



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2024,
Volumen 8, Número 1.

DOI de la Revista: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1

**ANÁLISIS DE LA TÉCNICA DE LA ADICIÓN
DE LA UREA EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS
DE LA CIUDAD DE JULIACA–2022**

**ANALYSIS OF THE UREA ADDITION TECHNIQUE IN
THE REMEDIATION OF HYDROCARBON-CONTAMINATED
SOILS IN THE CITY OF JULIACA–2022**

Edwin Parillo Escarsena

Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.10055

Análisis de la Técnica de la Adición de la Urea en la Remediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos de la Ciudad de Juliaca–2022

Edwin Parillo Escarsena¹edpaes23@gmail.com<https://orcid.org/0000-0003-1175-0512>Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez
Juliaca, Puno, Perú

RESUMEN

El estudio aborda la contaminación del suelo por hidrocarburos y la necesidad de encontrar métodos efectivos de remediación. El objetivo es evaluar la eficacia de la técnica de adición de la urea en suelos contaminados. La metodología del estudio fue experimental y cuantitativa, utilizando el método de degradación de contaminantes mediante nutrientes (urea) y landfarming. Se utilizaron cinco celdas con 15000 gramos de muestra, aplicando hidrocarburos y urea bajo condiciones específicas y utilizando métodos analíticos se midió la reducción de contaminantes en el suelo. Dando como resultado en la preservación de la conductividad eléctrica, relacionado con otros parámetros de suelo. En conclusión, la adición de urea como fuente de nitrógeno con una dosificación de 1267.39 gramos, restauró la conductividad eléctrica en 185.30 uS/cm y redujo el pH a 7.75, indicando una corrección exitosa. A pesar de las variaciones en humedad, fósforo y potasio debido a las condiciones específicas del suelo, se logró un equilibrio en nitrógeno, fósforo y potasio a 57.34 kg/ha, 175.07 kg/ha y 102.83 kg/ha respectivamente, lo que contribuyó a la restauración del suelo contaminado. El landfarming es económico, pero su efectividad varía según la contaminación, clima y suelo, esencial para seleccionar estrategias de remediación.

Palabras clave: contaminación del suelo, urea, remediación, conductividad eléctrica, landfarming

¹ Autor principal.

Correspondencia: edpaes23@gmail.com

Analysis of the Urea Addition Technique in the Remediation of Hydrocarbon-Contaminated Soils in the City of Juliaca–2022

ABSTRACT

The study addresses soil contamination by hydrocarbons and the need to find effective remediation methods. The objective is to evaluate the efficacy of urea addition technique in contaminated soils. The study methodology was experimental and quantitative, utilizing the nutrient degradation method (urea) and landfarming. Five cells with 15000 grams of samples were used, applying hydrocarbons and urea under specific conditions, and analytical methods were used to measure contaminant reduction in the soil. This resulted in the preservation of electrical conductivity, related to other soil parameters. In conclusion, the addition of urea as a nitrogen source at a dosage of 1267.39 grams restored electrical conductivity to 185.30 uS/cm and reduced the pH to 7.75, indicating successful correction. Despite variations in moisture, phosphorus, and potassium due to specific soil conditions, a balance was achieved in nitrogen, phosphorus, and potassium at 57.34 kg/ha, 175.07 kg/ha, and 102.83 kg/ha respectively, contributing to the restoration of the contaminated soil. Landfarming is cost-effective, but its effectiveness varies depending on contamination, climate, and soil, essential for selecting remediation strategies.

Keywords: soil contamination, urea, remediation, electrical conductivity, landfarming

Artículo recibido 20 enero 2024

Aceptado para publicación: 22 febrero 2024



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, uno de los problemas más destacados a nivel mundial ha sido el conflicto relacionado con el agua y su relación con otros elementos (Encinas, 2011). La contaminación del suelo se ha posicionado como una preocupación significativa, especialmente cuando se vierten compuestos líquidos, ya que estos pueden alcanzar el nivel freático y allí contaminar los ríos y demás afluentes hidráulicos, de esto no se libra la ciudad de Juliaca ni ninguna de las demás ciudades del Perú.

Por otro lado, las estaciones de servicio son vitales para abastecer combustibles líquidos y ofrecer servicios adicionales; En Juliaca, una ciudad que alberga a aproximadamente 325,146 habitantes y vehículos (Instituto nacional de estadística e informática, 2013), pero enfrentan desafíos cruciales debido al deterioro de elementos como tanques de almacenamiento y surtidores, lo que causa derrames frecuentes de combustible y genera graves problemas ambientales al afectar tanto el suelo como las fuentes de agua locales. En este contexto, se propone investigar la eficacia de la técnica de adición de urea en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos (Crespo González, 2018), con el objetivo de estimular la actividad microbiana y restaurar el suelo afectado.

La justificación de esta investigación se fundamenta en la urgente necesidad de encontrar métodos efectivos y sostenibles para remediar suelos contaminados, en la escasez de estudios exhaustivos que evalúen específicamente el impacto y la eficacia de la adición de urea en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos (Ariza & Mejía, 2017). Aunque existen investigaciones previas que sugieren el potencial de la urea como agente de bioestimulación, En las estrategias de remediación de suelos se ha seguido la técnica de extracción física in situ siempre que ha sido posible (Coria, 2007), cuando se ha agotado este tipo de solución se han empleado tratamientos físico-químicos a base de adición de aditivos y sustancias que limiten los contaminantes de una forma total o menos asequible (Universidad de Ácala, 2012). Las primeras tareas de remediación que se aplicaron fueron similares a la “biolabranza”, indudablemente fueron utilizadas por empresas petroleras, fundamentalmente para la remediación de vertidos de gasolina, estas aparecen en los años 70 (Geotecnia, 2000).

En los años 80 se generalizó el uso del aire para suministrar oxígeno a los lugares contaminados mejorando la eficacia de los métodos de degradación (Cossio et al., 2012), durante los años 90, se hizo posible la biorremediación mediante el desarrollo de las tecnologías de “burbujeo de oxígeno” en franjas

por debajo del nivel freático (Helena et al., 2014). Al mismo tiempo, la implementación de laboratorios permitió el tratamiento de hidrocarburos clorados, los primeros intentos fueron con metales pesados, entre otros experimentos anaerobios, paralelamente se desarrollaron estrategias de ingeniería que mejoraron los rendimientos de los métodos más populares para suelos contaminados (“biolabranza”, “compostaje”) (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2013).

Las características del contaminante, como la del suelo trabajan de manera compleja y se definirán por una variedad de factores para así poder determinar el comportamiento de un contaminante en el suelo, así como la eficacia de una tecnología de remediación (Helena et al., 2014). Por tanto, para la selección adecuada de una tecnología de remediación con excelentes resultados de éxito, es primordial considerar tanto las propiedades del contaminante como las del sitio contaminado. También dentro de los factores a considerar se encuentran los siguientes: (i) procesos químicos (reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción, fotólisis); (ii) procesos físicos o de transporte (sorción, advección, dispersión, difusión, volatilización y solubilización); y (iii) procesos biológicos (biodegradación, biotransformación y toxicidad) (Sepúlveda & Trejo, 2002).

La biodegradación es la más común y es la más fácil de manejar como lo muestran varios de los investigadores en sus estudios y resultados (Díaz et al., 2013), por biorremediación tenemos la Biorremediación de suelo contaminado con 55000 y 65000 ppm de aceite residual automotriz y fitorremediación con *Sorghum bicolor* inoculado con *Burkholderia cepacia* y *Penicillium chrysogenum* (Sánchez Yañes et al., 2015) el cual somete al suelo contaminado con 55000 y 65000 ppm de aceite residual automotriz (ARA) a biorremediación por bioestimulación (BS), seguida de fitorremediación (FR) con *Sorghum bicolor* y microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) para reducir el ARA a un valor inferior al máximo permisible por la NOM-138 SEMARNAT/SS-2003 de 4400 ppm/Kg de suelo (Sánchez Yañes et al., 2015).

En Puno también existen investigaciones de fitorremediación de suelos expuestos a plomo (Pb) y cadmio (Cd) utilizando *alopecurus magellanicus bracteatus* y *muhlenbergia angustata* (poaceae), en el cual se seleccionaron diez puntos de muestreo próximos a una zona minera de Ananea-Puno, Perú. No se encontraron diferencias entre *A. magellanicus bracteatus* y *M. angustata* en la concentración de Pb y Cd en la raíz, y en las hojas. El potencial de fitorremediación para ambas especies de plantas fue bajo

(Argota Pérez et al., 2014).

Las hipótesis de esta investigación se centran en la suposición de que la adición controlada de urea y el landfarming al suelo contaminado favorecerá el crecimiento y la actividad de microorganismos degradadores de hidrocarburos, acelerando así el proceso de remediación. A este respecto se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Analizar la técnica de la adición de la urea en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos de la ciudad de Juliaca-2022

Objetivos específicos

- Determinar cómo interviene la urea en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.
- Establecer la dosificación de la urea para el empleo en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.
- Comparar el efecto de la urea en la estimulación de la degradación de hidrocarburos de suelos contaminados.

METODOLOGÍA

La metodología de investigación fue experimental y cuantitativa, siendo de esta manera de tipo aplicada (Hernández-Sampieri et al., 2006). Para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos implica una serie de pasos y técnicas específicas para identificar, evaluar y tratar la contaminación.

A continuación, se presenta el procedimiento general de la metodología aplicada según las características particulares del estudio: Revisión de la literatura; Realizar una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Caracterización del sitio; identificando el estrato de suelo con más resistencia con fines de cimentación para tomarlo como muestra natural, luego controlar la contaminación por hidrocarburos del suelo, su extensión y la profundidad. Para su remediación se utiliza la urea y el proceso de landfarming.

Población: Suelos contaminados por hidrocarburos en la ciudad de Juliaca presentes en las estaciones de servicio de combustible o aledaños.

Muestra: suelos contaminados por hidrocarburos de estrato de suelo con mayor capacidad de soporte

de la urbanización Anexo Jesús Nazareno Mz. "C" lote 10.

Tipo de Muestreo: El muestreo es a conveniencia, intencional a criterio del investigador (Quezada Lucio, 2010).

En esta investigación se realizó el método de degradación de hidrocarburos por estimulación mediante nutrientes (urea) y landfarming. Para Esta actividad se ubicaron celdas cargadas con 15000 gr. de muestra natural del estrato de mejor capacidad de soporte para una cimentación. También se habilitaron zonas de tratamiento en un área adecuada para el método landfarming a pequeña escala además de las instalaciones de la Universidad Peruana Unión. Laboratorio de Ingeniería Ambiental, que se distribuyó de la siguiente manera:

Estimulación: landfarming a pequeña escala más;

- M-1: Suelo natural; 100% de suelo provenientes de la zona de estudio del estrato de más capacidad de soporte.
- M-2: Suelo contaminado; 100% de suelos contaminados artificialmente con hidrocarburos (petróleo) 16.67ml/kg provenientes de la zona de estudio.
- M-3: Suelo Contaminado más Nutriente 33.33 gr/kg; 100% de sedimentos contaminados con hidrocarburos de la zona de estudio, más nutriente (Urea 500gr.)
- M-4: Suelo Contaminado más Nutriente 66.67 gr/kg; 100% de sedimentos contaminados con hidrocarburos de la zona de estudio, más nutriente (Urea 1000gr.)
- M-5: Suelo Contaminado más Nutriente 100.00 gr/kg; 100% de sedimentos contaminados con hidrocarburos de la zona de estudio, más nutriente (Urea 1500gr.)

Para la muestra M-1; se realizó un estudio físico mecánico del suelo en la urbanización Anexo Jesús Nazareno precisamente en la manzana C lote 10, realizando una calicata convencional, el cual el estrato con mayor capacidad de soporte está ubicado a una profundidad de 1.70m por el ensayo de GEOGAUGE y corte directo, siendo este estrato un suelo arenoso (SP) según el sistema de clasificación de suelos (SUCS) y en relación a la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) clasifica en A1-b (0), los parámetros del suelo en estudio se muestran en las siguientes tablas AASHTO:

Tabla 1. Clasificación de suelo de la muestra M-1

Calicata	Profundidad (m)	Densidad		Humedad (%)	Consistencia			Granulometría (% que pasa)				I.G.	Clasificación	
		Natural (gr/cm ³)	Seca (gr/cm ³)		LL (%)	LP (%)	IP (%)	N°4	N°10	N°40	N° 200		SUCS	AASHTO
C-01	1.70	1.75	1.62	7.50	NP	NP	NP	99.69	97.21	36.61	4.77	0.0	SP	A1-b (0)

Nota: en la tabla muestra el resumen de los parámetros físicos de la muestra de suelo natural en estudio.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de suelo de la muestra M-1

Calicata	Profundidad (m)	Corte Directo		Módulo elástico (Mpa)	Rigidez del suelo Mr (MN/m)	Coeficiente de poisson (μ)	Modulo de corte G (Mpa)	CBR al 100%	q adm (Kg/cm ²)
		C (Kg/cm ²)	ϕ						
C-01	1.70	0.09	30.48°	44.96	5.18	0.37	16.37	11.50	2.43

Nota: en la tabla muestra el resumen de las propiedades mecánicas de la muestra de suelo natural en estudio realizadas mediante ensayos de GEOGAUGE y corte directo.

Fotografía 1. Muestreo de calicata C-01



Nota. Las fotografías muestran el ensayo de Geogauge y la extracción de la muestra a una profundidad 1.70m (Muestra M-1).

Para las muestras M-2, M-3, M-4, M-5; Se tuvo control en la contaminación pesando 15000gr de suelo natural contaminándolo artificialmente con hidrocarburos (petróleo) 16.67ml/kg equivalente a 250ml. Con una probeta normalizada.

Fotografía 2. Medición del contaminante



Nota. Las fotografías muestran el hidrocarburo (petróleo) en 250ml. utilizado para la contaminación del suelo.

Proceso de remediación

En esta etapa del proyecto se realiza la técnica de la adición de la urea como agente químico de remediación de suelo contaminado por hidrocarburo de la siguiente manera; a la muestra M-3, M-4, M-5 se le agrega 500gr, 1000gr, y 1500gr. De urea de cultivo triturada y diluida en 1000ml de agua respectivamente.

Fotografía 3. Técnica de adición de la urea en 500gr, 1000gr y 1500gr.



Nota. Las fotografías muestran la aplicación de la urea como diluida en agua en 500gr, 1000gr y 1500gr.

Además, para estimular este efecto de la urea con el suelo contaminado se procede a mezclar uniformemente la muestra, también se realiza el proceso de landfarming a pequeña escala, aireando el suelo dos veces al día comprendidos entre las 7:00am y 7:00pm para su análisis y comportamiento durante tres meses, acomodando las celdas en un lugar estratégico donde la luz solar también fungirá un factor importante.

Fotografía 4. Estimulación por landfarming a pequeña escala



Nota. La fotografía muestra el método de degradación de contaminantes mediante el uso de la urea y el landfarming a pequeña escala como estimulante.

Ensayos de condiciones ambientales del suelo

Para el análisis del efecto de remediación se realizó el análisis de suelo en el laboratorio de ingeniería ambiental de la Universidad Peruana Unión, llevando muestras periódicamente cada mes del estudio y así evaluar el comportamiento del suelo con la adición de la urea y el landfarming. Para este análisis de suelo, las muestras deben estar secas por un lapso mínimo de 12 horas y ser trituradas, pasante el tamiz N° 200. La muestra deberá ser fina debido a que los químicos a utilizar necesitan reaccionar con la muestra y así obtener datos relevantes, sobre los parámetros medidos fueron los siguientes:

pH; El método potenciométrico para medir el pH es un enfoque común en el que se utiliza un electrodo de vidrio específico para pH para detectar el nivel de acidez o alcalinidad de una solución.

Humedad; El método termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés, Thermogravimetric Analysis) es una técnica utilizada para medir cambios en la masa de una muestra a medida que se somete a un aumento controlado de temperatura. Este método puede ser empleado para determinar el contenido de humedad en una muestra a través del seguimiento de la pérdida de masa asociada con la evaporación del agua.

Conductividad eléctrica; El método conductimétrico se utiliza para medir la conductividad eléctrica de una solución. La conductividad eléctrica está relacionada con la capacidad de una solución para transportar iones y, por lo tanto, se puede utilizar para inferir la concentración de iones disueltos en dicha solución.

Nitrógeno; El método utilizado es por colorimetría a través del kit LaMotte. Para el nitrógeno se midió en forma de nitrato.

Fósforo; La prueba de fósforo es extremadamente sensible precauciones especiales deben adoptarse para evitar la contaminación. En particular, la exposición a los componentes de la prueba al polvo de fertilizantes debe ser escrupulosamente evitada, La superficie de trabajo, zona de pruebas, manos y ropa del operador, deben estar limpias y libres de residuos de fertilizantes.

Potasio; Es importante que la temperatura de la muestra (extracto de suelo) y del “Reactivo Potasio C” (5162) estén en el intervalo de 20 a 27 °C. En los días cálidos antes del ensayo se debe enfriar la muestra en el tubo Potash “A” y el contenedor del “Reactivo Potasio C” (5162), colocándolos en agua fría.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados de análisis de suelo tomados en tres meses diferentes denominados muestreo N° 1, 2 y 3 determinados en el laboratorio, realizando análisis de suelo mediante el kit LaMotte y la metodología antes explicada, como la presencia y cantidad de diversos elementos químicos. Estos elementos pueden abarcar desde macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, como también el pH y conductividad eléctrica del suelo muy importantes para el crecimiento de plantas. De los datos recopilados en laboratorio estos deben ser procesados a unidades conocidas para una mejor interpretación de los mismos como el nitrógeno, fosforo y potasio que están en libras por acre en kilogramos por hectárea siendo estos resultados lo siguiente:

Tabla 3. Análisis de suelo de muestreo N° 1

Muestras	Parámetro					
	pH	Humedad (%)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Nitrógeno (kg/ha)	Fósforo (kg/ha)	Potasio (kg/ha)
M-1; Suelo o sedimento	7,50	2,02	39,70	56.04	134.51	156.92
M-2: Suelo contaminado con hidrocarburo 16.67ml/kg (petróleo)	6,88	1,22	68,90	33.63	145.72	156.92
M-3: Suelo contaminado + nutriente 500gr.	7,20	1,10	90,20	78.46	147.96	156.92
M-4: Suelo contaminado + nutriente 1000gr.	7,23	1,04	83,40	56.04	156.92	112.09
M-5: Suelo contaminado + nutriente 1500gr.	7,10	0,74	26,10	24.66	168.13	78.46

Nota: en la tabla muestra los parámetros químicos de suelo en estudio, muestra tomada en el mes diciembre de 2022.

Tabla 4. Análisis de suelo de muestreo N° 2

Muestras	Parámetro					
	pH	Humedad (%)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Nitrógeno (kg/ha)	Fósforo (kg/ha)	Potasio (kg/ha)
M-1; Suelo o sedimento	9,16	2,19	168,20	16.81	112.09	112.09
M-2: Suelo contaminado con hidrocarburo 16.67ml/kg (petróleo)	9,07	1,43	218,40	28.02	140.11	112.09
M-3: Suelo contaminado + nutriente 500gr.	8,17	1,25	189,70	44.84	140.11	134.51
M-4: Suelo contaminado + nutriente 1000gr.	8,11	1,16	186,50	44.84	168.13	112.09
M-5: Suelo contaminado + nutriente 1500gr.	8,07	0,99	125,80	67.25	168.13	84.07

Nota: en la tabla muestra los parámetros químicos de suelo en estudio, muestra tomada en el mes enero de 2023.

Tabla 5. Análisis de suelo de muestreo N° 3

Muestras	Parámetro					
	pH	Humedad (%)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Nitrógeno (kg/ha)	Fósforo (kg/ha)	Potasio (kg/ha)
M-1; Suelo o sedimento	8,01	2,38	348,00	22.42	140.11	123.30
M-2: Suelo contaminado con hidrocarburo 16.67ml/kg (petróleo)	8,43	1,54	143,80	33.63	140.11	140.11
M-3: Suelo contaminado + nutriente 500gr.	8,54	1,36	500,00	50.44	151.32	140.11
M-4: Suelo contaminado + nutriente 1000gr.	8,18	1,24	372,00	56.04	168.13	123.30
M-5: Suelo contaminado + nutriente 1500gr.	7,94	1,15	233,00	78.46	224.18	89.67

Nota: en la tabla muestra los parámetros químicos de suelo en estudio, muestra tomada en el mes febrero de 2023.

Los datos recopilados en esta investigación son cuantitativos en su totalidad y se expresan en términos de cantidades y medidas. Esto permite un análisis estadístico para inferir patrones, relaciones y tendencias:

Tabla 6. Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar
Tratamiento de muestras	15	1,00	5,00	3,0000	1,46385
pH	15	6,88	9,16	7,9660	,69400
Humedad	15	0,74	2,38	1,3873	,46387
Conductividad eléctrica	15	26,10	500,00	186,2467	133,31435
Nitrógeno	15	16,81	78,46	46,1053	19,59645
Fósforo	15	112,09	224,18	153,7107	25,00199
Potasio	15	78,46	156,92	122,1767	25,69888
N válido (por lista)	15				

Nota: en la tabla muestra los estadísticos descriptivos que permitirán el análisis de las muestras.

Tabla 7. Análisis descriptivos (95% del intervalo de confianza para la media)

	N	Media	Desv. Estándar	Desv. Error	Límite inferior	Límite superior	Mínimo	Máximo
pH	M-1 3	8,2233	,85031	,49093	6,1110	10,3356	7,50	9,16
	M-2 3	8,1267	1,12607	,65014	5,3294	10,9240	6,88	9,07
	M-3 3	7,9700	,69203	,39954	6,2509	9,6891	7,20	8,54
	M-4 3	7,8067	,58705	,33894	6,3483	9,2650	7,13	8,18
	M-5 3	7,7033	,52653	,30399	6,3954	9,0113	7,10	8,07
	Total 15	7,9660	,69400	,17919	7,5817	8,3503	6,88	9,16
Humedad	M-1 3	2,1967	,18009	,10398	1,7493	2,6440	2,02	2,38
	M-2 3	1,3967	,16258	,09387	,9928	1,8005	1,22	1,54
	M-3 3	1,2367	,13051	,07535	,9125	1,5609	1,10	1,36
	M-4 3	1,1467	,10066	,05812	,8966	1,3967	1,04	1,24
	M-5 3	,9600	,20664	,11930	,4467	1,4733	0,74	1,15
	Total 15	1,3873	,46387	,11977	1,1304	1,6442	0,74	2,38
M-1 3	185,3000	154,85971	89,40830	-	569,9928	39,70	348,00	

Conductividad eléctrica	M-2	3	143,7000	74,75005	43,15696	-41,9894	329,3894	68,90	218,40
	M-3	3	259,9667	213,74532	123,40592	-	790,9395	90,20	500,00
	M-4	3	213,9667	146,24740	84,43598	-	577,2654	83,40	372,00
	M-5	3	128,3000	103,47265	59,73996	-	385,3403	26,10	233,00
	Total	15	186,2467	133,31435	34,42162	112,4196	260,0737	26,10	500,00
Nitrógeno	M-1	3	31,7567	21,21623	12,24919	-20,9474	84,4607	16,81	56,04
	M-2	3	31,7600	3,23894	1,87000	23,7140	39,8060	28,02	33,63
	M-3	3	57,9133	18,01289	10,39975	13,1668	102,6598	44,84	78,46
	M-4	3	52,3067	6,46632	3,73333	36,2434	68,3699	44,84	56,04
	M-5	3	56,7900	28,38430	16,38769	-13,7205	127,3005	24,66	78,46
	Total	15	46,1053	19,59645	5,05978	35,2532	56,9575	16,81	78,46
Fósforo	M-1	3	128,9033	14,82755	8,56069	92,0697	165,7370	112,09	140,11
	M-2	3	141,9800	3,23894	1,87000	133,9340	150,0260	140,11	145,72
	M-3	3	146,4633	5,75292	3,32145	132,1723	160,7544	140,11	151,32
	M-4	3	164,3933	6,47210	3,73667	148,3158	180,4709	156,92	168,13
	M-5	3	186,8133	32,36048	18,68333	106,4254	267,2012	168,13	224,18
	Total	15	153,7107	25,00199	6,45548	139,8650	167,5563	112,09	224,18
Potasio	M-1	3	130,7700	23,32987	13,46951	72,8154	188,7246	112,09	156,92
	M-2	3	136,3733	22,64739	13,07548	80,1141	192,6326	112,09	156,92
	M-3	3	143,8467	11,66293	6,73360	114,8743	172,8190	134,51	156,92
	M-4	3	115,8267	6,47210	3,73667	99,7491	131,9042	112,09	123,30
	M-5	3	84,0667	5,60500	3,23605	70,1431	97,9903	78,46	89,67
	Total	15	122,1767	25,69888	6,63542	107,9451	136,4082	78,46	156,92

Nota: en la tabla muestra el análisis descriptivo de las muestras en estudio.

Con las tablas 6 y 7 se procede a realizar el análisis de varianza, conocido comúnmente como ANOVA (por sus siglas en inglés, Analysis of Variance), para determinar si hay alguna diferencia significativa entre las medias de los grupos. Existen varios tipos de ANOVA, y la elección del tipo adecuado depende de la naturaleza del diseño experimental. En este caso se utilizará el ANOVA de un factor (One-Way ANOVA), debido a que se comparará las medias de tres o más grupos en una única variable independiente:

Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA)

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
pH	Entre grupos	,559	4	,140	,226	,918
	Dentro de grupos	6,184	10	,618		
	Total	6,743	14			
Humedad	Entre grupos	2,755	4	,689	26,751	,000
	Dentro de grupos	,257	10	,026		
	Total	3,012	14			
	Entre grupos	34115,904	4	8528,976	,397	,806

Conductividad eléctrica	Dentro de grupos	214702,113	10	21470,211		
	Total	248818,017	14			
Nitrógeno	Entre grupos	2111,161	4	527,790	1,616	,245
	Dentro de grupos	3265,130	10	326,513		
	Total	5376,291	14			
Fósforo	Entre grupos	6046,326	4	1511,582	5,588	,013
	Dentro de grupos	2705,063	10	270,506		
	Total	8751,390	14			
Potasio	Entre grupos	6713,023	4	1678,256	6,625	,007
	Dentro de grupos	2533,030	10	253,303		
	Total	9246,053	14			

Nota: en la tabla muestra el análisis ANOVA de las diferentes muestras independientes.

Para estimar las diferencias entre dos componentes de variabilidad, se calcula el estadístico F, que es la razón de variación entre la variación de intergrupos y la variación intragrupos.

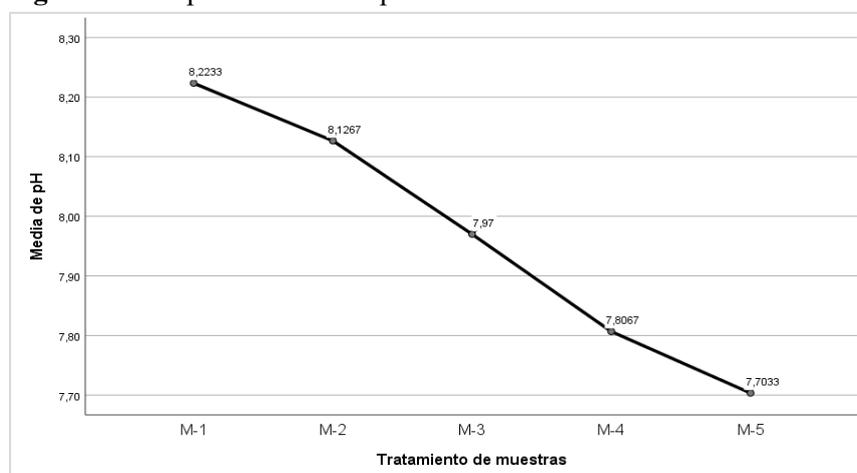
Si F es un numero grande, la variabilidad entre medias de las muestras es mayor que la esperada a la variabilidad dentro de las muestras, y rechazamos H_0 .

Si $P < 0.05$ rechazamos H_0 , que indica que las medias comparadas son iguales. Es decir, si existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias.

Del análisis podemos observar que el P valor o significancia superan el 0.05 en el pH, conductividad eléctrica y nitrógeno por lo que indica que estos datos son homogéneos y con lo que respecta a la humedad, fósforo y potasio son muy variados unos de otros.

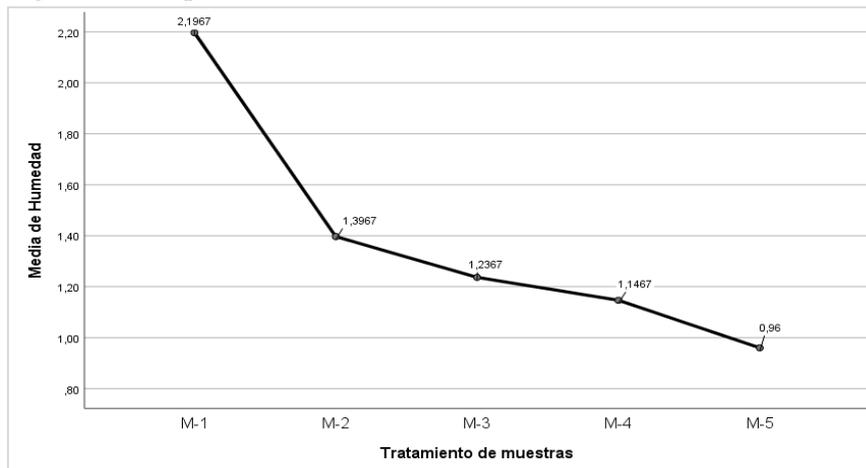
En seguida mostramos los gráficos de medias de las muestras las muestras M-1. M-2, M-3, M-4 y M-5:

Figura 1. Comportamiento del pH



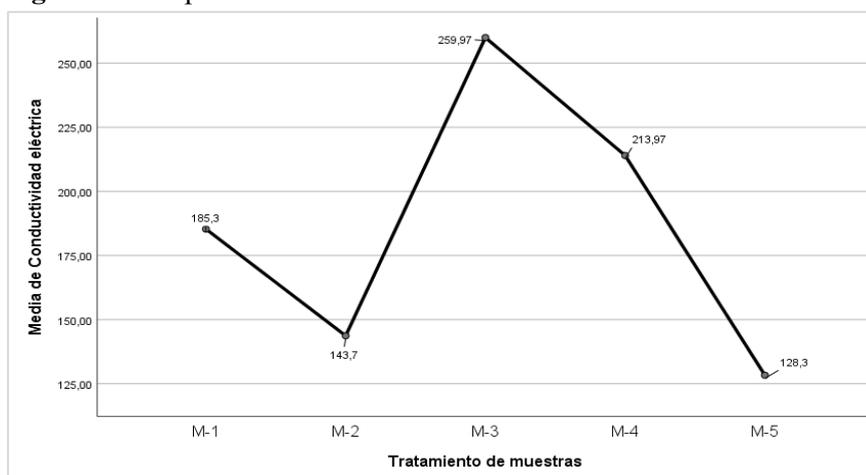
Nota. La figura muestra la reducción del pH promedio en relación al tratamiento realizado.

Figura 2. Comportamiento de la humedad



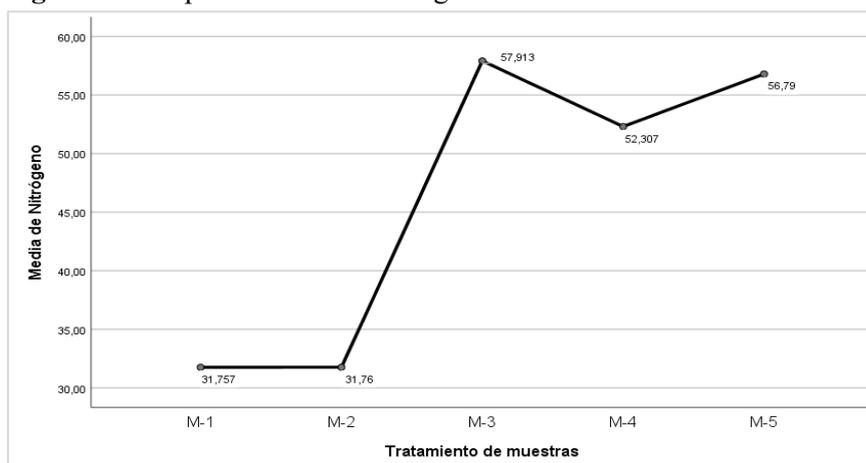
Nota. La figura muestra la reducción de la humedad promedio en relación al tratamiento realizado.

Figura 3. Comportamiento de la conductividad eléctrica



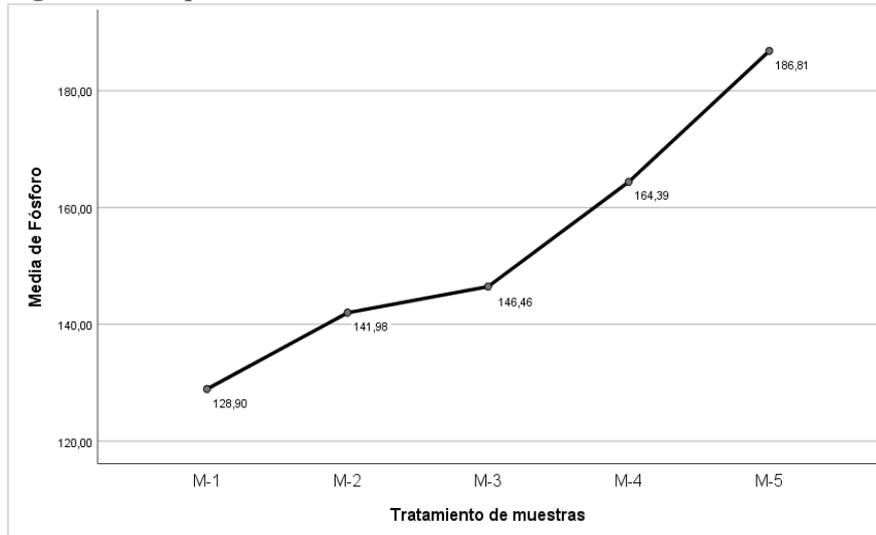
Nota. La figura muestra la conductividad eléctrica promedio en relación al tratamiento realizado.

Figura 4. Comportamiento del nitrógeno



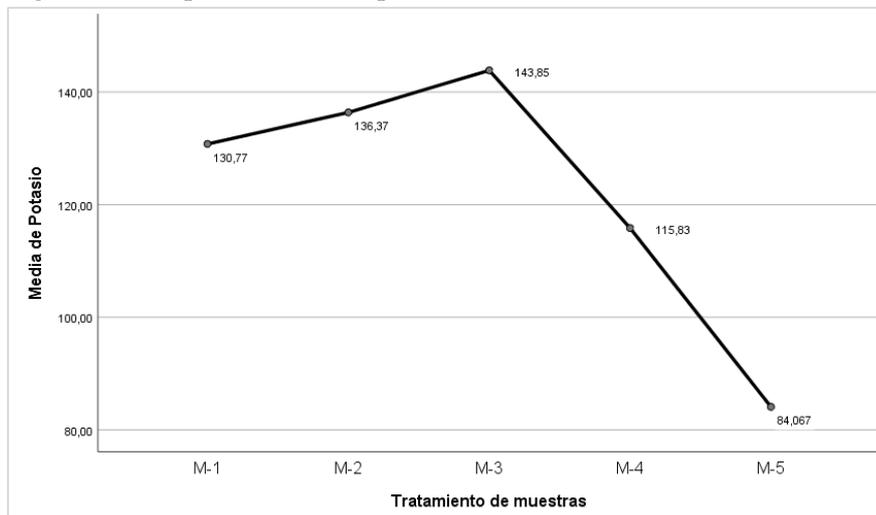
Nota. La figura muestra el comportamiento de nitrógeno en relación al tratamiento realizado.

Figura 5. Comportamiento del fósforo



Nota. La figura muestra el incremento del fósforo promedio en relación al tratamiento realizado.

Figura 6. Comportamiento del potasio



Nota. La figura muestra el comportamiento del potasio promedio en relación al tratamiento realizado.

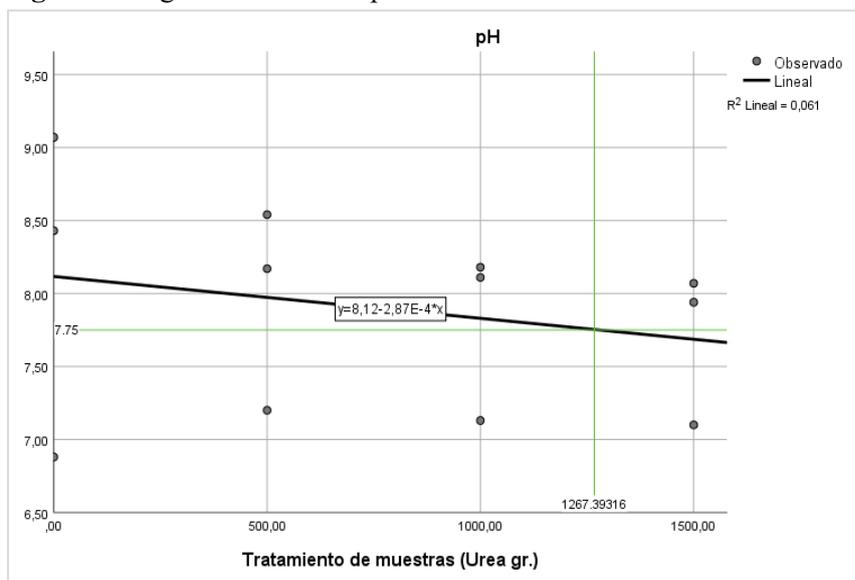
Para obtener la proporción óptima de nutrientes en la remediación de suelos contaminados, procedemos a realizar una regresión lineal de los datos del pH, conductividad eléctrica y nitrógeno al ser estos homogéneos. para establecer el tratamiento que se asemeja a las propiedades de origen del suelo y así determinar la cantidad de nutriente a utilizar para un tratamiento óptimo.

Tabla 9. Resumen de modelo de estimaciones de regresión

Variable dependiente	Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de parámetro		
		R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	X	X ²
pH	Lineal	,061	,650	1	10	,439	8,117	-2,87E-	
Humedad	Lineal	,598	14,901	1	10	,003	1,395	-2,8E-4	
Conductividad	Cuadrático	,159	,848	2	9	,460	149,830	0,284	-2,02E-4
Nitrógeno	Cuadrático	,291	1,843	2	9	,213	33,853	0,046	-2,167E-5
Fósforo	Lineal	,580	13,838	1	10	,004	137,048	0,030	
Potasio	Cuadrático	,798	17,724	2	9	,001	137,961	0,022	-3,923E-5

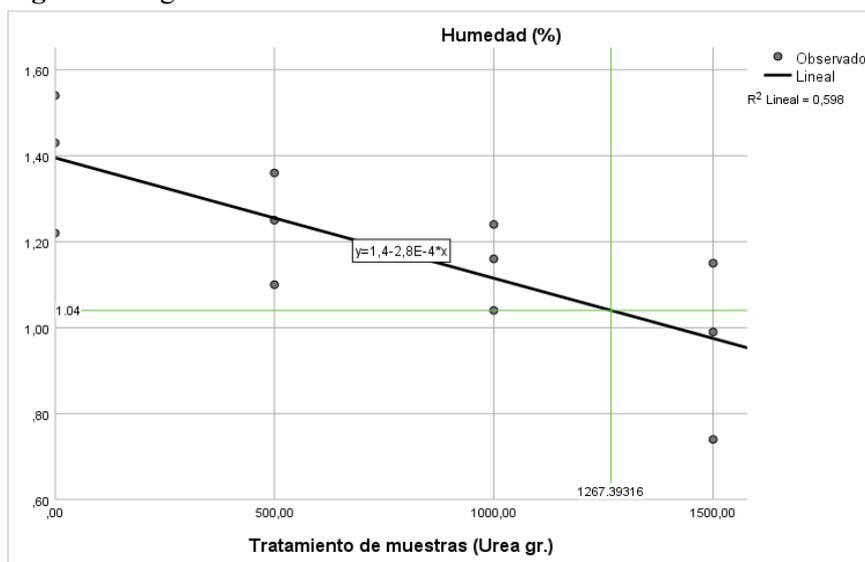
Nota: en la tabla muestra las estimaciones de los parámetros de ecuación siendo la variable independiente el tratamiento de las muestras M-2, M-3, M-4 y M-5.

Figura 7. Regresión lineal del pH



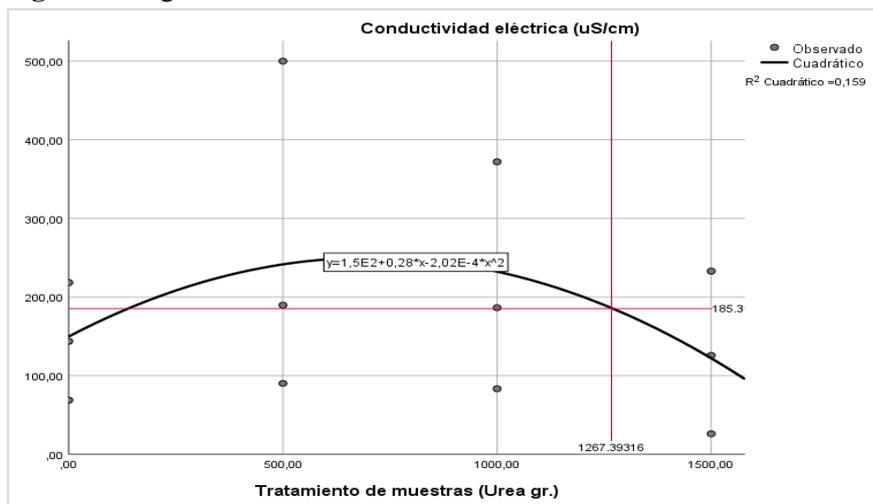
Nota. La figura muestra la ecuación y la regresión lineal de pH.

Figura 8. Regresión lineal de la humedad



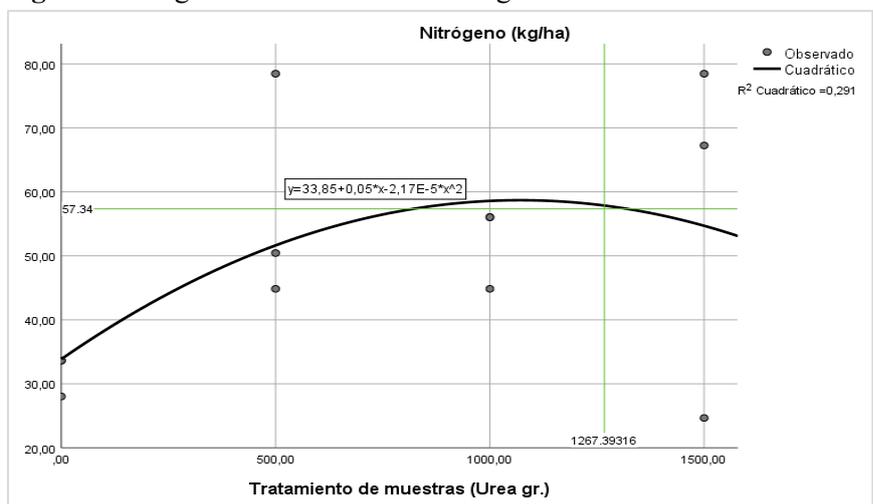
Nota. La figura muestra la ecuación y la regresión lineal de la humedad.

Figura 9. Regresión cuadrática de la conductividad eléctrica



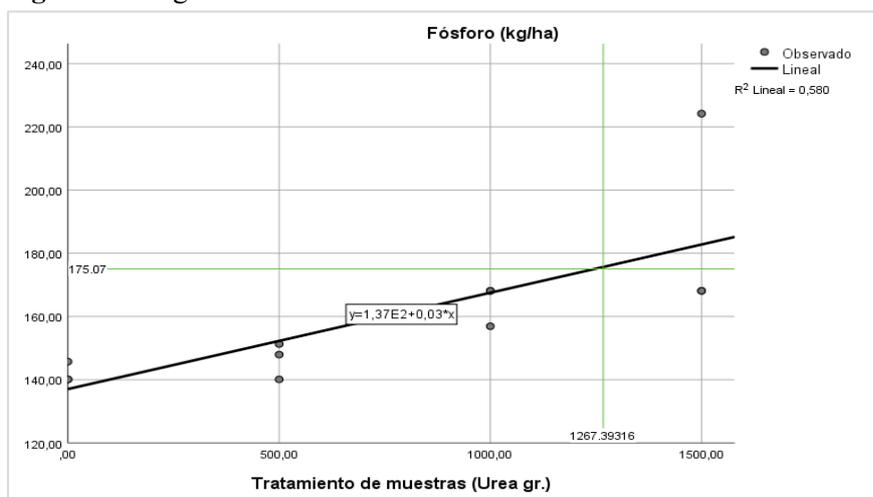
Nota. La figura muestra la ecuación y la regresión cuadrática de la conductividad eléctrica.

Figura 10. Regresión cuadrática del nitrógeno



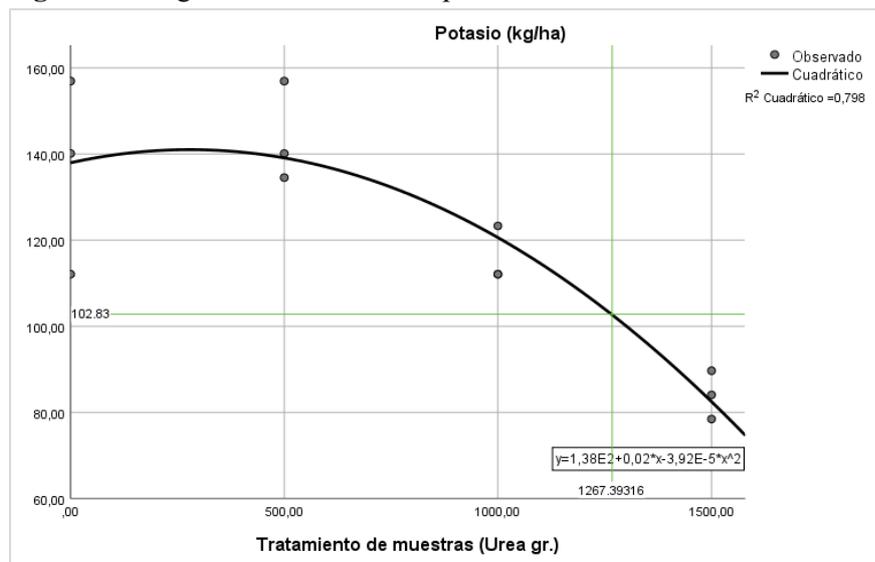
Nota. La figura muestra la ecuación y la regresión cuadrática del nitrógeno.

Figura 11. Regresión lineal del fósforo



Nota. La figura muestra la ecuación y la regresión lineal del fósforo.

Figura 12. Regresión cuadrática del potasio



Nota. La figura muestra la ecuación y la regresión cuadrática del potasio

De los gráficos anteriores el que se correlaciona viene a ser el de conductividad eléctrica no se toma el pH puesto que hubo una regresión negativa y en el caso del nitrógeno una tendencia positiva, tomando los siguientes valores a través de la conductividad eléctrica siendo el tratamiento óptimo de 1267.39gr. recalcando que en relación a la humedad, fósforo y potasio se obtendrán valores variados según la naturaleza del estudio. Siendo los parámetros como sigue:

Tabla 10. Parámetros del suelo de la proporción óptima de nutriente

Proporción de nutriente (Urea en gramos)	PARÁMETRO					
	pH	Humedad (%)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Nitrógeno (kg/ha)	Fósforo (kg/ha)	Potasio (kg/ha)
1267,39	7,75	1,04	185,30	57,34	175,07	102,83

Nota: en la tabla se muestra los parámetros del suelo de la proporción óptima de nutriente y landfarming en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

La urea proporciona nitrógeno, que es esencial para el crecimiento de microorganismos. Al aumentar la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo, se puede estimular el crecimiento de bacterias y otros microorganismos que tienen la capacidad de degradar los hidrocarburos. El landfarming es un tratamiento que implica la aireación para mejorar el suministro de oxígeno necesario para el crecimiento de microorganismos presentes en el suelo.

CONCLUSIONES

La urea es un nutriente que puede tener aplicaciones en la remediación de suelos contaminados. En el caso de suelos contaminados por hidrocarburos, la técnica de la adición de la urea es adaptable a diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales. Además, logra actuar como fuente de nitrógeno para microorganismos que descomponen los contaminantes presentes en los suelos, evitando la necesidad de soluciones químicas más agresivas.

La dosificación óptima de nutrientes para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos (petróleo) se determinó en 1267.39 gramos, logrando restablecer la conductividad eléctrica a niveles similares a los del suelo antes de la contaminación, con un valor de 185.30 uS/cm. Además, se observó una reducción del pH a 7.75, indicando una corrección exitosa. Sin embargo, es importante destacar que, en cuanto a la humedad, fósforo y potasio, se obtendrán valores variados debido a las condiciones específicas del suelo, marcando la necesidad de considerar estos factores de manera individualizada en futuras aplicaciones de la técnica. Asimismo, se logró alcanzar un equilibrio en los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio a 57.34 kg/ha, 175.07 kg/ha y 102.83 kg/ha respectivamente, contribuyendo a la restauración del suelo contaminado. Estos resultados subrayan la importancia de una dosificación precisa de nutrientes para lograr una efectiva remediación y resaltar la necesidad de monitoreo continuo para evaluar y ajustar el proceso según las características específicas de cada área afectada.

El landfarming se presenta como una alternativa viable y económicamente más accesible para la remediación de suelos contaminados, en contraste con otras técnicas más costosas. No obstante, es crucial reconocer que su eficacia está sujeta a diversos factores, incluyendo la naturaleza y nivel de contaminación, las condiciones climáticas y la capacidad del suelo para llevar a cabo el tratamiento. La evaluación integral de estos elementos es esencial para determinar la idoneidad del landfarming en la selección de estrategias de remediación del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argota Pérez, G., Encina Cáceres, M., Argota Coello, H., & Iannacone O, J. (2014). Coeficientes biológicos de fitorremediación de suelos expuestos a plomo y cadmio utilizando *Alopecurus magellanicus* var. *bracteatus* y *Muhlenbergia angustata* (Poaceae), Puno, Perú. *The Biologist*, 12(1), 99–108. <https://doi.org/ISSN 1994-9073>



- Ariza, C., & Mejía, S. (2017). Optimización Del Proceso De Landfarming Para Mejorar La Funcionalidad Del Tratamiento De Suelos Contaminados Con Hidrocarburos Mediante La Adición De Materia Orgánica. *Scientific International Journal™*, 14(3), 11.
[http://www.nperci.org/C.Ariza & S. Mejía-Optimización del proceso de landfarming-V14N3.pdf](http://www.nperci.org/C.Ariza%20%26%20S.Mejia-Optimizaci3n%20del%20proceso%20de%20landfarming-V14N3.pdf)
- Coria, I. D. (2007). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Universidad Abierta Interamericana*, 1–7.
- Cossio, M. L. T., Giesen, L. F., Araya, G., Pérez-Cotapos, M. L. S., Vergara, R. L., Manca, M., Tohme, R. A., Holmberg, S. D., Bressmann, T., Lirio, D. R., Román, J. S., Solís, R. G., Thakur, S., Rao, S. N., Modelado, E. L., La, A. D. E., Durante, C., Tradición, U. N. A., En, M., ... Héritier, F. (2012). Biorremediación. *Uma Ética Para Quantos?*, XXXIII(2), 81–87.
<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Crespo González, A. (2018). *Revisión Del Tratamiento De Las Alteraciones En El Ciclo De La Urea*. 1–20.
- Díaz, J., Ricoy, cristina, Moreno, C., Ricoy, V., Perez, V., & Valbuena, O. (2013). *Incorporación de Alcanos Por Bacterias Degradadoras de Hidrocarburos mediada por una Proteína de 70 KDa Combustible Diesel*. 38, 437–442.
- Encinas, M. (2011). Medio Ambiente Y Contaminación. Principios Básicos. In *Addi.Ehu.Es*.
<https://bit.ly/2QDqF6R>
- Geotecnia. (2000). Remediación de suelos contaminadas por hidrocarburos mediante biopilas: Caso práctico. *PONENCIA*, 2000, 1–92. [http://www.geotecnia2000.com/files/archivos/Ponencia - Suelos Contaminados.pdf](http://www.geotecnia2000.com/files/archivos/Ponencia_-_Suelos_Contaminados.pdf)
- Helena, P., Cardona, P., Del, G., & Mercado, C. (2014). *Petróleo En Colombia Bioremediation Contaminated Soil Oil Spill in Colombia Petroleum*.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2006). Análisis de los datos cuantitativos. In *Metodología de la investigación*.
- Instituto nacional de estadística e informática. (2013). *PERÚ Instituto Nacional de Estadística e Informática*. <https://www.inei.gob.pe/estadisticas-indice-tematico/>
- Quezada Lucio, N. (2010). *Estadística para Ingenieros*. Macro E.I.R.L.

- Sánchez Yañes, J. M., Alonso Bravo, Jennyfer Nayeli Dasgupta Schuber, N., & Márquez Benavides, L. (2015). *Biorremediación de suelo contaminado con 55000 y 65000 de aceite residual automotriz y fitorre- mediación con Sorghum bicolor inoculado con Burkholderia cepacia y Penicillium chrysogenum* *Bioremediation of soil contaminated by waste motor oil in 55000 and.* 86–94.
- Sepúlveda, T. V., & Trejo, J. V. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. In *Jiménez Editores*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Torres Delgado, K., & Zuluaga Montoya, T. (2013). Biorremediación de suelos contaminados en Colombia. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Universidad de Ácala. (2012). Remediación contra eventos de contaminación masiva. *Seminario*, 22.
http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/remediacion.pdf