389509383491>
- Méndez, R., Pietrogiovanna, A., Santos, B., Sauri, M., Giacomán Vallejos, G., & Borges, E. (2010). *Determinación de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-Adsorción*. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v26n3/v26n3a4.pdf>
- Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related

EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS AMBIENTALES DEL BLOQUE 61

- Chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(1), 1–84. <https://doi.org/10.1080/10643380500326564>
- Plata Quinteros, L. S. (2012). *Evaluación teórica de la remoción y tiempo de acción de tres técnicas de biorremediación, para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos*. Retrieved from https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2075/digital_24402.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador. (2001). Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/RAOHE-DECRETO-EJECUTIVO-1215.pdf>
- Riesco, R. A. (2012). *Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos*. Retrieved from https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_206396/PFC_RaquelAlonsoRiesco.pdf
- Salomón, F. (2016). *Biorremediación de suelos contaminados con Fluidos de producción* (Universidad de Guayaquil). Retrieved from <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/35522/1/Caso de Estudio Remediación de Suelos Contaminados.pdf>
- Siegrist, R. L., Crimi, M., Simpkin, T. J., & Borden, R. C. (2011). *In situ chemical oxidation for groundwater remediation*. Springer.
- Villacreces, L. (2012). *Evaluación a nivel de laboratorio de oxidación química asistida con detergente para tratar suelos contaminados con petróleo*.
- Villalobos, M., Avila-Forcada, A. P., & Gutierrez-Ruiz, M. E. (2008). An improved gravimetric method to determine total petroleum hydrocarbons in contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 194(1–4), 151–161. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9704-1>

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO FENTON APLICADO A SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE PASIVOS
AMBIENTALES DEL BLOQUE 61**