

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“METAANÁLISIS DEL USO DE *MEGATHYRSUS MÁXIMUS* EN LA
FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS DE PETRÓLEO
EN EL PERIODO 2014-2023”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autores:

Jean Franko Rivera Cirilo

Pilar Helen Vidal Martinez

Asesor:

Mg. Haniel Josué Torres Joaquín
<https://orcid.org/0000-0001-9659-4250>

Lima - Perú

2024

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	MAGDA ROSA VELASQUEZ MARIN
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	DENISSE MILAGROS ALVA MENDOZA
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	HANIEL JOSUE TORRES JOAQUIN
	Nombre y Apellidos

INFORME DE SIMILITUD

TESIS

ORIGINALITY REPORT

9%	10%	1%	4%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	docplayer.es Internet Source	2%
2	repository.javeriana.edu.co Internet Source	1%
3	repositorio.ucv.edu.pe Internet Source	1%
4	www.scielo.org.mx Internet Source	1%
5	pubag.nal.usda.gov Internet Source	1%
6	repositorio.upse.edu.ec Internet Source	1%
7	repositoriodigital.ipn.mx Internet Source	1%
8	repositorioinstitucional.buap.mx Internet Source	1%
9	hemeroteca.unad.edu.co Internet Source	1%

DEDICATORIA

Deseamos expresar nuestra más sincera gratitud a nuestros padres, cuya dedicación inquebrantable hacia nuestro bienestar y su apoyo constante a lo largo de todo este proceso educativo han sido pilares fundamentales en nuestro camino hacia el éxito. Su sacrificio y amor incondicional han sido una fuente inagotable de inspiración y fortaleza, y no podemos más que valorar profundamente su inestimable contribución en nuestro viaje académico y personal.

AGRADECIMIENTO

Estamos profundamente agradecidos por la valiosa contribución de nuestros queridos profesores, la colaboración y apoyo de nuestros compañeros, y el respaldo incondicional de nuestra universidad en todos los aspectos. Esta experiencia, en conjunto con la abundante sabiduría que hemos adquirido a lo largo de nuestro tiempo aquí, ha sido invaluable para nuestro crecimiento y desarrollo académico.

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR	2
INFORME DE SIMILITUD	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
TABLA DE CONTENIDO	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	25
CAPÍTULO III: RESULTADOS	32
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	50
REFERENCIAS	56
ANEXOS	61

Índice de tablas

Tabla 1. Etapas de la recolección de información	27
Tabla 2. Validación de expertos	27
Tabla 3. Estrategias de búsqueda	29
Tabla 4. Variables a recolectar	30
Tabla 5. Ficha de caracterización de estudios relevantes	34
Tabla 6. Ficha de información técnico de estudios relevantes	36
Tabla 7. Estadísticas descriptivas	39

Índice de figuras

Figura. 1. Contaminación ambiental	19
Figura. 2. Usos de los hidrocarburos	19
Figura. 3. Forraje de <i>Megathyrus maximus</i>	20
Figura. 4. Programa Review Manager 5	31
Figura. 5. Clasificación de los artículos científicos	39
Figura. 6. Ploteo entre las Concentración de Fitorremediación	42
Figura. 7. Ploteo entre las Concentración iniciales y finales	44
Figura. 8. Ploteo de pH iniciales y finales	46
Figura. 9. Ploteo de % de fitorremediación vs días de aplicación	49

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo demostrar el uso de *Megathyrus maximus* como fitorremediador a través del metaanálisis en suelos contaminados de petróleo en el periodo 2014-2023. Se recopiló estudios científicos de diversas las bases de datos, como referencia a las variables como los productos contaminados con petróleo entre el periodo 2014 al 2023. Quedaron 18 artículos que tuvieron los parámetros de trabajo, se realizó una tabla de caracterización de los datos obtenidos, dónde finalmente 9 artículos científicos cumplieron con los criterios de inclusión que son: especie del fitorremediador y suelo contaminado. Adicionalmente se añadió 1 artículo a nuestro criterio, obteniéndose así 10 estudios. En los resultados se demostró que *Megathyrus maximus* es una planta que tiene una efectividad de 42.5% promedio en la remoción de contaminantes, dónde estos datos varían según el período en el que es realizado. Finalmente, los días de aplicación de fitorremediación en todos los estudios seleccionados fueron en el rango de 90-120 días, de los cuales el 60% de los estudios supera el 40% de remoción de contaminantes. Se concluye que el uso de *Megathyrus maximus* logra obtener valores de pH neutro y un % de fitorremediación del 42.5%, obteniendo así buenos resultados en el metaanálisis.

PALABRAS CLAVES: *Hidrocarburo, fitorremediador, tratamiento, plan de fitorremediación, Megathyrus maximus*

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Los hidrocarburos son combustibles fósiles ampliamente utilizados alrededor del mundo como generadores de diversas formas de energía, se encuentran en la naturaleza gracias a la acumulación de biomasa durante millones de años. Sin embargo, es posible que en la extracción se genere contaminación en agua y suelos debido a constantes derrames accidentales, los cuales son muy comunes en países productores. (Velásquez, J., s.f.).

La contaminación de los suelos por derrames o disposición inadecuada de petróleo es un problema ambiental mundial, particularmente la contaminación producida por el petróleo pesado y extrapesado, que, aunque son menos tóxicos que los petróleos livianos y medianos, su remediación es más difícil y costosa (Infante y Morales, 2012)

Existe un alto porcentaje de derrames en el Perú, principalmente en la selva, al igual que en las zonas mineras. En algunas comunidades nativas, han existido derrames de petróleo que afectan de manera brusca el ecosistema animal y recursos hidrológicos. Según INDECI (2012), se detallan altas concentraciones de hidrocarburos en el agua, superando por mucho los ECA's establecidos, hasta tal punto de poder visualizar un color negro en la superficie de los arroyos y demás, llegando así a contaminar los suelos aledaños a estos canales.

Dentro de las técnicas para la descontaminación de suelos, la fitorremediación resulta atractiva por su bajo costo, por mejorar las condiciones del suelo, por ser estéticamente agradable y ambientalmente amigable (Yaravi et al, 2015).

Si bien, la fitorremediación se fundamenta en el uso de plantas y su microbiota asociada para remover, retener o reducir los contaminantes presentes en el ambiente, se puede operar mediante diversos mecanismos que involucran distintas partes de las plantas. (Khan et al, 2013)

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, se seleccionó la especie *Megathyrus maximus* como agente fitorremediador, debido a que es una especie adaptable, posee un rápido crecimiento (sustento técnico), donde sus cuidados agrícolas son muy conocidos, las semillas de estos se pueden conseguir en variedad de lugares y a un bajo costo.

Antecedentes internacionales.

Iveth Neira (2022), En su tema *Uso De Fabáceas Como Alternativa De Fitorremediación De Suelos Contaminados Por Petróleo En La Provincia De Santa Elena* indica que el uso de leguminosas para la fitorremediación de suelos contaminados por petróleo en la provincia de Santa Elena se llevó a cabo una revisión bibliográfica de 24 documentos científicos de los últimos 12 años, utilizando palabras clave como "Fitorremediación con leguminosas en suelos contaminados por hidrocarburos". Los resultados indican que el método más eficaz es la Fito extracción, con *Leucaena leucocephala* y *Medicago sativa* como las especies más efectivas en la eliminación de petróleo crudo e hidrocarburos aromáticos policíclicos, los principales contaminantes del suelo.

Pamela Camacho (2022), *Aplicación De La Fitorremediación En Áreas Afectadas Por Contaminantes En Ecuador* menciona que el objetivo de esta investigación fue analizar la tendencia en el uso de la fitorremediación en Ecuador durante la última década. Se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos como Scielo, Redalyc, Google Académico y repositorios universitarios utilizando "Fitorremediación en Ecuador" como palabra clave. Se recopilaron 24 estudios que se organizaron según año, lugar, especies vegetales, género, orden, familia y tipos de contaminantes (hidrocarburos y metales pesados). De los 53 tipos de especies identificadas, 42 fueron consideradas hiperacumuladoras debido a su capacidad para resistir y acumular concentraciones contaminantes en suelos ecuatorianos. Entre las 53 especies diferentes identificadas, 42 se clasificaron como hiper acumuladoras debido a su excepcional capacidad para prosperar y acumular concentraciones de contaminantes en los suelos ecuatorianos. Este hallazgo sugiere que estas especies de plantas específicas poseen una capacidad única no sólo para resistir, sino también para acumular activamente contaminantes, lo que las hace altamente adecuadas para fines de fitorremediación en la región. Estas especies hiper acumuladoras representan un

recurso valioso para la restauración ecológica y la remediación de áreas contaminadas en Ecuador, contribuyendo a la comprensión general de las posibles aplicaciones de la fitorremediación para abordar desafíos ambientales.

Camila Torres (2022), en *Evaluación De Estrategias Sostenibles Para La Remediación De Suelos Contaminados Con Hidrocarburo Pesado*, indica que la contaminación del suelo debido a derrames de hidrocarburos, que pueden resultar de actividades en la industria petrolera como explotación, producción, transporte o rupturas en oleoductos, es un grave problema ambiental. Para abordar esta cuestión, se realizó un estudio descriptivo en este trabajo de grado para investigar y comprender los diferentes métodos de tratamiento utilizados en la recuperación de suelos contaminados por incidentes en la industria petrolera.

Antecedentes nacionales.

Astudillo y Vicente (2020), en su artículo *Técnicas De Fitorremediación Para El Tratamiento Suelos Contaminados Con Petróleo* menciona que la contaminación del suelo por hidrocarburos causa preocupación debido a su impacto en los ecosistemas y la biodiversidad. La fitorremediación se utiliza para mejorar esta situación de manera sostenible y económica. Esta investigación se enfocó en identificar y evaluar las técnicas de fitorremediación más efectivas para suelos contaminados por hidrocarburos. Se realizó una revisión sistemática de la literatura utilizando palabras clave en varias bases de datos, seleccionando 20 artículos relevantes. Los resultados indican que la Fito estabilización es la técnica más comúnmente utilizada, seguida de la Fito extracción. Las especies más efectivas en la remoción de petróleo son *Phosealus vulgaris*, *Hordeum vulgaris* y *Spinacea oleracea*, que pueden degradar hasta un 90% de hidrocarburos totales a temperaturas de 18° a 25°C, con humedad relativa de 68% a 80%, y un pH del suelo de 4 a 7.

Fiestas y Vásquez (2020), en *Biorremediación De Suelos Salinos Contaminados Con Petróleo Por El Consorcio Bacteriano De Pseudomona Por La Técnica De Bioaumentación* sustenta que el estudio investigó la efectividad de las bacterias del género *Pseudomonas* en la biorremediación de suelos salinos contaminados con petróleo. Se realizó una revisión sistemática de 50 artículos de investigación y se encontró que *Pseudomonas*, como *P. aeruginosa*, *P. putida* y *P. fluorescens*, es eficaz en la remoción de hasta el 98% de los hidrocarburos debido a su

diversidad metabólica y resistencia a altas concentraciones de sal. Estas bacterias pueden utilizar hidrocarburos como sustrato y nutrientes, adaptándose a las condiciones contaminadas y formando ramnolípidos con potencial biorremediador.

Tamayo y Cariga (2021), en *Aplicaciones de Microorganismos para Remediar Suelos Contaminados por Petróleo y sus Residuos o Derivados. Revisión Sistemática 2021* menciona la forma de búsqueda de artículos científicos según las características fisicoquímicas y toxicidad del suelo. Esta revisión sistemática de los últimos 7 años evaluó el uso de microorganismos, características del suelo, las técnicas de biorremediación y la dinámica microbiana. Los resultados muestran que la bioaumentación es efectiva, especialmente cuando se combina con la adsorción en polvos orgánicos. Sin embargo, se necesita una mayor comprensión de los mecanismos metabólicos de hongos y bacterias. Lo que indica que la biorremediación es mucho mejor con la adición de hongos y/o bacterias que ayuden con la remediación.

Gutiérrez (2020), en *Revisión sistemática de métodos de fitorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos* menciona que el estudio investigó los principales métodos de fitorremediación para suelos contaminados con hidrocarburos. Se llevó a cabo una investigación cualitativa descriptiva con diseño narrativo en tres etapas: búsqueda de artículos científicos en plataformas como Scopus, Dialnet, ScienceDirect y Scielo, limitando la selección a artículos de revistas indexadas aplicables y con hasta 5 años de antigüedad, con lo que se seleccionaron 50 artículos. La información se categorizó en Fito degradación, Fito estimulación y Fito acumulación, y se estableció como el método más utilizado la Fito degradación con un total de 20 artículos, y por otro lado se determinó que la fitorremediación utiliza a las plantas como bombas extractoras depuradoras de suelos contaminados.

Flores (2020), en *Modelos Usados en Fitorremediación de Metales Pesados en Suelo*,

Revisión Sistemática, 2022 menciona que la investigación se enfocó en la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados, con el objetivo de evaluar los modelos utilizados en este proceso. Se realizó una revisión sistemática de revistas indexadas con un período no menor de 5 años. Los resultados fueron 59 artículos seleccionados, de los cuales destacaron varios modelos efectivos, como

Langmuir, sigmoides, regresión múltiple, regresión lineal y Freundlich, que demostraron eficacia en la eliminación de contaminantes y la cuantificación de metales acumulados en plantas. Se concluyó que los modelos más importantes y ampliamente utilizados son Sigmoides, Freundlich y Langmuir, debido a su capacidad para eliminar diversos metales (principalmente Cd, Pb y Cu) en diferentes tipos de suelos, aunque Langmuir se destaca como un modelo fenomenológico poderoso y descriptivo en el proceso de adsorción.

Bases teóricas

Bases teóricas de fitorremediación.

Mendoza, Y. y Castro, F. (2016), menciona que la fitorremediación es un tratamiento donde se aprovechan los procesos biológicos de las plantas acuáticas y microorganismos (adsorción, absorción, degradación, reacciones redox, acumulación, etc.) debido a su capacidad de eliminar una gran variedad de contaminantes (nutrientes, metales pesados, sustancias orgánicas, metales radioactivos, derivados del petróleo, otros), que por su naturaleza pueden provocar problemas ambientales. Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos físico químicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo. En esta revisión se presenta un panorama de las diversas técnicas fito correctivas empleadas para restaurar suelos y efluentes contaminados; así como del potencial que ofrece el uso de plantas transgénicas.

Transporte de contaminantes orgánicos

Los microorganismos que habitan en la rizósfera juegan un papel importante en la degradación de la materia orgánica. Los metabolitos generados de esta degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales. Algunos compuestos orgánicos son utilizados por los microorganismos como fuente de carbono. Otro fenómeno importante es el relacionado con la atracción electrostática entre las cargas eléctricas de las raíces de las plantas con las cargas opuestas de partículas coloidales, las cuales se adhieren a la superficie de la raíz donde son absorbidas y transportadas a las partes aéreas donde se metabolizan o volatilizan. El tipo de planta y las propiedades físicas y químicas de estos compuestos son parámetros importantes que determinan el destino de los contaminantes. Para la fitorremediación de contaminantes orgánicos se toma en cuenta los siguientes aspectos: 1) el metabolismo de los

contaminantes al interior y al exterior de la planta (rizósfera), 2) los procesos que conducen a la completa degradación de los contaminantes (mineralización), y 3) la absorción de los contaminantes. A continuación, se muestran algunas especies relacionadas:

- *Salix* spp. (Sauce): Algunas especies de sauces son conocidas por su capacidad para fito degradar contaminantes orgánicos, como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Su sistema de raíces desarrollado y su tolerancia a condiciones adversas les permiten prosperar en suelos contaminados.
- *Populus* spp. (Álamo): Los álamos, en particular el álamo negro (*Populus nigra*) y el álamo temblón (*Populus tremuloides*), se utilizan en la Fito degradación de contaminantes orgánicos, incluyendo compuestos clorados y solventes orgánicos.
- *Helianthus annuus* (Girasol): El girasol ha demostrado su capacidad para eliminar metales pesados y compuestos orgánicos del suelo, aunque generalmente se enfoca en la Fito extracción de metales.

Transporte de contaminantes inorgánicos

El transporte de contaminantes inorgánicos, como los metales pesados, en las plantas es un proceso fundamental que puede tener importantes implicaciones en la salud de los ecosistemas y la biota circundante. Los metales pesados, definidos por su alta densidad y número atómico superior a 20, tienen la capacidad de interactuar con las plantas de varias maneras, y su transporte dentro de la planta sigue un conjunto de fases clave:

Absorción: El proceso comienza con la absorción de metales pesados del suelo por las raíces de las plantas. La eficiencia de absorción depende de factores como el tipo de metal, su forma química en el suelo y las propiedades de las raíces, como su superficie y la presencia de transportadores específicos.

Translocación: Una vez que los metales pesados son absorbidos por las raíces, se mueven a través de la planta a medida que son transportados desde las raíces hacia los tejidos superiores, incluyendo el tallo, las hojas y otras partes aéreas. Este proceso de

translocación puede variar según el metal y la especie de planta, y puede ser limitado o promovido por diversas rutas y mecanismos.

Secuestro y Acumulación: En esta etapa, los metales pesados pueden ser secuestrados y acumulados en ciertos tejidos o compartimentos celulares de la planta. Las plantas pueden almacenar metales pesados en vacuolas o estructuras de almacenamiento especiales, lo que reduce la toxicidad potencial en otras partes de la planta. Este proceso de secuestro ayuda a las plantas a tolerar niveles más altos de metales pesados en su entorno.

El transporte de metales al interior de la planta se puede dar por absorción foliar o radical, ya sea por medio de las células de la raíz o por la cutícula de la hoja.

- Una vez dentro de las células, estos iones son secuestrados por ligandos tales como fitoquelatinas, metalotioneinas o quelantes a base de cisteína y posteriormente son compartimentalizados en diferentes organelos de la planta. Aunque algunos tipos de transportadores permiten la salida de los ligandos con iones metálicos los cuales se transportan vía xilema o floema, de acuerdo con el mecanismo de ingreso, llegan finalmente a diferentes partes de la planta.

- La absorción foliar de metales pesados en plantas depende de las características fisicoquímicas de la cutícula y metales, la morfología y superficie de área de las hojas, las formas físicas y químicas de los metales absorbidos, textura superficial de las hojas (pubescencia y rugosidad), hábitat de la planta, duración de exposición, condiciones ambientales e intercambio de gases. (Reyes, Y.; 2020). *Estudio de bioacumulación de metales pesados en plantas de consumo humano para censado molecular In situ, Colombia.*

La bioacumulación y biomagnificación de metales pesados fue diferente entre órganos y tejidos, por lo que se demostró un proceso de organotropía, en donde el gradiente de bioacumulación de cada elemento fue; Cd hígado> músculo> branquia> gónada, Cu gónada> hígado> músculo> branquia, Pb branquia> músculo> gónada> hígado y Zn músculo> branquia> hígado> gónada. A través de las cadenas alimentarias puede representar un riesgo significativo para los seres vivos que dependen de esas plantas como fuente de alimento, ya que los metales pesados pueden llegar a concentraciones tóxicas a medida que avanzan en la cadena trófica. Por lo tanto, entender los mecanismos de transporte y acumulación de metales pesados en las plantas

es esencial para abordar los problemas de contaminación y sus efectos en los ecosistemas (Valle, F; 2021). En su artículo: *Biomagnificación, Bioacumulación Diferencial De Metales Pesados En Tejidos Y Órganos E Impacto En La Condición De Salud Del Pargo Lunarejo*.

Hidrocarburos:

Velásquez, J. (2016) en su artículo: *Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación*, Indica que son combustibles fósiles ampliamente utilizados alrededor del mundo como generadores fundamentales de diversas formas de energía, ellos están en la naturaleza gracias a la acumulación de biomasa durante millones de años. Sin embargo, es posible que en su extracción se genere contaminación en agua y suelos debido a constantes derrames accidentales, los cuales son muy comunes en países productores.

Hidrocarburos alifáticos

La evaluación se centra en la clasificación de los hidrocarburos presentes en el petróleo crudo, teniendo en cuenta su estado físico a temperatura ambiente y su identificación basada en su fórmula química y nombre común:

- Metano (CH₄): Se evalúa en cuanto a su estado físico a temperatura ambiente, el cual es gaseoso.
- Etano: También se examina en cuanto a su estado físico a temperatura ambiente, el cual es gaseoso.
- Propano: Se lleva a cabo una evaluación de su estado físico a temperatura ambiente, que es gaseoso.
- n-Butano: Del mismo modo, se evalúa su estado físico a temperatura ambiente, que es gaseoso.
- n-Pentano: En este caso, se examina su estado físico a temperatura ambiente, que es líquido.
- n-Cetano (Hasta C₁₆): La evaluación se centra en su estado físico a temperatura ambiente, el cual es líquido.
- Moléculas parafínicas normales de peso molecular superior: Igualmente, se considera su estado físico a temperatura ambiente, que es sólido.

- Parafina: Cabe mencionar que todas las moléculas mencionadas, desde el n-pentano hasta el n-cetano, junto con las moléculas parafínicas normales de peso molecular superior, conforman lo que comúnmente se conoce como "parafina".

Definición, Fitorremediación

Fitorremediación es una técnica de remediación ambiental que utiliza plantas para eliminar, degradar, inmovilizar o acumular contaminantes del suelo, el agua o el aire. Esta técnica aprovecha la capacidad natural de las plantas para absorber y acumular sustancias contaminantes, como metales pesados, contaminantes orgánicos, o incluso nutrientes en exceso, con el objetivo de reducir los niveles de contaminación en el medio ambiente.

La fitorremediación se basa en varios mecanismos y procesos que pueden incluir:

Fitorremediación por absorción: Las plantas absorben contaminantes del suelo o el agua a través de sus raíces y los acumulan en sus tejidos. Esta acumulación puede ser posteriormente cosechada y eliminada de manera segura.

Fitorremediación por Fito degradación: Algunas plantas tienen la capacidad de degradar contaminantes orgánicos a través de enzimas presentes en sus raíces o tejidos, descomponiéndose en productos menos tóxicos.

Fitorremediación por Fito estabilización: En este proceso, las plantas ayudan a inmovilizar los contaminantes en el suelo al modificar las condiciones químicas del mismo, evitando así que se dispersen o sean absorbidos por organismos vivos.

Fitorremediación por volatilización: Algunas plantas pueden absorber contaminantes y liberarlos en forma de vapor a través de un proceso conocido como fitovolatilización.

Fitorremediación por hiper acumulación: Algunas plantas, conocidas como hiper acumuladoras, tienen la capacidad de acumular cantidades excepcionalmente altas de ciertos contaminantes en sus tejidos, lo que permite su extracción efectiva del suelo o el agua.

La fitorremediación se considera una opción respetuosa con el medio ambiente y puede ser una alternativa rentable para abordar la contaminación en sitios afectados. Sin embargo, su eficacia puede variar según la naturaleza de los contaminantes, las especies de plantas seleccionadas y las condiciones ambientales locales.

Contaminación ambiental

Es la alteración al medio ambiente dañando de manera leve o grave, o destruyéndolo por completo. También debemos tener en cuenta el factor tiempo, ya que el daño puede ser temporal o continuo. Además, si se trata de contaminación ambiental influye en la contaminación del agua, suelo, aire.

Figura. 1. *Contaminación ambiental*



Hidrocarburos

El petróleo es un compuesto químico complejo en el que coexisten partes líquidas con sólidas y gaseosas. Lo constituyen, por una parte, unos compuestos denominados hidrocarburos, formados por átomos de carbono e hidrógeno y, por otra, pequeñas cantidades de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. Aparece asociado a rocas de naturaleza sedimentaria y su color es variable, entre el ámbar y el negro. (Rodríguez, M. y Amaro, A. 2017).

Figura. 2. *Usos de los hidrocarburos*



Megathyrsus maximus (La hierba de guinea)

Megathyrsus maximus, comúnmente conocida como "Megathyrsus" o "Pennisetum maximus," es una especie de pasto forrajero originaria de África del Este, con una amplia distribución en países como Tanzania, Costa de Marfil, Uganda y Kenia. Esta planta ha atraído la atención debido a sus diversas características beneficiosas, tanto para el medio ambiente como para la producción ganadera (Rodríguez, M. y Amaro, A. 2017).

Figura. 3. Forraje de *Megathyrsus maximus*



Algunos de los aspectos clave que se puede abordar en la investigación:

Adaptabilidad y Tolerancia: *M. maximus* se destaca por su adaptabilidad a una variedad de condiciones climáticas y tipos de suelo. Esta capacidad de crecer en diversas condiciones ambientales lo convierte en una opción atractiva para la restauración de suelos degradados y la revegetación.

Producción de Materia Seca: Esta especie tiene una alta capacidad de producción de materia seca por unidad de área. Esta característica es esencial en la producción ganadera, ya que proporciona una fuente abundante de alimento para el ganado.

Nutrición Animal: *M. maximus* es conocido por su valor nutricional y su aceptación por parte de los animales de pastoreo, como el ganado. Su calidad forrajera y su contenido nutricional son aspectos importantes para considerar en la producción ganadera sostenible.

Impacto Ambiental Positivo: La capacidad de *M. maximus* para prosperar en diferentes entornos puede contribuir a la conservación del suelo y la prevención de la erosión. Además, su sistema de raíces puede ayudar en la captura de carbono y la mejora de la estructura del suelo.

Usos Potenciales: Explora las aplicaciones potenciales de *M. maximus* en la agricultura, la ganadería, la restauración ambiental y otros campos relacionados con la sostenibilidad.

Además, *Megathyrus maximus* (Hierba Guinea) y sus procesos potenciales de remediación:

1. Tolerancia al petróleo: La Hierba Guinea ha demostrado ser resistente a los efectos negativos del petróleo y sus derivados, lo que la convierte en una candidata prometedora para la fitorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos.

2. Fitorremediación: La capacidad de la Hierba Guinea para absorber, acumular y metabolizar contaminantes petroleros del suelo es una de sus principales ventajas. A través de un proceso conocido como fitorremediación, las raíces de la planta pueden extraer compuestos tóxicos y contaminantes del suelo, ayudando así a limpiarlo.

3. Aumento en la biodiversidad: La introducción de *Megathyrus maximus* en suelos contaminados puede fomentar la biodiversidad local al proporcionar un hábitat propicio para otros organismos, lo que puede contribuir a la recuperación del ecosistema.

4. Aporte de materia orgánica: La descomposición de la materia vegetal de la Hierba Guinea en el suelo puede mejorar la calidad del sustrato al aumentar su contenido de materia orgánica.

5. Proceso de fitorremediación: El proceso de fitorremediación con *Megathyrus maximus* generalmente implica plantar la hierba en áreas contaminadas y permitir que crezca y extraiga los contaminantes del suelo durante un período de tiempo determinado. Luego, la planta puede ser cosechada y eliminada adecuadamente para contener los contaminantes extraídos.

Es importante destacar que la eficacia de *Megathyrus maximus* en la fitorremediación puede variar según las condiciones específicas del suelo y la contaminación. Sin embargo, con una gestión adecuada y monitoreo constante, esta planta puede desempeñar un papel importante en la recuperación de suelos contaminados por petróleo.

1.2. Formulación del problema

Problema general

¿Qué se conoce del uso del *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo en el periodo 2014-2023?

Problemas específicos.

Problema Específico 1: ¿Cuál es el porcentaje de remoción de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023)?

Problema Específico 2: ¿Cuál es la influencia de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en el pH de suelos contaminados por petróleo?

Problema Específico 3: ¿Cuál es el tiempo óptimo de remoción de contaminantes utilizando a *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo?

1.3. Objetivos

Conocer la eficacia de la especie *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo mediante estudios en el periodo 2014-2023.

Objetivos específicos.

A continuación, los problemas específicos se han convertido en objetivos de investigación:

Objetivo Específico 1: Determinar el porcentaje de remoción de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023) usando concentraciones iniciales y finales.

Objetivo Específico 2: Determinar cuál es la influencia de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en el pH de suelos contaminados por petróleo.

Objetivo Específico 3: Determinar cuál es el tiempo óptimo de remoción de contaminante de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo.

1.4. Hipótesis

Existe un conocimiento amplio en la capacidad fitorremediador de la especie *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo, y esta influencia varía de manera significativa a lo largo del período 2014-2023.

Hipótesis específicas.

Hipótesis Específicas 1: Existe una efectividad significativa en el porcentaje de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023).

Hipótesis Específico 2: Existe una influencia significativa de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en el pH de suelos contaminados por petróleo.

Hipótesis Específico 3: Existen diferencias significativas entre el % de remediación y los días de aplicación de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados variará según la concentración inicial del contaminante.

1.5. Justificación

Se justifica, debido a que la contaminación ambiental puede verse por derrames, que se encuentra ocasionado debido a accidentes, sea por una mala manipulación de este. Debido a esto, el área afectada puede variar en diferentes aspectos, lo que complicaría establecer un método en concreto sin antes haber realizado estudios previos; ante esta problemática, el estudio establecerá conocer más acerca de la variable, como es el caso de la aplicación de métodos de trabajo para reducir la contaminación en suelos fértiles.

Según Head *et al.* (2014), el bitumen y los hidrocarburos pesados constituyen las mayores reservas de petróleo del mundo, lo que justificaría los estudios de remediación de suelos contaminados. De esta manera, se definirían los parámetros más afectados del suelo según cantidad de contaminante y método de introducción al suelo y subsuelo. Basándose en estos datos, se podrán realizar estudios en casos y contextos similares, brindando una solución previamente realizada y aplicación de una solución ya probada.

A nivel social, la investigación se basa en ayudar a la población a tener mejor calidad de vida, identificando los factores que pueden ayudar a limpiar los suelos contaminados por los derrames de petróleo. En casos particulares, como en comunidades nativas, se tiene mayor impacto debido a que consumen lo que producen.

Al contaminar el suelo, su producción se ve afectada, de esta misma manera el recurso hídrico, lo que los lleva a retirarse los pobladores de la zona afectada.

Con la obtención de resultados de la investigación, diversas poblaciones que sufren de estos impactos podrían adoptar esta medida para poder rehabilitar el suelo mediante el uso de la vegetación y tener conocimientos previos sobre esta actividad y no depender de estudios estatales o privados los cuáles en variados casos toman más tiempo de lo debido para luego realizar el tratamiento.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de estudio es revisión metaanálisis, ya que presenta la evidencia de forma descriptiva, pero aplica el uso de técnicas estadísticas para combinar "numéricamente" los resultados frente a un estimador puntual sobre los resultados obtenidos por *Megathyrus maximus*, para contestar a una pregunta específica y extraer conclusiones sobre los datos recopilados. (Aguilera R., 2014).

El enfoque es básico, debido a que se busca información con propuestas de estudios múltiples relacionadas a investigaciones similares, como también existe una intencionalidad de la variable independiente como también los efectos de la variable dependiente.

El diseño de la investigación es no experimental de alcance longitudinal, ya que se realizó una búsqueda minuciosa y metódica de trabajos de investigación y de artículos de aspecto científico de distintas fuentes bibliográficas en un determinado momento sin manipular intencionalmente las variables entre los periodos 2014 al 2023.

Este metaanálisis es de nivel correlacional porque procura establecer la asociación entre las variables. Primero se identifican las variables y posteriormente, se hace el análisis por medio de la aplicación de técnicas estadísticas (Hernández, et al, 2014). Por consiguiente, en este metaanálisis se tomó en cuenta como variables los parámetros de fitorremediación en suelos contaminados de petróleo en el periodo 2014-2023.

2.2. Población y muestra

En el presente estudio, se utilizaron criterios de búsqueda (TABLA 3) y se obtuvieron como población inicial a 18 artículos científicos buscados en las siguientes bases de datos: SCOPUS, PUBMED, WEB OF SCIENCE y SCIENCEDIRECT, donde a todos los estudios que determinaron las propiedades en el uso de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo en el periodo 2014-2013. Luego de aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 9 estudios relevantes según la Tabla 2. Además, se empleó la herramienta de Review Manager modificada (Ficha 3) para evaluar la calidad de los estudios incluidos. Se

utilizó la metodología del metaanálisis como muestreo. Según Hernández et al (2018, pág. 108), es un método sistemático que permite sintetizar diversos estudios respecto a una variable independiente en un resultado final más exacto. La Unidad de análisis será cada estudio de carácter relevante que contenga información sobre el uso de *Megathyrus maximus* como fitorremediación en suelos contaminados de petróleo 2014-2023.

Por otro lado, se seleccionó un artículo a criterio del autor, debido a que no estuvo incluido dentro de los artículos encontrados por la estrategia de búsqueda establecida. Este artículo cumple con todas las características seleccionadas para el desarrollo del presente estudio.

2.3. Técnicas e instrumentos de análisis estadístico de datos

Para el presente estudio se empleó técnicas de observación y análisis documental, donde los instrumentos de recolección de datos presentados en el Anexo 2, son: Ficha de Caracterización de estudios relevantes, Ficha de información técnica de estudios relevantes. Una técnica de análisis de datos se debe precisar con dos elementos fundamentales: validez y confiabilidad, y se ajuste con los objetivos de la investigación científica (Escrí, Lluca, Granel, & Bellver, 2020).

Se utilizará la prueba de ANOVA, que es un conjunto de técnicas estadísticas de gran utilidad y ductilidad. Es útil cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados, cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones, cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afectan el resultado y se necesita ajustar su efecto o cuando se desea analizar simultáneamente el efecto de dos o más tratamientos diferentes. (Dagnino S., 2014)

Aplicaremos la prueba CHI CUADRADO, que se emplea en el análisis de dos o más grupos, y de dos o más variables y ofrece una prueba general sobre la existencia de diferencias entre las categorías que agrupan a los datos de la variable dependiente. (Hernández Y., et al., 2017).

De la misma forma, se usa el programa Review Manager 5, donde tiene incorporado el diseño del metaanálisis, donde se analiza el impacto que tiene de las variables utilizando la prueba de hipótesis para los intervalos de confianza.

Tabla 1

Etapas de la recolección de información

ETAPAS	FUENTE	TÉCNICA	INSTRUMENTO	RESULTADOS
Búsqueda de la información	Plataformas de búsqueda científica	de Observación	Formato Estrategias Búsqueda	de Posibles estudios para seleccionar
Selección de estudios relevantes	Plataformas de búsqueda científica	de Observación	Ficha de caracterización de estudios relevantes.	de Formato de recopilación de estudios relevantes
Descripción de los estudios relevantes	Plataformas de búsqueda científica	de Análisis Documental	Ficha de información técnica de los estudios.	Propiedades técnicas de los estudios.
Procesamiento de la in	Plataformas de búsqueda científica	de Análisis Documental	Review Manager 5	Gráficas y tablas estadísticas

Nota: Etapas de la recolección de información para el resultado final.

Tabla 2

Validación de expertos

Expertos	Especialidad	Ficha 1	Ficha 2	Ficha 3	Ficha 4	Ficha 5
Dr. Acosta Suasnabar	Ing. Química	89%	89%	89%	89%	89%
Dr. Cabrera Carranza	Ing. Química	79%	79%	79%	79%	79%
Dr. Castañeda Olivera	Ing. Química	90%	90%	90%	90%	90%
Total						

Nota: porcentaje de validación por cada experto según especialidad.

2.4. Procedimientos

Para lograr recolectar la información primero se procedió a encontrar las fuentes bibliográficas que más estén acordes con la variable de estudio para su identificación y posterior análisis de sus indicadores y dimensiones.

A continuación, se muestra el diagrama de procedimientos:

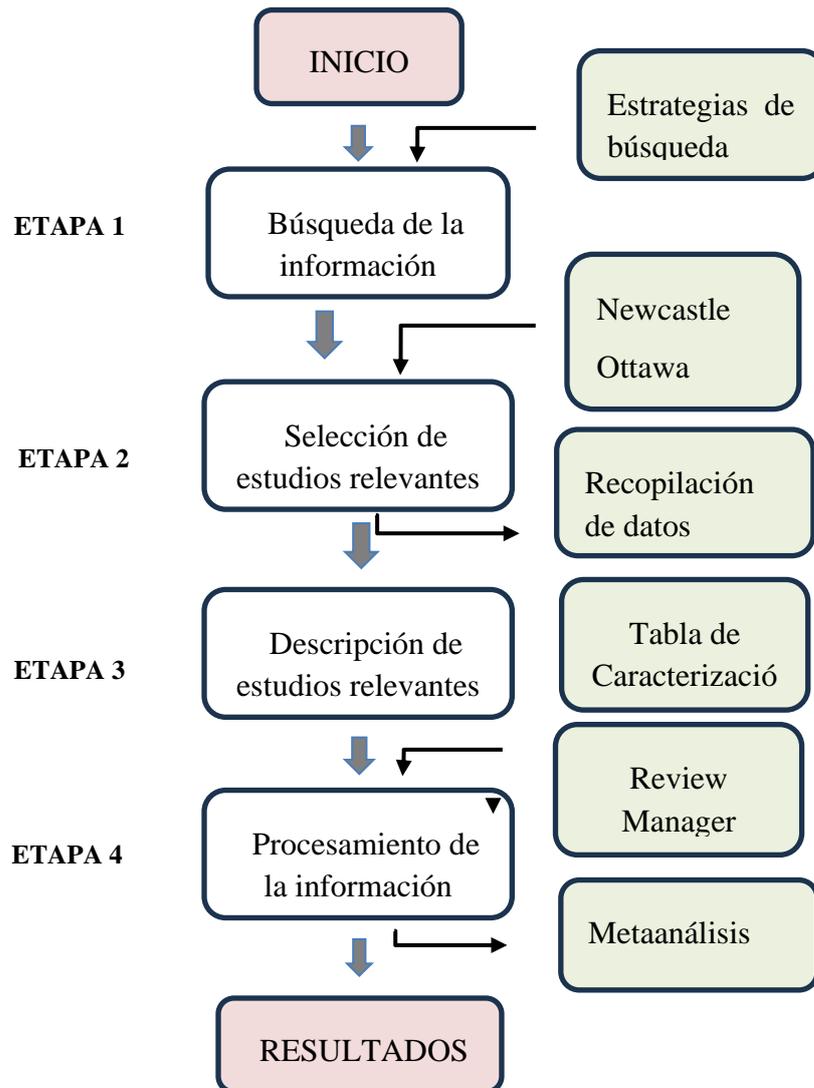


Diagrama de procedimientos.

Etapa 1: Búsqueda de información

Para la búsqueda de la información, se utilizó base de datos confiables, tales como: Scopus, Pubmed, Web of science y Science Direct. Estas plataformas de búsquedas científicas están disponibles en la Biblioteca Virtual de Scimago, donde se detallan el ranking de revistas científicas según su capacidad y productividad. Además, se consideró el empleo de estrategias de búsqueda para una búsqueda exhaustiva (Tabla 3), con códigos de consulta y combinación de palabras claves, donde se ajustó los filtros de búsqueda únicamente a artículos e investigaciones de tipo experimental y se estableció un tiempo de periodicidad de la publicación.

Tabla 3

Estrategias de búsqueda

Bases de datos	Criterios de búsqueda	Artículos encontrados
Scopus	Códigos de Consulta:	1
Web of science	“Megathyrus”, “fitorremediación”, “Cadmio”, “Suelos”, “suelos contaminados”, “petróleo”, de la misma forma en inglés: <i>Megathyrus maximus</i> , Phytoremediation, Cadmium, Contaminated soils, Petroleum	4
Sciencedirect	Periodo de Publicación: 2014-2023 (últimos 10 años)	7
Pubmed	Artículos e investigaciones de tipo experimental.	6
Total		18

Nota: La cantidad de artículos encontrados aplicando la estrategia de búsqueda.

Etapas 2: Selección de estudios relevantes

Esta etapa se inicia con un análisis observacional de las investigaciones recolectadas, luego de aplicar las Estrategias de Búsqueda. Seguidamente se desarrollaron de forma independiente los criterios de inclusión (Tabla 4) teniendo en cuenta el artículo seleccionado a criterio del autor, además de la escala Newcastle-Ottawa, modificada de evaluación de estudios relevantes (Tabla 6). Estos estudios seleccionados fueron presentados en una tabla de recopilación de estudios relevantes (Anexo 2) que permitió elaborar el metaanálisis. De acuerdo con ello, se consideran los criterios de inclusión

Etapas 3: Descripción de los estudios relevantes

Cada investigación obtuvo la caracterización del *Megathyrus maximus*. La información resultante fue sintetizada en una tabla de caracterización de estudios relevantes (Anexo 3).

Etapas 4: Evaluación de calidad de estudios relevantes

Con el fin de obtener una evaluación de la calidad metodológica de los estudios más relevantes, se utilizó la herramienta Newcastle-Ottawa Scale For Cohort Studies (Tabla 6). Esta escala de simple uso hace posible evaluar diferentes estudios no aleatorizados con el contenido y diseño correspondiente que será incorporado en la comprensión de los resultados del metaanálisis. En los encabezados del formato para la evaluación de la calidad de información se consideró la representatividad, que se menciona si la muestra es un estudio en el uso de *Megathyrus maximus* de la fitorremediación en suelos y la exposición.

2.5. Método de análisis de datos

El método comprende el análisis de metaanálisis en todos los documentos que aparecen en la base de datos de la base Pubmed, Scopus, Scielo y WOS, para el cual se llevará a cabo una técnica de análisis de datos en el cual se utilizarán ficha de información técnica de estudios relevantes, donde en ellas se extrae toda información, como es el caso de la concentración, la cantidad de tratamientos, parámetros de crecimiento y el periodo del experimento para el presente trabajo de revisión.

El análisis estadístico que utiliza el programa Review Manager 5.0 es el análisis de medias, la cual, busca encontrar la proximidad entre los resultados de los artículos científicos encontrados.

Tabla 4.

Variables para recolectar

Estudio (s)	% Reducción		Tratamiento	Periodo
	con <i>Megathyrus Maximus</i>	con especies adicionales		

Nota: son las variables que se usaron en la recolección de datos.

De la misma forma, se usa el programa Review Manager 5, donde tiene incorporado el diseño del metaanálisis, donde se analiza el impacto que tiene de las variables utilizando la prueba de hipótesis para los intervalos de confianza.

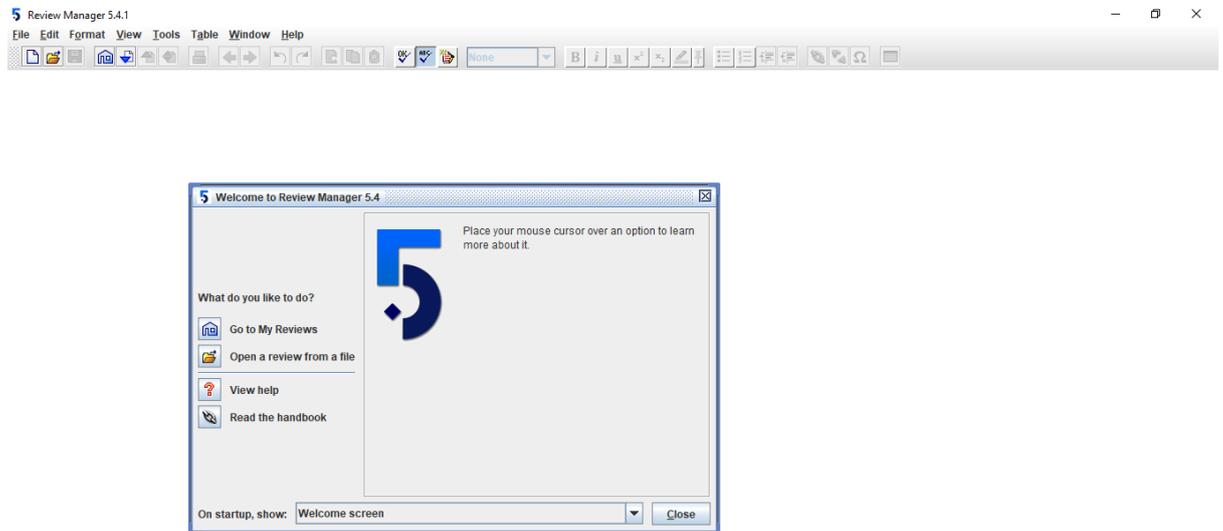


Figura 4. Programa Review Manager 5

2.6. Aspectos éticos

Se establece citando cada fuente consultada y considerada en toda la investigación, también se cuenta con la autorización de la Universidad Privada del Norte para la recolección de la información necesaria con el fin de realizar un buen proyecto. Toda la información recolectada será usada únicamente con fines académicos, utilizando el método científico y sin dejar de lado los valores que un investigador debe observar; todos los resultados se presentan sin alterar datos reales. El presente estudio es original y tiene un porcentaje de similitud no mayor a 20% según la aplicación de la herramienta Turnitin. De la misma manera, se tiene en cuenta la contribución ambiental como un aspecto fundamental para la realización del proyecto.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de selección de investigaciones para el metaanálisis:

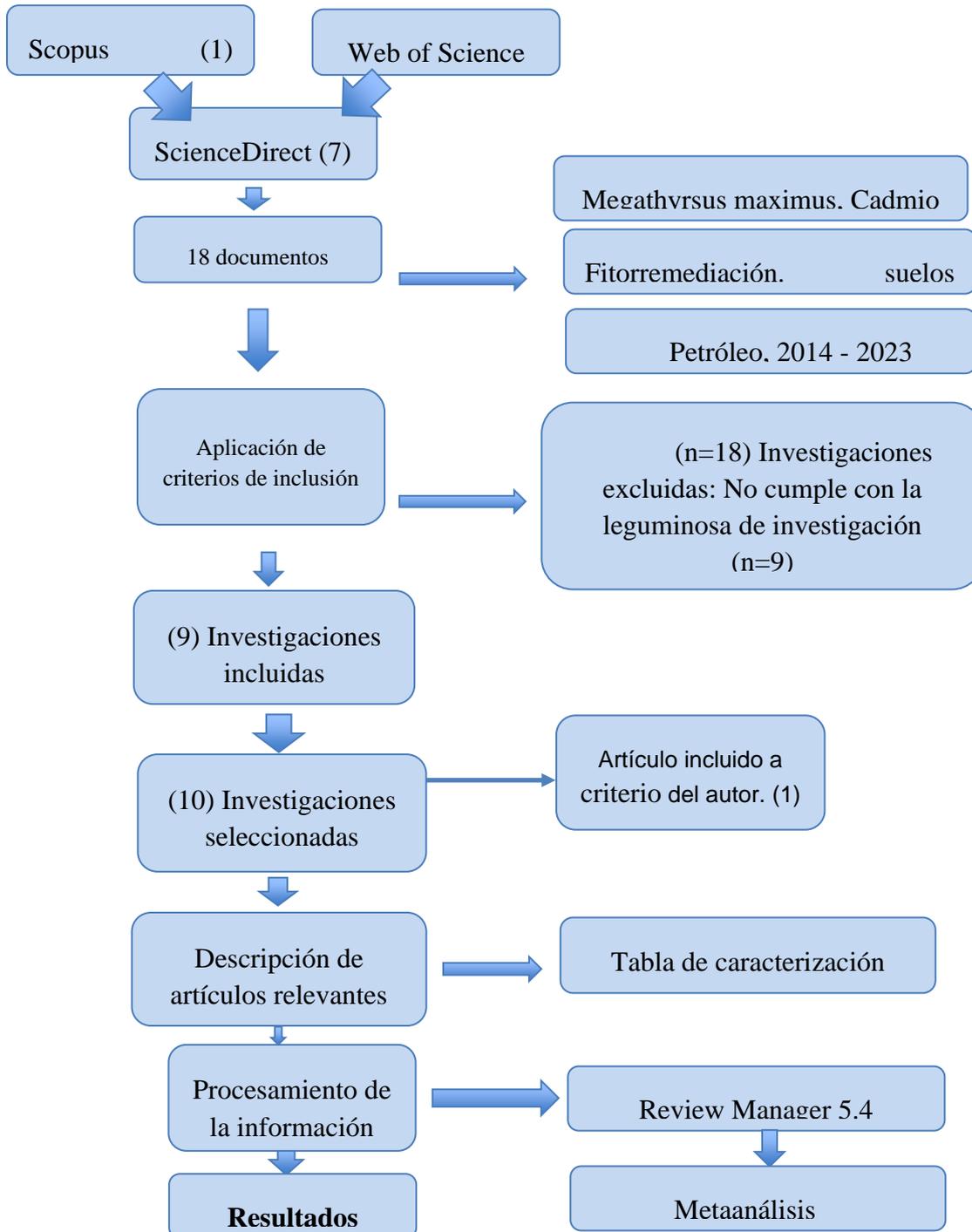


Diagrama de flujo de selección.

De los 18 artículos encontrados, se ha obtenido el texto completo, donde se aplicó una escala, se excluyeron 9 artículos científicos, diseñados con los de exclusión: No cumple con la leguminosa a *Megathyrsus maximus* (n=9).

Se presentó la búsqueda de las investigaciones de mayor relevancia de una forma resumida, también indicando la cantidad de estudios excluidos y aquellos que si fueron incluidos tras haber aplicado los criterios de inclusión y exclusión y los criterios de calidad según la escala de calidad (Newcastle-Ottawa modificada). Solo 9 artículos han sido incluidos de todas las investigaciones que se encontraron y 1 artículo seleccionado a criterio del autor.

Es importante señalar, que la investigación, no encontró artículos científicos a nivel nacional, con las componentes de inclusión ni con el ranking de la revista que lo limite respecto a su conocimiento y a nivel experimental.

Tabla 5

Ficha de caracterización de estudios relevantes

Artículo N°	Plataforma de búsqueda	Título	País	Idioma	Año	Autor (es)	Doi
1	Rev. Int. Contam. Ambie	Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extrapesado con <i>Megathyrus maximus</i>	Venezuela	Español	2017	Hernández; Navas; Infante	10.20937/RICA.2017.33.03.12
2	Rhizosphere	<i>Megathyrus maximus</i> and <i>Brachiaria decumbens</i> improve soil characteristics and select promising rhizobacteria during rhizoremediation of petroleum hydrocarbons	Colombia	Inglés	2022	Uribe; Peñuela; Pino	10.1016/j.rhisph.2022.100517
3	Food and Environmental Mycology	Synergistic action of rhizospheric fungi with <i>Megathyrus maximus</i> root speeds up hydrocarbon degradation kinetics in oil polluted soil	Pakistan	Inglés	2017	Dare; Ahmad; Gbolagade	10.1016/j.chemosphere.2017.07.158.
4	Journal of Environmental Management	Mediational influence of spent mushroom compost on phytoremediation of black-oil hydrocarbon polluted soil and response of <i>Megathyrus maximus</i> Jacq	Pakistan	Inglés	2017	Dare; Ahmad; Gbolagade	10.1016/j.jenvman.2017.05.090
5	International Journal of Phytoremediation	Tolerance and phytoremediation potential of four tropical grass species to land-applied drill cuttings	Qatar	Inglés	2018	Kogbara; Badom; Ayotamuno	
6	International Journal of Phytoremediation	Availability and zinc accumulation in forage grasses grown in contaminated soil	Brasil	Inglés	2017	Nardis; Silva; Graziotti; Melo; Mucio; Farnezi	10.1080/15226514.2017.1365347

7	Animal Nutrition	Accuracy of two optical chlorophyll meters in predicting chemical composition and in vitro ruminal organic matter degradability of <i>Brachiaria</i> hybrid, <i>Megathyrus maximus</i> , and <i>Paspalum atratum</i>	Trinidad Tobago	Inglés	2016	Hughes; Mlambo; Lallo; Basha; Nsahlai; Jennings	10.1016/j.aninu.2016.10.002
8	Plant Nutr. Soil Sci	Spent Mushroom Compost Enhances Plant Response and Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Soil	Nigeria	Inglés	2020	Dare; Stephen; Gbolagade	10.1002/jpln.202000004
9	Sustainability	Guinea Grass (<i>Megathyrus maximus</i>) Fibres as Sorbent in Diesel Bioremediation	Malaysia	Inglés	2023	Eryssa; Nadhirah; Azzura; Azmi; Abdul; Gómez-Fuentes; Zulkharnain; Lim; Ahmad	10.3390/su1553904
10	Land	Potencial of Forage Grasses in Phytoremediation of Lead through Production of Phytoliths in Contaminated Soils	Brasil	Inglés	2022	Magno de Melo; Enilson de Barros; Lopes; Silva; Graziotti; Prochnow; Pereira; Costa LThéu	10.3390/land12010062

Nota: Datos y caracterizaciones de los estudios seleccionados.

Tabla 6.

Ficha de información técnico de estudios relevantes

n° artículo	Autor	Periodo	ci (mg/g)	cf (mg/g)	% reducción de contaminante	días de aplicación	pH inicial	pH final	suplementos
1	Hernández; Navas; Infante	2017	37,5	31,1	17.06%	120 días	NE	NE	NE
2	Uribe; Peñuela; Pino	2022	NE	NE	23.83%	90 días	5,1	6,6	NE
3	Dare; Ahmad; Gbolagade	2017	0,8512	0,4738	44.34%	90 días	NE	NE	0,5 kg - 1 kg - 1.5 kg - 2.5 kg (hongo por 5 KG de tierra contaminada)
4	Dare; Ahmad; Gbolagade	2017	0,80566	0,44376	41.19%	120 días	4,7	6,8	10%,20%, 30% y 40% de compost de hongo gastado
5	Kogbara; Badom; Ayotamuno	2018	4,75	1,995	58.00%	84	4,1	6,9	NE
6	Nardis; Silva; Grazziotti; Melo; Mucio; Farnezi	2017	1.530	1.377	10.00%	90 días	7,3	7,3	NE
7	Hughes; Mlambo; Lallo; Basha; Nsahlai; Jennings	2016	NE	NE	75.00%	84 días	NE	NE	NE

8	Dare; Stephen; Gbolagade	2020	100	60	35%; [30%-40%]	90 días	4,3	6,8	10, 20, 30, 40% (hongo gastado)
9	Eryssa; Nadhirah; Azzura; Azmi; Abdul; Gómez- Fuentes; Zulkharnain; Lim; Ahmad	2023	5	1.25	74.00%	120 días	7,5	8,5	NE
10	Magno; Barros; Lopes; Silva; Grazziotti; Prochnow; Pereira; Costa LThéu	2022	270	148.5	45.00%	120 días	NE	NE	NE

Nota: Ficha de datos técnicos de los 10 estudios utilizados en este metaanálisis.

Resultados de Sensibilidad:

La sensibilidad se refiere a la capacidad de un estudio para identificar positivos verdaderos. Cada estudio ha sido evaluado en términos de su sensibilidad y se proporciona un intervalo de confianza del 95% (95% CI). Por ejemplo, el primer estudio (01) tiene una sensibilidad del 0.12, con un intervalo de confianza del 95% que varía desde 0.07 hasta 0.19.

Resultados de Especificidad:

La especificidad se refiere a la capacidad de un estudio para identificar negativos verdaderos. Sin embargo, en la tabla que proporcionaste, no se muestran los valores de especificidad para cada estudio. Parece que hay información incompleta en la tabla, ya que solo se proporcionan los valores de sensibilidad.

Resumen de Sensibilidad:

Los valores de sensibilidad para los diez estudios varían desde 0.10 hasta 0.47. Estos valores indican que la capacidad de los estudios para identificar positivos verdaderos varía ampliamente. Por ejemplo, el estudio 07 tiene la sensibilidad más alta (0.47), lo que sugiere que es el estudio más eficaz para identificar suelos contaminados con petróleo tratados con *Megathyrus maximus*.

- Las columnas "FN" y "TN" parecen mostrar el número de falsos negativos y verdaderos negativos, pero no se proporciona una descripción detallada de estos valores.
- Las columnas "Sensitivity (95% CI)" y "Specificity (95% CI)" proporcionan intervalos de confianza del 95% para las métricas de sensibilidad y especificidad.

En resumen, la tabla presenta datos sobre la sensibilidad de diez estudios que investigan la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo utilizando *Megathyrus maximus*.

Los resultados sugieren que la efectividad de esta planta en la remediación de suelos contaminados con petróleo varía significativamente entre los estudios evaluados. Sin embargo, es importante destacar que no se proporcionan los valores de especificidad en la tabla, lo que

podría ser crucial para una evaluación completa de la eficacia de *Megathyrus maximus* en este contexto.

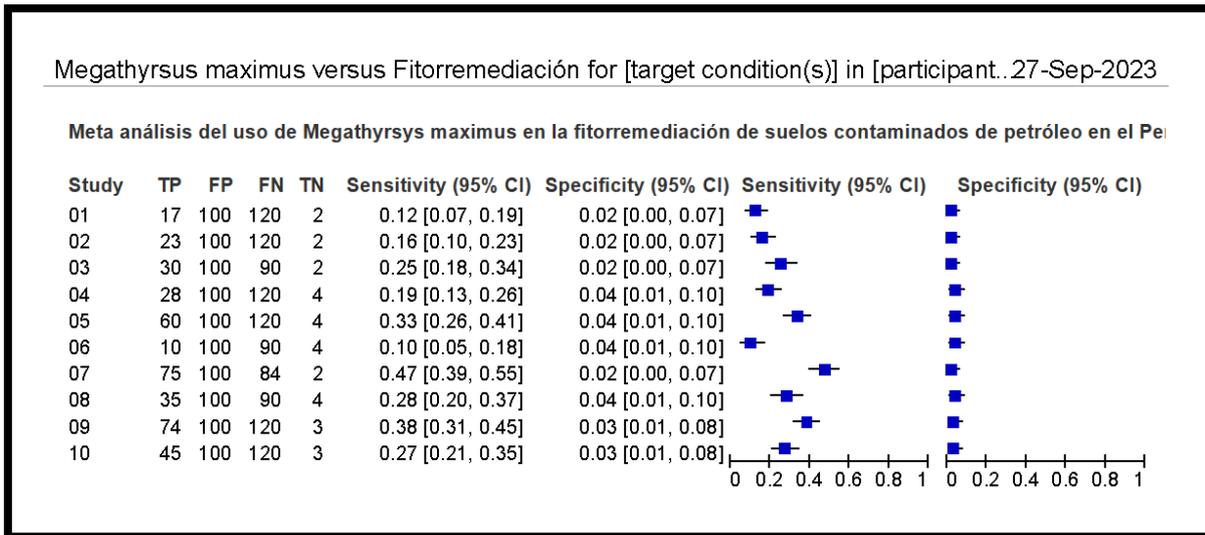


Figura. 5. Clasificación de los artículos científicos

A nivel descriptivo, se tiene una serie de características y parámetros que son detallados a continuación:

Tabla 7

Estadísticas descriptivas

Variable	N	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
PERIODO	10	2018.9	0.823	2.60	2016.0	2017.0	2017.5	2022.0	2022.0
CI (mg/g)	10	42.0	27.2	86.1	0.0	0.6	3.1	53.1	270.0
CF (mg/g)	10	24.5	15.1	47.9	0.0	0.3	1.3	38.3	148.5
% Fito	10	42.5	7.04	22.26	10.00	21.5	43.00	62.00	75.00
Días aplicación	de10	100.8	5.28	16.69	84.00	88.5	90.00	120.00	120.00
pH inicial	10	3.30	0.966	3.056	0.000	0.000	4.200	5.650	7.50
pH final	10	4.29	1.18	3.73	0.000	0.000	6.7	7.0	8.5

Interpretación:

1. CI (mg/g):

- Estos indicadores se aplican a una variable que mide la concentración de un compuesto en miligramos por gramo. Por ejemplo, la media es 42.0 mg/g, lo que significa que, en promedio, la concentración de este compuesto es de 42.0 mg por gramo.

2. CF (mg/g):

- Estos indicadores se aplican a otra variable que también mide la concentración de un compuesto en miligramos por gramo, con valores promedio, desviación estándar y cuartiles.

3. % Fito:

- Estos indicadores se aplican a una variable que representa un porcentaje. Por ejemplo, la media es 42.5%, lo que indica que, en promedio, el valor es 42.5% de la escala total.

4. Días de aplicación:

- Estos indicadores se aplican a la variable que representa la cantidad de días en un período de aplicación. Por ejemplo, la media es 100.8 días, lo que indica el valor promedio de días de aplicación.

5. pH inicial y pH final:

- Estos indicadores se aplican a variables que miden los valores de pH. Por ejemplo, el pH inicial tiene una media de 3.30 y un pH final con una media de 4.29. Estos valores representan los niveles promedio de pH al inicio y al final de un proceso.

A continuación, se realiza las pruebas de hipótesis general:

Hipótesis Nula (H0): No hay diferencia significativa en la eficacia del uso de *Megathyrsus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período 2014-2023.

Hipótesis Alternativa (H1): Existe una influencia significativa de *Megathyrsus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo, y esta influencia varía de manera significativa a lo largo del período 2014-2023.

P alpha=0.05

Chi-Square Goodness-of-Fit Test for Observed Counts in Variable: % FITO

Using category names in Dias de aplicación

Category	Observed	Test		Contribution to Chi-Sq
		Proportion	Expected	
120	177	0.333333	141.667	8.81255
90	115	0.333333	141.667	5.01961
84	133	0.333333	141.667	0.53020

N	DF	Chi-Sq	P-Value
425	2	14.3624	0.001

Decisión. Se rechaza Hp.

Descripción de resultados: Usando la prueba de hipótesis Chi cuadrado, se demuestra que existe una relación entre el periodo y el % de fitorremediación ($p \text{ alpha} > 0.001$), como se observa en el ploteo del periodo y el %.

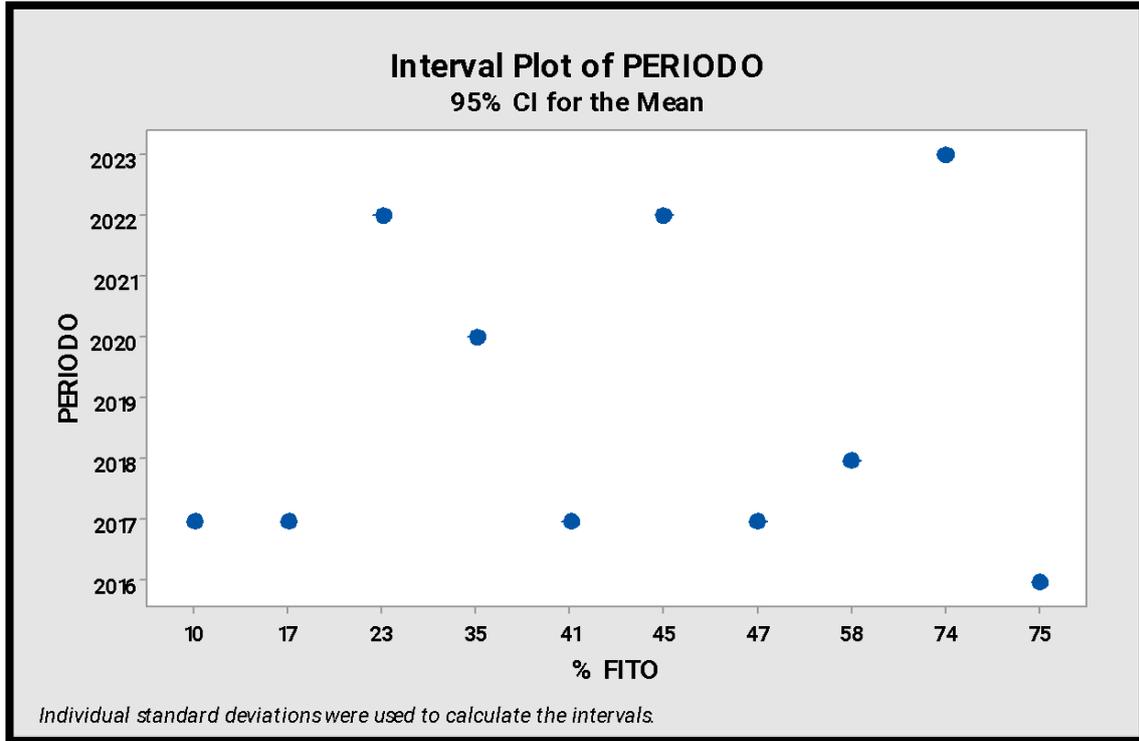


Figura 6. Ploteo entre las Concentración de Fitorremediación y el periodo de 2014-2023

Hipótesis específicas.

Hipótesis Específico 1: Existe una efectividad significativa en el porcentaje de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023) usando concentraciones iniciales y finales

P alpha=0.05

One-way ANOVA: Con data versus Trata

Method

Null hypothesis	All means are equal
Alternative hypothesis	At least one mean is different
Significance level	$\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Trata	2	1; 2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Trata	1	1536	1536	0.32	0.580
Error	18	87299	4850		
Total	19	88835			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
69.6414	1.73%	0.00%	0.00%

Means

Trata	N	Mean	StDev	95% CI
1	10	42.0	86.1	(-4.2; 88.3)
2	10	24.5	47.9	(-21.8; 70.8)

Pooled StDev = 69.6414

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Trata	N	Mean	Grouping
1	10	42.0	A
2	10	24.5	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 - 1	-17.5	31.1	(-83.0; 47.9)	-0.56	0.580

Individual confidence level = 95.00%

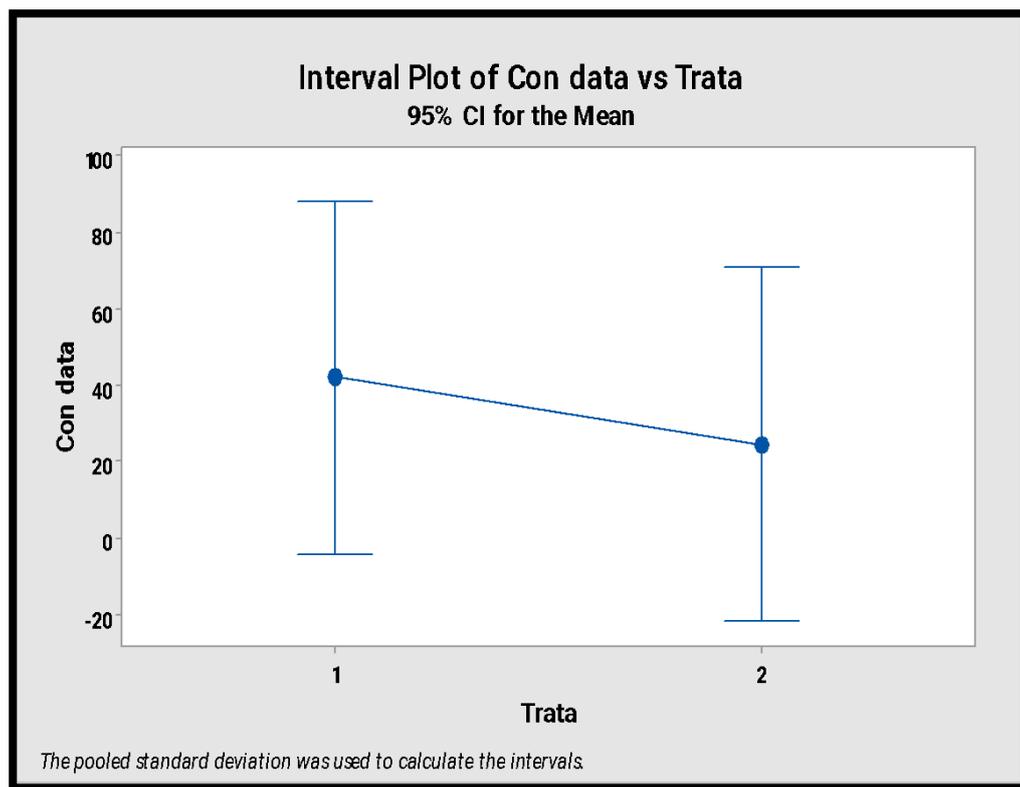


Figura 7. Ploteo entre las Concentración iniciales y finales

Decisión. Se acepta H_0 ($p > \alpha < 0.580$).

Descripción de resultados: Usando la prueba de hipótesis ANOVA, se demuestra que no hay diferencias significativas entre las concentraciones iniciales y finales, por lo que algunos experimentos, no han demostrado que baje

significativamente las concentraciones del contaminante del petróleo. Sin embargo, mediante el método de Tukey arrojado por la prueba ANOVA, demostraría que las medias de los estudios utilizados no son valores significativamente diferentes.

Hipótesis Específico 2: Existe una influencia significativa de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en el pH de suelos contaminados por petróleo.

P Alpha=0.05

One-way ANOVA: Ph data versus Trata

Method

Null hypothesis All means are equal
Alternative hypothesis At least one mean is different
Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Trata	2	1; 2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Trata	1	4.901	4.901	0.42	0.524
Error	18	209.189	11.622		
Total	19	214.089			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.40905	2.29%	0.00%	0.00%

Means

Trata	N	Mean	StDev	95% CI
1	10	3.300	3.056	(1.035; 5.565)
2	10	4.29	3.73	(2.03; 6.55)

Pooled StDev = 3.40905

Decisión. Se acepta H_0 ($p > 0.524$).

Descripción de resultados: Usando la prueba de hipótesis ANOVA, se demuestra que no hay diferencias significativas entre el pH inicial y final, por lo que algunos experimentos, no han demostrado que baje significativamente las concentraciones del pH frente al contaminante del petróleo.

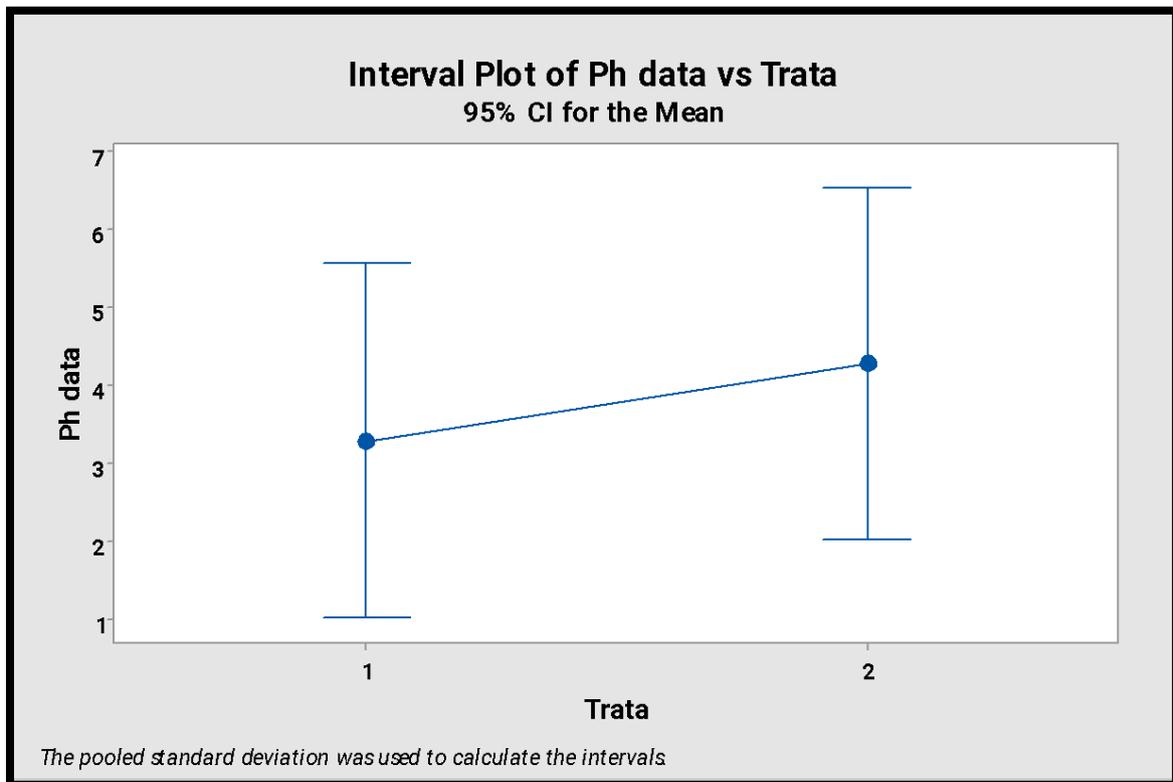


Figura 8. Ploteo de pH iniciales y finales

Hipótesis Específico 3: Existen diferencias significativas entre el % de remediación y los días de aplicación de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados variará según la concentración inicial del contaminante.

P Alpha=0.05

One-way ANOVA: % FITO versus Dias de aplicación

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Dias de aplicación	3	84; 90; 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dias de aplicación	2	1921	960.3	2.65	0.139
Error	7	2540	362.9		
Total	9	4460			

Model Summary

S R-sq R-sq(adj) R-sq(pred)
19.0488 43.06% 26.79% 0.00%

Means

Dias de

aplicación	N	Mean	StDev	95% CI
84	2	66.50	12.02	(34.65; 98.35)
90	4	28.75	15.88	(6.23; 51.27)
120	4	44.3	23.4	(21.7; 66.8)

Pooled StDev = 19.0488

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Dias de

aplicación	N	Mean	Grouping
84	2	66.50	A
120	4	44.3	A
90	4	28.75	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
90 - 84	-37.8	16.5	(-86.4; 10.9)	-2.29	0.123
120 - 84	-22.3	16.5	(-70.9; 26.4)	-1.35	0.415
120 - 90	15.5	13.5	(-24.2; 55.2)	1.15	0.516

Individual confidence level = 97.86%

Decisión. Se acepta H_0 ($p > 0.139$).

Descripción de resultados: Usando la prueba de hipótesis ANOVA, se demuestra que no hay diferencias significativas entre el % de fitorremediación y los días de aplicación, por lo que algunos experimentos, no han demostrado que baje significativamente las concentraciones del contaminante de petróleo. Sin embargo, mediante el método de Tukey arrojado por la prueba ANOVA, demostraría que las medias de los estudios utilizados no son valores significativamente diferentes.

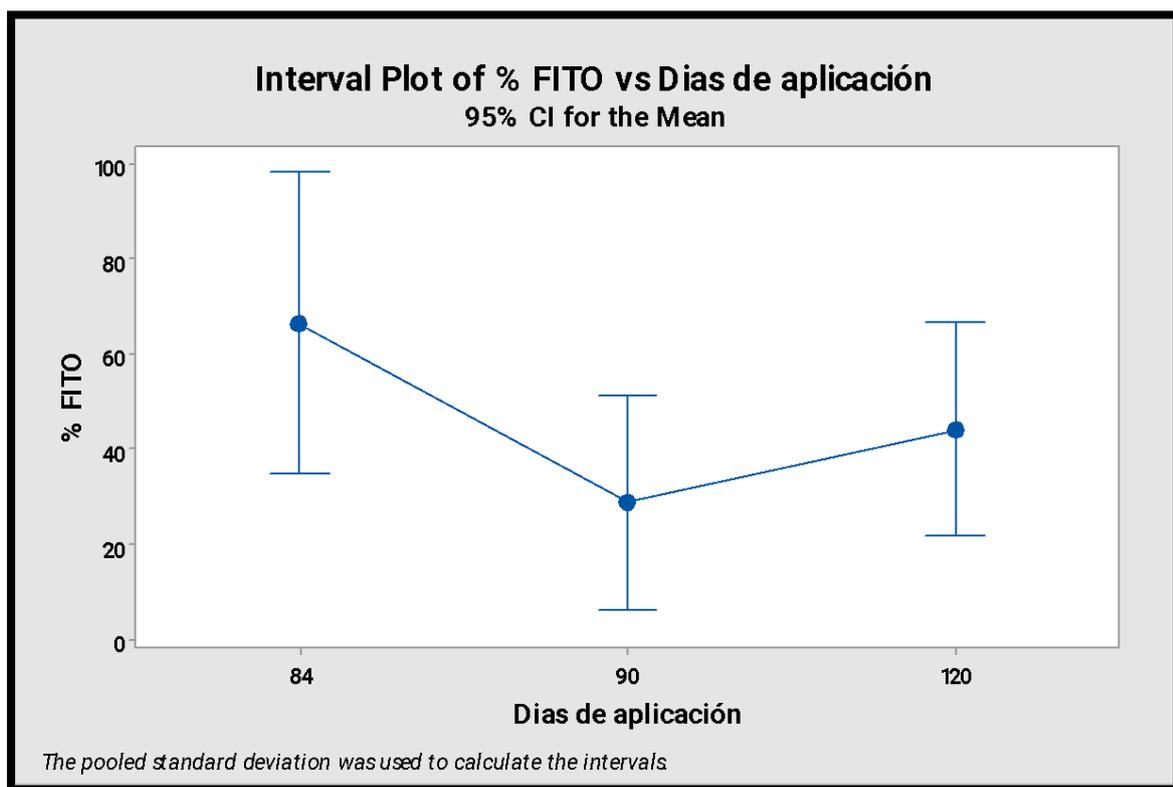


Figura 9. Ploteo del % de fitorremediación vs días de aplicación.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

A continuación, discutiremos cada uno de los objetivos específicos en relación con los antecedentes proporcionados:

Determinar el porcentaje de remoción de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023).

Utilizando la prueba de ANOVA en base al porcentaje de remoción, se obtiene “ $p < 0.580$ ”, con lo que se demuestra que no hay una diferencia significativa. Sin embargo, a lo largo de los períodos de estudio, se observan porcentajes de remoción con valores numéricos sesgados, por lo que se tomó la moda de los porcentajes, obteniendo un 40% en la remoción de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo.

En base a nuestra ficha de información técnica de estudios relevantes, el porcentaje de remoción es mayor en bajas concentraciones (30% de los estudios) de contaminante y menor en concentraciones altas (20% de los estudios). Esto puede atribuirse a la capacidad de retención de contaminantes del fitorremediador *Megathyrus* (Hernández et al., 2016) y las características que éste posee según el tipo de suelo en el que se realice la fitorremediación. La capacidad de retención de *Megathyrus maximus* se puede deber a diferentes motivos, siendo uno de ellos el límite de absorción de contaminantes de la planta por las características específicas que posee, o debido a los productos adicionales que se puedan utilizar mediante el tiempo de aplicación de la especie *Megathyrus maximus*. El 30% de los artículos, indican que el porcentaje de remoción de contaminantes de *Megathyrus maximus* puede verse afectado en cuánto a la adición de cepas fúngicas sinérgicas y el uso de compost de champiñones agotados (SMC), según la ficha de información técnica de estudios relevantes, estos han mejorado el porcentaje de remoción de la fitorremediación en el

rango de un 15% - 25% en comparación a los valores más bajos obtenidos debido a las características adicionales que brinda a la fitorremediación.

Determinar cuál es la influencia de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en el pH de suelos contaminados por petróleo.

Usando la prueba de ANOVA, a través del pH inicial y pH final se obtiene que “p Alpha < 0.524”, lo que demuestra que no hay influencias significativas de *Megathyrus maximus* en la variabilidad inicial y final del pH. Sin embargo, el 50% de nuestros estudios indica que mediante el uso de *Megathyrus maximus* como fitorremediador se alcanzaron los valores de pH neutro para los suelos. Estos cambios se podrían explicar mediante la presencia de petróleo en los suelos, que afecta la fertilidad (intercambio de nutrientes orgánicos e inorgánicos) de los mismos (Carvazos et al., 2014), lo que indicaría que no hay presencia o pase de nutrientes. De esta manera, la absorción de contaminantes por parte de *Megathyrus maximus* favorecería el pase de los nutrientes en el suelo, obteniendo así mejores valores en el pH del suelo estudiado. (Zamora A. et al, 2012)

El 50% estudios presentados muestran que la influencia de *Megathyrus maximus* en el pH puede variar en un rango de 1.5 – 2.5 de los valores presentados, siendo estos valores similares. Esto sugiere que diversos factores no necesariamente pueden influir en la mejora de los valores del pH utilizando a *Megathyrus maximus* como fitorremediador.

Determinar cuál es el tiempo óptimo de remoción de contaminante de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo.

1. Usando la prueba de ANOVA, con un resultado de “p Alpha < 0.139”, se demuestra En resumen, los resultados de las pruebas de hipótesis indican que, en los experimentos estudiados, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de contaminante de petróleo, pH y % de fitorremediación

en relación con el periodo de estudio, el pH inicial y final, o los días de aplicación. Estas conclusiones pueden ser útiles para comprender que algunos experimentos no han demostrado una efectividad significativa de *Megathyrus maximus* en la remoción de contaminantes en ciertas condiciones.

No hay diferencias significativas entre el % de fitorremediación y los días de aplicación, sin embargo, nuestros datos numéricos están distribuidas de forma normal, lo que indica que los días de aplicación son valores similares, teniendo una media de 100.8 días de aplicación. En base a los resultados obtenidos, se puede identificar que no hay una influencia con % de remoción y días de aplicación al no variar significativamente en la comparación del % más alto de remoción y el menor, ya que en ambos casos el tiempo de aplicación fue de 84 (Kogbara et al, 2018) y 120 días (Hernández et al., 2017; Dare et al., 2017; Eryssa et al., 2023; Magno et al., 2022) respectivamente. Sin embargo, el 40% de los estudios relevantes indican que el tiempo óptimo para la remoción es de 120 días, mientras los otros 40% señalan que el tiempo necesario es de 90 días y el 20% de los artículos muestran resultados de fitorremediación en 84 días. Esto puede deberse a las cantidades de concentraciones al inicio del procedimiento en cada estudio realizado, mostrando que la tolerancia de almacenamiento de petróleo en la planta depende de la concentración del contaminante en el suelo. Se evidencia que para tener un resultado eficaz en menor tiempo es posible que se requieran estrategias adicionales de remediación.

Los resultados de los estudios sugieren que *Megathyrus maximus* puede ser efectivo tanto en suelos con concentraciones bajas, como moderadas de contaminantes, así como en suelos altamente contaminados. Sin embargo, se necesita más investigación para una comparación detallada.

4.2. Limitaciones

La principal limitación del estudio estuvo relacionada a la cantidad de estudios encontrados, ya que, hay variedad de estudios de *Megathyrus Maximus* y diferentes tipos de aplicaciones, más no tantos de estudios que se enfoquen en la fitorremediación de suelos

contaminados con petróleo, lo que no beneficiaría nuestro análisis de datos, al ser una población reducida de estudios.

Otra limitación serían los estudios científicos que no comparten datos técnicos en común, ya que, para realizar un correcto metaanálisis, se deben realizar análisis estadísticos de los mismos parámetros encontrados en cada estudio, de lo contrario, obtendríamos resultados veraces.

4.3. Implicancias

En relación con la implicancia teórica, este trabajo de investigación incluye estudios nacionales e internacionales tomando datos técnicos en común para analizar. Con esto, poder establecer características de la fitorremediación utilizando *Megathyrus maximus* y con los datos obtenidos, seleccionar la mejor aplicación en base al tiempo y cantidad de fitorremediador para suelos contaminados con petróleo.

Para finalizar, en la implicancia metodológica, según lo realizado, el trabajo de investigación es confiable para poder realizar futuras investigaciones en cuanto a las características de retención de hidrocarburos en las partes de la planta y la relación del % de remediación y el periodo de aplicación, ya que en la presente investigación se identifican estudios que tienen un mayor tiempo de aplicación, pero menor % de remediación,

4.4. Conclusiones:

2. Se puede concluir que, a lo largo del período de estudio, ha habido avances significativos que han aumentado la eficacia de *Megathyrus maximus* como es la adición de especies fúngicas, como está identificado en los resultados del ANOVA, en base al porcentaje de fitorremediación de hidrocarburos como en suelos contaminados de hidrocarburos.
3. Según los datos obtenidos, se concluye que la fitorremediación de suelos contaminados utilizando *Megathyrus maximus* modificará los valores del pH hasta obtener un pH con valores neutros.

4. Utilizando la prueba de hipótesis Chi cuadrado, se ha demostrado que existe una relación significativa entre el periodo y el % de Fito mediación, ya que el valor p (p Alpha) es menor que el nivel de significancia de 0.001. Esto sugiere que el período de estudio tiene un impacto significativo en el % de fitorremediación, como se ilustra en el gráfico de periodo y %.
5. Se acepta la hipótesis nula (H_0) con un valor p ($p < 0.580$) que es mayor que el nivel de significancia. Esto sugiere que no hay diferencias significativas entre las concentraciones iniciales y finales, lo que indica que algunos experimentos no han demostrado una reducción significativa en las concentraciones del contaminante del petróleo.
6. Se acepta la hipótesis nula (H_0) con un valor p ($p > 0.524$) que es mayor que el nivel de significancia. Esto sugiere que no hay diferencias significativas entre el pH inicial y final, lo que indica que algunos experimentos no han demostrado una reducción significativa en las concentraciones de pH frente al contaminante del petróleo.
7. En la hipótesis específica 3, se indica que no hay diferencias significativas entre el % de fitorremediación y los días de aplicación. Esto sugiere que algunos experimentos no han demostrado una reducción significativa en las concentraciones del contaminante del petróleo en función de los días de aplicación.
8. En resumen, los resultados de las pruebas de hipótesis indican que, en los experimentos estudiados, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de contaminante de petróleo, pH y % de fitorremediación en relación con el periodo de estudio, el pH inicial y final, o los días de aplicación. Estas

conclusiones pueden ser útiles para comprender que algunos experimentos no han demostrado una efectividad significativa de *Megathyrus maximus* en la remoción de contaminantes en ciertas condiciones.

9. La tendencia temporal indica que la efectividad de *Megathyrus maximus* mejora con el tiempo y la acumulación de experiencia, lo que respalda la importancia de la investigación continua en esta área.

4.5. Recomendaciones:

1. Relación entre Periodo y Fitorremediación: Dado que se ha demostrado una relación significativa entre el período y el % de fitorremediación, es importante tener en cuenta el efecto del tiempo al planificar estrategias de fitorremediación. Se recomienda realizar evaluaciones periódicas y considerar la evolución a lo largo del tiempo al diseñar proyectos de recuperación de suelos contaminados.
2. Concentraciones Iniciales y Finales: A pesar de que algunos experimentos no han demostrado diferencias significativas entre las concentraciones iniciales y finales de contaminantes, es esencial seguir evaluando la efectividad de *Megathyrus maximus* en una variedad de condiciones. Se recomienda realizar estudios más detallados para comprender las circunstancias específicas en las que esta planta puede lograr una reducción significativa en las concentraciones de contaminantes.
3. pH Inicial y Final: Del mismo modo, la falta de diferencias significativas entre el pH inicial y final en algunos experimentos sugiere que el pH no es un factor clave en la efectividad de *Megathyrus maximus* como fitorremediador. No obstante, se recomienda continuar investigando y considerar otros factores que puedan influir en el proceso de fitorremediación.
4. Días de Aplicación: La falta de diferencias significativas entre el % de fitorremediación y los días de aplicación indica que este factor podría no ser determinante en la efectividad de la planta en la remoción de contaminantes. Se sugiere investigar más a fondo las variables que realmente influyen en el proceso de fitorremediación.

Referencias

- Aguilera R., (2014). *¿Revisión sistemática, revisión narrativa o metaanálisis?* Universidad de las Américas, Chile. Recuperado de: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1134-80462014000600010
- Alcántara M. y Llatas C., (2019). *Efecto del estiércol de *Cavia porcellus* en el potencial de malezas para la remediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo.* Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, Perú. Recuperado de: <https://shorturl.at/afhNR>
- Aluyor et al. (2017). *Phytoremediation of crude oil polluted soil using *Glycine max* and *Megathyrus maximus*.* University of Benin, Nigeria. Recuperado de: <https://shorturl.at/iksB2>
- Asemoloye et al, (2017). *Synergistic action of rhizospheric fungi with *Megathyrus maximus* root speeds up hydrocarbon degradation kinetics in oil polluted soil.* University of Ibadan, Nigeria. Recuperado de: <https://shorturl.at/corAC>
- Astudillo y Vicente (2020). *Técnicas de fitorremediación para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo: Revisión sistemática.* Universidad César Vallejo. Tomado de la página web: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/49692/Astudillo_ADS-Vicente_VJM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Camacho (2022). *Aplicación de la fitorremediación en áreas afectadas por contaminantes en Ecuador.* Universidad Estatal Península de Santa Elena. Tomado en la página web: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8728>
- Carvajal J., (2019). *Evaluación agronómica, nutricional y ambiental de 130 accesiones de *Megathyrus maximus* para selección en el Valle del Patía - Cauca Colombia.* Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de: <https://shorturl.at/giprP>
- Castellanos L. (2017). *Técnica de Observación. Metodología de la Investigación.* <https://shorturl.at/GLMY7>

- Cruz, R. (2021). *Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos de suelos del distrito de Manseriche Región Loreto por cromatografía de gases*. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Federico Villareal. Recuperado de: <https://rb.gy/h4jj3>
- Danigno, J. (2014). *Análisis de Varianza*. Revista Chilena de Anestesia. Recuperado de: <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>
- Dare; Ahmad; Gbolagade (2017). Synergistic action of rhizospheric fungi with *Megathyrsus maximus* root speeds up hydrocarbon degradation kinetics in oil polluted soil. Pakistan. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.07.158.
- Dare; Stephen; Gbolagade (2020). Spent Mushroom Compost Enhances Plant Response and Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Soil. Nigeria. Doi 10.1002/jpln.202000004
- Delgadillo, A. y Gonzales, C. (2011). *Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Recuperado de: <https://rb.gy/4jhde>
- Eryssa; Nadhirah; Azzura; Azmi; Abdul; Gómez-Fuentes; Zulkharnain; Lim; Ahmad (2023). Guinea Grass (*Megathyrsus maximus*) Fibres as Sorbent in Diesel Bioremediation. Malasya. Doi. 10.3390/su1553904
- Escamilla, M. (2010). *Aplicación básica de los métodos científicos*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Recuperado de: <https://rb.gy/51pmc>
- Fiestas y Vásquez (2020). Revisión sistemática. Biorremediación de suelos salinos contaminados con petróleo por el consorcio bacteriano de pseudomona por la técnica de bioaumentación. Universidad César Vallejo. Tomado en la página web: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60270>
- Flores (2022). Modelos usados en fitorremediación de metals pesados en suelo, revision sistemática, 2022. Universidad César Vallejo. Tomado de la página web: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/93922>
- Giraldo P., (2015). *Efecto de varios aditivos y suplementos nutricionales en las emisiones de metano y los parámetros de la fermentación ruminal in vitro*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de: <https://rb.gy/ghj43>

Gutiérrez (2020). Revisión sistemática de métodos de fitorremediación para suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad César Vallejo. Tomado en la página web: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/66979>

Hernández et al. (2017). *Which of these two alternatives is the correct way to say Chi-square in Spanish? Chi cuadrado o Ji cuadrado?*. Universidad de Ciencias Médicas de Villa Clara, Cuba. Recuperado de:

http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s1029-30432017000400001&script=sci_arttext

Hernández et al. (2017). *Phytoremediation of a soil contaminated with extra heavy petroleum by Megathyrus maximus*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, México. Recuperado de: <https://rb.gy/2fvc6>

Hernández; Navas; Infante (2017). Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extrapesado con *Megathyrus maximus*. Venezuela. Doi: 10.20937/RICA.2017.33.03.12

Hughes; Mlambo; Lallo; Basha; Nsahlai; Jennings (2016). Accuracy of two optical chlorophyll meters in predicting chemical composition and in vitro ruminal organic matter degradability of *Brachiaria hybrid*, *Megathyrus maximus*, and *Paspalum atratum*. Trinidad Tobago Doi: 10.1016/j.aninu.2016.10.002

INEI (2010). *Sistema Estadístico Departamental, San Martín*. Recuperado de: <https://tinyurl.com/2rjuc69f>

Khan, Afzal; Iqbal; Khan (2013). Plant bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere* 90 (4). 1317-1332. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.09.045

Kogbara; Badom; Ayotamuno (2018). *Tolerance and phytoremediation potential of four tropical Grass species tol and-applied drill cuttinngs. International journal of phytoremediation. Vol 28. DOI: 10.1080/15226514.2018.1501337*

Larez et al. (2017). *Evaluación de la toxicidad de un suelo contaminado con diferentes tipos de crudos sobre la germinación de dos pastos tropicales. Instituto de Zoología y*

- Ecología Tropical*. Universidad Central de Venezuela, Venezuela. Recuperado de :
<https://tinyurl.com/33epdawv>
- Leopold L., et al (1971). *A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey Circular 645, Washington, D.C.* Recuperado de: <https://tinyurl.com/53fynvjk>
- López, P. (2014). *Población, muestra y muestreo*. Scielo. Recuperado de :
<https://tinyurl.com/yc4xmrea>
- Magno de Melo; Enilson de Barros; Lopes; Silva; Graziotti; Prochnow; Pereira; Costa LThéu (2020). Potential of Grasses in Phytolith Production in Soils Contaminated with Cadmium. Brasil. DOI 10.3390/plants9010109
- Magno de Melo; Enilson de Barros; Lopes; Silva; Graziotti; Prochnow; Pereira; Costa LThéu (2022). Potencial of Forage Grasses in Phytoremediation of Lead through Production of Phytoliths in Contaminated Soils. Brasil. Doi: 10.3390/land12010062
- Nardis; Silva; Graziotti; Melo; Mucio; Farnezi (2017). Availability and zinc accumulation in forage grasses grown in contaminated soil. Brasil. Doi:10.1080/15226514.2017.1365347
- Neira (2022). Uso de fabáceas como alternativa de fitorremediación de suelos contaminados por petróleo en la provincia de Santa Elena. Universidad Estatal Península de Santa Elena. Tomado en la página web: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8735>
- Rodríguez, M. y Amaro, A. (2017). *Megathyrsus maximus. Resultados científicos y potencialidades ante el cambio climático en el trópico*. Avances en Investigación Agroperia, México. Recuperado de: <https://tinyurl.com/289v4634>
- Rodríguez, T. (2009). *Los hidrocarburos en Castilla y León*. Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, España. Recuperado de: <https://tinyurl.com/yauee4sx>
- Secretaría de Energía – República Argentina (2003). *Conceptos básicos de hidrocarburo*. Recuperado de : <https://tinyurl.com/284tsnr3>

- Silva, S. y Correa, F. (2009). *Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica*. Universidad de Medellín, Colombia. Recuperado de : <https://tinyurl.com/43umyuhy>
- Tamayo y Cariga (2021). Aplicaciones de microorganismos para remediar suelos contaminados por petróleo y sus residuos o derivados. Revisión sistemática 2021. Universidad César Vallejo. Tomado de la página web: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/66398>
- Tarazona et al, (2020). *Tratamientos biológicos y físicos en la recuperación de suelos contaminados por petróleo crudo*. Universidad Peruana Unión, Perú. Recuperado de : <https://tinyurl.com/37cfx8hv>
- Torres (2022). Evaluación de estrategias sostenibles para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos pesados. Fundación Universidad de América. Tomados de la página web: <http://52.0.229.99/handle/20.500.11839/9118>
- Uribe; Peñuela; Pino (2022). *Megathyrus maximus* and *Brachiaria decumbens* improve soil characteristics and select promising rhizobacteria during rhizoremediation of petroleum hydrocarbons. Colombia. DOI. 10.1016/j.rhisph.2022.100517
- Vega, G. (2014). *Paradigma en la investigación. Enfoque cuantitativo y cualitativo*. Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Querétaro, México. Recuperado de: <https://tinyurl.com/2ymhzxv>

Anexos

1.- LA MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

VARIABLE DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Independiente: Uso del <i>Megathyrus maximus</i> en fitorremediación	Es el impacto de la especie en suelos con hidrocarburos, siendo usada en la fitorremediación para la reducción de contaminantes.	El efecto de la planta <i>Megathyrus Maximus</i> es muy considerada por sus características que posee y es usada en muchas fitorremediaciones.	Características del experimento	Periodo, Práctica y avance de la tecnología	% Porcentaje
			Características de la concentración inicial del contaminante	Tipo de suelo, condiciones climáticas	
			Características de los resultados	Regiones geográficas	

Características
de las concentraciones
Comparación con
suelos contaminados

Características
de la efectividad
Prácticas de
fitorremediación,
acumulación de la
experiencia

Dependiente:	Es	Es una técnica			
Concentración de suelos contaminados	específicamente disminución contaminantes en plantas	la natural de favoreciendo ambiente y secundarios	muy conocida al medio sin efectos negativos.	Concentración	Concentración del suelo recuperado
	basadas				% Porcentaje

2.- LA MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	TIPO DE INVESTIGACIÓN
<p>¿Cómo el meta-análisis del uso de <i>Megathyrus maximus</i> influye como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo en el periodo 2014-2023?</p>	<p>Conocer si el meta-análisis con el uso <i>Megathyrus maximus</i> influye como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo en el periodo 2014-2023.</p>	<p>Hipótesis Alternativa (H1): Existe una influencia significativa de <i>Megathyrus maximus</i> como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo de forma significativa a lo largo del período 2014-2023.</p>	<p>Variable dependiente: Concentración de suelos contaminados</p>	<p>Enfoque cuantitativo, investigación de tipo correlativo, no experimental.</p>
<p>Problemas específicos</p> <p>Problema Específico 1: ¿Cómo la efectividad del <i>Megathyrus maximus</i> como</p>	<p>Objetivos específicos.</p> <p>Objetivo Específico 1: Determinar la efectividad del <i>Megathyrus maximus</i> como fitorremediador en suelos</p>	<p>Hipótesis específicas</p> <p>Hipótesis Específico 1: La efectividad del <i>Megathyrus</i></p>	<p>Variable independiente:</p>	

fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023) usando concentraciones iniciales y finales?

Problema Específico 2: ¿Cómo la efectividad de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo con concentraciones de pH inicial y ph final?

Objetivo Específico 3: ¿Cómo la efectividad de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo y los días de aplicación?

contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023) usando concentraciones iniciales y finales.

Objetivo Específico 2: determinar la efectividad de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo con concentraciones de pH inicial y ph final.

Objetivo Específico 3: La efectividad de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo y los días de aplicación.

maximus como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo a lo largo del período de estudio (2014-2023) usando concentraciones iniciales y finales?

Hipótesis Específico 2: La efectividad de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo con concentraciones de pH inicial y ph final.

Hipótesis Específico 3: La efectividad de *Megathyrus maximus* como fitorremediador en suelos contaminados de petróleo y los días de aplicación.

Uso del
Megathyrus maximus en
fitorremediación

3. PLAN DE FITORREMEDIACIÓN



4. PLAN DE FITORREMEDIACIÓN

A continuación, se presenta un plan de fitorremediación basado en los estudios mencionados y en las propiedades de *Megathyrus maximus* (pasto Guinea). Este plan está diseñado para abordar la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo y metales pesados, teniendo en cuenta las capacidades de esta planta y las estrategias sinérgicas que se han demostrado efectivas en la literatura científica. El plan se estructura en varias etapas:

Etapas 1: Evaluación Inicial del Sitio

1.1. Identificar y caracterizar el sitio contaminado, incluyendo la extensión de la contaminación, el tipo de suelo, las concentraciones de contaminantes y las condiciones climáticas locales.

1.2. Realizar un análisis detallado de los contaminantes presentes en el suelo, incluyendo hidrocarburos de petróleo y metales pesados.

1.3. Evaluar la biodiversidad y la composición microbiana del suelo en el sitio, identificando las especies bacterianas y fúngicas presentes.

Etapas 2: Selección de Cepas Beneficiosas

2.1. Basándose en la evaluación inicial, seleccionar cepas beneficiosas de bacterias y hongos rizosféricos que tengan la capacidad de degradar los contaminantes presentes en el suelo.

2.2. Realizar pruebas de laboratorio para determinar la eficacia de las cepas seleccionadas en la degradación de hidrocarburos y metales pesados, tanto de manera individual como en combinación.

Etapa 3: Preparación del Suelo

3.1. Realizar la preparación del suelo mediante la esterilización para eliminar microorganismos no deseados y preparar un sustrato limpio para la fitorremediación.

3.2. Incorporar compost de champiñones agotado (SMC) en diferentes concentraciones en el suelo esterilizado. Estas concentraciones pueden variar según la gravedad de la contaminación y los resultados de pruebas piloto.

Etapa 4: Selección de *Megathyrus maximus* y Plantación

4.1. Seleccionar variedades resistentes de *Megathyrus maximus* que sean adecuadas para las condiciones climáticas locales y la concentración de contaminantes en el suelo.

4.2. Establecer un sistema de riego adecuado para mantener la humedad del suelo en niveles óptimos para el crecimiento de la planta.

4.3. Plantar *Megathyrus maximus* en el suelo preparado, asegurándose de mantener la densidad de siembra recomendada.

Etapa 5: Monitoreo y Mantenimiento

5.1. Establecer un programa de monitoreo continuo que incluya la medición regular de los niveles de contaminantes en el suelo y la calidad del agua de riego.

5.2. Evaluar el crecimiento de *Megathyrus maximus* y realizar un seguimiento de su respuesta a las condiciones del suelo y la concentración de contaminantes.

5.3. Monitorear la actividad microbiológica en la rizosfera y la presencia de las cepas beneficiosas seleccionadas.

Etapa 6: Evaluación y Ajustes

6.1. Realizar evaluaciones periódicas de la eficacia de la fitorremediación en la reducción de los niveles de contaminantes en el suelo.

6.2. Ajustar las concentraciones de SMC y la cantidad de riego según sea necesario, con base en los resultados del monitoreo y las condiciones ambientales cambiantes.

6.3. Evaluar la salud y el crecimiento de *Megathyrus maximus* y su capacidad para fitorremediar el sitio.

Etapa 7: Finalización del Proyecto y Restauración del Suelo

7.1. Una vez que se hayan alcanzado los objetivos de fitorremediación y los niveles de contaminantes se encuentren dentro de los límites aceptables, considerar la finalización del proyecto.

7.2. Realizar una restauración adicional del suelo, como la siembra de vegetación nativa, para promover la recuperación completa del ecosistema.

Etapa 8: Seguimiento a Largo Plazo

8.1. Implementar un programa de seguimiento a largo plazo para monitorear la calidad del suelo y la salud del ecosistema después de la finalización del proyecto de fitorremediación.

8.2. Realizar ajustes adicionales si se detectan niveles elevados de contaminantes en el futuro.

Este plan de fitorremediación se basa en la capacidad de *Megathyrus maximus* para remediar suelos contaminados, aprovechando las estrategias sinérgicas con bacterias y hongos beneficiosos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cada sitio contaminado es único, por lo que el plan debe adaptarse a las condiciones específicas de cada ubicación. Además, se deben seguir regulaciones ambientales y de seguridad aplicables durante todo el proceso de fitorremediación.

5 RESUMEN DE ESTUDIOS

Hernández; et al (2017), con el título de investigación “Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus* ”, investigó la capacidad de *Megathyrus maximus* para remediar un suelo contaminado con petróleo extra pesado a lo largo de 120 días. Se evaluaron dos tratamientos: uno con la presencia de *Megathyrus maximus* y otro sin la planta, centrándose en cambios en los niveles totales de hidrocarburos de petróleo y en indicadores de actividad microbiológica (enzima deshidrogenasa, biomasa de carbono microbiano y respiración basal). A pesar de diferencias pequeñas, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Después de 120 días, la presencia de *Megathyrus maximus* condujo a una reducción del 17.1% en los hidrocarburos, en comparación con el 9.8% en el tratamiento sin plantas. Específicamente, las fracciones de hidrocarburos aromáticos y saturados disminuyeron en el tratamiento con la planta, mientras que en el tratamiento sin plantas solo los aromáticos redujeron. El tratamiento con *Megathyrus maximus* demostró cambios a lo largo del tiempo en todos los indicadores bioquímicos y microbiológicos evaluados, mientras que el tratamiento sin plantas solo mostró cambios en la actividad de la enzima deshidrogenasa y el coeficiente metabólico. La actividad microbiana fue consistentemente mayor o similar en el tratamiento con plantas, posiblemente debido a la presencia de la rizósfera, que promueve dicha actividad.

Uribe et al (2022), con el título “*Megathyrus maximus* and *Brachiaria decumbens* improve soil characteristics and select promising rhizobacteria during rhizoremediation of petroleum hydrocarbons”, compararon especies de pasto *Brachiaria decumbens* y *Megathyrus maximus* donde muestran promisorias capacidades para la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo (PHC). Sin embargo, se sabe poco acerca de su microbioma asociado a las raíces, fundamental para la degradación de PHC y la salud de las plantas. Aquí, se utilizó la secuenciación de ampliaciones de ARNr 16S durante un año para caracterizar las comunidades bacterianas de la rizosfera de estas dos plantas en suelos contaminados con PHC. Se monitorearon los niveles de PHC y parámetros fisicoquímicos del suelo para analizar su relación con el microbioma. Ambas plantas

mejoraron significativamente los parámetros de fertilidad del suelo, aumentando la porosidad, el fósforo disponible y la capacidad de intercambio catiónico. La diversidad de las comunidades bacterianas fue influenciada por las plantas, y la beta-diversidad de la comunidad de la rizosfera estuvo más relacionada con los cambios en el fósforo disponible y el pH que con la concentración de PHC. El tratamiento con *M. maximus* mostró la remoción más rápida de PHC (en promedio, un 23.38% menos en comparación con los niveles iniciales) a los 3 meses, y los géneros *Ohtaekwangia*, *Luteolibacter* y *Ellin6067* fueron significativamente más abundantes en la rizosfera de *M. maximus* en comparación con la otra planta y el control. Además, se identificaron géneros con características conocidas de promoción del crecimiento de las plantas y capacidad de degradación de PHC asociados a las plantas, que podrían ser objeto de futuros estudios para confirmar su papel y utilidad como biostimulantes, permitiendo la optimización de la fitorremediación con estos pastos.

Dare et al (2017), tuvo como título de investigación "Synergistic action of rhizospheric fungi with *Megathyrus maximus* root speeds up hydrocarbon degradation kinetics in oil polluted soil", combinaron el potencial de las plantas y algunas cepas fúngicas de la rizosfera en la remediación de suelos contaminados con petróleo crudo. Se identificaron cuatro nuevos hongos rizosféricos en un sitio contaminado por petróleo crudo antiguo y se utilizaron junto con *Megathyrus maximus* (pasto guinea) en un experimento de remediación sinérgica de 90 días. Las cepas fúngicas se mezclaron primero con compost de champiñones agotado (SMC), y luego se aplicaron en suelos esterilizados contaminados con petróleo crudo en concentraciones del 10%, 20%, 30% y 40% en tres réplicas. Se utilizaron suelos con solo plantas (0%1) y suelos con solo hongos-SMC (0.2%) como controles. Se determinaron el pH inicial y final del suelo, los nutrientes, los 16 EPA PAHs y los contenidos de metales pesados, y se calcularon las tasas de degradación, la semivida y el porcentaje de pérdida del hidrocarburo poliaromático total (TPAH). Finalmente, los suelos remediados se evaluaron para determinar su índice de soporte para la germinación de semillas. Se identificaron las cepas fúngicas y se registraron en NCBI como *Aspergillus niger* asemoA (KY473958), *Talaromyces purpurogenus* asemoF (KY488463), *Trichoderma harzianum* asemoJ (KY488466) y *Aspergillus flavus* asemoM (KY488467). Observamos por primera vez que el mecanismo sinérgico

mejoró los nutrientes del suelo, redujo la concentración de metales pesados y aceleró la tasa de degradación de hidrocarburos. Utilizando las concentraciones iniciales y finales de TPAH, registramos las tasas de biodegradación más altas (K1) y la semivida (t1/2) más alta en los tratamientos del 30% y 40% en comparación con los controles; estos tratamientos también tuvieron el índice de soporte para la germinación de semillas más alto. Este trabajo sugiere que la remediación sinérgica podría utilizarse para remediar suelos contaminados con petróleo crudo y podría implementarse a gran escala.

Dare et al (2017) con el título de investigación "Mediational influence of spent mushroom compost on phytoremediation of black-oil hydrocarbon polluted soil and response of *Megathyrus maximus* Jacq", donde evaluaron el impacto del compost de champiñones agotado (SMC) en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo negro y la respuesta de *Megathyrus maximus* (pasto guinea). Se llevaron a cabo estudios en condiciones de microcosmos, mezclando diferentes concentraciones de SMC (10%, 20%, 30% y 40%) en 5 kg de suelo contaminado, además de un grupo de control. Se sembraron semillas de *M. maximus* en una bandeja durante dos semanas, se permitió que crecieran hasta una altura de 10 cm y luego se trasplantaron a diferentes macetas experimentales. Se analizaron los nutrientes del suelo, los metales pesados y los contenidos de PAH antes y después del experimento. Después de 120 días, se analizaron las respuestas ecofisiológicas y anatómicas de *M. Maximus* debido a los contaminantes en el suelo. Se registraron la eficiencia de la fitomasa, la fotosíntesis potencial (Amax), los contenidos de clorofila (a y b) y la clorofila total, junto con evaluaciones anatómicas. El tratamiento con plantas solo redujo los metales pesados y los contenidos de PAH en el suelo, pero se observaron mejoras adicionales en los tratamientos con SMC. Se observaron resultados similares en términos de eficiencia de fitorremediación (PE), fitomasa y tasas de fotosíntesis potencial de la planta en los tratamientos con SMC en comparación con el grupo de control. Además, las respuestas anatómicas de las raíces y los brotes de la planta se mejoraron en los tratamientos con SMC en comparación con el control. Este estudio sugiere que el tratamiento con SMC mejora la biestimulación y el desarrollo de características adaptativas para la supervivencia de *M. maximus* en suelos contaminados y promueve la co-degradación de hidrocarburos.

SMC respalda la remediación y mejora las evaluaciones anatómicas, por lo que recomendamos su uso en la respuesta de *Megathyrus maximus* Jacq para la remediación de la fitorremediación basada en petroquímicos.

Magno de Melo et al. (2020), con el título "Potential of Grasses in Phytolith Production in Soils Contaminated with Cadmiu," evaluaron el potencial de las gramíneas en la producción de fitolitos en suelos contaminados con Cd. Se realizaron experimentos en diferentes tipos de suelo con tres especies de gramíneas y cuatro concentraciones de Cd en el suelo. Se observó que el crecimiento de las gramíneas disminuyó y la concentración de Cd en las plantas aumentó con las mayores concentraciones de Cd en el suelo. Las gramíneas mostraron un potencial de producción de fitolitos, independientemente del tipo de suelo, lo que permitió la fitoextracción de Cd. *Megathyrus maximus* fue la gramínea más tolerante al Cd, con una mayor producción y captura de Cd en los fitolitos. La producción de fitolitos por parte de las gramíneas en suelos contaminados con Cd está relacionada con diferencias genéticas y fisiológicas de las especies evaluadas y la disponibilidad de Cd en el suelo.

Nardis et al. (2017), con el título de investigación "Availability and zinc accumulation in forage grasses grown in contaminated soil", tuvo como objetivo evaluar el crecimiento, la concentración, la acumulación y la disponibilidad de Zn en pastos forrajeros (*Megathyrus maximus* , *Urochloa brizantha* y *Urochloa decumbens*) cultivados en suelos contaminados con Zn. Los experimentos se llevaron a cabo en condiciones de invernadero durante un período de evaluación de 90 días, utilizando diferentes concentraciones de Zn en el suelo. La adición de Zn en el suelo redujo el crecimiento en todos los pastos evaluados. El cultivar Aruana mostró mayor tolerancia al Zn, mientras que Marandu fue más susceptible. Ninguno de los pastos evaluados se consideró un hiperacumulador de Zn. Los métodos de extracción de Zn en el suelo se ordenaron como DTPA a pH 7.3 < Mehlich-1 < USEPA 3051 < USEPA 3052, y el extractor USEPA 3051 fue similar al Mehlich-1 en la predicción de la disponibilidad de Zn en el suelo.

Hughes et al (2016), con el título "Accuracy of two optical chlorophyll meters in predicting chemical composition and in vitro ruminal organic matter degradability of *Brachiaria hybrid*, *Megathyrus maximus* , and *Paspalum atratum*", tuvo como objetivo determinar la precisión y confiabilidad de 2 medidores ópticos de clorofila:

FieldScout CM 1,000 NDVI y Yara N-Tester, en la predicción de fibra detergente neutra (NDF), fibra detergente ácida (ADF), lignina detergente ácida (ADL), nitrógeno insoluble en detergente ácido (ADIN) y degradabilidad de la materia orgánica ruminal in vitro (IVOMD) en 3 pastos tropicales. Las mediciones ópticas de clorofila se tomaron en 3 etapas de crecimiento en *Brachiaria* híbrida y *Megathyrus maximus*, y en 6 y 12 semanas de crecimiento en *Paspalum atratum* (cv. Ubon). Las mediciones ópticas de clorofila mostraron la mayor correlación ($r = 0.57$ a 0.85) con la concentración de NDF. El FieldScout CM 1,000 NDVI fue mejor que el Yara N-Tester en la predicción de las concentraciones de NDF ($R^2 = 0.70$) y ADF ($R^2 = 0.79$) en *Brachiaria* híbrida y NDF ($R^2 = 0.79$) en *M. maximus*. Sin embargo, estos modelos de predicción tuvieron coeficientes de correlación de concordancia relativamente bajos, es decir, $CCC > 0.90$, pero los errores aleatorios fueron la principal fuente de sesgo. En general, el FieldScout CM 1,000 NDVI muestra potencial para producir estimaciones útiles de IVOMD24h y ADF en *Brachiaria* híbrida y IVOMD48h y concentraciones de NDF en *M. maximus*.

Dare et al. (2020), con el título de investigación "Spent Mushroom Compost Enhances Plant Response and Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Soil", investigaron el efecto del SMC en la fitorremediación y la respuesta de las plantas a los suelos contaminados con metales pesados, y se sugiere para el establecimiento de una posible remediación del suelo. Se esterilizó el suelo contaminado con metales pesados (80 kg) a 121°C en un esterilizador de suelo durante 30 minutos y se repitió cuatro veces más para eliminar la interferencia microbiana. Se llenaron macetas con 5 kg de suelo suplementado con SMC de *Pleurotus ostreatus* en diferentes concentraciones del 10, 20, 30 y 40%, además de un control (sin SMC), y se utilizó para cultivar la planta de prueba (*Megathyrus maximus*, comúnmente conocida como pasto Guinea) durante 90 días. El efecto de los tratamientos de SMC en las características químicas del suelo se determinó mediante análisis del suelo antes y después del experimento. La respuesta de la planta al SMC en suelos contaminados se estudió observando la proliferación de raíces, el crecimiento de la planta y la biomasa. Los resultados sugieren que el tratamiento con SMC modificó las características químicas del suelo, el índice de germinación (GI), el crecimiento de la planta y el potencial de fitorremediación. El pH del suelo aumentó de 4.3 en el control a 6.8 en

los tratamientos con 40% y 30% de SMC; además, los nutrientes del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CEC) y el GI mejoraron con el aumento incremental de los tratamientos con SMC, mientras que la eliminación de metales pesados se observó mejor en los tratamientos con 40% y 30%. Además, se confirmó el efecto bio estimulante del SMC en la proliferación de raíces, el crecimiento, la fitomasa y el potencial de fitorremediación de la planta de pasto guinea. Por lo tanto, se sugiere el uso de SMC para estimular el suelo y mejorar el crecimiento y la fitorremediación de las plantas.

Eryssa et al. (2023), con el título de investigación "Guinea Grass (*Megathyrus maximus*) Fibras as Sorbent in Diesel Bioremediation", investigaron la capacidad de una hierba natural llamada *Megathyrus maximus* (pasto Guinea) como sorbente para limpiar derrames de diesel en agua. Se utilizó la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para identificar las propiedades fisicoquímicas de GG sin tratar y tratado. Se optimizaron varios parámetros que influyen en la eficiencia de absorción de aceite por el pasto guinea mediante la metodología de un factor a la vez (OFAT) seguida de la metodología de superficie de respuesta (RSM). Los parámetros optimizados incluyen tratamiento térmico, tiempo de calentamiento, densidad de empaque y concentración de diesel, con solo los factores significativos que proceden a la optimización estadística a través de RSM. Como resultado del análisis OFAT, se absorbió 18.83 mL de aceite a 110°C durante 15 minutos de calentamiento, con una densidad de empaque de 14 g/cm³ y una concentración de aceite del 10% (v/v). A través de RSM, el modelo predicho fue significativo, confirmando que la densidad de empaque y la concentración de aceite influyeron significativamente en la eficiencia de absorción de aceite por GG. El software predijo una eficiencia de absorción de aceite de 16.64 mL, mientras que el modelo experimental validó el diseño con 22.33 mL de aceite absorbido a una temperatura y tiempo constantes, respectivamente. La técnica RSM demostró una mayor eficiencia y efectividad en la absorción de aceite en comparación con OFAT. Esta investigación avanza en nuestra comprensión de la utilización de sorbetes naturales como estrategia de remediación de la contaminación por diésel.

Magno de Melo et al. (2022), con el título de investigación "Potencial of Forage Grasses in Phytoremediation of Lead through Production of Phytoliths in Contaminated Soils", evaluaron el potencial de fitoremediación de las gramíneas forrajeras mediante la producción de fitolitos y la oclusión de Pb en los fitolitos cultivados en suelos contaminados con Pb. Se realizaron tres experimentos en invernadero en un diseño completamente aleatorio, separados por tipo de suelo (Hapludox Típico, Hapludox Xántico y Hapludox Ródico), en un esquema factorial 3x4 que consistió en tres gramíneas forrajeras (*Megathyrus maximus*, *Urochloa brizantha* y *Urochloa decumbens*) y cuatro niveles de Pb (0, 45, 90 y 270 mg kg⁻¹) con cuatro repeticiones. Las gramíneas forrajeras fueron influenciadas por el aumento de las concentraciones de Pb en los suelos. La mayor disponibilidad de Pb en Typic Quartzipsamment promovió la toxicidad de Pb, como se indicó por la reducción del peso seco de los brotes, el aumento de la producción de fitolitos en los brotes, el aumento de Pb en los brotes y la oclusión de Pb en los fitolitos de las gramíneas forrajeras. La producción y la captura de Pb en los fitolitos en las gramíneas en los suelos contaminados con Pb estuvieron relacionadas con las diferencias genéticas y fisiológicas en las gramíneas forrajeras y la disponibilidad de Pb en los suelos. *Urochloa brizantha* fue la gramínea forrajera más tolerante al exceso de Pb, con una mayor producción de fitolitos y una mayor oclusión de Pb en los fitolitos, lo que la convierte en una gramínea forrajera que se puede utilizar en el futuro para la fitoremediación de suelos contaminados con Pb.

6 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE TEMAS (PICOT)

Con base en los antecedentes proporcionados, se pueden identificar y seleccionar varios temas de investigación utilizando el enfoque PICOT. El enfoque PICOT es un acrónimo que representa los elementos clave de una pregunta de investigación:

1. Población: ¿Cuál es la población o grupo de interés en el estudio?
2. Intervención: ¿Cuál es la intervención o exposición que se está evaluando?
3. Comparación: ¿Se compara la intervención con un grupo de control o con otra intervención?
4. Outcome (Resultado): ¿Cuál es el resultado o el efecto que se espera medir o lograr?
5. Tiempo: ¿Cuál es el período de tiempo en el que se llevará a cabo el estudio?

Se utiliza el enfoque PICOT basados en los antecedentes proporcionados:

****Hernández et al. (2017) ****

****P****: Población - Suelo contaminado con petróleo extra pesado.

****I****: Intervención - Fitorremediación con *Megathyrus maximus* .

****C****: Comparación - Suelo sin *Megathyrus maximus* .

****O****: Resultado - Reducción en hidrocarburos de petróleo, cambios en actividad microbológica.

****T****: Hernández et al. (2017) tuvieron como objetivo determinar la eficacia de *Megathyrus maximus* en la remediación de suelos contaminados con petróleo extra pesado durante 120 días. Compararon dos tratamientos: uno con *Megathyrus*

maximus y otro sin la planta. El estudio se centró en cambios en los niveles totales de hidrocarburos de petróleo y en indicadores de actividad microbiológica, como la enzima deshidrogenasa, la biomasa de carbono microbiano y la respiración basal. Después de 120 días, la presencia de *Megathyrus maximus* condujo a una reducción del 17.1% en los hidrocarburos, en comparación con el 9.8% en el tratamiento sin plantas. Específicamente, las fracciones de hidrocarburos aromáticos y saturados disminuyeron en el tratamiento con la planta, mientras que solo los aromáticos disminuyeron en el tratamiento sin plantas. El tratamiento con *Megathyrus maximus* demostró cambios a lo largo del tiempo en todos los indicadores bioquímicos y microbiológicos evaluados, mientras que el tratamiento sin plantas solo mostró cambios en la actividad de la enzima deshidrogenasa y el coeficiente metabólico. La actividad microbiana fue consistentemente mayor o similar en el tratamiento con plantas, posiblemente debido a la presencia de la rizósfera, que promueve dicha actividad.

Uribe et al. (2022)

****P****: Población - Suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo (PHC).

****I****: Intervención - Comparación de *Brachiaria decumbens* y *Megathyrus maximus* en fitorremediación.

****C****: Comparación - Comparación de microbiomas asociados a las raíces de las dos especies de pasto.

****O****: Resultado - Mejora en la fertilidad del suelo, eliminación de PHC, identificación de bacterias asociadas a las plantas.

****T****: Uribe et al. (2022) compararon las capacidades de fitorremediación de *Brachiaria decumbens* y *Megathyrus maximus* en suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo (PHC). Utilizaron la secuenciación del gen 16S rARN para caracterizar las comunidades bacterianas en la rizósfera de estas dos plantas en suelos contaminados con PHC durante un año. Ambas plantas mejoraron significativamente

los parámetros de fertilidad del suelo, como la porosidad, el fósforo disponible y la capacidad de intercambio catiónico. La diversidad de las comunidades bacterianas se vio influenciada por las plantas, y la beta-diversidad de la comunidad de la rizosfera estuvo más relacionada con cambios en el fósforo disponible y el pH que con la concentración de PHC. El tratamiento con *M. maximus* mostró la remoción más rápida de PHC (en promedio, un 23.38% menos en comparación con los niveles iniciales) a los 3 meses, y ciertos géneros bacterianos fueron significativamente más abundantes en la rizósfera de *M. maximus* en comparación con la otra planta y el control. También identificaron géneros bacterianos asociados al crecimiento de las plantas y la degradación de PHC, que podrían ser objeto de futuros estudios para confirmar su papel y utilidad como biostimulantes para optimizar la fitorremediación con estos pastos.

****Dare et al. (2017) ****

****P****: Población - Suelo contaminado con petróleo crudo.

****I****: Intervención - Uso combinado de hongos rizosféricos y *Megathyrus maximus* en remediación.

****C****: Comparación - Suelo con solo plantas o solo hongos.

****O****: Resultado - Cinética de degradación de hidrocarburos, características del suelo, índice de soporte para germinación.

****T****: Dare et al. (2017) investigaron la remediación sinérgica de suelos contaminados con petróleo crudo antiguo utilizando una combinación de hongos rizosféricos y *Megathyrus maximus* (pasto guinea). Identificaron cuatro nuevas cepas fúngicas rizosféricas y las utilizaron junto con *Megathyrus maximus* en un experimento de remediación sinérgica de 90 días. Las cepas fúngicas se mezclaron con compost de champiñones agotado (SMC) y se aplicaron en suelos esterilizados contaminados con petróleo crudo a varias concentraciones. Se midieron el pH inicial y final del suelo, los nutrientes, los 16 EPA PAHs y los contenidos de metales pesados,

y se calcularon tasas de degradación, semivida e índice de soporte para germinación de semillas. El estudio encontró que la remediación sinérgica mejoró los nutrientes del suelo, redujo las concentraciones de metales pesados y aceleró las tasas de degradación de hidrocarburos. Los tratamientos con 30% y 40% de SMC mostraron las tasas de biodegradación más altas y el índice de soporte para germinación de semillas más alto. Este estudio sugiere que la remediación sinérgica podría utilizarse para remediar suelos contaminados con petróleo crudo a gran escala.

****Dare et al. (2017) **** (Segundo Estudio)

****P****: Población - Suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo negro.

****I****: Intervención - Aplicación de compost de champiñones agotado (SMC) en fitorremediación con *Megathyrus maximus*.

****C****: Comparación - Suelo con diferentes concentraciones de SMC.

****O****: Resultado - Características químicas del suelo, respuesta de la planta, eliminación de hidrocarburos, evaluaciones anatómicas.

****T****: Dare et al. (2017) evaluaron

el impacto del compost de champiñones agotado (SMC) en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo negro utilizando *Megathyrus maximus* (pasto guinea). Realizaron estudios en condiciones de microcosmos, mezclando diferentes concentraciones de SMC en suelos contaminados. Luego, se sembraron semillas de *M. maximus* y se evaluaron las respuestas eco fisiológicas y anatómicas después de 120 días. El tratamiento con SMC mejoró las características químicas del suelo, el índice de germinación, el crecimiento de la planta y la capacidad de fitorremediación. También mejoró las respuestas anatómicas de las raíces y los brotes de la planta en comparación con el control. Este estudio sugiere que el SMC puede mejorar la estimulación y el desarrollo de características adaptativas para la

supervivencia de *M. máximus* en suelos contaminados y promover la co-degradación de hidrocarburos.

****Magno de Melo et al. (2020) ****

****P**:** Población - Suelos contaminados con cadmio (Cd)

****I**:** Intervención - Evaluación de la capacidad de las gramíneas para producir fitolitos en suelos contaminados con Cd

****C**:** Comparación - Diferentes especies de gramíneas y concentraciones de Cd en el suelo

****O**:** Resultado - Captura de Cd en fitolitos producidos por las gramíneas

****T**:** Magno de Melo et al. (2020) evaluaron el potencial de las gramíneas para producir fitolitos en suelos contaminados con cadmio (Cd). Realizaron experimentos con tres especies de gramíneas y cuatro concentraciones de Cd en el suelo. Observaron que el crecimiento de las gramíneas disminuyó a medida que aumentaba la concentración de Cd en el suelo, y las gramíneas mostraron la capacidad de producir fitolitos independientemente del tipo de suelo. *Megathyrus maximus* fue la gramínea más tolerante al Cd y capturó una mayor cantidad de Cd en los fitolitos. Este estudio destacó la importancia de las diferencias genéticas y fisiológicas de las especies de gramíneas en la Fito extracción de metales pesados mediante la producción de fitolitos.

****Hughes et al. (2016) ****

****P**:** Población - Pastos tropicales (*Brachiaria hybrid*, *Megathyrus maximus*, *Paspalum atratum*)

****I**:** Intervención - Uso de medidores ópticos de clorofila para predecir composición química y degradabilidad de la materia orgánica ruminal

****C****: Comparación - Medición de diferentes parámetros químicos y degradabilidad in vitro

****O****: Resultado - Precisión de los medidores ópticos en la predicción de la composición y degradabilidad

****T****: Hughes et al. (2016) evaluaron la precisión de dos medidores ópticos de clorofila para predecir la composición química y la degradabilidad de la materia orgánica ruminal en pastos tropicales. Realizaron mediciones ópticas de clorofila en diferentes etapas de crecimiento de las gramíneas y encontraron correlaciones con la concentración de fibra detergente neutra (NDF) y otros parámetros. El estudio demostró que el FieldScout CM 1,000 NDVI tenía potencial para estimar útilmente la degradabilidad de la materia orgánica y la composición química en algunas de las gramíneas estudiadas.

****Dare et al. (2020) ****

****P****: Población - Suelos contaminados con metales pesados

****I****: Intervención - Uso de compost de champiñones agotado (SMC) para mejorar la fitorremediación y respuesta de las plantas

****C****: Comparación - Diferentes concentraciones de SMC en el suelo

****O****: Resultado - Cambios en características del suelo, crecimiento de plantas, potencial de fitorremediación

****T****: Dare et al. (2020) investigaron el efecto del SMC en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados y la respuesta de las plantas. Estudian la respuesta de *Megathyrus máximus* en suelos contaminados con metales pesados y tratados con diferentes concentraciones de SMC. El estudio mostró que el SMC modificó las características químicas del suelo, mejoró el crecimiento de las plantas y

su potencial de fitorremediación. Se sugirió que el SMC podría utilizarse para estimular el crecimiento y la fitorremediación de las plantas en suelos contaminados.

****Eryssa et al. (2023) ****

****P**:** Población - Derrames de diésel en agua

****I**:** Intervención - Uso de *Megathyrus maximus* (pasto Guinea) como sorbete para limpiar derrames de diésel

****C**:** Comparación - Propiedades fisicoquímicas del pasto antes y después del tratamiento

****O**:** Resultado - Eficiencia de absorción de aceite de diésel

****T**:** Eryssa et al. (2023) investigaron la capacidad de *Megathyrus maximus* como sorbete natural para limpiar derrames de diésel en agua. Utilizaron espectroscopia infrarroja para estudiar las propiedades fisicoquímicas del pasto antes y después del tratamiento. El estudio optimizó varios parámetros para mejorar la eficiencia de absorción de aceite, y los resultados sugirieron que el pasto Guinea podría utilizarse como una estrategia efectiva de remediación para la contaminación por Diesel.

****Magno de Melo et al. (2022) ****

****P**:** Población - Suelos contaminados con plomo (Pb)

****I**:** Intervención - Evaluación de la capacidad de gramíneas para producir fitolitos y ocultar Pb en ellos

****C**:** Comparación - Diferentes especies de gramíneas y niveles de Pb en el suelo

****O**:** Resultado - Captura de Pb en fitolitos producidos por las gramíneas

****T****: Magno de Melo et al. (2022) evaluaron el potencial de fitorremediación de gramíneas mediante la producción de fitolitos y la ocultación de plomo (Pb) en los fitolitos cultivados en suelos contaminados con Pb. Realizaron experimentos con tres especies de gramíneas y cuatro niveles de Pb en el suelo. El estudio destacó la capacidad de algunas gramíneas, como *Megathyrus maximus*, para ser utilizadas en la fitorremediación de suelos contaminados con Pb al producir fitolitos que capturan y ocultan este metal pesado.

10. Resumen de selección de artículos

1. Hernández et al. (2017): Este estudio investigó la capacidad de *Megathyrus maximus* para remediar un suelo contaminado con petróleo extrapesado a lo largo de 120 días. Encontraron que la presencia de *Megathyrus maximus* condujo a una reducción del 17.1% en los hidrocarburos, en comparación con el 9.8% en el tratamiento sin plantas. Además, observaron cambios en indicadores bioquímicos y microbiológicos, lo que sugiere que esta planta puede ser efectiva en la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo.

2. Uribe et al. (2022): Este estudio comparó las capacidades de *Brachiaria decumbens* y *Megathyrus maximus* en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. Ambas plantas mejoraron significativamente los parámetros de fertilidad del suelo y la diversidad de las comunidades bacterianas en la rizosfera. *Megathyrus maximus* mostró una remoción más rápida de los hidrocarburos, lo que sugiere su eficacia en la fitorremediación.

3. Dare et al. (2017): Este estudio combinó el potencial de las plantas y cepas fúngicas en la remediación de suelos contaminados con petróleo crudo. Observaron que el tratamiento sinérgico mejoró la degradación de hidrocarburos y la calidad del suelo, lo que respalda la idea de que la combinación de plantas y hongos puede ser efectiva en la remediación de suelos contaminados.

4. Magno de Melo et al. (2020): Este estudio evaluó el potencial de las gramíneas en la producción de fitolitos en suelos contaminados con Cd y encontró que *Megathyrus maximus* fue la gramínea más tolerante al Cd, lo que sugiere su capacidad para la Fito extracción de este metal pesado.

5. Nardis et al. (2017): Este estudio evaluó el crecimiento y la acumulación de Zn en pastos forrajeros, incluyendo *Megathyrus maximus*, en suelos contaminados con Zn. Observaron que el cultivar Aruana mostró mayor tolerancia al Zn, lo que puede ser relevante en la Fito extracción de este metal pesado.

6. Hughes et al. (2016): Este estudio se centró en la precisión de medidores ópticos de clorofila en la predicción de características químicas y degradabilidad de la materia orgánica en pastos, incluyendo *Megathyrsus maximus*. Los resultados indican que estos medidores pueden ser útiles para estimar ciertos parámetros en estos pastos.

7. Dare et al. (2020): Este estudio investigó el efecto del SMC en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados y encontró que el SMC mejoró el crecimiento de la planta y la fitorremediación, lo que sugiere su utilidad en la remediación de suelos contaminados.

8. Eryssa et al. (2023): Este estudio investigó la capacidad de *Megathyrsus maximus* como sorbete para limpiar derrames de Diesel en agua, lo que podría ser relevante en la remediación de la contaminación por Diesel.

9. Magno de Melo et al. (2022): Este estudio evaluó el potencial de fitorremediación de las gramíneas forrajeras, incluyendo *Megathyrsus maximus*, en suelos contaminados con Pb mediante la producción de fitolitos. Observaron que *Urochloa brizantha* fue la gramínea más tolerante al exceso de Pb, lo que sugiere su utilidad en la fitorremediación de suelos contaminados con este metal pesado.

Estos estudios proporcionan evidencia de que *Megathyrsus maximus* y otras plantas, así como la combinación con otros agentes como hongos y compost de champiñones agotado, pueden ser efectivos en la fitorremediación de suelos contaminados con petróleo, metales pesados y otros contaminantes. También muestran que *Megathyrsus maximus* puede ser útil en la producción de fitolitos y en la absorción de Diesel.