

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK



Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales

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

Autor: Michael Andrés Páez Hoffmann

Director del Proyecto: Katty Coral

Quito, 01 de Agosto 2019

Tabla de Contenidos

- Introducción
- Fundamentación teórica
- Objetivos
- Metodología
- Resultados
- Conclusiones
- Bibliografía

Problema de Investigación

Contaminación del Suelo

Procesos de industrias hidrocarburíferas



Obtenido de: <https://es.123rf.com>

Pasivos Ambientales

400.000 m³ de suelo contaminado acopiado en plataformas y más de 2000 pasivos esperando su remediación.



Obtenido de: <https://www.ecoportal.net>

Tratamiento de suelos

Eliminación del contaminante

TPH

Períodos extensos



Obtenido de: <https://www.eppetroecuador.ec>

¿Se puede reducir tiempos de remediación mediante la aplicación del método Fenton en suelos contaminados con hidrocarburos?

Fundamentación Teórica

Tipos de Tratamientos

Tratamientos Biológicos

Tratamientos Fisicoquímicos



Obtenido de: <https://www.eppetroecuador.ec>



Obtenido de: <https://www.eppetroecuador.ec>

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
Biorremediación	Mayor a 6 meses	150
Fitorremediación	Mayor a 6 meses	120
Lavado de suelos	4 meses	35
Inyección de aire	2 meses	25

Fuente: Toledo (2009).

Elaborado por: Michael Páez

Fundamentación Teórica

Estudios realizados de Fenton.

Removal of sorbed polycyclic aromatic hydrocarbons from soil, sludge and sediment samples using the Fenton's reagent process

Authors: V. Flotron, C. Delteil, Y. Padellec et al.

Eliminación de HAPs (50%-80%)

Evaluación a nivel de laboratorio de oxidación química asistida con detergente para tratar suelos contaminados con petróleo

Authors: L. Villacreces

H₂O₂ de 5% p/p y 15% p/p, tuvo como resultado remociones de TPH representativas entre 21% y 70%. (~~Ácido cítrico y pH~~).

In situ chemical oxidation for groundwater remediation

Authors: R. Siegrist, M. Crimi, T. Simpkin et al.

Adición de oxidantes químicos reduce la carga bacteriana; sin embargo, se restaura con el tiempo.

Fundamentación Teórica

Tabla 2. (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 policíclicos	HAPs	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

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

Elaborado por: Michael Páez

Hipótesis

- *La aplicación del método Fenton reduce la concentración de TPH en suelos contaminados con hidrocarburos en tiempos reducidos, en relación a tratamientos biológicos vigentes.*

Objetivos

- **General**

- Evaluar el método Fenton como proceso de oxidación avanzada mediante su aplicación a suelos contaminados con hidrocarburos, para el cumplimiento de la normativa vigente y la reducción de tiempos de remediación.

- **Específicos**

- Identificar la dosis óptima de la reacción Fenton mediante pruebas experimentales.
- Evaluar la concentración de TPH del suelo problema utilizando el método Fenton para la identificación de su eficiencia.
- Establecer costos del tratamiento de oxidación avanzada Fenton mediante el análisis económico, para la identificación de su viabilidad.

Recolección y preparación de la muestra inicial

Muestra de suelo remediado del Bloque 61 intervenido por una empresa petrolera.

Contaminación Inicial de 10000 y 2000 ppm de crudo de Lago Agrio.

Análisis inicial de TPH mediante el método EPA 418 Total Hydrocarbons Analyzer utilizando el equipo HACH DR 2800 y curva de calibración respectiva (10 000 ppm y 2000 ppm).

Curvas de calibración en HACH DR 2800 a una longitud de onda de 450 nm

Alto rango: 10 000 ppm, 8000 ppm, 5000 ppm, 3000 ppm y 1000 ppm.

Bajo rango: 2000 ppm, 1500 ppm, 1000 ppm y 500 ppm.

Métodos

Plan de desarrollo

El experimento tuvo como factor a considerar principalmente la concentración de H_2O_2 .

La muestra de suelo contaminada con hidrocarburos fue sometida a diferentes concentraciones de agua oxigenada (10, 20 y 30 %p/p).

Las concentraciones de peróxido de hidrógeno fueron seleccionadas en relación al análisis de la información bibliográfica existente.

RANGO: 5-50% p/p H_2O_2

Tabla 3. Porcentaje de concentración de los tratamientos aplicados.

Tratamientos	H_2O_2 (%p/p)	Volumen H_2O_2 (mL)	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (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

Experimentos en reactores Reacción Fenton

1 kg de suelo contaminado con petróleo a 10000 ppm y 1 kg a 2000 ppm, los cual fue dividido en reactores (250 g).

Consecuentemente se añadieron los reactivos en cada una de las muestras para dar paso a la reacción.

50 mL de H_2O_2 con 5 mL de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$.



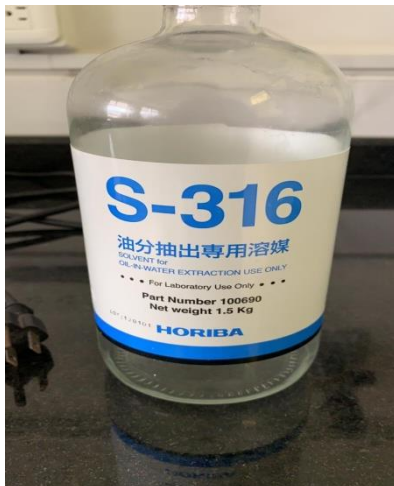
Fotografía tomada por: Michael Páez

Métodos

Experimento en viales para la Extracción EPA 418

Se aplicó 10 mL del reactivo S-316 marca HORIBA para la extracción del contaminante y se lo agitó durante 1 minuto.

Se realizó la filtración del mismo para evitar sólidos existentes por la agitación y minimizar así errores de medición; posteriormente el extractante fue recolectado en viales para ser medido en HACH DR 2800.



Fotografías tomadas por: Michael Páez

Determinación de la eficiencia de remoción

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

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

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

Repeticiones realizadas y aplicación de Hanssen

Se realizó cinco repeticiones de cada tratamiento para validar los resultados, y cinco repeticiones de la reacción Fenton, con un total de 150 valores de TPH.

Se realizó además el Método Hanssen para ver la correlación, dispersión y error de los datos experimentales en relación a los datos arrojados por Hanssen.

Resultados

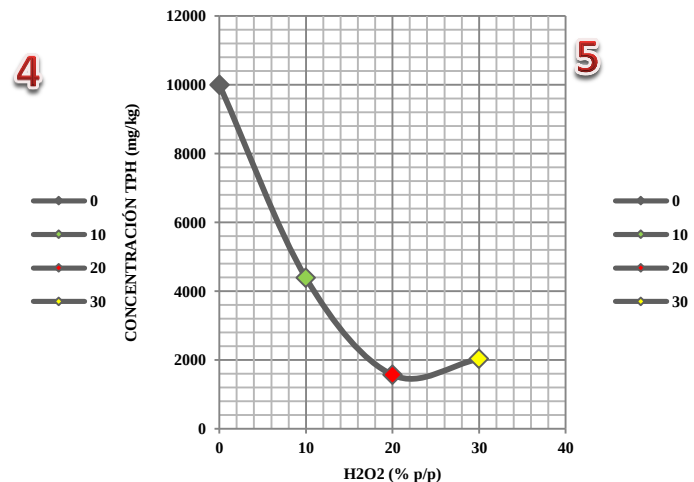
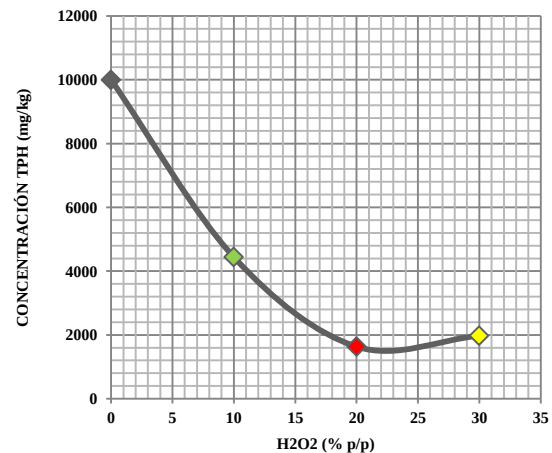
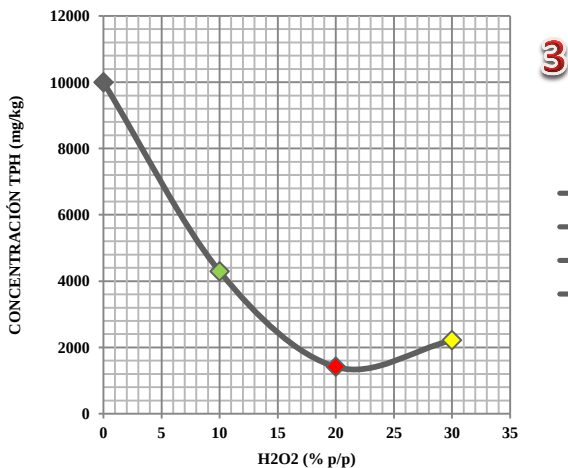
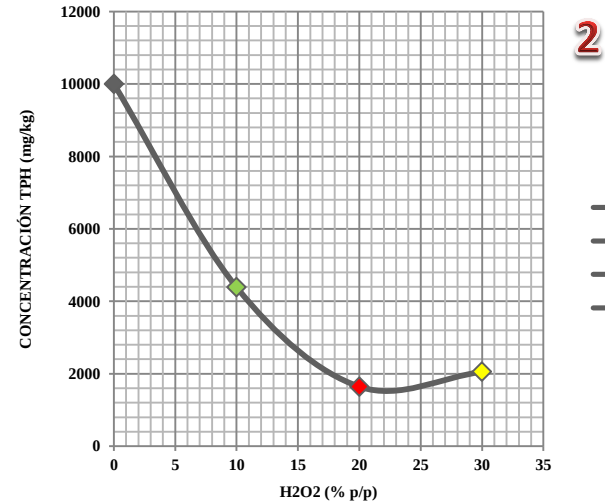
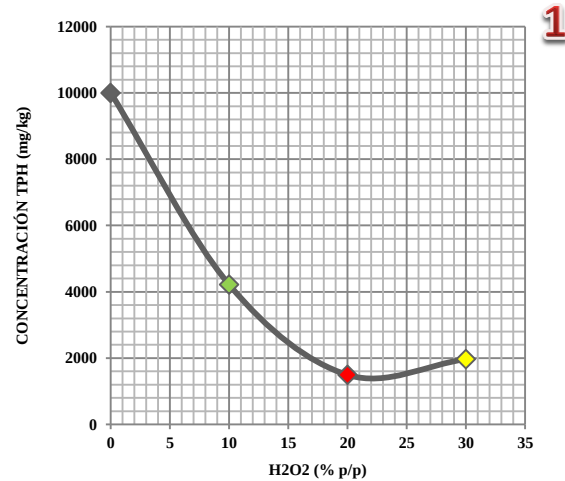
Datos obtenidos del suelo contaminado a 10 000 mg/kg

Tabla 4. Resultados obtenidos en la fase de laboratorio en suelo a 10000 mg/kg de Hidrocarburo.

Fenton 1							
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
Fenton 2							
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	83,3	82,8	84
T3	30	76,9	79	81	81,5	79,1	79
Fenton 3							
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	55,1	57,8	57
T2	20	85,7	85	87,6	83,3	87,8	86
T3	30	75,6	79,8	77,5	80,4	76,1	78
Fenton 4							
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	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
Fenton 5							
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	55	54
T2	20	80,5	84,2	84,2	84	83,8	83
T3	30	79,5	76,2	82,7	82,3	81,8	81

Resultados

Comportamiento de la oxidación Fenton en los Tratamientos realizados en suelo contaminado a 10 000 mg/kg



Resultados

Valores promedio de TPH a concentraciones de H_2O_2 de 10, 20 y 30 % p/p en muestra de suelo a 10 000 mg/kg

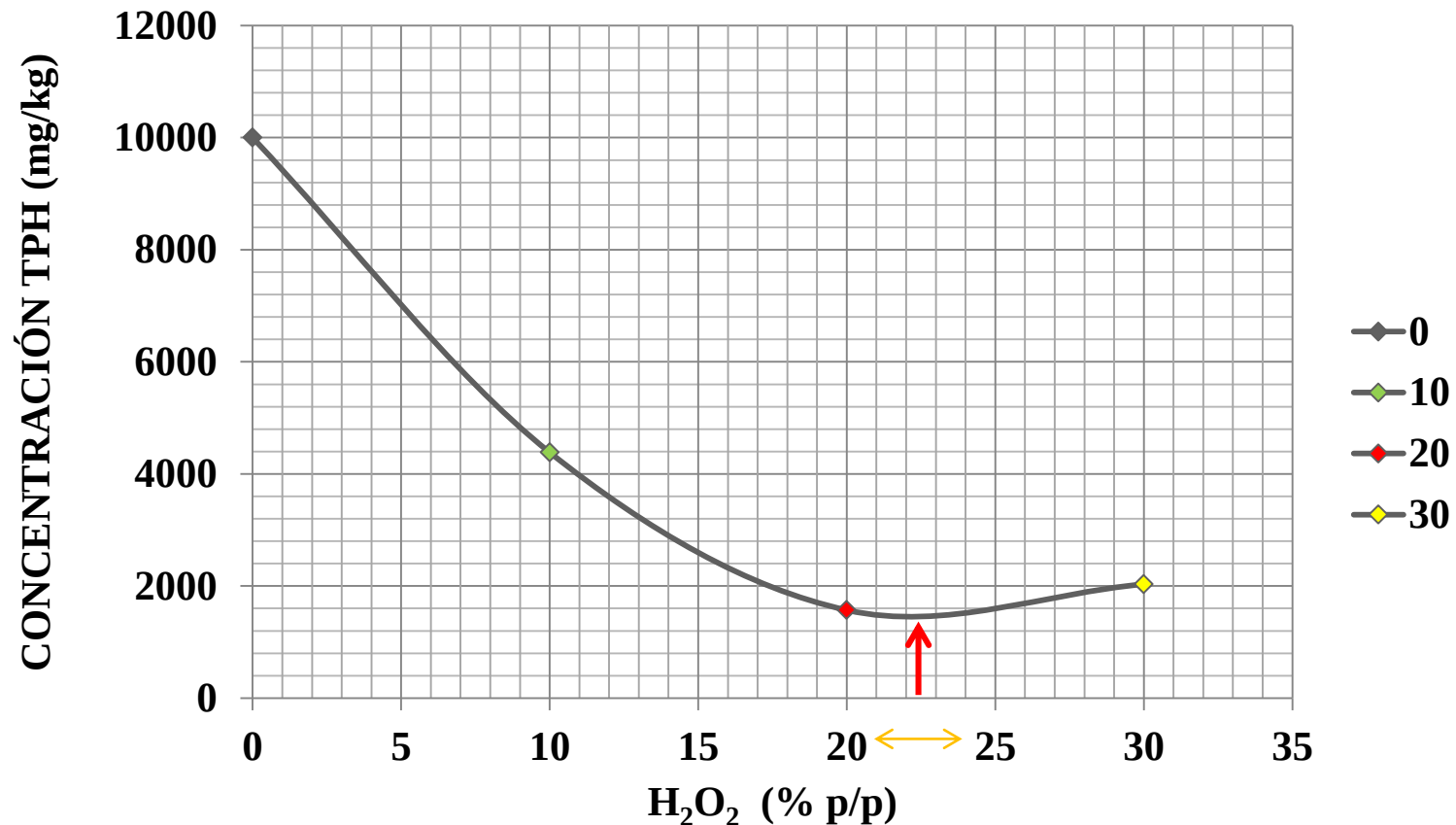


Figura 1. Patrón de curva en la reducción de TPH aplicado el método Fenton a concentraciones de H_2O_2 establecidas en suelo a 10 000 mg/kg

Elaborado por: Michael Páez

Resultados

Porcentaje de remoción para muestra de suelo a 10000 mg/kg

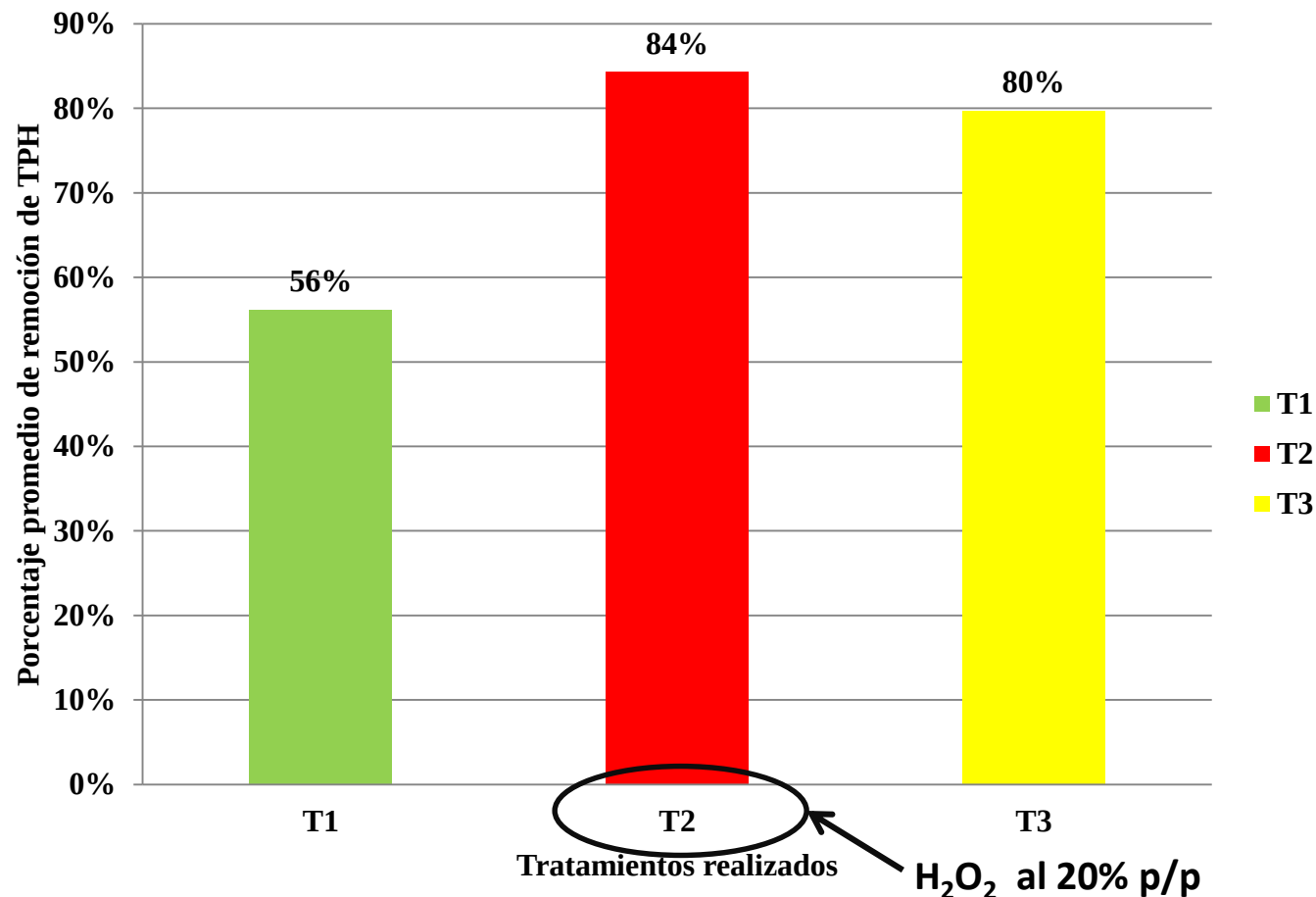


Figura 2. Porcentaje de reducción de TPH en suelo a 10 000 mg/kg

Resultados

Datos obtenidos del suelo contaminado a 2000 mg/kg

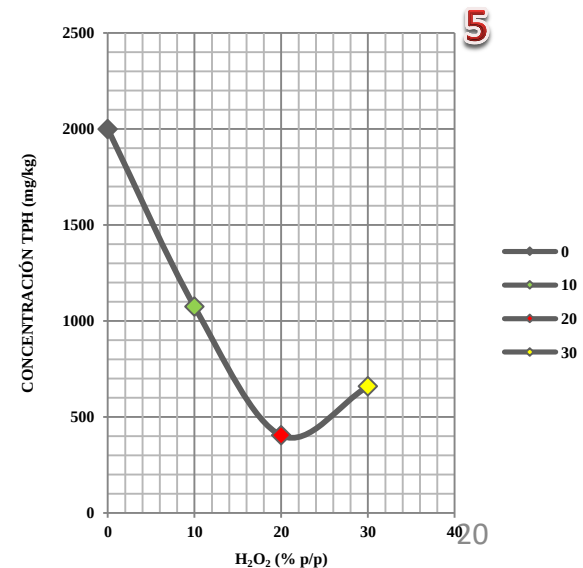
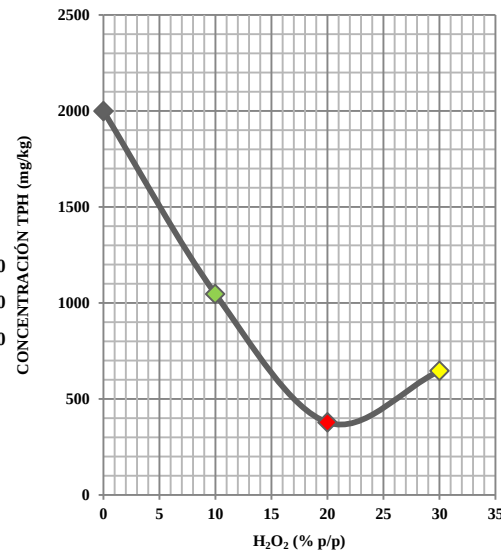
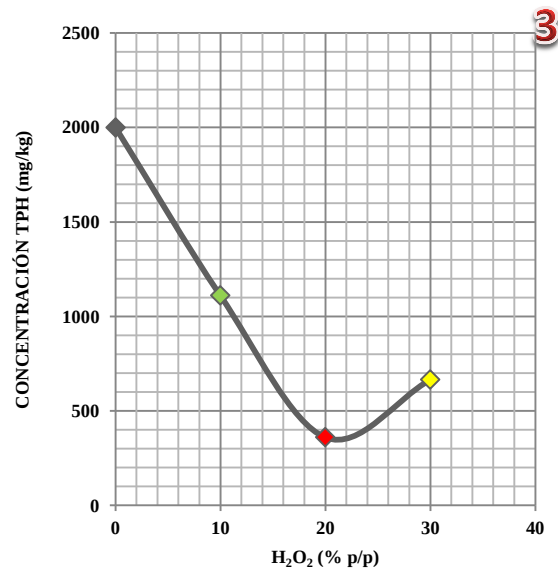
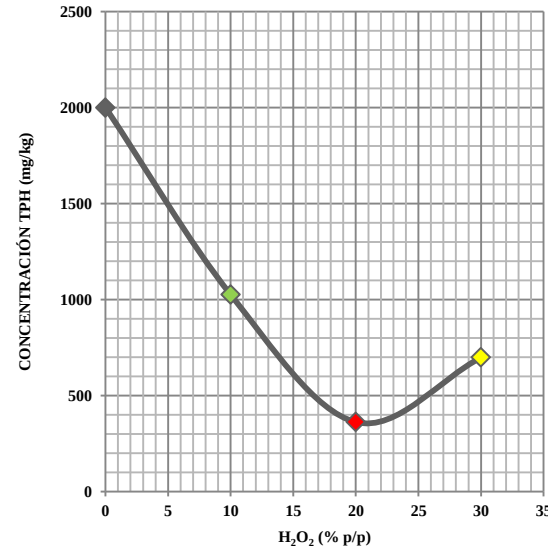
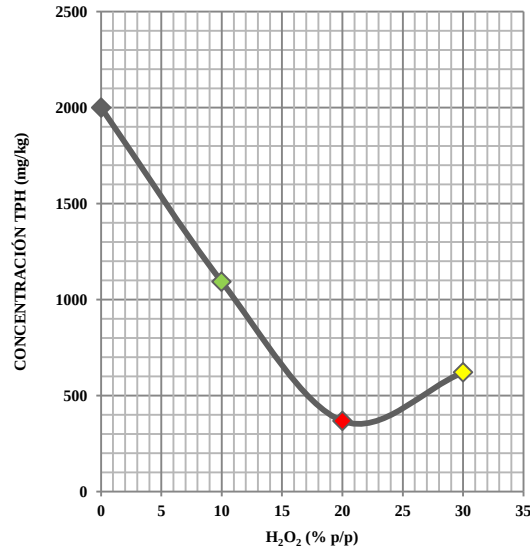
Tabla 5. Resultados obtenidos en la fase de laboratorio en suelo a 2000 mg/kg de Hidrocarburo.

FENTON 1							
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	45
T2	20	80,5	84	82,4	80,9	80,3	82
T3	30	70,9	73	70,8	59,9	70,3	69
FENTON 2							
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	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
FENTON 3							
Tratamientos	H ₂ O ₂ (%p/p)	Valor final de TPH (mg/kg)					Promedio (mg/kg)
		R1	R2	R3	R4	R5	
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	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
FENTON 4							
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	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	68
FENTON 5							
Tratamientos	H ₂ O 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 ₂ O ₂ (%p/p)	%Remoción					Promedio (%)
		R1	R2	R3	R4	R5	
T1	10	25,9	55,2	56	37,3	56,7	46
T2	20	79,7	80	74	83,8	80,6	80
T3	30	73	70,7	60,6	60,3	70,5	67

Elaborado por: Michael Páez

Resultados

Comportamiento de la oxidación Fenton en los Tratamientos realizados en suelo contaminado a 2000 mg/kg



Resultados

Valores promedio de TPH a concentraciones de H_2O_2 de 10, 20 y 30 % p/p en muestra de suelo a 2 000 mg/kg

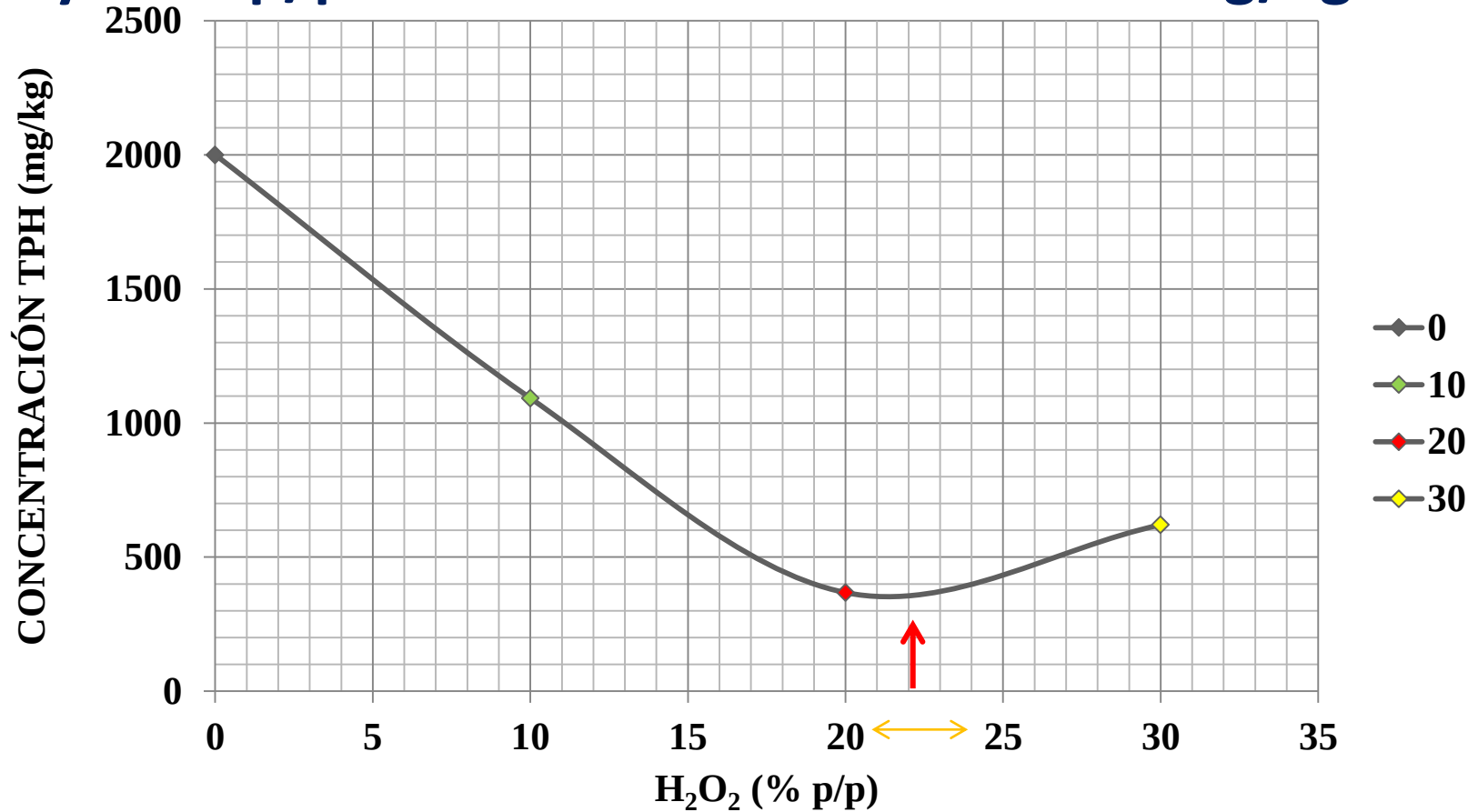


Figura 3. Patrón de curva en la reducción de TPH aplicado el método Fenton a concentraciones de H_2O_2 establecidas en suelo a 2000 mg/kg

Elaborado por: Michael Páez

Resultados

Porcentaje de remoción para muestra de suelo a 2000 mg/kg

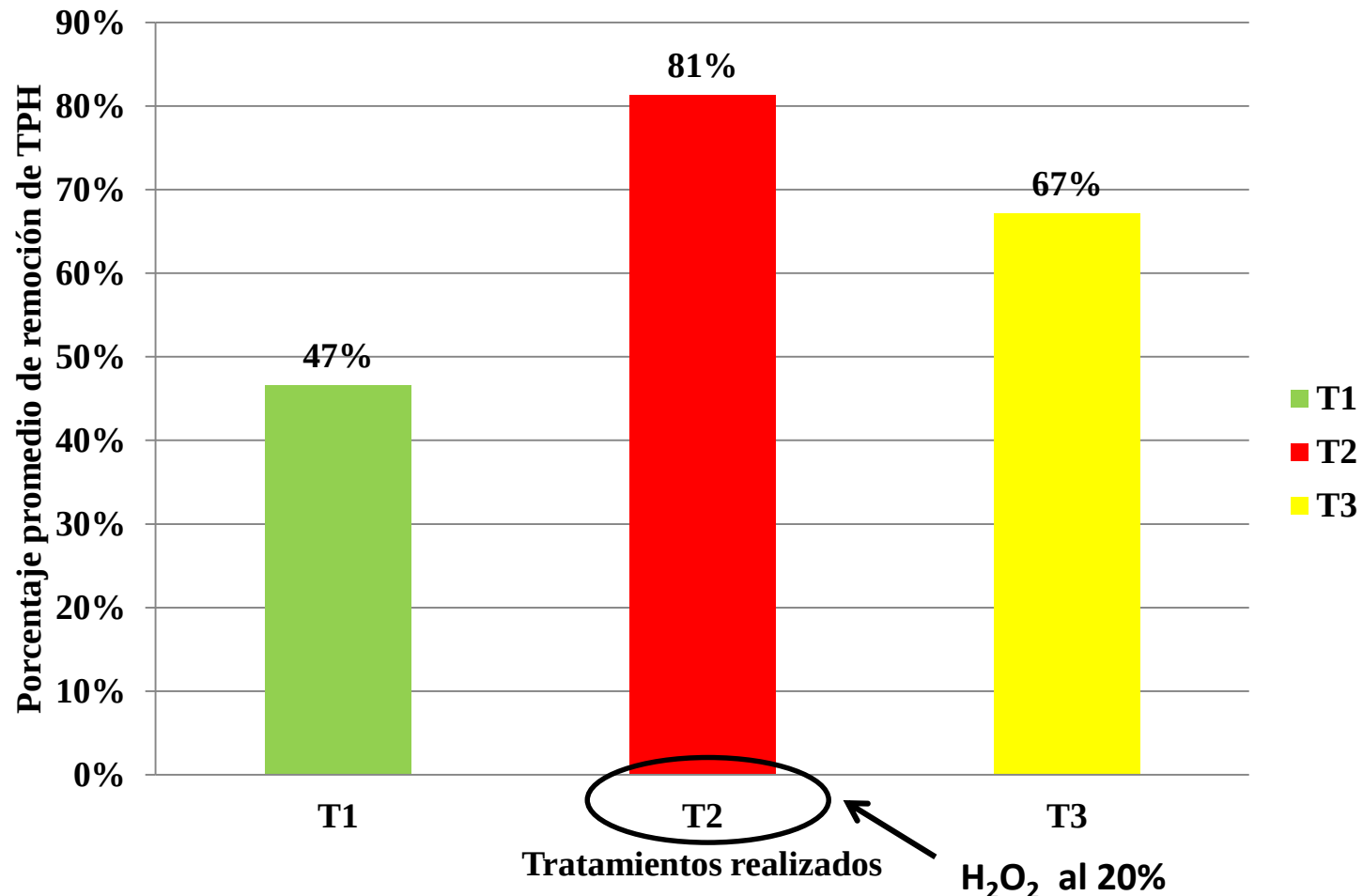


Figura 4. Porcentaje de reducción de TPH en suelo a 2000 mg/kg

Tratamientos realizados y cumplimiento con Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 10 000 mg/kg.

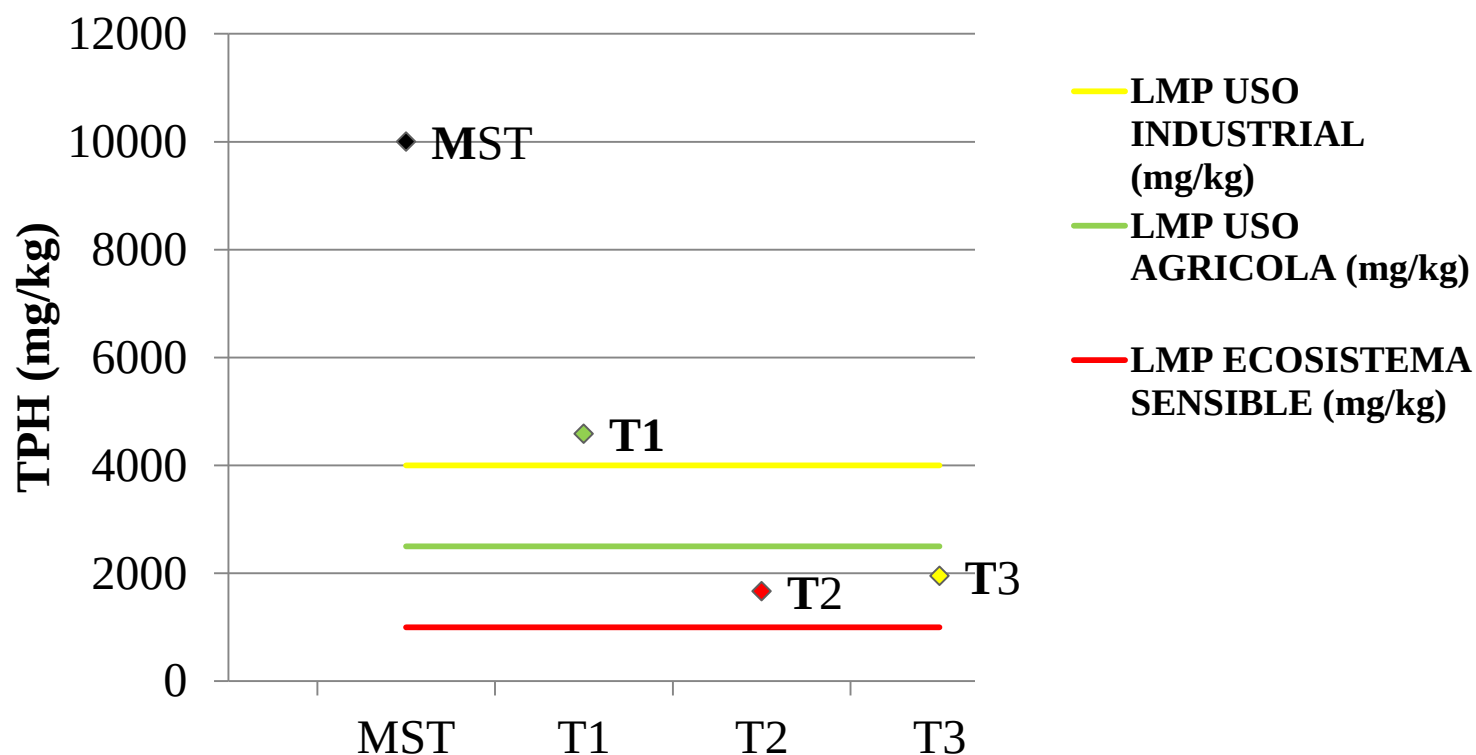


Figura 5. Tratamientos que cumplen o no con Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 10 000 mg/kg.

Tabla 6. TPH final de tratamientos realizados y cumplimiento con Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 10 000 mg/kg.

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

TPH final de tratamientos realizados y cumplimiento con Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 2000 mg/kg.

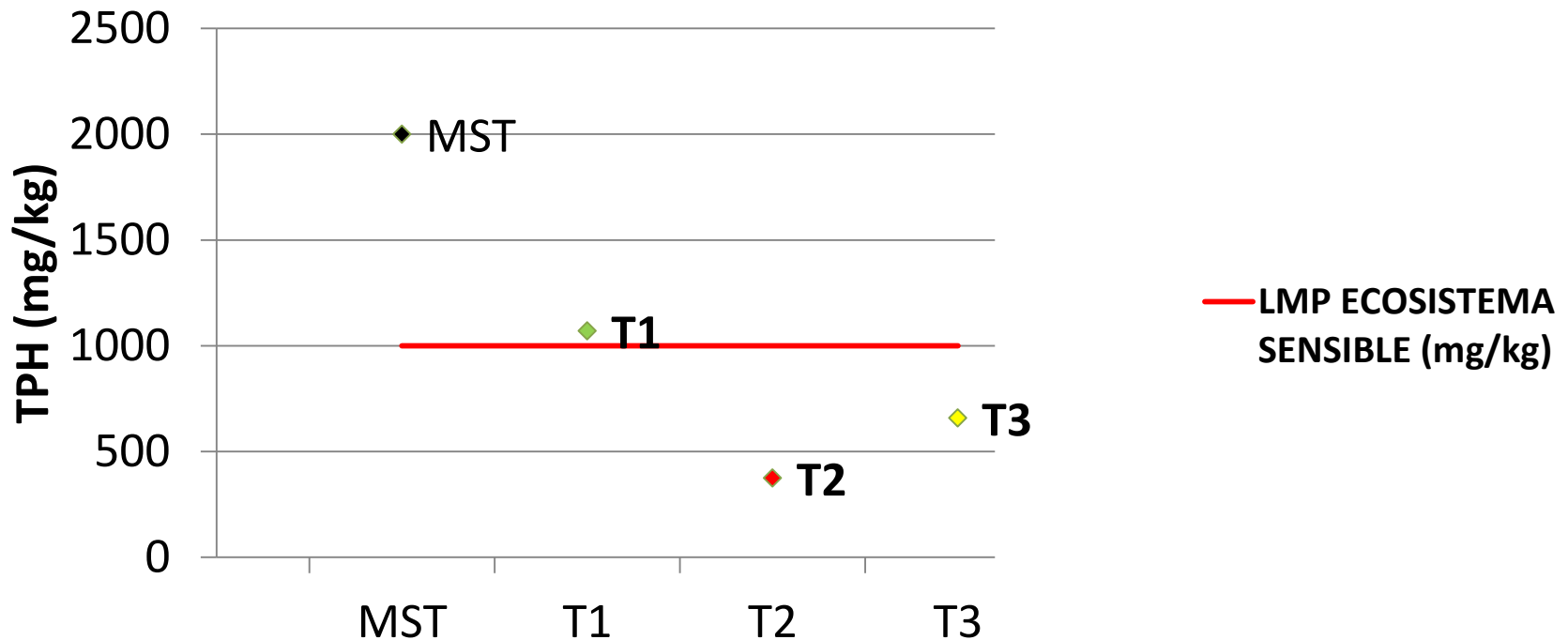


Figura 6. Cumplimiento con Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 2000 mg/kg.

Elaborado por: Michael Páez

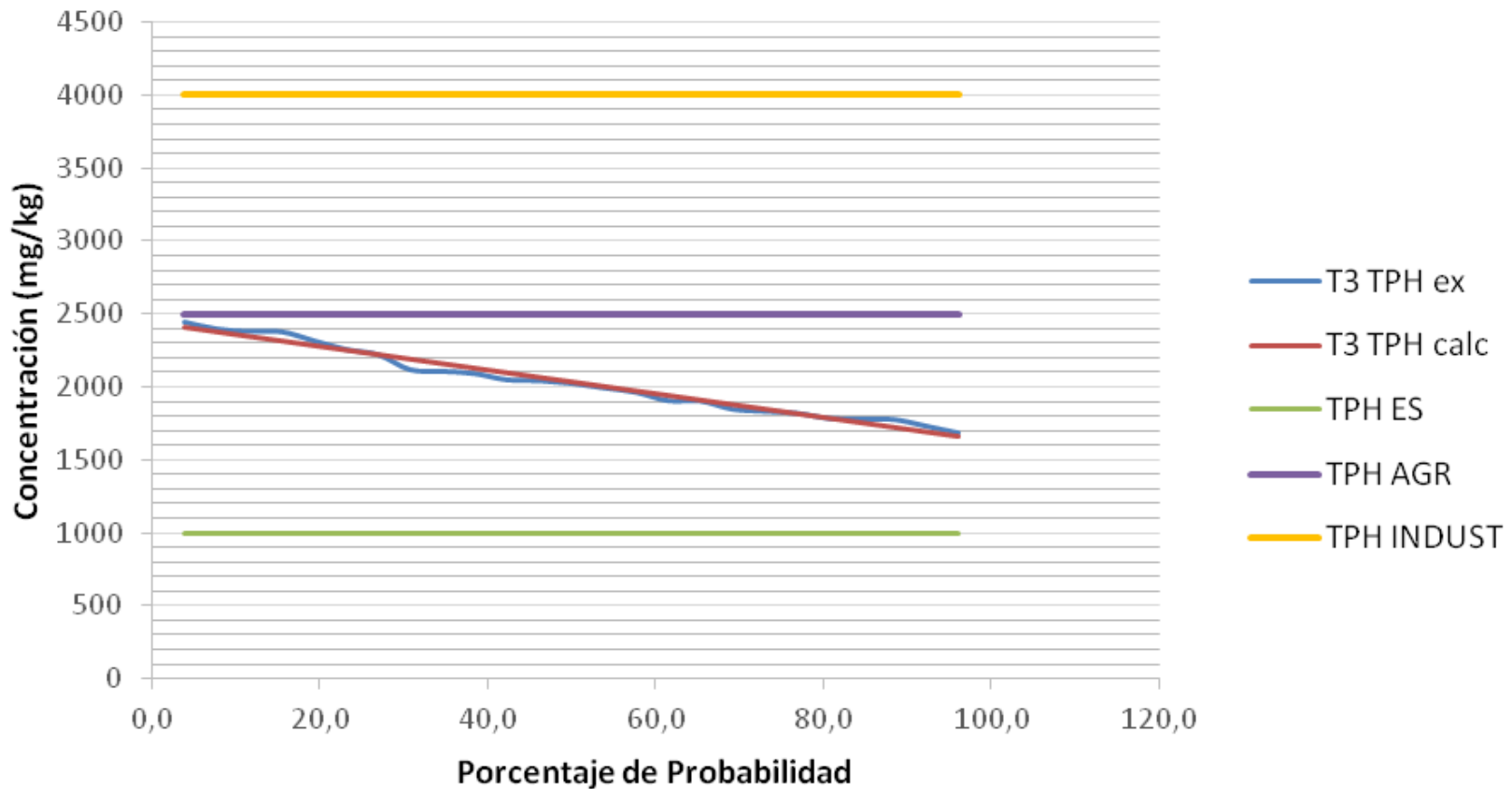
Tabla 7. TPH final de tratamientos realizados y cumplimiento con Límites Máximos Permisibles RAOHE 1215 en el suelo a 2000 mg/kg.

Tratamientos del Suelo (2000 ppm)			Concentración (mg/kg)		
			T1	T2	T3
Fenton 1			1093	368	620
Fenton 2			1025,602	361,872	698,114
Fenton 3			1109,922	359,892	665,036
Fenton 4			1046,96	378,436	646,056
Fenton 5			1074,336	403,968	658,846
Promedio			1070	374	658
Ecosistema Sensible	mg/kg	1000	No cumple	Cumple	Cumple

Resultados

Hanssen Suelo a 10 000 ppm

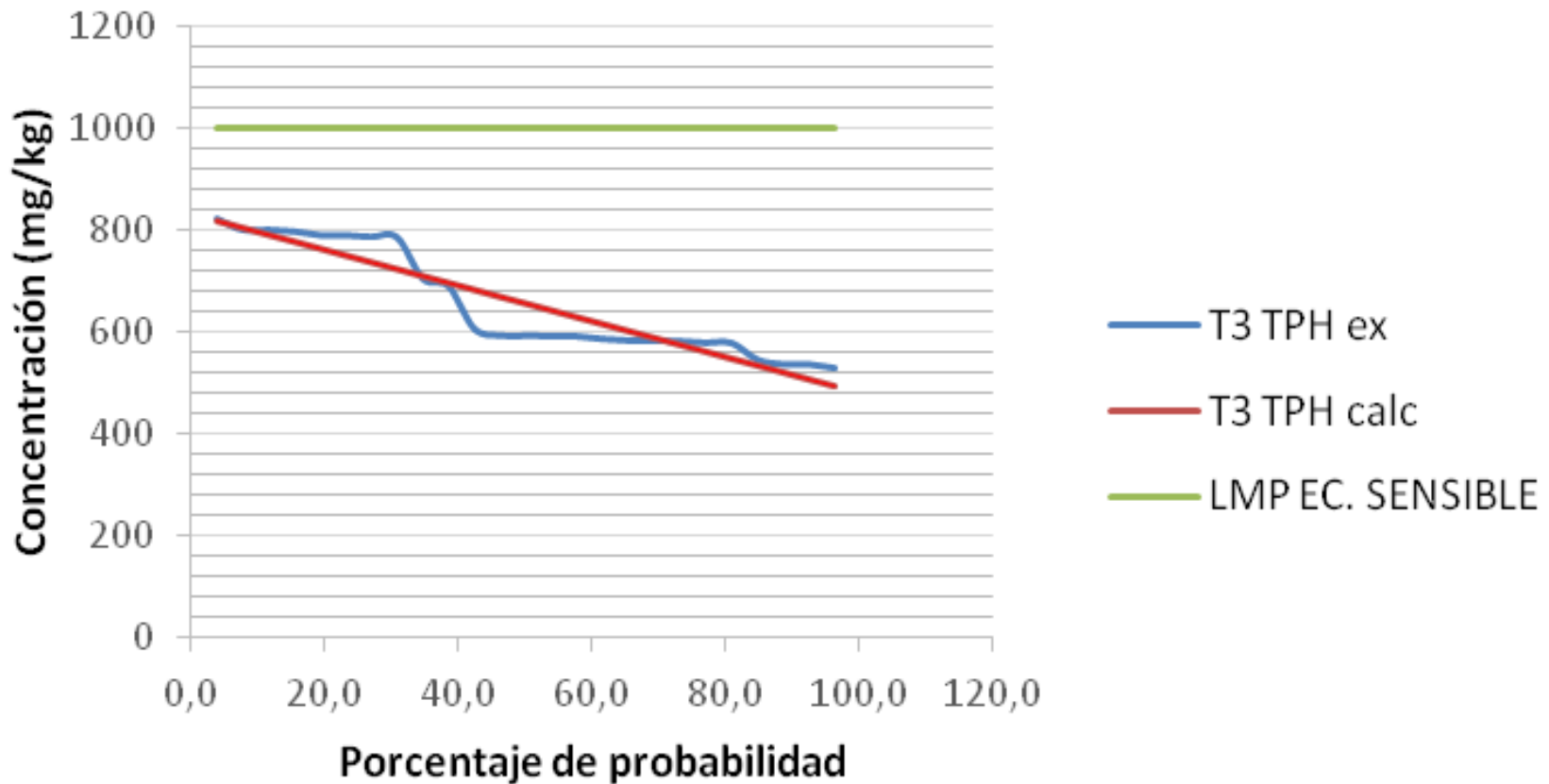
TRATAMIENTO 3



Resultados

Hanssen Suelo a 2000 ppm

TRATAMIENTO 3



- Peróxido de Hidrógeno marca SCHARLAU.
- Sulfato Ferroso heptahidratado marca FISCHER.

PRECIO DE MÉTODO FENTON
266,34 USD/m³

4 días

PRECIO TRATAMIENTO BIOLÓGICO
150 USD/m³

> 6 meses

VOLUMEN SUELO	PRECIO SOLO POR QUÍMICOS (USD)	ASUMIENDO UN 50% DE COSTO EXTRA DIARIO POR M.O, TRANSPORTE Y OTROS (USD)	TIEMPO (DÍAS)	M.O, TRANSPORTE Y OTROS (USD)	DIFERENCIA (USD)
1 m3	266,34	133,17	4	532,68	12967,32
VOLUMEN SUELO	PRECIO SOLO POR NUTRIENTES (USD)	ASUMIENDO UN 50% DE COSTO EXTRA DIARIO POR M.O, TRANSPORTE Y OTROS (USD)	TIEMPO (DÍAS)	M.O, TRANSPORTE Y OTROS (USD)	
1 m3	150	75	180	13500	

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 la 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 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 (H₂O₂ al 20% p/p) y 3 (H₂O₂ 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 (H₂O₂ 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.
- 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*.
- Mejorar el proceso de adición del oxidante, para intensificar el contacto entre el oxidante y el suelo contaminado, ya sea mediante goteo o ducha.

Bibliografía

- Beltrán Pérez, C., Darío, Ó., Giraldo, B., Ivette, L., Alexánder, 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>
- 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 POLYCYKLIKÝCH AROMATICKÝCH UHLOVODÍKŮ 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>
- Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related 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/trerepro/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>
- Schwab, A. P., Su, J., Wetzel, S., Pekarek, S., & Banks, M. K. (1999). Extraction of petroleum hydrocarbons from soil by mechanical shaking. *Environmental Science and Technology*, 33(11), 1940–1945. <https://doi.org/10.1021/es9809758>
- Siegrist, R. L., Crimi, M., Simpkin, T. J., & Borden, R. C. (2011). *In situ chemical oxidation for groundwater remediation*. Springer.
- Tapia, M. P. (2016). *Evaluación de la eficiencia de la remoción de hidrocarburos totales de lodos petrolizados empleando un procedimiento de oxidación química* (EPN). Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15632/3/CD-7071.pdf>
- 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>

¡GRACIAS!