

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

**FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS POR METALES PESADOS A
CAUSA DE LA MINERÍA ARTESANAL,
UTILIZANDO ARACHIS PINTOI (MANÍ
FORRAJERO) EN LA PARROQUIA ZURMI,
CANTÓN NANGARITZA, PROVINCIA ZAMORA
CHINCHIPE, ECUADOR**

**PHYTOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED BY HEAVY
METALS DUE TO ARTISANAL MINING, USING ARACHIS
PINTOI (FORAGE PEANUT) IN THE PARISH OF ZURMI,
CANTON NANGARITZA, ZAMORA CHINCHIPE PROVINCE,
ECUADOR**

Marlon Vinicio Guayanay Correa

Biólogo. Universidad Estatal Amazónica

Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados a causa de la minería artesanal, utilizando *arachis pintoii* (maní forrajero) en la parroquia zurmi, cantón nangaritza, provincia zamora chinchipe, Ecuador

Marlon Vinicio Guayanay Correa¹

mv.guayanayc@uea.edu.ec

Biólogo. Universidad Estatal Amazónica
Puyo, Ecuador

RESUMEN

El estudio se centra en *Arachis pintoii*, un maní forrajero, crucial por su papel como leguminosa adaptable a suelos afectados por actividades mineras y su utilidad como alimento para el ganado. Este trabajo investigativo se enfoca en la capacidad fitorremediadora de *A. pintoii* en suelos contaminados por metales pesados en la parroquia Zurmi, cantón Nangaritza, provincia de Zamora Chinchipe. La metodología incluyó la identificación de áreas previamente explotadas para obtener muestras de suelo, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de la Universidad Estatal Amazónica para determinar la presencia y niveles de metales pesados. Los resultados revelaron que las muestras de suelo 1, 2 y 3 excedían los límites normativos para cadmio, clasificándose, así como suelos contaminados por este metal. A pesar de esto, *A. pintoii* demostró una notable resistencia, no presentando mortalidad ni alteraciones significativas en su morfología al ser cultivada en suelos contaminados por metales pesados. Estos hallazgos sugieren que *A. pintoii* podría considerarse una planta capaz de adaptarse a condiciones ambientales extremas. Además, se identificaron otros metales pesados como níquel, cadmio y arsénico, de los cuales el cadmio superó los límites permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 028 del Ministerio del Ambiente del Ecuador.

Palabras clave: *Arachis pintoii*, leguminosa, maní forrajero, metales pesados, planta acumuladora

¹ Autor principal

Correspondencia: mv.guayanayc@uea.edu.ec

Phytoremediation of soils contaminated by heavy metals due to artisanal mining, using *arachis pinto* (forage peanut) in the parish of zurmi, canton nangaritza, zamora chinchipe province, Ecuador

ABSTRACT

The study focuses on *Arachis pinto*, a forage peanut, crucial for its role as a legume adaptable to soils affected by mining activities and its usefulness as food for livestock. This research work focuses on the phytoremediation capacity of *A. pinto* in soils contaminated by heavy metals in the Zurmi parish, Nangaritza canton, and Zamora Chinchipe province. The methodology included the identification of previously exploited areas to obtain soil samples, which were analyzed in the laboratory of the Amazonian State University to determine the presence and levels of heavy metals. The results revealed that soil samples 1, 2 and 3 exceeded the regulatory limits for cadmium, thus classifying them as soils contaminated by this metal. Despite this, *A. pinto* demonstrated notable resistance, presenting no mortality or significant alterations in its morphology when grown in soils contaminated by heavy metals. These findings suggest that *A. pinto* could be considered a plant capable of adapting to extreme environmental conditions. In addition, other heavy metals were identified such as nickel, cadmium and arsenic, of which cadmium exceeded the permissible limits established in Ministerial Agreement 028 of the Ministry of the Environment of Ecuador.

Keywords: *A. pinto*, legume, forage peanut, heavy metals, accumulator plant

Artículo recibido 06 enero 2025
Aceptado para publicación: 13 febrero 2025



INTRODUCCIÓN

El problema global de la contaminación ambiental por metales pesados ha intensificado su impacto debido a la movilización de estos contaminantes a través de la extracción y procesamiento de minerales para diversas aplicaciones industriales. Esta situación ha conducido a la liberación de metales pesados en el medio natural, agravando la contaminación debido al avance de la industrialización y la alteración de los ciclos biogeoquímicos. A diferencia de los compuestos orgánicos, los metales pesados no son biodegradables y tienden a acumularse en el ambiente, representando un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Estos contaminantes se concentran en los tejidos vivos a través de la bioacumulación y aumentan su presencia a lo largo de la cadena alimenticia mediante un proceso conocido como biomagnificación. En los suelos, los metales pesados pueden tener efectos tóxicos en los microorganismos, disminuyendo su cantidad y actividad biológica.

El suelo, como recurso no renovable, se ve severamente afectado por la contaminación prolongada debido a grandes cantidades de desechos peligrosos, incluyendo metales pesados, pesticidas e hidrocarburos que deterioran su calidad y función. La contaminación del suelo por metales pesados como el mercurio, resultante de actividades mineras, altera sus características físicas y químicas, así como los ecosistemas circundantes, afectando negativamente la flora y fauna locales. Esta contaminación genera preocupación entre los agricultores por la seguridad de la producción agrícola, debido a la incertidumbre sobre la posible transmisión de estos contaminantes a la cadena alimenticia, lo que podría comprometer la seguridad alimentaria.

En contextos como la Parroquia Zurmi, Cantón Nangaritza, Provincia Zamora Chinchipe en Ecuador, la minería artesanal y a pequeña escala (MAPE) ha resultado en una problemática evidente de contaminación por mercurio, un contaminante prevalente debido a las prácticas de extracción de oro. Esta situación demanda la implementación de estrategias eficientes y sostenibles para la remediación de suelos afectados. Una de las técnicas más prometedoras es la fitorremediación, que implica el uso de plantas para extraer, inmovilizar o degradar contaminantes. Dentro de las especies vegetales, *Arachis pintoi* (Maní Forrajero) ha demostrado ser particularmente efectiva debido a su tolerancia a los metales pesados y su capacidad para estabilizar y mejorar las propiedades del suelo.



El género *Arachis*, originario de regiones como Brasil, Paraguay, Argentina y Uruguay, es notable entre las leguminosas por sus características únicas como frutos subterráneos y diferentes tipos de anteras en una misma flor. *A. pintoii* es una planta herbácea perenne de crecimiento rastrero, con raíz pivotante, hojas alternas compuestas y flores amarillas. Su valor nutritivo supera al de muchas otras leguminosas tropicales de importancia comercial.

Aunque hay estudios documentados sobre la toxicidad del manganeso en *Arachis pintoii*, las investigaciones sobre su capacidad para acumular otros metales pesados son aún escasas. La visualización de síntomas como parches necróticos en los bordes de las hojas indica la presencia de toxicidad. En Zurmi, una agrupación de mineros artesanales ha estado utilizando mercurio en la extracción de oro, afectando los suelos locales. Este estudio surge de la necesidad de recuperar los suelos contaminados, evaluando la capacidad fitorremediadora de *A. pintoii* en estos contextos, no solo para ampliar el conocimiento científico sino también para ofrecer una solución práctica y sostenible que mitigue los impactos adversos de la minería artesanal en el medio ambiente y la salud pública.

Problemática

La economía de varios países se sustenta en la actividad extractiva de minerales, considerados recursos no renovables. En Ecuador, la legislación ambiental regula la extracción de metales preciosos bajo criterios que incluyen la obligación de restaurar suelos contaminados. Particularmente en la parroquia Zurmi, cantón Nangaritza, provincia de Zamora Chinchipe, la minería artesanal ha provocado serios problemas ambientales por la contaminación de suelos con metales pesados, afectando la biodiversidad local y representando un riesgo para la salud humana y la sostenibilidad de los ecosistemas cercanos.

Según el Plan de Ordenamiento Territorial de Nangaritza (2020), se realizan tanto minería no metálica (sílice) como minería metálica (oro, plata y cobre). Aunque las explotaciones son limitadas, gran parte del territorio cantonal ha sido concesionado para explotación y exploración, y existe minería ilegal en casi todas las parroquias. De las 147 concesiones mineras en el cantón, 123 son para minerales metálicos, abarcando 59,888.16 hectáreas. Este contexto de intensa actividad minera resalta la necesidad de abordar los desafíos ambientales de manera sostenible para mitigar los impactos negativos.

La minería inevitablemente implica contaminación y destrucción del entorno, especialmente por el uso de maquinaria pesada y sustancias tóxicas como el mercurio. Por ley, tanto microempresas como grandes

corporaciones mineras deben tener planes de restauración para las zonas afectadas, lo que establece un compromiso entre los mineros y los propietarios de las tierras. Sin embargo, los altos costos y la eficacia limitada de los tratamientos fisicoquímicos tradicionales han impulsado la búsqueda de nuevas tecnologías de remediación. Entre estas, la fitorremediación destaca por utilizar procesos bioquímicos de plantas y microorganismos para reducir la concentración de metales pesados.

A pesar de ser una actividad económica importante, el impacto ambiental de la minería artesanal ha sido subestimado, especialmente en lo que respecta a la liberación de metales pesados en el suelo y la falta de recuperación y restauración de áreas afectadas. Existe una preocupante falta de información y concienciación sobre las posibilidades de recuperación de los suelos, lo que lleva a muchos propietarios a asumir que sus tierras son irrecuperables. Legalmente, en zonas donde la minería es ilegal, no se exige la restauración, pero este estudio se centra en una zona legal, buscando ofrecer soluciones prácticas al problema identificado.

La investigación propuesta busca demostrar la presencia de metales como plomo, mercurio y cadmio, que son un riesgo directo para la salud de la población local y afectan la capacidad del suelo para sostener vida vegetal. Se evaluará la aplicabilidad de la fitorremediación utilizando *Arachis pintoi* (maní forrajero) para reducir los niveles de metales pesados en los suelos contaminados. Esta aproximación plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Permitirá la aplicación de fitorremediación mediante *A. pintoi* disminuir los niveles de metales pesados en suelos afectados por la minería artesanal en Zurmi, Nangaritza, Zamora Chinchipe?

Hipótesis

La aplicación de fitorremediación con *A. pintoi* (maní forrajero) se espera que resulte en una reducción de los niveles de metales pesados en suelos contaminados por minería artesanal en la Parroquia Zurmi, Cantón Nangaritza, Provincia Zamora Chinchipe, Ecuador.

Objetivo general:

- ✓ Evaluar la capacidad fitorremediadora de *A. pintoi* (Maní forrajero) en suelos contaminados por metales pesados en la parroquia Zurmi, cantón Nangaritza, provincia de Zamora Chinchipe.

Suelo

El suelo está definido como la primera capa que va desde la superficie de un terreno hasta aproximadamente 30 cm de profundidad; es considerado como un material compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, microorganismos, materia orgánica, agua y aire; está formado además por rocas muy sólidas, capas de arena, arcillas, limos, mismas que poseen características diferentes (Iturbe, 2010 pág. 45). Los minerales son los principales elementos del suelo que contribuyen más del 50% del volumen total de dicho recurso (Volke, & Velasco, 2002), (Vilcapasa, 2018, p. 24).

En síntesis, el suelo es un elemento importante formado por minerales y rocas, en el que la vida se desarrolla, debido al contenido de nutrientes que hacen que crezcan las plantas, las mismas que toman del suelo lo que necesitan para su crecimiento. Es un recurso primordial para los seres vivos que se le considera como no renovable, ya que su regeneración depende del pasar de cientos de miles de años, por lo cual buscar alternativas viables para su recuperación es indispensable (Muñoz, 2017).

Tabla 1

Beneficios ambientales del recurso suelo

Beneficio ambiental	Descripción
Hábitat y reserva genética	El suelo es el hábitat de una cantidad ingente de organismos de todo tipo que viven tanto en el suelo como sobre él, cada uno con un genotipo irremplazable. Esta es una función ecológica esencial.
Generación de alimento y demás producción de biomasa	Los alimentos y otros productos agrícolas, esenciales para la vida humana, así como la silvicultura dependen totalmente del suelo. Prácticamente toda la vegetación-pastos, cultivos y árboles, inclusive- necesitan del suelo para obtener tanto agua y nutrientes como soporte físico.
Entorno físico y cultural para la humanidad	El suelo sirve de base a las actividades humanas y es asimismo un elemento del paisaje del patrimonio cultural
Almacenaje, filtración y transformación	El suelo almacena minerales, materia orgánica, agua y varias sustancias químicas. Sirve de filtro natural de las aguas subterráneas, la principal reserva de agua potable, y libera dióxido de carbono, metano y otros gases a la atmósfera.
Fuente de materias primas	Los suelos proporcionan materias primas tales como las arcillas, las arenas y los minerales, entre otros, que son empleados en los diversos procesos productivos de las organizaciones.

Nota. Esta tabla muestra los análisis de contaminación del suelo.

Fuente: (Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de la regulación económica, 2009)



Suelo contaminado

Un suelo contaminado es aquel que en su estado natural se ha visto alterado por diferentes causas; las más frecuentes se deben a la introducción de contaminantes en la atmósfera, producidas por las actividades del ser humano (Mackenzie, 2005).

Fuentes de contaminación

Fuente natural

La mayor fuente natural de mercurio es la desgasificación de la corteza terrestre, las emisiones de los volcanes y la evaporación desde los cuerpos de agua (Guzmán, 2007).

Fuentes antropogénicas

La contaminación ocasionada por el hombre es realizada de muchas formas, como por ejemplo las descargas de desechos y la emisión directa a la atmósfera en la explotación minera del metal y del oro, en la quema de los combustibles fósiles misma que representa una fuente importante de contaminación atmosférica, así como la incineración de desechos sólidos los cuales incluyen mercurio volatilizado de baterías desechadas, también durante la fundición de cobre y zinc, entre otras fuentes de contaminación (Guzman, 2007 pág. 67).

A continuación, en la tabla 2 se detallan las fuentes antropogénicas más comunes existentes:

Tabla 2

Fuentes de contaminación antropogénicas más comunes

Fuentes de contaminación antropogénicas

Cunetas y alcantarillas azolvadas	Líquidos por falta de mantenimiento de equipos
Derrames y liqueos por manejo de combustibles (carga y descarga)	Mecheros en funcionamiento • Minas y canteras en uso
Descargas de agua de formación del separador API	Oleoducto en mal estado y con presencia de Líquidos
Descargas de aguas negras sin tratamiento provenientes de campamentos en funcionamiento	Piscina en uso
Efluentes líquidos descargados al ambiente desde trampas de grasas y aceite	Piscinas en uso con mecheros
Fosas con crudo	Pozos averiados y con Líquidos
Líquidos de tanques de almacenamiento de crudo	Sitios utilizados para la disposición de residuos sólidos.
Líquidos de tanques de almacenamiento de diésel	Suelos contaminados por derrames de crudo
Líquidos por cubetos con presencia de derrames	Suelos contaminados por derrames de diésel
Líquidos.	

Nota. En la siguiente tabla se muestra algunas de causas antropogénicas de contaminación del suelo.

Fuente: Trabajo de titulación de Muñoz Gissela, 2017

Elaborado por: Guayanay Vinicio, 2024



Actividad minera en Ecuador

La actividad minera en el país se ha limitado a la minería artesanal y a pequeña escala. En ambos escenarios, el Gobierno desempeña un papel activo proporcionando capacitación a los trabajadores mineros, asistiéndolos en el proceso de regularización y brindándoles asistencia técnica. Adicionalmente, está en proceso la promulgación de una legislación específica, denominada Ley de Fomento, Participación y Capacitación de la Pequeña Minería y Minería Artesanal, que busca respaldar estas modalidades de minería (Rea, 2017).

Minería artesanal

La minería artesanal se define como aquella actividad minera llevada a cabo de manera individual, familiar o a través de asociaciones, siempre bajo la autorización del Estado. Se distingue por el uso de herramientas y maquinarias sencillas y móviles, cuyo propósito es la extracción de minerales. Los ingresos obtenidos de esta actividad generalmente solo alcanzan para satisfacer las necesidades básicas del individuo o de la familia que la ejerce. Además, esta modalidad de minería se caracteriza por no requerir una inversión que exceda las 150 remuneraciones básicas unificadas (Rea, 2017).

Cuando tres o más mineros artesanales deciden asociarse, deben realizar una inversión equivalente a 300 salarios básicos unificados. Esta acción requiere un informe previo que evalúe aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, el cual debe ser emitido por la Agencia de Regulación y Control Minero. En cuanto al permiso para la minería artesanal, el Ministerio correspondiente al sector otorga autorizaciones con una duración de hasta 10 años. Estos permisos son renovables por periodos similares, bajo la condición de que se presente una solicitud por escrito antes de la fecha de caducidad del permiso vigente y que se cuente con un informe favorable tanto de la Agencia de Regulación y Control Minero como del Ministerio del Ambiente. Además, es importante destacar que los mineros artesanales están exentos del pago de regalías (Rea, 2017).

Labores mineras artesanales: 700 regularizadas con los acuerdos ministeriales elaborados.

Producción anual de oro, estimada: una tonelada.

Empleo generado (directo e indirecto): 30.000.

La mayor cantidad de labores mineras artesanales están en las provincias de Zamora Chinchipe y El Oro.

Pequeña minería

Esta se refiere a una modalidad que se define por varios criterios, incluyendo el tamaño del área de las concesiones, la cantidad de producción y procesamiento, la cuantía de las inversiones realizadas, y el nivel de tecnología implementado y posee las siguientes características (Rea, 2017):

- a. Una capacidad instalada de explotación y/o beneficio de hasta 300 toneladas métricas por día.
- b. Una capacidad de producción de hasta 800 m³/d, con relación a la minería de no metálicos y materiales de construcción.

Mercurio

Los autores Restrepo y Verbel (2002), citado por León (2016), definen al mercurio como uno de los metales que posee mayor impacto sobre los ecosistemas, y su acumulación, así como su toxicidad son persistentes en el medio ambiente, lo cual afecta la salud de los seres vivos.

De acuerdo con Carrasquero y Adams, (2003) citado por León (2016), sostiene que el mercurio es conocido por ingresar al suelo bajo la forma de mercurio metálico, y este puede llegar a oxidarse hasta la forma divalente, el cual es interactúa en la superficie de los suelos, esto a través de reacciones de la adsorción.

Mercurio en el suelo

En los últimos 125 años se han emitido a la atmósfera casi 200000 toneladas de mercurio, de los cuales cerca del 95% ha sido depositado en la superficie terrestre, convirtiendo los suelos en el principal depósito de este elemento. Esta reserva se convierte en una continua fuente de mercurio, que continuará emitiendo mercurio hacia la atmósfera durante muchos años (León, 2016 pág. 43). Además, la utilización de mercurio en las prácticas mineras de Latinoamérica no sólo ha construido un factor de riesgo para el ambiente de las regiones en donde existen explotaciones, sino que también ha afectado la salud de los mineros. En el ambiente, el mercurio emitido por la minería aurífera se acumula en forma de mercurio metálico y compuestos en los sedimentos de los suelos, donde por la acción bacteriana y bajo ciertas condiciones puede convertirse en mercurio orgánico metil o di metil mercurio, sustancia altamente tóxica para el hombre (Villas, 2001).

Mercurio y salud humana

Todas las formas conocidas de mercurio han sido establecidas como tóxicas, la exposición a concentraciones elevadas de Hg puede causar incluso la muerte; el Hg y los compuestos que este metal

forma son persistentes y bioacumulativos, por consiguiente, son de gran riesgo para la salud del hombre y la calidad ambiental. La exposición al mercurio en el hombre puede ocurrir a través del consumo de alimentos contaminados (productos vegetales, peces, entre otras), la ingesta de agua y la respiración de aire contaminado (León, 2016 pág. 112). La principal vía de ingreso de este tóxico al hombre es el consumo de pescado contaminado y una vez se encuentra en el cuerpo, es capaz de producir serios trastornos de salud, puede generar cáncer, especialmente de riñón (Mackenzie, 2005).

Criterios de remediación del suelo

Los criterios de remediación de suelo se establecen dependiendo del uso del suelo, con el fin de establecer los niveles máximos de concentración de contaminantes en un suelo, a partir de un proceso de remediación, de este modo se pueden observar los siguientes valores en la tabla 3 a continuación:

Tabla 3

Criterios de remediación del suelo, parámetros inorgánicos, valores máximos permisibles

Parámetro	Unidades*	Uso del suelo			
		Residencial	Comercial	Industrial	Agrícola
Conductividad	uS/cm	200	400	400	200
Ph	-	6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8
Relación de adsorción de Sodio (índice SAR)	-	5	12	12	5
Parámetros inorgánicos					
Arsénico	mg/kg	12	12	12	12
Sulfuro	mg/kg	-	-	-	-
Bario	mg/kg	500	2000	2000	750
Boro (soluble en agua caliente)	mg/kg	-	-	-	2
Cadmio	mg/kg	4	10	10	2
Cobalto	mg/kg	50	300	300	40
Cobre	mg/kg	63	91	91	63
Cromo total	mg/kg	64	87	87	65
Cromo VI	mg/kg	0.4	1.4	1.4	0.4
Cianuro	mg/kg	0.9	8	8	0.9
Estaño	mg/kg	50	300	300	5
Fluoruros	mg/kg	400	2000	2000	200
Mercurio	mg/kg	1	10	10	0.8
Molibdeno	mg/kg	5	40	40	5
Níquel	mg/kg	100	100	50	50
Plomo	mg/kg	140	150	150	60
Selenio	mg/kg	5	10	10	2
Talio	mg/kg	1	1	1	1

Vanadio	mg/kg	130	130	130	130
Zinc	mg/kg	200	380	360	200
Concentración en peso seco de suelo					

Nota. La presente tabla muestra los criterios de remediación, parámetros inorgánicos y valores máximos permisibles.

Fuente: (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2015)

Biorremediación

La biorremediación se refiere al método empleado para solucionar cuestiones de contaminación ambiental, utilizando técnicas y recursos que son respetuosos con el medio ambiente. Esto implica minimizar la generación de contaminaciones secundarias e indirectas, y optar por materiales y procedimientos que se alineen con los ciclos y procesos naturales. Un ejemplo claro de esto es el aprovechamiento de las capacidades metabólicas de diversos organismos, como microorganismos, hongos y plantas, para descomponer contaminantes hasta eliminarlos completamente o transformarlos en sustancias más simples, estables y menos dañinas. Este enfoque tiene un amplio rango de aplicaciones en el ámbito ambiental (Muñoz, 2017).

La biorremediación se entiende como la aplicación de procesos biológicos de descomposición en entornos naturales con el fin de eliminar o disminuir los niveles de sustancias contaminantes que representan un riesgo tanto para los seres humanos como para el medio ambiente. Así, organismos biológicos tienen la capacidad de excretar enzimas, sustancias tóxicas activas, factores de crecimiento o proteínas beneficiosas para otros individuos dentro de un ecosistema (Muñoz, 2017).

Según Berkeley (2011), la biorremediación es el uso de seres vivos para restaurar ambientes contaminados. De este modo, los agentes biológicos pueden secretar enzimas o agentes surfactantes, factores de crecimiento o proteínas que sean de utilidad para otros miembros de una comunidad.

Un proceso natural de la remediación es la biodegradación la cual no exige una inversión elevada en reactivos, así como de infraestructura y requerimientos energéticos. Aproximadamente se estima que el valor de tratamiento por tonelada de suelo contaminado con hidrocarburos es casi 100% superior cuando se realiza un tratamiento químico en lugar de biorremediación.

En los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de microorganismos, aunque algunos se basan en la introducción de cepas definidas de bacterias u hongos. Actualmente se están desarrollando microorganismos, algas (especialmente cianobacterias o algas azules) y plantas genéticamente modificadas para ser empleadas en biorremediación (Van, et.al, 2010 pág. 23).



Tecnologías aplicadas en la biorremediación

In situ. - “Aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo, sin necesidad de excavar el sitio. Así, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación”. (Volke - Sepúlveda, et.al, 2005 pág. 8)

Ventajas

- ✓ Permiten tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar
- ✓ Potencial disminución en costos.

Desventajas

- ✓ Mayores tiempos de tratamiento.
- ✓ Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo.
- ✓ Dificultad para verificar la eficacia del proceso.

Ex situ. - “La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio o fuera de él” (Volke - Sepúlveda, et.al, 2005 pág. 67).

Ventajas

- ✓ Menor tiempo de tratamiento.
- ✓ Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente.

Desventajas

- ✓ Necesidad de excavar el suelo.
- ✓ Aumento en costos e ingeniería para equipo.
- ✓ Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante.

Tipos de biorremediación

En la actualidad existen una variedad de técnicas de biorremediación que ayudan a la masificación del empleo de microorganismos y/o plantas mismas que están en la capacidad de degradación, así como en la acumulación de sustancias contaminantes. Básicamente los procesos de biorremediación son de tres tipos, tales como de remediación microbiana, degradación enzimática y fitorremediación (Muñoz, 2017).

Fitorremediación

El uso de plantas para remover contaminantes del suelo es la técnica de la fitorremediación la cual tiene un

gran potencial para remediar suelos contaminados in situ con metales pesados debido a su baja rentabilidad y respeto con el medio ambiente (Clemente, Medina, Laura, Pariona & Gutiérrez, 2021). Dentro de esta tecnología se describe a la Fito estabilización, la cual se basa en la capacidad de acumular los contaminantes en el tejido radicular y absorber los mismos sobre la superficie radicular. Las ventajas de esta técnica es que alivia la erosión del suelo y la escorrentía superficial y minimiza la disponibilidad y la migración de metales pesados hacia aguas subterráneas (Barajas Aceves et al., 2015) como se citó en (Clemente et al, 2021).

Las plantas poseen una capacidad excepcional para absorber y acumular contaminantes del aire mediante sus estomas, así como del agua y el suelo a través de la rizósfera. Adicionalmente, disponen de procesos metabólicos específicos que les permiten trasladar metales. Se distinguen también por su habilidad para activar respuestas enzimáticas que contrarrestan el estrés oxidativo causado por el aumento de metales tóxicos en sus células (Muñoz, 2017).

Ventajas y limitaciones de la fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología de tratamiento ambiental que utiliza plantas para eliminar, transferir, estabilizar o destruir contaminantes en el suelo y en el agua. Esta técnica se destaca por ser una alternativa ecológica y de bajo costo en comparación con los métodos tradicionales de remediación. Sin embargo, también presenta ciertas limitaciones que deben considerarse al evaluar su aplicabilidad en diferentes escenarios. A continuación, en la Tabla 4, se enumeran algunas de las principales ventajas y limitaciones asociadas a la fitorremediación, basadas en Muñoz Gissela (2017).

Tabla 4
Ventajas y algunas limitaciones de la fitorremediación

VENTAJAS	LIMITACIONES
Es una tecnología sustentable	Es un proceso relativamente lento
Es de bajo costo	Es dependiente de las estaciones
Es poco perjudicial para el ambiente	Crecimiento limitado por toxicidad
No produce contaminantes secundarios	No todas las plantas son acumuladoras
Evita la excavación y el tráfico pesado	La solubilidad puede incrementar
Alta versatilidad para tratar MP	Se requiere áreas grandes
Se pueden reciclar recursos (agua, biomasa, metales)	Favorece el desarrollo de mosquitos

Nota. Se muestran algunas ventajas y limitaciones de la fitorremediación.

Fuente: Muñoz Gissela, (2017).

Elaborado por: Guayanay Vinicio, 2024

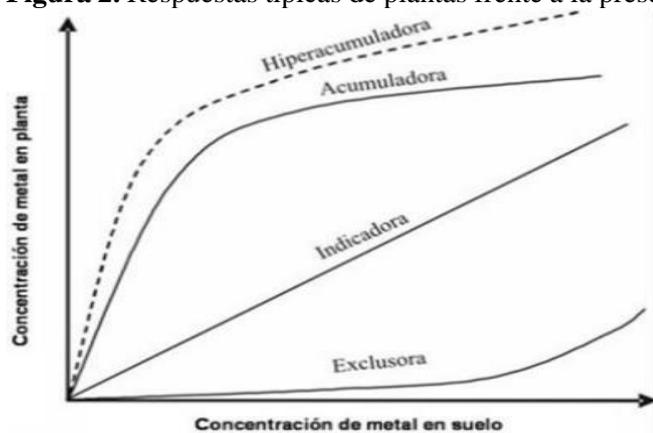


Plantas hiperacumuladoras

Hay especies vegetales que muestran una extraordinaria capacidad de concentrar metales en sus partes aéreas, denominadas plantas hiperacumuladoras. Funcionan similar a pequeños filtros, siendo así que, a mayor biomasa de la planta, mayor será su habilidad para acumular metales. Estas especies pueden acumular entre el 1 y el 10% de su peso seco en metales. No obstante, por razones no completamente entendidas, estas plantas suelen tener una biomasa limitada, un ciclo de vida breve (lo que requiere incrementar la frecuencia de cosecha) y se adaptan a ambientes muy específicos, lo que limita su aplicabilidad a sitios particulares (Muñoz, 2017).

Las plantas hiperacumuladoras se destacan en el gráfico de la Figura 2, donde se compara la concentración de metales en plantas y en el suelo. Este gráfico ilustra diferentes tipos de plantas según su capacidad de acumulación de metales. Las plantas hiperacumuladoras muestran una tendencia a acumular metales en mayores concentraciones en comparación con otras plantas como las acumuladoras, indicadoras y excluidoras.

Figura 2. Respuestas típicas de plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo.



Fuente: (Adriano, 2001)

La línea que representa a las plantas hiperacumuladoras en la Figura 2 se encuentra por encima de las demás, indicando su notable capacidad de concentración de metales, lo cual reafirma su potencial en procesos de fitorremediación, aunque con las limitaciones previamente mencionadas (Adriano, 2001).

La mayor parte de las plantas que prosperan en suelos con altos niveles de metales logran sobrevivir al evitar la absorción de iones que podrían ser tóxicos para sus sistemas radiculares; mientras que, en otras especies, estos metales se aprovechan como micronutrientes, aunque solo hasta ciertos niveles mínimos antes de que la planta se sature. La capacidad de una planta para resistir la presencia de metales pesados se

define por el grado de diversidad genética que posee el individuo (Adriano, 2001).

Las gramíneas se consideran el grupo más apropiado para la fitorremediación de metales, tanto orgánicos como inorgánicos, debido a su capacidad para crecer y adaptarse en diversos tipos de suelos y condiciones climáticas. Se ha evidenciado una amplia diversidad de especies con capacidad para la fitorremediación, demostrada tanto en ensayos de campo como en laboratorio. Hasta el momento, se han catalogado más de 400 especies de plantas, incluyendo formas terrestres y acuáticas, distribuidas en 22 familias. De estas, la familia Brassicaceae destaca con 87 especies distribuidas en 11 géneros, que muestran tolerancia a metales y la habilidad para prosperar en ambientes de alta concentración de estos elementos (Muñoz, 2017).

Se ha observado que ciertas especies de briófitas, conocidas comúnmente como musgos, y pteridofitas, más conocidas como helechos, poseen la habilidad de desarrollarse en suelos con altas concentraciones de metales, mercurio incluido. En el caso de las angiospermas, se han catalogado aproximadamente 400 especies con capacidad de hiperacumulación de metales, siendo algunas de las familias más representativas las siguientes que se detallan a continuación en la tabla 5:

Tabla 5

Familias vegetales representativas con capacidad hiperacumuladora

<i>Asteraceae</i>	<i>Flacourtiáceo</i>
<i>Brassicaceae</i>	<i>Lamiaceae</i>
<i>Cyperaceae</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Cunouniaceae</i>	<i>Violaceae</i>
<i>Fabaceae</i>	<i>Europhobiaceae</i>

Nota. Se muestra algunas de las familias vegetativas más representativas con capacidad hiperacumuladora.

Fuente: Trabajo de Titulación de Muñoz Gissela, (2017)

Elaborado por: Guayanay Vinicio, 2024

Dentro de los grupos estudiados, la familia Brassicaceae destaca por tener la mayor diversidad de taxones, con 11 géneros y 87 especies, que poseen la habilidad de híper acumular metales, según lo señalado por Villas en el año 2001 en la página 98. Se ha identificado y confirmado la capacidad de acumulación de mercurio en diversas plantas, incluyendo pastos tales como el *Polipogon monspeliensis*, así como otras especies como *Arabidopsis thaliana*, *Brassica juncea*, *Eichhornia crassipes*, *Typha sp*, y árboles como el álamo (*Populus sp*), el sauce (*Salix sp*) y el eucalipto (*Eucalyptus sp*) (Muñoz, 2017).

Maní forrajero (*a. Pintoi*)

En la tabla 6 se describe las características taxonómicas que posee la planta denominada comúnmente maní forrajero.

Tabla 6.
Generalidades del Maní Forrajero (Arachis pintoi)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Fabales
Familia	Fabaceae
Género	Arachis
Especie	Pintoi

Fuente: (Vidal et al., 2010)

Elaborado por: Guayanay Vinicio, 2024.

El Maní Forrajero se caracteriza por ser una planta leguminosa de tipo herbácea y perenne, con un desarrollo horizontal y capacidad de producir estolones. Su tamaño oscila entre los 20 y 40 cm de altura y cuenta con una raíz principal capaz de extenderse hasta los 30 cm de profundidad. Esta especie presenta hojas de disposición alterna y estructura compuesta, incluyendo cuatro folíolos de forma ovoide y tonalidades que varían del verde claro al oscuro. Su tallo, que se ramifica y muestra una forma circular con una leve aplanación, posee entrenudos breves y estolones que pueden alcanzar una longitud de hasta 1.5 metros. Se distingue por tener una floración persistente e indeterminada, con inflorescencias situadas en las axilas en forma de espigas. Estas cuentan con un tubo calcina de color rojo, textura pubescente y hueca, el cual soporta el perianto y los estambres, mientras el estilo se ubica en su interior (Rincón et al., 1992).

El maní forrajero presenta una considerable diversidad dentro de su misma especie, lo que abre la oportunidad de descubrir variedades polivalentes en su interior. El género al que pertenece, *Arachis*, tiene sus raíces en América del Sur, donde su presencia se limita de forma natural a los países de Brasil, Paraguay, Argentina y Uruguay. Este vegetal se adapta óptimamente a regiones situadas a altitudes de 0 a 1800 metros sobre el nivel del mar, donde la precipitación anual varía de 2000 a 3500 milímetros y el periodo de sequía no supera los 4 meses. Sin embargo, ha mostrado una buena adaptación en áreas de clima tropical húmedo,

donde las lluvias pueden alcanzar hasta 4500 milímetros al año (Muñoz, 2017).

Esta planta leguminosa prospera en zonas tropicales, abarcando desde la costa hasta altitudes de 1800 metros, en condiciones de precipitación anual que varían entre 1500 y 3500 milímetros y que estén equitativamente distribuidas. Presenta una buena adaptabilidad a terrenos de fertilidad intermedia y es capaz de soportar suelos ácidos con un alto nivel de saturación de aluminio, típicos de las sábanas tropicales. Logra un crecimiento y rendimiento óptimos en suelos de textura desde franca a arcillosa, siempre que el contenido de materia orgánica exceda el 3%. Posee una resistencia moderada frente a períodos de sequía. Resiste adecuadamente las condiciones de poca luz, lo que permite su empleo como un manto vegetal en plantaciones de café, palma de aceite, frutas cítricas y cacao. Su cultivo no es aconsejable en áreas de bosque seco donde las lluvias sean menores a 1500 mm, y tiende a no sobrevivir en terrenos arenosos en regiones que experimentan sequías extendidas (Rincón, et.al, 2011, p. 99).

Aunque ya es reconocida su importancia como forraje, la función de ciertas plantas como acumuladoras de metales pesados como por ejemplo el mercurio todavía no ha sido ampliamente estudiado. Se ha demostrado en investigaciones previas que algunas leguminosas, como el *Lupinus albus*, poseen propiedades fitorremediadoras efectivas contra el mercurio específicamente (Zornoza et al., 2010). En un estudio adicional realizado por Millan et al. (2007) en el distrito minero de Almadén (España), se plantaron leguminosas tales como garbanzo, lenteja y arveja en suelos con una concentración de 5,53 mg/kg de mercurio total. Los resultados mostraron que ninguna de estas especies presentó síntomas visuales de toxicidad, observándose mayores concentraciones de mercurio en las raíces que en las partes aéreas. Aunque el cultivo en estas áreas es viable, es crucial evaluar la transferencia de mercurio a los órganos consumidos antes de su comercialización.

Materiales y métodos

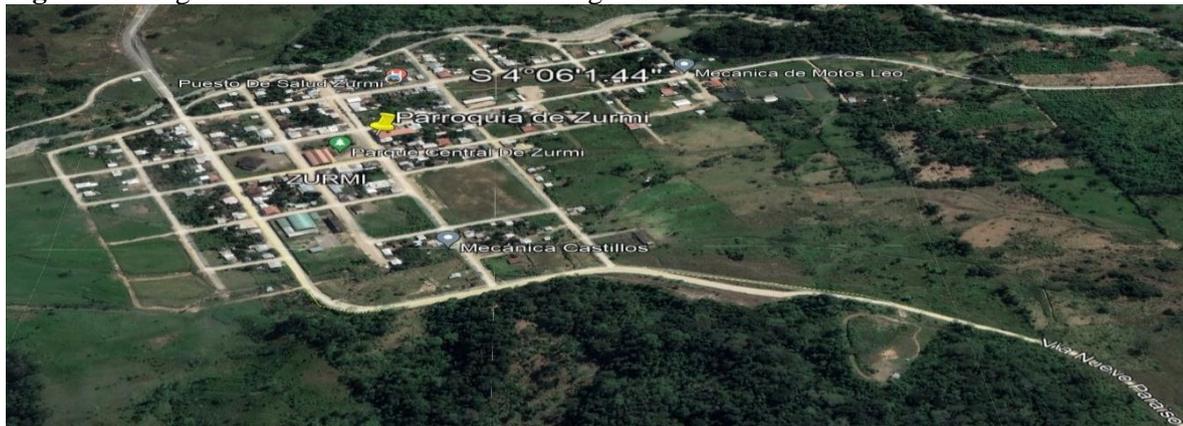
Localización del área de estudio

La investigación se realizó en la parroquia Zurmi, cantón Nangaritza, provincia de Zamora Chinchipe, al sur de Ecuador, está situado al margen del río Nangaritza, aproximadamente a 4 km de la parroquia, vía a Nuevo Paraíso. La zona pertenece a un bosque húmedo tropical con una temperatura media anual que oscila entre los 17° C a 22°C y una precipitación promedio anual oscila entre 2000 y 3000 mm (PDOT, 2021). En las figuras 3a y 3b se muestran los lugares donde se tomaron las muestras de suelos.



Coordenadas de la parroquia: -4.101431, -78.665139

Figura 3a. Lugar toma de muestras **Fuente:** Google Earth



Coordenadas del lugar de toma de muestras: -4.127947, -78.649285

Las siguientes coordenadas pertenecen al lugar exacto de muestreo, lugar perteneciente a la parroquia Zurmi, vía a las Orquídeas Alto Nangaritz, específicamente a 7 minutos de la parroquia.

Figura 3b. Lugar exacto de muestreo **Fuente:** Google Earth



TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es descriptiva y exploratoria.

La investigación descriptiva: Este tipo de investigación se aplica debido a la necesidad de describir los fenómenos y responder a los cuestionamientos de como aparecen, como se manipularon las variables, además de dar una descripción general de todos los datos recabados en el presente estudio.

La investigación exploratoria: El presente estudio se rige mediante la tipología de investigación exploratoria ya que de esta manera las interrogantes propuestas tuvieron respuesta y esto fue de gran ayuda ya que aumentó el grado de familiaridad con los fenómenos relativamente desconocidos, de esta manera se obtuvo información veraz y oportuna, características que ayudaron a obtener la posibilidad de aportar en investigaciones que se desarrollen en lo posterior con un enfoque similar.

Método de investigación

En este estudio se utiliza el método de investigación experimental, debido a su área de estudio y tipo de investigación.

Tratamiento de datos

El tema de investigación que se ha planteado se centra en la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados debido a la minería artesanal, utilizando *A. pintoii* (maní forrajero) en una ubicación específica: la parroquia Zurmi, cantón Nangaritza, provincia de Zamora Chinchipe.

Diseño experimental

Tipo de diseño: se utilizará el diseño experimental de bloques completamente al azar (DBCA), donde se dividen los suelos en bloques homogéneos según características similares y se asignan aleatoriamente a los tratamientos.

Tratamientos:

Tratamiento 1: Suelo sin intervención (control)

Tratamiento 2: Aplicación de *A. pintoii* en suelo contaminado.

Variables de respuesta:

- ✓ Concentración de metales pesados en el suelo antes y después de la fitorremediación.
- ✓ Salud y biomasa de *A. pintoii*.

Repeticiones/Replicas:

- ✓ En cada tratamiento se aplicó tres replicas para obtener resultados más robustos y reducir la variabilidad experimental.

Número de muestras

Muestras de suelo:

- ✓ Se tomó tres muestras de suelo en diferentes puntos representativos de la zona contaminada antes del inicio del experimento.
- ✓ Se tomó tres muestras de suelo después de la aplicación de *A. pintoii*.

Muestras de *A. pintoii*:

- ✓ Se tomó una muestra de 100 gr de plántulas retiradas de *A. pintoii* para evaluar biomasa, concentración de metales en tejidos, etc.

Número de muestras por replica

✓ Dependió de la variabilidad esperada y el análisis estadístico planificado, pero se tomó 12 submuestras para tomar una muestra representativa de suelo por cada punto.

Frecuencia de muestreos:

✓ Se realizó muestreos antes y después de la intervención de *A. pintoii* en intervalos específicos de tiempo, cada 15 día durante un periodo de tres meses. El muestreo antes de la intervención de *Arachis pintoii* se realizó el 10 de marzo del 2024 y el muestreo después de la intervención de *Arachis pintoii* se realizó el 10 de mayo del 2024.

OBTENCIÓN DEL SUELO CONTAMINADO

Las muestras de suelo contaminado por metales pesados pertenecen a la concesión minera “La preciosa” y se seleccionó en base a los siguientes criterios: necesidad del dueño de la finca por recuperar los suelos degradados por consecuencia de la actividad aurífera, áreas intervenidas por la minería que no han sido recubiertas por la capa arable y se encuentren en la rivera del Río Nangaritzá.

Además, se realizó un recorrido con el dueño de la finca para identificar las zonas intervenidas por la actividad minera y que cumplan con los criterios de selección establecidos. Para la recolección de las muestras de suelo se estableció tres áreas de 12x12m², 12x12m² y 10x10m² respectivamente. Se aplicó la fórmula para extensiones menores 0.1 ha y mayores a 30 ha establecida en el “Anexo 2 del libro VI del texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados” (MAE, 2015). Para las tres muestras, se tomaron 12 submuestras en una disposición en zigzag a una profundidad de 20 cm. Posteriormente, estas submuestras fueron homogeneizadas para obtener 1 kg de suelo para cada sitio de muestreo, para luego ser enviadas al laboratorio de suelos y ambiental de la Universidad Estatal Amazónica, en donde se analizaron los siguientes parámetros: materia orgánica, conductividad eléctrica, pH, textura, nitrógeno, fósforo y metales pesados.

$$(1) \quad Y = (X)^{0.3}x \quad (11.71)$$

Y es el número mínimo de puntos de muestreo

X es la superficie del suelo de la zona de estudio expresada en hectáreas.

La presente fórmula se utilizó para medir el número de submuestras a tomar por cada sitio de muestreo,



esto debido a que los tres sitios de muestreo poseen un área menor a 1 ha, y para este caso se utilizó la fórmula designada por la normativa vigente.

Aplicación de *a. Pintoi*

El método empleado para sembrar *Arachis pintoi* en suelo afectado por contaminación de metales pesados debido a actividades mineras, se realizó utilizando tres contenedores de plástico. Cada recipiente tenía dimensiones de 0,80 metros de largo, 0,21 metros de ancho y 0,18 metros de alto, y contenía 21,7 kilogramos de suelo contaminado, correspondiendo a un contenedor por cada zona de muestreo.

Obtención y siembra de *a. Pintoi*

Las plantas se adquirieron a través de regeneración natural y se plantaron plántulas a raíz desnuda, distribuyendo 10 plantas por cada macetero. La disposición se efectuó dejando un espacio de 13,3 cm entre cada planta a lo largo del macetero y 7 cm de separación a lo ancho.

El monitoreo de las plantas se llevó a cabo quincenalmente por un período de 12 semanas, observando características morfológicas tales como la altura, diámetro, número de hojas, mortalidad y presencia de hojas con clorosis. No fue necesario añadir más plantas durante este periodo.

Toma de muestras vegetales y de suelo en el ensayo

Tras completar las doce semanas del proceso de remediación de suelo, se procedió a retirar todas las plantas que se habían sembrado. Posteriormente, en cada uno de los tratamientos aplicados, se recolectaron muestras de suelo a una profundidad de 10 cm. Estas muestras fueron mezcladas para obtener una muestra compuesta de 1 kg. Adicionalmente, se extrajo una muestra de 100 gr de las plántulas retiradas. El parámetro que se utilizó en

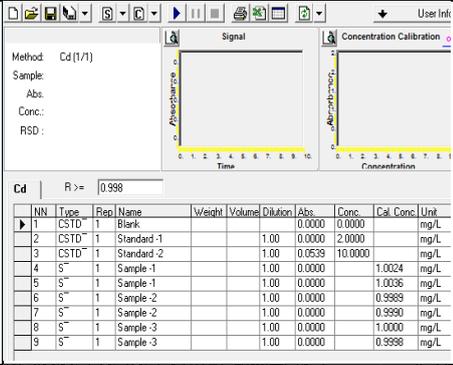
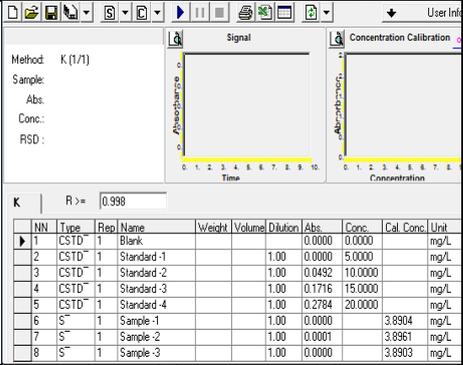
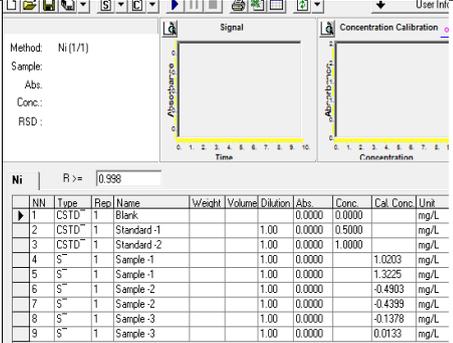
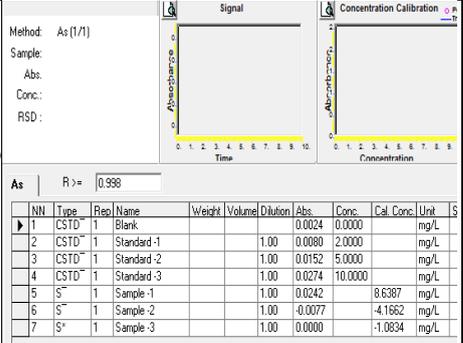
A. pintoi fue el contenido de metales pesados como arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni), plomo (Pb), copernico (Cn). En el suelo se analizó el parámetro físico – químico como conductividad eléctrica (físico), materia orgánica (físico-químico), pH (químico), textura (físico), nitrógeno (químico), fósforo (químico). Para realizar estos análisis se utilizaron las siguientes técnicas: Materia orgánica (Método por calcinación), Conductividad eléctrica (Método de Laboratorio Conductímetro), pH (Método electrométrico pH-metro), Textura (Método de Bouyoucos), Nitrógeno (Método Kjeldahl), Fósforo (Método Espectrofotometría UV-VIS).

Asimismo, dentro del análisis del suelo se utilizó el parámetro de análisis de metales pesados como potasio,

níquel, cadmio y arsénico para los cuales se utilizó la metodología de determinación de metales pesados y sustancias tóxicas.

A continuación, en la tabla 7 se muestran los anexos del ingreso de las muestras y las respectivas lecturas.

Tabla 7. Digestión de muestras y lecturas.

<p>Digestión de muestras</p>		<p>Lecturas</p>																																																																																																																																																																																																																		
<p>Cadmio</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>NN</th> <th>Type</th> <th>Rep</th> <th>Name</th> <th>Weight</th> <th>Volume</th> <th>Dilution</th> <th>Abs.</th> <th>Conc.</th> <th>Cal. Conc.</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Blank</td><td></td><td></td><td></td><td>0.0000</td><td>0.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>2</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>2.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>3</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0539</td><td>10.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>4</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>1.0024</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>5</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>1.0036</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>6</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>0.9989</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>7</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>0.9990</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>8</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>1.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>9</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>0.9998</td><td></td><td>mg/L</td></tr> </tbody> </table>	NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit	1	CSTD	1	Blank				0.0000	0.0000		mg/L	2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0000	2.0000		mg/L	3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0539	10.0000		mg/L	4	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.0024		mg/L	5	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.0036		mg/L	6	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	0.9989		mg/L	7	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	0.9990		mg/L	8	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	1.0000		mg/L	9	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	0.9998		mg/L	<p>Potasio</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>NN</th> <th>Type</th> <th>Rep</th> <th>Name</th> <th>Weight</th> <th>Volume</th> <th>Dilution</th> <th>Abs.</th> <th>Conc.</th> <th>Cal. Conc.</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Blank</td><td></td><td></td><td></td><td>0.0000</td><td>0.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>2</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>5.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>3</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0492</td><td>10.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>4</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.1716</td><td>15.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>5</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-4</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.2784</td><td>20.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>6</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>3.8904</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>7</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0001</td><td>3.8961</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>8</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>3.8903</td><td></td><td>mg/L</td></tr> </tbody> </table>	NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit	1	CSTD	1	Blank				0.0000	0.0000		mg/L	2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0000	5.0000		mg/L	3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0492	10.0000		mg/L	4	CSTD	1	Standard-3			1.00	0.1716	15.0000		mg/L	5	CSTD	1	Standard-4			1.00	0.2784	20.0000		mg/L	6	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	3.8904		mg/L	7	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0001	3.8961		mg/L	8	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	3.8903		mg/L
NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit																																																																																																																																																																																																										
1	CSTD	1	Blank				0.0000	0.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0000	2.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0539	10.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
4	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.0024		mg/L																																																																																																																																																																																																										
5	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.0036		mg/L																																																																																																																																																																																																										
6	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	0.9989		mg/L																																																																																																																																																																																																										
7	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	0.9990		mg/L																																																																																																																																																																																																										
8	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	1.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
9	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	0.9998		mg/L																																																																																																																																																																																																										
NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit																																																																																																																																																																																																										
1	CSTD	1	Blank				0.0000	0.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0000	5.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0492	10.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
4	CSTD	1	Standard-3			1.00	0.1716	15.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
5	CSTD	1	Standard-4			1.00	0.2784	20.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
6	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	3.8904		mg/L																																																																																																																																																																																																										
7	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0001	3.8961		mg/L																																																																																																																																																																																																										
8	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	3.8903		mg/L																																																																																																																																																																																																										
<p>Níquel</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>NN</th> <th>Type</th> <th>Rep</th> <th>Name</th> <th>Weight</th> <th>Volume</th> <th>Dilution</th> <th>Abs.</th> <th>Conc.</th> <th>Cal. Conc.</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Blank</td><td></td><td></td><td></td><td>0.0000</td><td>0.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>2</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>0.6000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>3</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>1.0000</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>4</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>1.0203</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>5</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>1.3225</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>6</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>-0.4903</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>7</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>-0.4399</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>8</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>-0.1378</td><td></td><td>mg/L</td></tr> <tr><td>9</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td>0.0133</td><td></td><td>mg/L</td></tr> </tbody> </table>	NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit	1	CSTD	1	Blank				0.0000	0.0000		mg/L	2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0000	0.6000		mg/L	3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0000	1.0000		mg/L	4	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.0203		mg/L	5	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.3225		mg/L	6	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	-0.4903		mg/L	7	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	-0.4399		mg/L	8	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	-0.1378		mg/L	9	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	0.0133		mg/L	<p>Arsénico</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>NN</th> <th>Type</th> <th>Rep</th> <th>Name</th> <th>Weight</th> <th>Volume</th> <th>Dilution</th> <th>Abs.</th> <th>Conc.</th> <th>Cal. Conc.</th> <th>Unit</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Blank</td><td></td><td></td><td></td><td>0.0024</td><td>0.0000</td><td></td><td>mg/L</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0080</td><td>2.0000</td><td></td><td>mg/L</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0152</td><td>5.0000</td><td></td><td>mg/L</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>CSTD</td><td>1</td><td>Standard-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0274</td><td>10.0000</td><td></td><td>mg/L</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-1</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0242</td><td></td><td>8.6387</td><td>mg/L</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-2</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>-0.0077</td><td></td><td>-4.1662</td><td>mg/L</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>S⁻</td><td>1</td><td>Sample-3</td><td></td><td></td><td>1.00</td><td>0.0000</td><td></td><td>-1.0834</td><td>mg/L</td><td></td></tr> </tbody> </table>	NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit	S	1	CSTD	1	Blank				0.0024	0.0000		mg/L		2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0080	2.0000		mg/L		3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0152	5.0000		mg/L		4	CSTD	1	Standard-3			1.00	0.0274	10.0000		mg/L		5	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0242		8.6387	mg/L		6	S ⁻	1	Sample-2			1.00	-0.0077		-4.1662	mg/L		7	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000		-1.0834	mg/L				
NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit																																																																																																																																																																																																										
1	CSTD	1	Blank				0.0000	0.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0000	0.6000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0000	1.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
4	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.0203		mg/L																																																																																																																																																																																																										
5	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0000	1.3225		mg/L																																																																																																																																																																																																										
6	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	-0.4903		mg/L																																																																																																																																																																																																										
7	S ⁻	1	Sample-2			1.00	0.0000	-0.4399		mg/L																																																																																																																																																																																																										
8	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	-0.1378		mg/L																																																																																																																																																																																																										
9	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000	0.0133		mg/L																																																																																																																																																																																																										
NN	Type	Rep	Name	Weight	Volume	Dilution	Abs.	Conc.	Cal. Conc.	Unit	S																																																																																																																																																																																																									
1	CSTD	1	Blank				0.0024	0.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
2	CSTD	1	Standard-1			1.00	0.0080	2.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
3	CSTD	1	Standard-2			1.00	0.0152	5.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
4	CSTD	1	Standard-3			1.00	0.0274	10.0000		mg/L																																																																																																																																																																																																										
5	S ⁻	1	Sample-1			1.00	0.0242		8.6387	mg/L																																																																																																																																																																																																										
6	S ⁻	1	Sample-2			1.00	-0.0077		-4.1662	mg/L																																																																																																																																																																																																										
7	S ⁻	1	Sample-3			1.00	0.0000		-1.0834	mg/L																																																																																																																																																																																																										

Fuente: Laboratorio de estudios Ambientales UEA, 2024

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La zona escogida para la recopilación de muestras de suelo satisfizo los criterios de selección previamente definidos. Los datos del análisis de laboratorio de las muestras de suelo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de laboratorio de suelos antes de aplicar la fitorremediación

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Materia orgánica(%) (físico-químico)	0,35	0,57	0,25
Conductividad eléctrica (uS/cm) (físico)	180,9	190,8	119,4
pH (químico)	5,06	4,85	5,16
Textura (clase textural)	Franco arenoso	Franco arcillo arenoso	Arenoso franco
Nitrógeno(químico) (%)	0,03	0,08	0,03
Fósforo (químico) (%)	0,02	0,03	0,02

Fuente: Laboratorios UEA, 2024

Realizado por: Vinicio Guayanay, (2024)

Dentro de las características físico-químicas los resultados de la muestra número 1 reportan que se trata de un suelo franco arenoso, bajo en materia orgánica, salino y medianamente ácido, en síntesis es un suelo no apto para el desarrollo de especies vegetales por su baja fertilidad, sin embargo, durante la realización del trabajo de campo, se notó que

A. pintoii se había regenerado de manera natural en los alrededores del área de estudio, lo cual sugiere que esta especie es capaz de tolerar dichas condiciones ambientales. Lo cual corresponde con lo reportado por Skerman *et al.*, (1991) quien concluyó que *A. pintoii* puede desarrollarse adecuadamente en una variedad de suelos ácidos e infértiles, incluyendo aquellos que son arenosos y profundos, y logra buenos resultados en suelos de baja fertilidad. A pesar de que esta especie se adapta bien a condiciones ácidas, su crecimiento óptimo tiende a restringirse cuando el pH desciende por debajo de 5,4.

Esta capacidad de adaptarse a suelos poco fértiles se asocia con su eficiencia en mantener la actividad fotosintética por cada unidad de superficie foliar, según estudios de Rao y Kerridge (1995). Lo cual la hace una especie vegetal idónea para ser aplicada como fitorremediación en el área de estudio.



El nitrógeno de la muestra a disposición (muestra 1) es de porcentaje bajo contando con un 0,03%, se puede diferir que este aumenta cuando más fina es la textura, es decir en suelo arcillosos. El *A. pintoii*, siendo una leguminosa, no depende completamente del nitrógeno proporcionado por el suelo, ya que tiene la capacidad de formar nódulos en las raíces que fijan el nitrógeno atmosférico (Black, 1975). Sin embargo, la acidez del suelo puede inhibir este proceso de fijación de nitrógeno (Pohlman, 1946). Aunque se ha observado que muchas leguminosas son sensibles a la acidez del suelo, algunas especies de regiones tropicales muestran una resistencia destacable a esta condición (Black, 1975). El *A. pintoii* muestra una tolerancia a suelos moderadamente ácidos, lo cual difiere del comportamiento de algunas otras leguminosas. La investigación indica que el suelo de la muestra 1 es salino ya que está relacionado con la falta de humedad local y la proximidad a las orillas del río Nangaritzá. Black (1975) señala que en zonas húmedas es más común que las sales solubles en el suelo se eliminen mediante el lavado con agua, a diferencia de lo que sucede en regiones áridas, donde los problemas de salinidad son más frecuentes.

En la muestra 2, podemos observar que se trata de un suelo franco arcillo arenoso, bajo en materia orgánica, salino y teniendo en cuenta que esta leguminosa es tolerante a suelos ácidos pero su crecimiento se ve afectado cuando el potencial de hidrógeno está por debajo de 5,4, podemos decir que el crecimiento de la planta se ve afectado debido a la acidez del suelo que es de 4,85. En cuanto a esto, podemos indicar que no es un suelo apto para el crecimiento de la planta por la acidez. El nitrógeno aumentó, debido a la textura.

La tercera muestra podemos observar que se trata de un suelo arenoso franco, bajo en materia orgánica, salino y medianamente ácido, podemos observar que el porcentaje de nitrógeno baja respectivamente debido a la textura del suelo. En síntesis, podemos decir que es un suelo que puede ser apto para el desarrollo del vegetal.

En la tabla 9 se presenta la información recopilada sobre las características morfológicas de las plántulas evaluadas en el ensayo durante 90 días.

Tabla 9. Seguimiento de las de las características morfológicas de la especie *A.*

pintoii

Características morfológicas	Días					
	15	30	45	60	75	90
Altura (cm)	8	12	13	15	16	19
Diámetro (DAP)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
Número de hojas	18	23	32	35	39	40
Mortalidad (%)	0	0	0	0	0	0
Número de hojas con clorosis	5	7	7	7	3	5

Realizado por: Vinicio Guayanay, 2024

Durante un periodo de 90 días, se observó que las plántulas experimentaron un aumento de 11 cm en altura, un incremento de 0,1 DAP en el diámetro, y un aumento de 21 hojas. No se registró mortalidad, y el número de hojas con clorosis permaneció en 5. Las hojas fueron la parte más afectada, presentando un color amarillento (clorosis). Es importante señalar que la observación de síntomas visuales tiene varias limitaciones, ya que pueden existir deficiencias múltiples que se confundan con daños causados por enfermedades, insectos o estrés fisiológico (Rao y Kerridge, 1995). En este estudio, las plantas se establecieron mediante regeneración natural y se sembraron en un sustrato arenoso, lo que posiblemente influyó en su desarrollo. Fisher y Cruz (1995) mencionan que las plantas que se establecen a partir de estolones tienden a desempeñarse mejor en suelos más arenosos. Sin embargo, el crecimiento y la clorosis observados en esta investigación difieren de lo reportado por Fisher y Cruz (1995), ya que estos autores mencionan que el crecimiento de *A. pintoii* en macetas es generalmente lento y las plantas presentan una clorosis general. Durante el ensayo, no se registraron plagas ni enfermedades. Según Argel (1995), son pocas las plagas y enfermedades de importancia económica reportadas para esta especie, y no hay registros de plagas y enfermedades graves en *Arachis*, que tolera las plagas y enfermedades que atacan las hojas. Algunas posibles razones por las cuales *A. pintoii*, una leguminosa, crece en suelos contaminados por metales pesados podrían atribuirse a sus características únicas, como sus frutos subterráneos. Simpson, Valls y Miles (1995) indican que los frutos subterráneos en el género *Arachis* han evolucionado para escapar del fuego y de otros factores ambientales desfavorables.

Además, su enraizamiento profundo le confiere tolerancia a la sequía, permitiendo el acceso al agua

presente en capas más profundas del suelo. Su reproducción vegetativa mediante estolones procumbentes también le ayuda a resistir el pastoreo e invadir suelos descubiertos, ya que estos estolones forman raíces libremente. Esta especie puede regenerarse a partir de semillas, fragmentos de raíz y estolones, lo que le permite persistir y resistir los efectos del mal manejo (Fisher y Cruz, 1995).

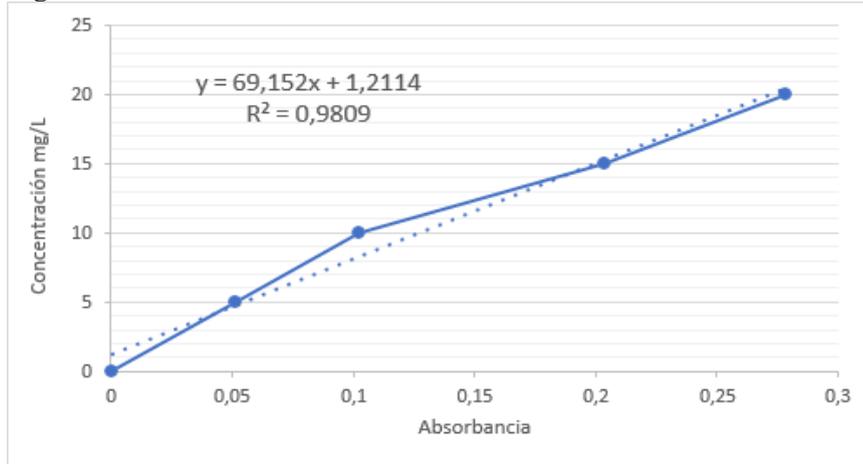
Con respecto a la supervivencia, no se registró mortalidad en las plántulas, lo que sugiere una adaptación exitosa a las condiciones del suelo contaminado. Esta capacidad de supervivencia indica que *Arachis pintoi* muestra una tolerancia a los niveles de metales pesados presentes a las condiciones de estudio. En este sentido, Tobar (2013) señala que las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para la absorción y acumulación de nutrientes. No obstante, algunos metales y metaloides no esenciales para las plantas también son absorbidos y acumulados debido a su comportamiento electroquímico similar al de los elementos nutritivos necesarios. Se cree que los iones de metales tóxicos ingresan a las células de las plantas mediante el mismo proceso que los micronutrientes y compiten con estos elementos por su absorción (Azevedo y Rodríguez, 2012).

Los resultados de los metales pesados analizados por determinación de metales pesados y sustancias tóxicas, se detallan a continuación en la tabla 10 obtenidos para cada elemento

Tabla 10. Concentración de Potasio

Potasio	
Descripción	Concentración (PPM)
Muestra 1	3,89
Muestra 2	3,90
Muestra 3	3,89

Figura 4. Concentración de Potasio

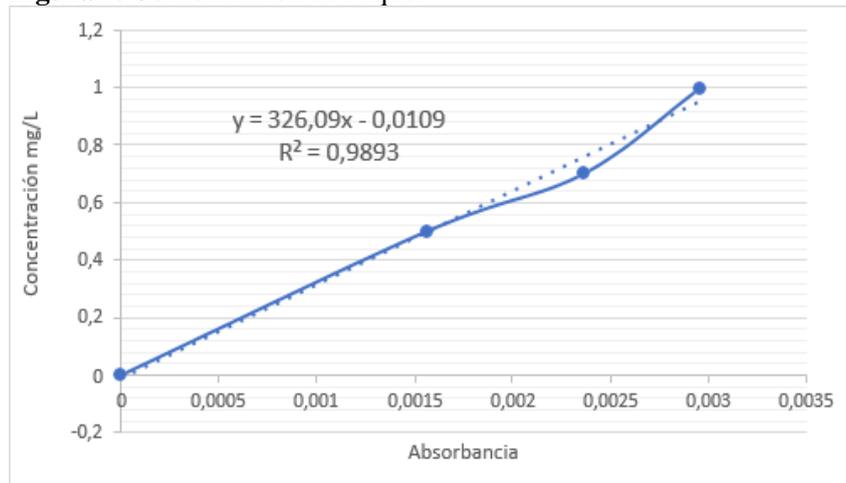


El potasio es un nutriente esencial para el crecimiento vegetal, participa en la regulación de procesos fisiológicos importantes como la fotosíntesis, la activación de enzimas y el metabolismo del agua. En el contexto de suelos contaminados por minería, el análisis de potasio es crucial no solo por su rol biológico, sino también para evaluar cómo las actividades mineras pueden haber alterado la disponibilidad de este nutriente esencial. Los resultados presentados para las concentraciones de potasio (medidos en partes por millón, PPM) en las tres muestras son los siguientes: Muestra 1: 3,89; Muestra 2: 3,89; Muestra 3: 3,89 respectivamente. Los niveles de potasio obtenidos en las tres muestras son notablemente similares lo que sugiere una homogeneidad en la concentración de potasio en el área estudiada. Esta uniformidad indica que las prácticas de minería en la zona no han afectado significativamente los niveles de potasio en el suelo.

Tabla 11. Concentración de Níquel

Níquel	
Descripción	Concentración (PPM)
Muestra 1	2,02
Muestra 2	0,0001
Muestra 3	0,0133

Figura 5. Concentración de Níquel



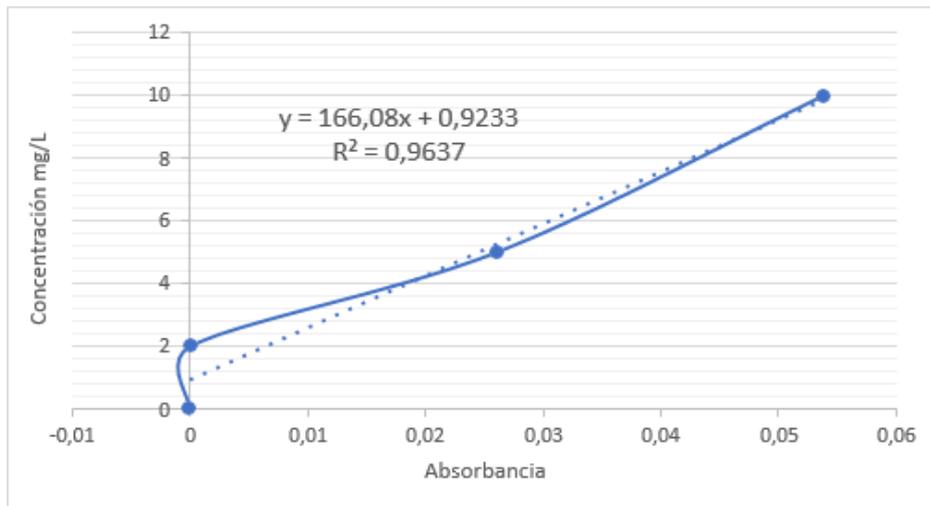
Observamos una notable variabilidad en las concentraciones de níquel entre las muestras. La muestra 1 tiene una concentración significativamente más alta (2,02 ppm) en comparación con las otras dos muestras, esta alta variación sugiere diferencias en la exposición o acumulación de níquel en los sitios específicos de muestreo.

Tomando en cuenta los resultados de los análisis de níquel encontrados en el suelo, se observa que se trata de un suelo no contaminado, el Acuerdo Ministerial 028 del Ministerio del Ambiente del Ecuador (2015, p. 116-119) tabla 1 indica que el “criterio de calidad del suelo para níquel es 19 mg/kg, estos criterios son valores de fondo aproximados o límites analíticos de detección para un contaminante presente en el suelo”. Los valores reportados en las tres muestras están por debajo del límite máximo permisible de la normativa ambiental ecuatoriana vigente, lo que sugiere que, en términos de níquel, los suelos no alcanzan niveles típicos de preocupación según los estándares del AMMAE.

Tabla 12. Concentración de Cadmio

Cadmio	
Descripción	Concentración (PPM)
Muestra 1	1,0031
Muestra 2	0,999
Muestra 3	1

Figura 6. Concentración de Cadmio



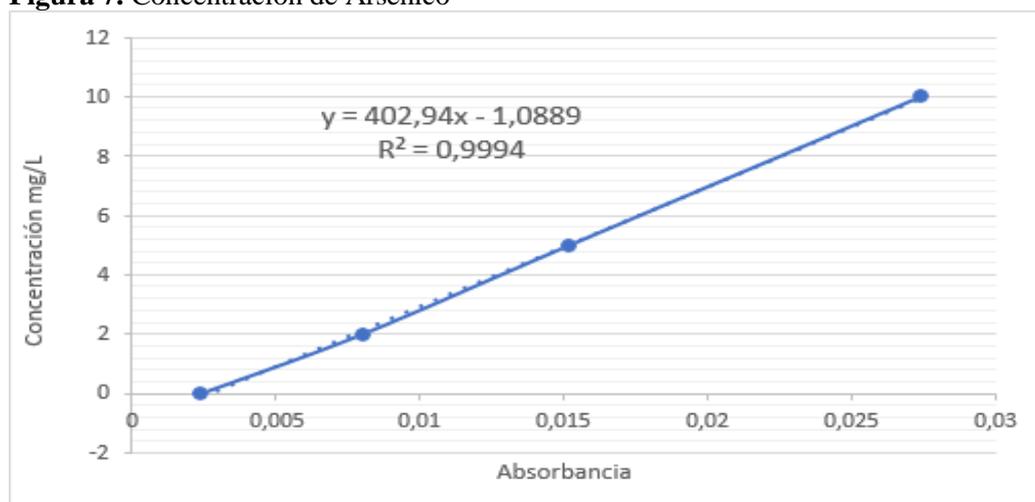
Las concentraciones de cadmio en todas las muestras están muy cercanas entre sí, indicando una consistencia en la fuente de contaminación o en las condiciones del suelo que permiten esta acumulación del metal pesado, en base al Acuerdo Ministerial 028 del Ministerio del Ambiente del Ecuador (2015, p. 116-119) tabla 1 indica que “el criterio de calidad del suelo para cadmio es 0,5 mg/Kg lo que nos corrobora que los suelos de las tres zonas de muestreo sobrepasan los límites máximos permisibles.

Tabla 13. Concentración de Arsénico

Arsénico

Descripción	Concentración (PPM)
Muestra 1	8,6387
Muestra 2	0,0001
Muestra 3	0,0001

Figura 7. Concentración de Arsénico



La variabilidad entre las concentraciones de arsénico en las muestras es notable. Mientras que la muestra 1 presenta un nivel extremadamente alto, las muestras 2 y 3 tienen concentraciones básicamente indetectables. La presencia de altas concentraciones de arsénico como se observa en la muestra 1 es motivo de gran preocupación, ya que el arsénico es altamente tóxico, sin embargo, bajo el Acuerdo Ministerial 028 del Ministerio de Ambiente de Ecuador es una cantidad que está por debajo del límite permisible que es de 12 mg/kg por lo que no se considera un suelo contaminado por arsénico.

En la tabla 14 se exponen los resultados de suelo obtenidos en el laboratorio luego del ensayo con *A. pintoii*, durante 90 días.

Tabla 14. Resultados de laboratorio para suelo luego de realizado el ensayo.

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Materia orgánica (%) (físico-químico)	0,16	0,19	0,07
Conductividad eléctrica (uS/cm) (físico)	181,95	193,9	120,5
pH (químico)	6,5	5,7	6,06
Textura (clase textural)	Franco arenoso	Franco arcillo arenoso	Arenoso franco
Nitrógeno (químico) (%)	0,05	0,09	0,04
Fósforo (químico) (%) Potasio (ppm)	0,02	0,02	0,01
Níquel (ppm) Cadmio (ppm)	2,25	2,2599	2,2563
Arsénico (ppm)	1,17	0,000058	0,007714
	0,58208	0,57942	0,58
	5,0113	0,000058	0,000057

Fuente: Laboratorio AmbiSolutions, 2024

Realizado por: Vinicio Guayanay, 2024

Al analizar los resultados de laboratorio antes y después del ensayo, se observó que el potencial de hidrógeno cambió de medianamente ácido a prácticamente neutro. No hubo cambios en la conductividad,

textura y materia orgánica después del ensayo. En cuanto al nitrógeno existió un leve aumento en las 3 muestras respectivamente, esto debido a que *A. pintoii* es capaz de fijar nitrógeno atmosférico. Sin embargo, para el fósforo se observó que los niveles bajaron, esto debido a que la planta en estudio lo absorbe en grandes cantidades antes de absorber los metales pesados. Este cambio en el potencial de hidrógeno podría deberse a dos factores. Primero, la planta utilizada, aunque esta teoría se descarta porque *A. pintoii* fija niveles significativos de nitrógeno, registrando una tasa de fijación superior al 80 %, sin importar la textura y fertilidad del suelo (Thomas, 1995).

Al ser una leguminosa, contribuye a la acidificación del suelo. Campillo y Sadzawka (1999) explican que las leguminosas, a través de la fijación simbiótica de nitrógeno, liberan hidrógeno en la solución del suelo, lo que causa una acidificación gradual. La segunda condición es la reducción de los niveles de metales pesados en el suelo, ya que, a menor concentración de estos metales, el pH tiende a ser más neutro, inmovilizando los metales.

Felipó (1992) indica que el metal más móvil en suelos ácidos con pH menores a 5,5 es el mercurio. Sin embargo, en este análisis no se consideró el análisis del mercurio por motivos económicos. El cambio observado en los niveles de los metales pesados en el suelo podría ser atribuible a *Arachis pintoii*. La acumulación de metales pesados en las plantas se entiende a través de dos mecanismos: la absorción desde la atmósfera mediante procesos de intercambio gaseoso en la superficie de las hojas, o la toma del metal disponible en el suelo en forma soluble e intercambiable (Hernández et al., 2012). Hanson et al. (1995) indican que las plantas asimilan tanto metales pesados orgánicos como inorgánicos a través de sus raíces, que puede luego ser transportado hasta el follaje. La absorción de metales pesados también puede ocurrir directamente por el follaje, especialmente a través de las estomas, aprovechando una mayor superficie de contacto con los metales pesados atmosféricos. Además, las plantas tienen una notable capacidad para acumular metales pesados en sus partes aéreas y para absorber y trasladar estos elementos en suelos con altos contenidos de metales pesados (Temmerman et al., 2009).

Finalmente, en la tabla 15 se presenta los resultados del grado de concentración de los diferentes metales pesados para la especie *A. pintoii*, luego de 90 días de la siembra en el suelo contaminado.



Tabla 15.
Concentración de metales pesados en la especie A. pintoii.

Metal	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Potasio (ppm) Níquel (ppm)	1,64	1,64	1,63
Cadmio (ppm)	0,85	0,000042	0,005586
Arsénico (ppm)	0,4210	0,42	0,42
	3,63	0.000042	0.000041

Fuente: Laboratorio AmbiSolutions, 2024

Realizado por: Vinicio Guayanay, 2024

En Ecuador, al igual que en muchos otros países, no hay un límite específico establecido legalmente para el contenido de potasio en las plantas destinadas a servir de alimento para animales.

El potasio es un nutriente esencial para los animales y su presencia en las plantas no suele ser motivo de regulación en términos de límites máximos como sí lo son otros contaminantes como metales pesados o micotoxinas.

Analizando el contenido de Níquel en la planta se observa que es alto con relación al permitido en productos destinados a la alimentación animal 0.5 mg/kg según (Directive – European, 2002). Con este resultado se infiere que *A. pintoii* presenta características acumuladoras de metales pesados lo que daría a lugar a una especie potencial para ser utilizada en técnicas de fitorremediación, al respecto Paiso et tal. (2012) menciona que las especies con mayor potencial para fitorremediar metales pesados, serían aquellas que poseen alta capacidad de extraer grandes cantidades de metales y acumularlo en su biomasa. Tobar (2013) señala las plantas capaces de absorber y acumular metales por sobre lo establecido como normal para otras especies en los mismos suelos se llaman hiperacumuladoras, una vez que los metales son absorbidos por las plantas estas ya pueden estar disponibles para los animales ingresando a la cadena alimenticia.

En el presente estudio se realizó el análisis de metales pesados a toda la planta sin discriminar raíz, tallo, hojas, no se cuenta con la información de qué órgano es el que acumula más metales, lo que daría la pauta para conocer si el riesgo de ingreso a la cadena alimentaria disminuiría si el metal solo se acumula en la raíz, situación que debería estudiarse con más detalle. Sin embargo, de otros estudios realizados se conoce que la mayor parte de los metales acumulados en plantas permanece en la raíz, encontrándose aproximadamente el 80% unido a la pared celular, mientras que sólo una pequeña proporción se transloca a los tallos, a través

de la transferencia al xilema (Wang, 2004; Wang y Greger, 2004). La mayoría de las plantas que incorporan metales pesados tienden a acumularlos en las raíces (Lenka, Panda y Panda, 1992). Por otra parte, los metales pesados también pueden ingresar a las hojas a través de las estomas durante el proceso de intercambio de gases (Niu et al., 2011; Rutter et al. 2011), y algunas hasta tienen la capacidad de acumular cantidades moderadas en los brotes (Dushenkov et al., 1995; Kumar et al., 1995).

Otros autores consideran que si el suelo tiene elevadas cantidades de metales disponibles y permite el desarrollo y cosecha de un cultivo en este caso se debe definir el riesgo alimentario del cultivo en relación al destino que pueda tener, considerando que órgano de la planta será procesado o consumido directamente (Chaney, 1980).

Por ejemplo, la bioacumulación del mercurio en el cultivo de maíz representa su inicio dentro de la cadena alimenticia, en los sistemas terrestres, como resultado del consumo del follaje por el ganado y de los granos por el hombre (Rothenberg et al., 2007).

Finalmente al analizar el contenido de metales pesados en las muestras de suelo luego de realizado el experimento se observa que han disminuido considerablemente aunque siguen estando por encima de los estándares permitidos dentro de nuestra normativa vigente y en la planta se observó concentraciones altas con respecto a los límites permitidos de acuerdo con normativas internacionales, infiriendo que la planta tiene concentraciones elevadas de este metal, lo que indica que esta planta tiene un potencial para acumular metales pesados, tal como se indica en el análisis estadístico realizado por León (2016) el cual señala que la efectividad del tratamiento del suelo por el proceso de fitorremediación, difiere significativamente entre el uso de la especie vegetal *Medicago Sativa*, *Cecropia Peltata*, *A. Pintoi*, siendo la que presenta mejores resultados *A. Pintoi*.

CONCLUSIONES

Se identificaron metales pesados como potasio, níquel, cadmio y arsénico en los suelos de la parroquia Zurmi. De estos, el cadmio excede los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 028 del Ministerio del Ambiente del Ecuador. El análisis físico-químico reveló que los suelos son francos arenosos, con bajo contenido de materia orgánica. Sin embargo, estos suelos muestran una homogeneidad en la concentración de potasio, sugiriendo que las actividades mineras no han afectado significativamente los niveles de este elemento.

El ensayo de siembra de *A. pintoii* demostró que esta leguminosa puede desarrollarse adecuadamente en suelos contaminados por metales pesados, como el cadmio, níquel y arsénico, a pesar de las condiciones desfavorables del suelo en términos de acidez y baja fertilidad. *A. pintoii* mostró una notable tolerancia y capacidad de crecimiento, sin presentar mortalidad, lo que sugiere su potencial uso en fitorremediación para suelos contaminados por prácticas mineras.

A. pintoii se comportó como una especie acumuladora de metales pesados, con características que le permiten tolerar suelos medianamente ácidos y con altos contenidos de metales pesados. La comparación con otras especies de la literatura confirmó que *A. pintoii* posee una alta capacidad de fitorremediación, lo que la convierte en una opción viable y eficiente para proyectos de fitorremediación en suelos afectados por la minería.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios adicionales que incluyan una gama más amplia de metales y más muestras para evaluar completamente el impacto de la minería en el suelo. Además, sería prudente implementar un monitoreo continuo del suelo y la biodiversidad asociada para detectar cualquier cambio a largo plazo.

Aunque se ha determinado que *A. pintoii*, es una especie acumuladora de mercurio con potencial fitorremediador, es necesario precisar que para remediar suelos contaminados es necesario la combinación con otras técnicas de remediación.

Aunque los niveles no exceden los estándares reguladores comunes para preocupación ambiental, la gestión prudente y el monitoreo continuo son esenciales para asegurar que no existan riesgos acumulativos o localizados para el ecosistema y la salud humana.

Un enfoque proactivo en la gestión y remediación puede ayudar a mitigar los riesgos ambientales y de salud asociados con la contaminación por metales pesados.

Acompañar el proceso de experimentación con análisis microbiológico con el fin de conocer la dinámica y actividad microbiana de la zona de estudio, así como, el efecto de los tratamientos usados en la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, Yolivia & Céspedes, Juan. (2021). *Evaluación de las especies fitorremediadoras aplicadas en suelos agrícolas contaminados con pesticidas* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/77283>
- Adriano, D. 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. New York: Springer Verlag, 2001.
- Black, C. (1975). Relaciones Suelo-planta. Argentina. Segunda edición. Tomo I. Centro Regional de Ayuda Técnica Agencia para el Desarrollo Internacional. Editorial Hemisferio Sur
- Berkelley (2011). Laboratorio de biorremediación. EE. U
- Buendía R., H. (2012). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 15(30), 123–130. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v15i30.4101>
- Bose-O'Reilly, S., Drasch, G., Beinhoff, C., Rodrigues-Filho, S., Roider, G., Lettmeier, B., Maydl, A., Maydl, S., & Siebert, U. (2010). Health assessment of artisanal gold miners in Indonesia. *The Science of the total environment*, 408(4), 713–725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.070>
- Carrasquero-Durán Armando y Adams M., 2003. Fraccionamiento de mercurio en suelos de áreas contaminadas de El Callao, estado Bolívar-Venezuela, *Agronomía Tropical*, Vol. 53, No. 3, pp 331-345.
- Chaney, R. (1980) Health risks associated with toxic metal in municipal sludge
- Clarkson, Thomas & Magos, Laszlo. (2006). The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Critical reviews in toxicology*, 36(8), 609–662. <https://doi.org/10.1080/10408440600845619>
- Clemente Huachen, J. P., Medina Contreras, J., Pfuño, J. D. L., Pariona Aguilar, L. A., & Gutiérrez Vílchez, P. P. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica*, 70(2), 163-170.
- Díaz, Maria & Ordoñez González, Eduardo. (2017). *Arachis pintoi*: ¿Una especie acumuladora de mercurio? *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, Vol. II. 115 - 124.
https://www.researchgate.net/publication/325273614_Arachis_pintoi_Una_especie_ac



[umuladora de mercurio](#)

Directive the European Parliament and of the Council (2002) on undesirable substances in animal feed”.

Official Journal of the European Communities

Delgadillo-López, Angélica Evelin, González-Ramírez, César Abelardo, Prieto-García, Francisco,

Villagómez-Ibarra, José Roberto, & Acevedo-Sandoval, Otilio. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612. Recuperado en 26 de marzo de 2023, de

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es)

Dushenkov, V., Kumar, P., Motto, H. y I. Raskin, I. (1995). Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science & Technology*, vol. 29, pp. 1239-1245

Felipo, M. (1992). Contaminación del suelo e impacto ambiental. Seminario “Contaminación, protección y saneamiento de suelos. UIMP. Valencia

Guzmán, Marta. (2007). *La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales*. Sevilla-España: Porvenir.

Hanson, P., Lindberg, S., Tabberer, T., y et al. (1995) Foliar exchange of mercury vapor: evidence for a compensation point. *Water, Air and Soil Pollution* 80, 373-382

Hazrat, Ali., Ezzat Khan. & Muhammad, Sajadc. (2013). Fitorremediación de metales pesados: conceptos y aplicaciones. *ScienceDirect*, Vol. 91 (7), 869-881.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

Hernández, G., García, R., Solís, S., y et al. (2012) Presencia del Hg total en una relación suelo-planta-atmósfera al sur de la Sierra Gorda de Querétaro. México. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas* Vol.15

Iturbe, R. (2010). ¿Qué es la biorremediación? *Universidad Nacional Autónoma de México*.

Kabata, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third edition. CRC. Press. Boca Raton. USA. 413 p.

León, Ingrid. (2016). *Evaluación de la Medicago sativa l (alfalfa), Cecropia peltata l (guarumo) y Arachis pintoi w.c (maní forrajero) como potenciales especies fitorremediadoras para remediación de*



- suelos contaminados por minería aurífera en las riberas del río Nambija, barrio puente azul, cantón Zamora* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio digital – Universidad Nacional de Loja. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/14131>
- Lenka, M., Panda, K., y Panda, B. (1992) Monitoring and assessment of mercury pollution in the vicinity of a chloralkali plant. Bioconcentration of mercury in situ aquatic and terrestrial plants at Ganjam, India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 22, No. 2, pp. 195-202
- Liu, D et al. (2018). Un estudio multimodelo del PDRMIP sobre los impactos de los forzamientos regionales de aerosoles en las precipitaciones globales y regionales. *American Meteorological Society*, vol. 31 (11), 4429-4447. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0439.1>
- Mackenzie, L. D., & Susan, J. M. (2005). Ingeniería y ciencias ambientales.
- Magnicol, R., y Beckett, P. (1985) Critical tissue concentration of potentially toxic elements. Plant and soil
- Mas y Azcue (1993). Metales en sistemas biológicos. Barcelona. 1ra ed. PPU.S.A. 340 P.
- Millan, R., Carpena, R., Schmid, T., y et al. (2007). Rehabilitación de suelos contaminados con mercurio: estrategias aplicables en el área de Almadén. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente* [en línea], (2). Asociación Española de Ecología Terrestre. Disponible en <https://goo.gl/gEXEL6>
- Muñoz, Gissela. (2017). *Evaluación in vitro de la capacidad de maní forrajero (Arachis pintoi w.c) y guarumo (Cecropia peltata l) en la biorremediación de suelos contaminados con mercurio* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional – ESPOCH. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/7021/1/236T0277.pdf>
- Niu, Z., Zhang, X., y et al. (2011) Field controlled experiments of mercury accumulation in crops from air and soil. *Environ Poll* 159(10):2684 -2689
- Paisio, C., González, P., Talano, M., y et al. (2012). Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances. *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal* 3(2). Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina
- Pohlman, G. (1946). Effect of liming different soil layers on yield of alfalfa and on root development and nodulation. *Soil Sci.* 62; 255 -266.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., Roquero de Laburu, C. (1994). *Edafología para la*

agricultura y el medio ambiente. Madrid, España: Mundi-Prensa.

<https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/251>

Rao, I., y Kerridge, P. (1995). Nutrición Mineral de Arachis Forrajero. En: *Biología y agronomía de especies forrajeras de Arachis*. Kerridge, P. (comp.), Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 76-89agricultores. Bogota : Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)., 1992.

Rea Toapanta, Antonio Ricardo. (2017). Política minera y sostenibilidad ambiental en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 4(2), 41-

52. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.68>

Restrepo, B., y Verbel, J. 2002. La contaminación con mercurio en el norte de Colombia.

Jorge, E., y Matson, E. Universidad de Cartagena. 123 p.

Rincón, C., Cuesta, P.; Pérez, R.; Lascano, C.; Ferguson, J. 1992. Maní Forrajero Perenne (*Arachis pinto*; Krapovickas y Gregory): Una alternativa para ganaderos

Rothenberg, S., Du, X., Zhu, Y., y Jay, A. (2007) The impact of sewage irrigation on the uptake of mercury in corn plants (*Zea mays*) from suburban Beijing. *Environmental Pollution* 149, 246-51

Rutter, A., Schauer, J., Shafer, M., Creswell, J., Olson, M., Robinson, M., Collins, R., Parman, A., Katzman, T., Mallek, J. (2011). Dry deposition of gaseous elemental mercury to plants and soils using mercury stable isotopes in a controlled environment. *Atmospheric Environ*

Sánchez, L. Sierra, M. y Millan R. (2013) Aplicabilidad de Técnicas de Volatilización Controlada de Mercurio en el Cerco Minero de Almadenejos. Madrid. Editorial CIEMAT. 11-13

Skerman, P., Cameron, D., y Riveros, F. (1991). Leguminosas Forrajeras Tropicales.

Colección FAO: Producción y protección vegetal. Italia

Temmerman, L., Waegeneers, N., Claeys, N. y Roekens, E. (2009) Comparison of concentrations of mercury in ambient air to its accumulation by leaf vegetables: An important step in terrestrial food chain analysis. *Environmental Pollution* 157, 1337- 1341

Tobar, A., y Ventura, K., (2013). Determinación de plomo por el método de absorción atómica en cuatro especies vegetales cultivadas en el cantón Sitio del Niño municipio de San Juan Opaco, departamento de La Libertad. Tesis. El Salvador

Van, D., Lloyd, S.; Chetry, R.; Peck, J. (2010). *Remediación Technologies Screening Matrix and Reference*



Guide. London: Technology Innovation Office, EPA Platinum International, Inc., 2010.

Vilcapaza, J. (2018). *Evaluación de la capacidad fitorremediadora del Garbancillo (Astragalus arequipensis) en función de tres tipos de enmiendas orgánicas sobre la remoción de mercurio del suelo contaminado por la actividad minera del centro poblado la Rinconada - Región Puno, 2018* [Tesis de grado, Universidad Peruana Unión].

https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/1709/Jean_Tesis_Li_cenciatura_2018%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Villas, R. 2001. La minería en el Contexto de la Ordenación del Territorio. Rio de Janeiro Brasil: CYTED, 2001.

Volke, T., & Velasco, A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*.

Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/31851896>

Volke - Sepúlveda, T., Velasco - Trejo, J. y de la Rosa, D. 2005. Suelos Contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. México: Instituto Nacional de Ecología, 2005. págs. 19 - 31.

Wang, Y., y Greger, M. (2004) Clonal differences in mercury tolerance, accumulation, and distribution in willow. *J Environ Qual* .

Wang, Y. (2004) Phytoremediation of mercury by terrestrial plants. PhD. Thesis.

Department of Botany, Stockholm University, Sweden

Zornoza, P., Millán, R., Sierra, M.J., Seco, A., y Esteban, E. (2010). Efficiency of white lupin in the removal of mercury from contaminated soils: soil and hydroponic experiments.