UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“Bioacumulación de metales pesados en tejidos foliares de especies forestales y en suelo de un pasivo ambiental minero metálico”

AUTOR(ES):

Dina Stephany Cordero Chiriapa

Juan Pablo Vargas Pico

DOCENTE - TUTOR:

PhD. Yudel García Quintana

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Si cumple
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Si cumple
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	Si cumple
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	Si cumple
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	Si cumple

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	Si cumple
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	Si cumple
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Si cumple
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
MARIA KATHARINA ELISABETH DE DECKER

MARÍA KATHARINA ELISABETH DE DECKER (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 12 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Aceptado la rectificación
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Aceptado la rectificación
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	19.0 / 20	Se aceptan las rectificaciones realizadas, sin embargo, se sugiere mejorar la redacción.
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	14.0 / 15	Se aceptan las rectificaciones realizadas, sin embargo, se sugiere mejorar la redacción.
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	14.0 / 15	Se aceptan las rectificaciones realizadas, sin embargo, se sugiere mejorar la redacción.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	24.0 / 25	Se aceptan las rectificaciones realizadas, sin embargo, se sugiere mejorar la redacción.
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	9.0 / 10	Se aceptan las rectificaciones realizadas, sin embargo, se sugiere mejorar la redacción.
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Aceptado la rectificación
VALORACIÓN TOTAL	95	NOVENTA Y CINCO

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	95

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
RUBEN DARIO LEDESMA ACOSTA

RUBÉN DARÍO LEDESMA ACOSTA (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 11 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

Ouriginal by Turnitin

Firmado electrónicamente por: YUDEL GARCIA QUINTANA

Document Information

Analyzed document	DOCUMENTO FINAL DINA Y JUAN PARA URKUND.docx (D173271393)
Submitted	8/31/2023 2:03:00 AM
Submitted by	GARCIA QUINTANA YUDEL
Submitter email	ygarcia@uea.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	ygarcia.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA **UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / DOCUMENTO PARA URKUND.docx** 1
Document DOCUMENTO PARA URKUND.docx (D142662809)
Submitted by: ygarcia@uea.edu.ec
Receiver: ygarcia.uea@analysis.urkund.com

W URL: https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/14663 1
Fetched: 1/17/2023 4:15:31 PM

SA **UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS DE Piptocoma discolor KEYLA Y DANIELA.docx** 2
Document EVALUACIÓN DEL POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS DE Piptocoma discolor KEYLA Y DANIELA.docx (D159835372)
Submitted by: ygarcia@uea.edu.ec
Receiver: ygarcia.uea@analysis.urkund.com

SA **UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / Propuestas de especies forestales arbóreas y arbustivas con potencial bioacumulador de metales pesados en áreas de extracci��n minera VF.docx** 1
Document Propuestas de especies forestales arbóreas y arbustivas con potencial bioacumulador de metales pesados en áreas de extracci��n minera VF.docx (D158574735)
Submitted by: cbanol@uea.edu.ec
Receiver: cbanol.uea@analysis.urkund.com

SA **UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA / DOCUMENTOS URKUND- VIVIANA CHICO.docx** 2
Document DOCUMENTOS URKUND- VIVIANA CHICO.docx (D156090155)
Submitted by: yarteaga@uea.edu.ec
Receiver: yarteaga.uea@analysis.urkund.com

SA **Tesis 2_CasaErika_CunalataMariela 5.docx** 2
Document Tesis 2_CasaErika_CunalataMariela 5.docx (D127386809)

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

"Bioacumulación de metales pesados en tejidos foliares de especies forestales y en suelo de un pasivo ambiental minero metálico"

"Bioaccumulation of heavy metals in leaf tissues of forest species and in soil of a metallic mining environmental liability"

Dina Stephany Cordero Chiriapa[1]
dc.corderoc@uea.edu.ec
Juan Pablo Vargas Pico[1]
jp.vargasp@uea.edu.ec
PhD. Yudel García Quintana[2]
ygarcia@uea.edu.ec
[1]Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carrera de Ingeniería Forestal

Resumen

Actualmente el alto valor comercial de los minerales conduce a una explotación descontrolada de los ecosistemas, provocando contaminación y pérdida de la biodiversidad. El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial bioacumulador de metales pesados de especies forestales de importancia ecológica por su abundancia en un área de pasivo ambiental minero metálico. Para ello se recolectaron muestras de hojas de las especies *Acalypha diversifolia*, *Theobroma cacao, Myriocarpa longipes*, *Hieronyma asperifolia*, *Himatanthus succuba*, *Pourouma cecropiifolia*, *Trichantera gigantea,* y de suelo, a orillas del río Pinlloyacu, comunidad El Capricho y se determinó la concentración de cuatro metales pesados (Cd, Ni, Co, Mn), mediante el espectrofotómetro de absorción atómica, lo que permitió determinar el potencial bioacumulador de cada especie. Los resultados a nivel foliar, suelo y el factor de bioconcentración reportaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$), como reflejo de la respuesta diferenciada de cada especie para acumular metales pesados. El análisis de componentes principales (ACP) reportó que *P. cecropiifolia,* presentó alta capacidad para acumular Co y Ni en el suelo; *T. gigantea* Ni a nivel foliar y Cd en el suelo; *T. cacao* Mn en el suelo y la especie *M. longipes* Co y Cd a nivel foliar. Estos resultados demostraron la alta capacidad de bioacumulación de metales pesados de las especies forestales como herramienta para mitigar los impactos ambientales por la extracción minera, lo que facilitó información clave para recomendarlas como fitorremediadoras.

Palabras claves: minería, fitorremediación, metales pesados, bioacumulación.

Abstract

Currently the high commercial value of minerals leads to uncontrolled exploitation of ecosystems, causing pollution and loss of biodiversity. The objective of this research was to determine the bioaccumulator potential of heavy metals of forest species of ecological importance and abundance in an area of metallic mining environmental liabilities. To this end, samples of leaves of the species *Acalypha diversifolia, Theobroma cacao, Myriocarpa longipes, Hieronyma asperifolia, Himatanthus succuba, Pourouma cecropiifolia, Trichantera gigantea*, and soil were collected on the banks of the Pinlloyacu river, El Capricho community, and the concentration of four heavy metals (Cd, Ni, Co, Mn), using the atomic absorption spectrophotometer, which allowed calculating the bioaccumulator potential of each species. The results at the foliar level, in the soil and the bioconcentration factor reported significant differences ($p \leq 0,05$), as a reflection of the differentiated response of each species to accumulate heavy metals. The principal component analysis (PCA) reported that *P. cecropiifolia* presented a high capacity to accumulate Co and Ni in the soil; *T. gigantea* Ni at the leaf level and Cd in the soil; *T. cacao* Mn in the soil and the species *M. longipes* Co and Cd at the leaf level. These results demonstrated the high bioaccumulation capacity of heavy metals of forest species as a tool to mitigate the environmental impacts of mining extraction, which provided key information to recommend them as phytoremediators.

Keywords: mining, phytoremediation, heavy metals, bioaccumulation.

1. Introducción

La minería es una actividad indispensable para el desarrollo de las sociedades, sin embargo, resulta ser una de las acciones antropogénicas más contaminantes cuando no se ejecuta de forma adecuada (Paz et al., 2022). La contaminación del suelo es un problema mundial, causado principalmente por metales pesados originado por fuentes antrópicas como la minería, la industria y la agricultura (Castañeda, 2022). Como menciona (Correa et al., 2021) la presencia de metales pesados en el agua, los alimentos y el aire es uno de los mayores problemas que enfrenta el mundo en la actualidad. La alta toxicidad de estos elementos químicos no solo afecta la salud humana, sino que también causa daños irreversibles a los animales, las plantas y todo el medio ambiente, lo que a su vez tiene un gran impacto socioeconómico.

En la actualidad, la contaminación ambiental se ha convertido en un problema de preocupación a nivel mundial, los metales pesados son los contaminantes más

evidenciados en la naturaleza, son elementos no biodegradables, por lo cual, suelen acumularse fácilmente en tejidos y organismos vivos, perturbando su viabilidad en el ecosistema a largo plazo, además de no ser detectables cómodamente, menciona (González, 2022), por otra parte los metales se transfieren del suelo a las plantas, dependiendo de las propiedades químicos tales como: el pH del suelo, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, propiedades físicas: contenido de arcilla, textura, estructura, porosidad y color; propiedades biológicas: bacterias, hongos, microorganismos, según (Medina y Montano, 2014).

Ortega et al., (2003) mencionan que los metales no se descomponen, por lo que se acumulan en los ecosistemas con el tiempo, creando altas concentraciones que afectan negativamente a la mayoría de los organismos; por ello, se han desarrollado técnicas para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados. Como señala (Castañeda, 2022), actividades como la minería y la industria conducen a una grave contaminación del suelo debido al aumento de metales, y en respuesta se han introducido técnicas como la fitorremediación. (Corpus, 2018) argumenta que, a pesar de la alta concentración de metales pesados en el suelo, algunas especies de plantas han desarrollado estrategias para prosperar en condiciones desfavorables y altas concentraciones de metales pesados, convirtiéndolas en especies con un potencial de aplicación en procesos de fitorremediación.

Las plantas metalófitos son especies que han desarrollado mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en suelos degradados por la minería. Estas plantas pueden limitar la absorción de metales o trasladarlos a las hojas o absorberlos activamente y acumularlos en su biomasa aérea, algunas plantas alteran las condiciones de la rizósfera produciendo exudados de raíces o cambiando el pH, actualmente se utilizan diversas tecnologías para la remediación de suelos contaminados con metales pesados, las cuales suelen utilizar plantas metalófitas que pueden ser utilizadas en procesos de fitorrehabilitación y fitorremediación para restaurar sedimentos y aguas contaminadas con metales pesados y eliminar contaminantes en el ambiente (Jara-Peña et al., 2014).

En la ribera del río Pinlloyacu, perteneciente a la comunidad El Capricho, sector Simón Bolívar, cantón Carlos Julio Arosemena Tola en la provincia de Napo se ha evidenciado la existencia de minería de forma ilegal, a pequeña escala, y a cielo abierto en un área de 5.000 m² (0,5 ha), la cual estuvo en extracción durante 1 mes, y actualmente se encuentra en abandono hace aproximadamente 8 meses. La explotación de oro en este

sector ha provocado problemas ambientales como la degradación del suelo, contaminación del aire y agua, erosión de suelo, tala indiscriminada, pérdida de la flora y fauna, entre otros. Sin embargo, el desarrollo especies forestales con capacidad para adaptarse a las condiciones extremas del sitio donde se realizan actividades de extracción minera, conlleva a la necesidad de este estudio para identificar las especies que abundan en la zona con potencialidades para la bioacumulación de metales pesados, ya que al acondicionarse en el lugar podrían ser útiles para los fines de restauración de áreas contaminadas incluso con niveles tóxicos para los pobladores de esta comunidad.

Se conoce que el mercurio es uno de los metales más utilizados para separar y extraer el oro de la roca o piedra en la que se encuentra, este se adhiere al oro y forma una amalgama que facilita la separación de rocas, arena u otros materiales que al calentarse evapora el mercurio, dejando atrás el oro, aunque existen otros metales de gran importancia como el Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Cobalto (Co), Manganeso (Mn), entre otros, que representan un alto riesgo para las poblaciones vegetales, ocasionando efectos contaminantes en los sitios de extracción minera que ameritan un monitoreo contante y son de fácil determinación en condiciones experimentales. Por lo tanto, la siguiente investigación tuvo como propósito determinar el potencial bioacumulador de metales pesados Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Cobalto (Co), Manganeso (Mn) de especies forestales de importancia ecológica por su abundancia, tal es el caso de: *Acalypha diversifolia* J. (Arenillo), *Teobroma cacao* L. (Cacao), *Myriocarpa longipes L.* (Ortiga silvestre), *Hieronyma asperifolia* Jacq (Motilón), *Himatanthus succuba* (Spruce ex Mull.Arg.)Woodson (Bellaco caspi), *Pourouma cecropiifolia* Mart (Ubilla de monte), *Trichantera gigantea* (Bonpl.) Nees (Nacedero), en un área de pasivo ambiental minero metálico de la comunidad El Capricho.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El trabajo se realizó a orillas de la ribera del río Pinlloyacu, comunidad el Capricho, que se encuentra limitado por el cantón Carlos Julio Arosemena Tola y cantón Santa Clara, provincia Napo, Ecuador, con las coordenadas 1°16’60” S, 77°28’0” W, Zona 18 Sur, en un área de 5.000m² (0,5 ha) donde se realizó actividad de minería ilegal a pequeña escala. Para lo cual se recolectó muestras foliares y de suelo de siete especies forestales de importancia en el área (Figura 1).

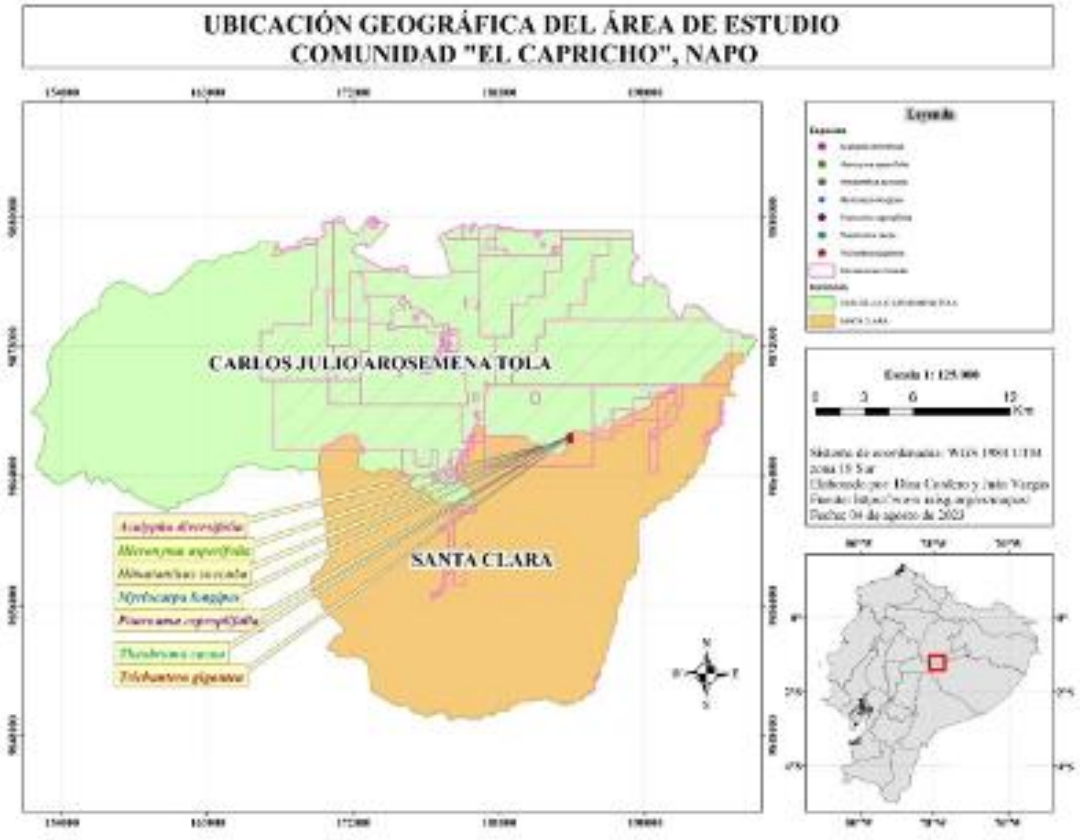

Figura 1. *Ubicación geográfica de siete especies forestales de estudio, pertenecientes a la comunidad El Capricho, Napo, Ecuador.*

2.2 Tipo de Investigación

Para el presente estudio se empleó la investigación descriptiva y analítica. En este contexto, (Morales, 2012) señala que mucho de lo que se escribe e investiga sobre la sociedad no va más allá de este nivel de investigación descriptiva (también conocida como investigación de diagnóstico), básicamente, se trata de la descripción de un determinado fenómeno o situación, indicando sus rasgos más característicos. En este caso se describió el comportamiento de siete especies forestales en cuanto a la concentración de metales pesados.

Por otro lado, (Bavaresco, 2013) menciona que, la investigación analítica se realiza de manera sistemática, estudiando un fenómeno e infiriendo las relaciones causa y efecto de las variables de estudio, así con los datos obtenidos que llegan a comprobar el conocimiento racional de la realidad. De ahí que para conocer la causa de la acumulación de metales pesados en las especies forestales y el efecto que conlleva a seleccionarlas como fitorremediadoras fue necesario aplicar el método analítico para obtener resultados

sobre la realidad de la minería ilegal y la problemática de esta contaminación por metales pesados.

2.3 Muestreo

El estudio se realizó en tres etapas básicas. La primera etapa correspondió al trabajo exploratorio y de campo, identificando un área donde haya existido explotación minera, en el cual se seleccionaron las especies forestales y se recolectaron muestras de hojas y suelo. La segunda etapa fue la experimental, donde se realizó el trabajo de laboratorio mediante el análisis de los metales pesados en las muestras recolectadas en campo, lo cual fue posible en los Laboratorios de Ambiental, Bromatología y de Suelos de la Universidad Estatal Amazónica. La tercera y última etapa correspondió a la interpretación de resultados de los datos obtenidos a escala de laboratorio.

En el muestreo de campo se seleccionaron siete especies forestales de interés (*A. diversifolia, T. cacao, M. longipes, H. asperifolia, H. succuba, P cecropiifolia, T. gigantea*), a través de un muestreo sistemático. El muestreo consistió en la selección aleatoria del primer elemento para la muestra (especie), y luego se seleccionaron los elementos posteriores utilizando intervalos fijos o sistemáticos cada 20 m hasta completar el muestreo de las siete especies seleccionadas para el estudio. Las especies fueron consideradas tomando como base la importancia ecológica de las especies en función de la abundancia, mediante análisis exploratorio de la vegetación predominante, y además se consideró su ubicación a las orillas del río Pinlloyacu del pasivo ambiental minero.

Se recolectaron muestras compuestas de tres individuos por cada especie, lo cual se etiquetó con el código de cada especie y el tipo de material correspondiente.

La identificación botánica de las especies se realizó con el apoyo de un personal técnico del Centro Experimental de Investigación y Producción Amazónica (CEIPA) que poseía conocimiento sobre las especies de la zona, seguido por una verificación taxonómica de las especies mediante recurso virtual (Tropico.org) y revisión bibliográfica de los libros de flora de Ecuador (Palacios, 2016).

Para el análisis foliar se recolectaron muestras de plantas de la parte aérea de cada especie, teniendo en cuenta el estado sanitario y madurez fisiológica, además se consideró que las hojas no tuvieran daño físico ni presencia de plagas o enfermedades, ya que esto alteraría los resultados (Sadeghian, 2020). Luego se colocaron las muestras foliares en bolsas ziploc selladas herméticamente, se etiquetaron con sus respectivos nombres y se transportaron al laboratorio para el análisis de los metales pesados. Se determinó la

concentración de cadmio (Cd), níquel (Ni), cobalto (Co), manganeso (Mn) y no fue posible el análisis del mercurio debido a la limitante de no contar con lámparas de mercurio para el análisis en el espectrofotómetro de absorción atómica.

En cuanto a las muestras de suelo, se recolectaron tres muestras compuestas, en tres puntos diferentes alrededores del fuste del árbol seleccionado, considerando un radio de 30 cm y una profundidad de 0-30 cm. Las muestras fueron almacenadas en bolsas ziploc selladas herméticamente y se consideró que las muestras estuvieran libres de raíces y desechos para el análisis de los metales pesados. Los metales analizados fueron los mismos que para el análisis de hojas.

2.4 Procedimiento para el análisis de metales pesados en muestras de hojas y suelo

Las muestras de hojas se procedieron a secar en un horno de circulación de aire forzado a 60 °C en un período de 72 h, se colocaron en un mortero después del secado y luego se trituraron en una licuadora hasta obtener partículas más finas (Mendoza et al., 2014).

Se empleó un sistema de digestión por microondas de alto rendimiento "ETHOS One High Performance Microwave Digestion System" equipado con 12 envases de 50 ml de capacidad de TFM (Teflon Fluor Modified), ubicado en el Laboratorio de Bromatología de la Universidad Estatal Amazónica.

Para la digestión por microondas se pesó 0,5 g de muestra, se agregó 1 ml de peróxido de hidrogeno al 30% de concentración y 7ml de ácido nítrico a 65% de concentración, se procedió a cerrar herméticamente con la ayuda del brazo ajustador (palanca) y se trasladaron al sistema de digestión por microondas para quedar fijos y en la posición correcta. Para la digestión en el microondas se trabajó con una temperatura de 220°C, a una presión de 1,5 bar, una potencia de 1500 W y un tiempo de 50 min.

Después de digerir las muestras se transfirieron a la sorbona abriéndola con su respectivo cuidado ya que el ácido nítrico aún estaba en proceso de gasificación, luego se transfirió a un vaso precipitado y se agregó 10 ml de ácido nítrico al 65% (HNO_3). Posteriormente se colocaron en un matraz aforado de 50 ml, adicionando solución de ácido nítrico (HNO3) al 10%, se tapó y agitó bien la muestra. Luego se colocaron en botellas de plástico etiquetadas y se refrigeraron para su posterior procesamiento.

Las muestras de suelo se colocaron en un horno durante 72 horas con circulación de aire forzado a 60°C para acelerar el proceso de secado. Después del secado, se trituraron con un mortero para obtener partículas más pequeñas (Mendoza et al., 2014).

Para la digestión por microondas se pesó una muestra de 0,5 g de cada especie en recipientes rotulados, luego se colocó cada muestra una a la vez en la cámara de extracción de gases y se agregó 8 ml de ácido nítrico (HNO_3) en cada muestra al 65% de concentración y 2 ml de peróxido de hidrogeno al 30%, mediante una llave dinamométrica se cerró los vasos herméticamente con la ayuda del brazo ajustador (palanca) y se trasladaron al sistema de digestión por microondas para quedar fijos y en la posición correcta para su digestión a temperatura de 187°C, con una presión de 1,1 bar, a una potencia de 1500W y por un tiempo de 60min. En este contexto, (Gonzáles, 2014) menciona que un sistema de digestión por microondas es un mecanismo que proporciona un sistema cerrado que utiliza microondas, alta temperatura y presión en presencia de una mezcla ácida para descomponer la materia orgánica en partes más simples, como iones, agua y gas residual.

Después de digerir las muestras de suelo se procedió a transportarlas a la sorbona, abriéndolas con cuidado ya que el ácido nítrico aún se estaba gasificando, luego se transfirieron las muestras a un vaso de precipitación y se agregó 10 ml al 65% de ácido nítrico (HNO_3). Se traspuso la muestra a un matraz aforado de 50 ml, enrasando con solución de ácido nítrico (HNO_3) al 10 %, se tapó bien la muestra y se agitó. Luego se dejó que las muestras se asentaran y se procedió a colocarlas en botellas de plástico etiquetadas y se refrigeraron para el siguiente proceso.

Se empleó el uso del espectrómetro de absorción atómica (TRACE 1200/INTRUMENS LTD) para el análisis de los parámetros de concentración de los metales Cd, Ni, Co, Mn en hojas y suelo (en este caso no se hizo el estudio del Hg debido a que el Laboratorio de Bromatología de la Universidad estatal Amazónica no contaba con una lámpara de mercurio para su análisis). Este método fue utilizado para estimar la concentración de analitos en la muestra donde los electrones de los átomos en el atomizador se mueven instantáneamente a una órbita más alta al absorber cierta cantidad de energía (es decir, luz de cierta longitud de onda), esta energía (o longitud de onda) es específica de la transición de electrones en un elemento en particular y, por lo general, cada longitud de onda corresponde a un elemento, dado que se conoce la energía puesta en la llama y se puede medir la energía que queda en el otro lado (en el detector), el número de transiciones que se han producido se calculó a partir de la ley de Beer-Lambert (Sanmiguel y Guerrero, 2017). Para obtener una señal proporcional a la concentración

del elemento medido se usó tres réplicas por muestra (R1, R2 y R3), y para la respectiva cuantificación se usó el método de la curva de calibración (Galicia et al., 2017).

Una vez determinado la concentración de metales pesados se calculó el factor de bioconcentración (FBC) que determina la cantidad de metales pesados (cadmio, níquel, cobalto, manganeso) acumulado en cada una de las especies seleccionadas. Para esto se utilizó la siguiente ecuación: (Torres, 2018).

(Ecuación 1)

$$FBC = \frac{Cfollaje}{Csuelo}$$

Dónde: C follaje y C suelo muestran la concentración de un elemento específico en el material vegetativo o suelo respectivamente.

2.5 Análisis de las propiedades del suelo

Se realizó un análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo con el propósito de establecer relaciones entre los metales pesados y se excluyeron del estudio aquellas variables que no resultaron significativas. Se consideraron como variables significativas para el análisis el pH y la materia orgánica.

La determinación del pH se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Estatal Amazónica. Una vez que las muestras estuvieron pesadas en la balanza a una escala de 0,2 y 0,5 g de suelo se le agregó 50 ml de agua desionizada a la mezcla suelo y se agitó por un período de 3 min y se dejó reposar 15 min para luego ser medida en el phmetro (Beretta y Musselli, 2014)

La determinación de la materia orgánica se realizó a través del método de calcinación propuesta por (Walkley y Black, 1934) Una vez pesadas las muestras de suelo en los envases se colocó en la estufa por un tiempo de 6 h para conseguir una resequedad suficiente y que su estado sea el adecuado, se procedió a pesar nuevamente en una balanza analítica y se ubicó en la mufla durante 3 h. El manejo de la mufla se realizó de la siguiente manera: 1.) se encendió el equipo según el manual a una temperatura de 100°C por espacio de una hora. 2.) se elevó la temperatura a 200°C durante una hora. 3.) se elevó la temperatura a 300°C por espacio de una hora. Durante estos pasos se abrió la cámara de la mufla varias veces para que la humedad vaporizada de la resistencia y de la fibra aislante saliera de la cámara.

2.6 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95% en los datos de concentración de metales pesados del tejido foliar, el suelo y factor de bioconcentración, con el objetivo de encontrar diferencias significativas entre los cuatro metales pesados, níquel (Ni), cobalto (Co), cadmio (Cd), manganeso (Mn) en cada una de las siete especies.

Se realizó una matriz de correlación de Pearson para examinar las relaciones que existen entre los metales estudiados a nivel de tejido foliar, en el suelo, factor de bioconcentración y las propiedades del suelo (pH y materia orgánica). Los valores oscilan de 0 a 1, donde los valores más cercanos a 1 indicaron correlaciones más altas.

Se realizó una clasificación mediante el método de clúster con las variables de concentración media de metales pesados en el tejido foliar, el cual permitió identificar similitud entre los metales pesados, con la medida de 50% de similitud como distancia de cohorte.

Se determinó un análisis de componentes principales (ACP) y se declaró el comportamiento de la variabilidad total de los datos con la finalidad de encontrar tendencias de comportamiento de cada especie en relación a los metales pesados, lo cual facilitó información clave para identificar las especies de mayor potencialidad como fitorremediadoras para suelos contaminados por metales pesados.

3. Resultados

3.1 Análisis de varianza (ANOVA) a nivel foliar y suelo

Los resultados obtenidos a nivel foliar, según el análisis de varianza (ANOVA) de clasificación simple, con un nivel de significación de ($p \leq 0,05$) permitieron evidenciar que existen diferencias significativas en cuanto a la concentración de metales Cd, Ni, Co, Mn en las especies de estudio (*A. diversifolia, T. cacao, M. longipes, H. asperifolia, H. succuba, P. cecropiifolia, T. gigantea).* La especie *M. longipes* presentó la mayor concentración de Cd con un valor de 5,4 *mg/kg*. En cuanto a Ni la especie *H. succuba* y *T. cacao* presentaron los valores más altos 30,2 *mg/kg* y 29,5 *mg/kg* respectivamente. *P. cecropiifolia* con un valor mayor de 27 *mg/kg* fue la especie que más concentra Co en sus hojas. La especie *T. cacao* presento un alto valor en captar Mn con 170 *mg/kg*, mientras que *H. succuba, P. cecropiifolia, A. diversifolia, T. gigantea, M. longipes, H. asperifolia* presentaron valores más bajos de 87,7 mg/kg a 28,2 mg/kg (Figura 2).

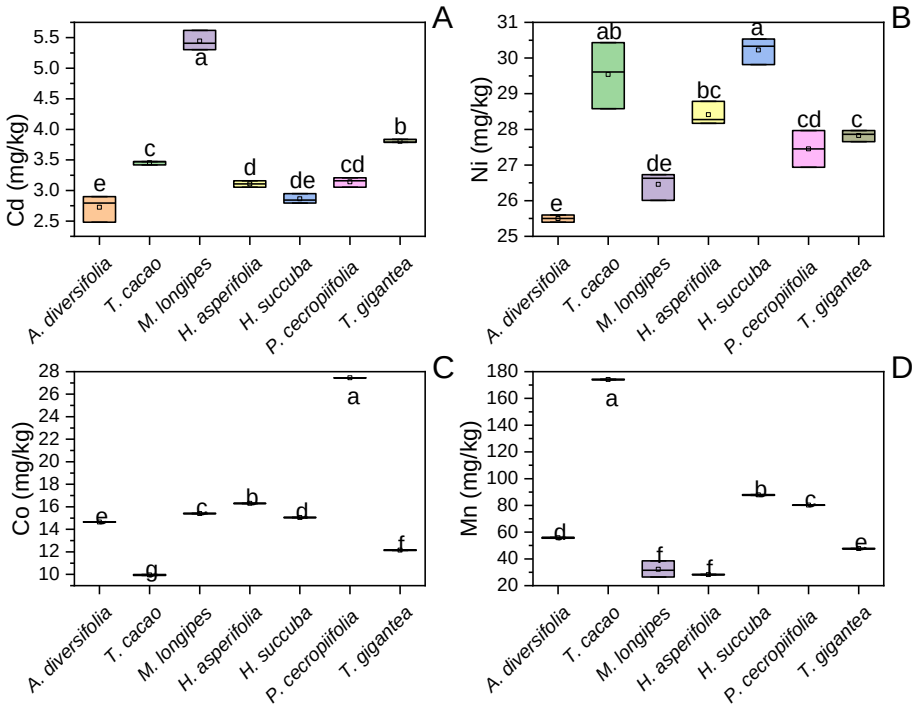

Figura 1. *Resultados del análisis de varianza (ANOVA) en cuanto a la concentración de metales pesados en tejido foliar de siete especies forestales (A) Cd, (B) Ni, (C) Co y (D) Mn. Letras desiguales indican diferencias significativas para la prueba de Tukey con un valor de p ≤ 0,05.*

A nivel de suelo, los resultados obtenidos con el análisis del ANOVA simple (p ≤0,05), mostraron diferencias significación en la capacidad de captar los diferentes metales cadmio (Ca), níquel (Ni), manganeso (Mn), cobalto (Co). La especie *T. cacao* resultó ser la especie con mayor capacidad para captar en el suelo tres de los cuatro metales estudiados, Ni con 72,8 *mg/kg*, Co con 45,9 *mg/kg* y Mn con 1607,8 *mg/kg*, mientras que las especie *A. diversifolia*, *M. longipes*, *H. asperifolia*, *H. succuba*, *P. cecropiifolia*, *T. gigantea* obtuvieron en Ni valores menores desde 70,8 *mg/kg* hasta 20,9 *mg/kg*; en Co valores menores de 39,2 *mg/kg* a 22,5 *mg/kg* y Mn con valores menores de 980 *mg/kg* a 63 *mg/kg*. En la concentración de Cd foliar la especie *T. gigantea* presentó los valores más altos con 13,4 *mg/kg*, y las demás especies mostraron niveles inferiores a 11,4 *mg/kg* (Figura 3).

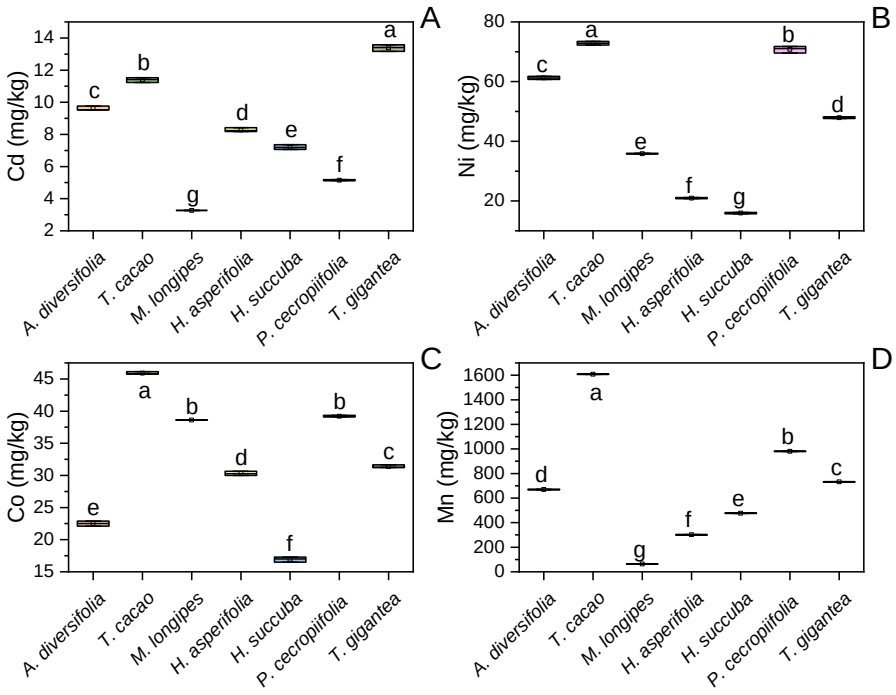

Figura 3. *Resultados del análisis de varianza (ANOVA) en cuanto a la concentración de metales pesados en el suelo de siete especies forestales (A) Cd, (B) Ni, (C) Co y (D) Mn. Letras desiguales indican diferencias significativas para la prueba de Tukey con un valor de p ≤ 0,05.*

3.2 Análisis del Factor de Bioconcentración (FBC)

Los resultados del factor de bioconcentración (FBC), mostraron que la especie *M. longipes* fue la de mayor valor en cuanto a la acumulación de Cd con 1,7 *mg/kg* y Mn con 0,5 *mg/kg* lo que indicó que sería favorable su uso para zonas con alto contenido de este metal. A sí mismo la especie *H. succuba* presentó alto potencial acumulador de Ni con 1,9 mg/kg y Co con 0,9 mg/kg haciéndolas de gran interés para usarlas como especies fitorremediadoras en áreas contaminas con Ni y Co (Figura 4).

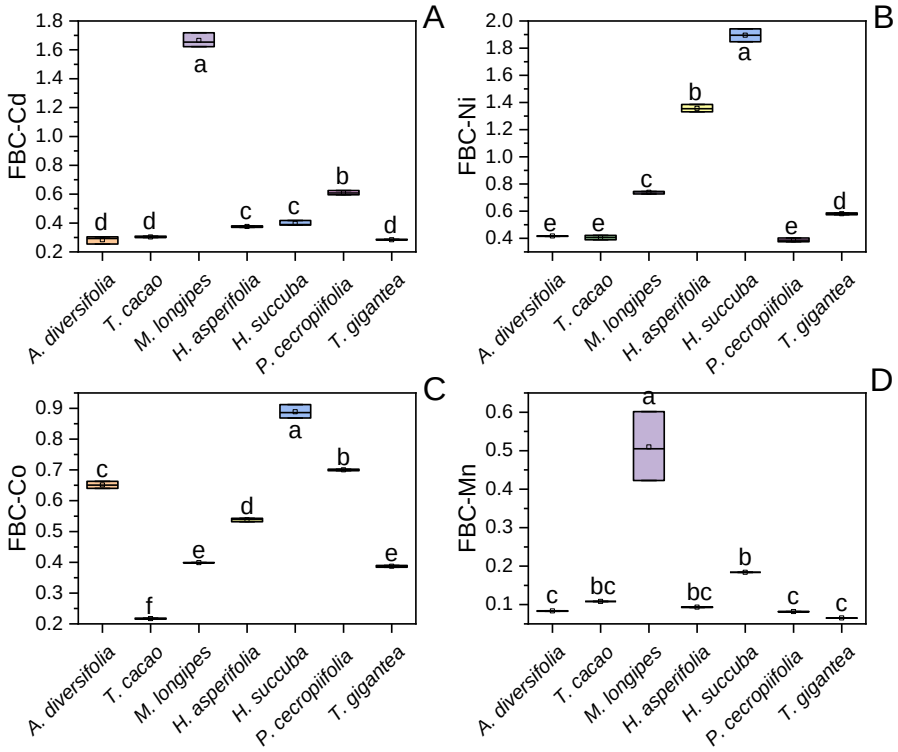

Figura 4. *Resultados del análisis de varianza (ANOVA) en cuanto al factor de bioconcentración de siete especies forestales (A) Cd, (B) Ni, (C) Co y (D) Mn. Letras desiguales indican diferencias significativas para la prueba de Tukey con un valor de p ≤ 0,05.*

3.3 Coeficiente de correlación de Pearson

La matriz de correlación de Pearson permitió reconocer las relaciones entre los metales analizados a nivel foliar, suelo y el factor de bioacumulación. Los resultados indicaron que mientras que el valor se acerca más a 1, que estuvo representado por el color rojo intenso, indicó una correlación mucho más fuerte y colores más claros una correlación débil en sentido positivo. Dentro de los resultados obtenidos referente a correlaciones positivas se encontraron Mn-F y Mn-S con un coeficiente (r = 0,88), Co-F y Co-S coeficiente no mayor al 1% (r = 0,07), Ca-S y Ni-S (r = 0,98). En las correlaciones negativas se encontró a Ni-S y Ni-F con un coeficiente de (r = -0,31) y Cd-S y Cd-F (r = -0,39), existiendo una relación muy débil entre estos metales a nivel foliar y suelo. El análisis también mostró correlaciones positivas entre los factores de bioconcentración: FBC-Cd y FBC-Mn muestran una correlación muy fuerte con un coeficiente mayor al 90% (r = 0,94); FBC-Ni y FBC-Co revelan una correlación fuerte con un coeficiente mayor al 50% (r = 0,56). En cuanto a las propiedades del suelo hubo correlación positiva

entre pH y Ni-S (r =0,74); y negativa con pH y Ni-F (r = -0,7); La MO obtuvo una mayor correlación positiva con Ni-S y negativa con Co-F. Esto indica que el pH y MO facilitan la absorción de Ni al suelo (Figura 5).

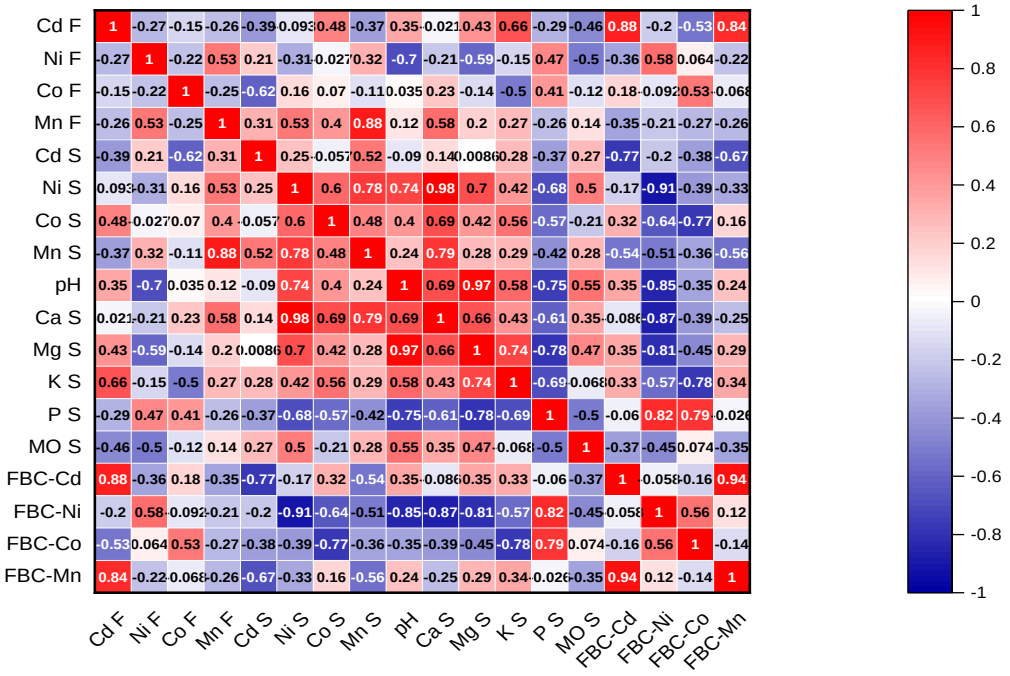

Figura 5. *Matriz de correlación de Pearson de la concentración de metales pesados Cd, Ni, Co, Mn a nivel de tejido foliar, suelo y potencial bioacumulador de siete especies forestales.*

3.4 Análisis de Clúster

A través de la técnica estadística del análisis de clúster se pudo observar la formación de cinco grupos representados por colores diferentes en función de la concentración de los metales pesados (Cd, Ni, Co, Mn) a nivel foliar. El primer grupo lo conformó Cd en las especies (*A. diversifolia, T. cacao, M. longipes, H. asperifolia, H. succuba, P. cecropiifolia, T. gigantea*) y Co en las especies (*A. diversifolia, T. cacao, M. longipes, H. asperifolia, H. succuba, T. gigantea*). El segundo grupo lo constituyó Ni en las especies (*A. diversifolia, T. cacao, M. longipes, H. asperifolia, H. succuba, P. cecropiifolia, T. gigantea*) junto con Mn en (*H. asperifolia, M. longipes*) y Co en (*P. cecropiifolia*). El tercer grupo lo conformaron Mn con las especies (*T. gigatea, A. diversifolia)*. El cuarto estuvo representado por Mn en las especies (*H. succuba, P. cecropiifolia*). El quinto y último grupo estuvo asociado a la concentración de Mn en *T. cacao* (Figura 6).

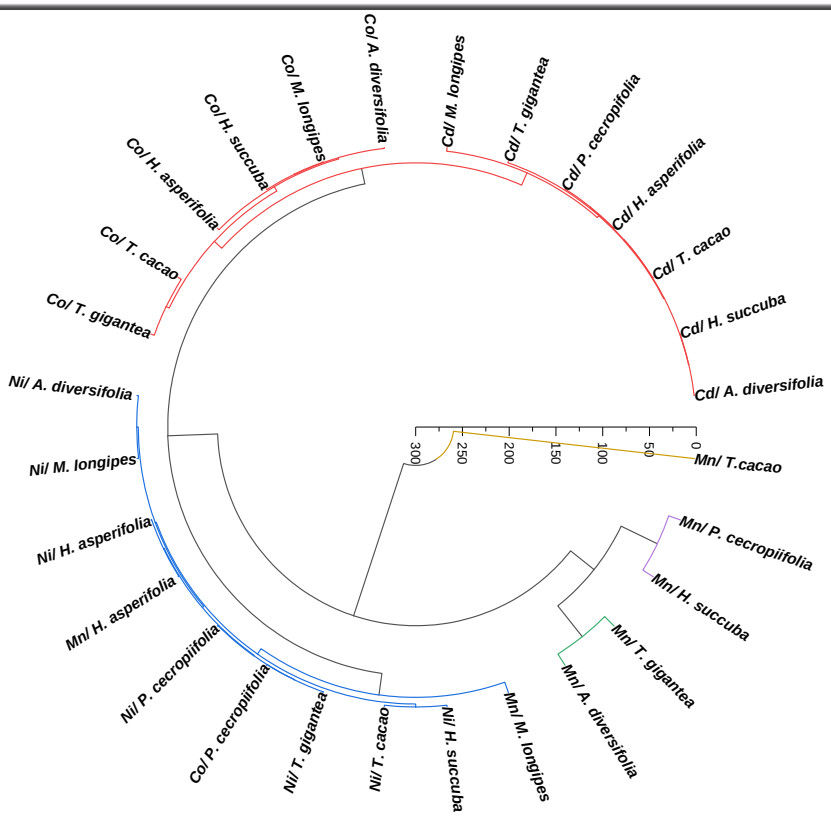

Figura 2. *Análisis de clúster a partir de la concentración de metales pesados Cd, Ni, Co, Mn a nivel foliar de siete especies forestales.*

3.5 Análisis de componentes principales (ACP)

Los resultados del análisis de componentes principales (ACP) permitió establecer la separación de las especies analizadas en dependencia de las concentraciones de metales pesados a nivel del suelo y foliar. El análisis reportó dos componentes principales, el componente principal 1 (PC1) con el 40,04% de variabilidad y el componente principal 2 (PC2) con 24,95% de variabilidad, lo que explicó el 64,99% de la variabilidad total de los datos obtenidos en la matriz. En relación con el análisis de PC1, en el lado positivo del eje 1 se encontraron dos especies: *T. cacao*, caracterizada por una mayor relación con el metal Mn en el suelo; la especie *P. cecropiifolia* presentó una mayor relación a Co y Ni en el suelo. Para el lado negativo del eje 1 se visualizó la especie *T. gigantea* con una mayor relación de Ni a nivel foliar y Cd en el suelo. En el eje 2, en el lado positivo se visualizó la especie *M. longipes* con una relación con Co y Cd a nivel foliar; en el cuadrante negativo se visualizó que las especies *A. diversifolia*, *H. asperifolia* y *H. succuba* no tienen relación con ningún metal a nivel foliar y suelo (Figura 7).

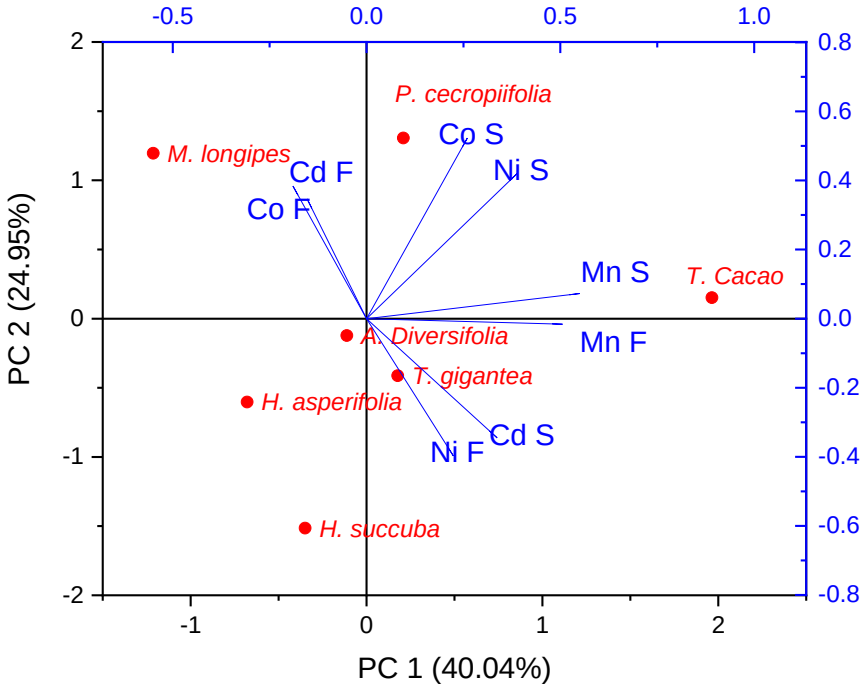

Figura 3. *Resultados del análisis de componentes principales (ACP) en relación a la concentración de metales pesados Cd, Ni, Co, Mn en el tejido foliar, suelo y el factor de bioconcentración de siete especies forestales.*

4. Discusión

Obtener información precisa sobre la capacidad de absorber a nivel foliar y captar en el suelo metales pesados como cadmio (Ca), niquel (Ni), cobalto (Co), manganeso (Mn) en seis especies forestales: *A. diversifolia, T. cacao, M. longipes, H. asperifolia, H. succuba, P. cecropiifolia, T. gigantea* permite determinar la potencialidad como especies hiperacumuladora para la remediación de sitios contaminados por la minería. El factor de bioconcentración (FBC), expresó el potencial de acumulación que tienen estas especies al concentrar metales pesados en la planta y el suelo; cuanto mayor sea su FBC, más fuerte será la acumulación de los metales pesados en cada una de las siete especies analizadas (Wang et al., 2019). Conforme a ello, se entiende que la especies *H. succuba* se perfila como especie bioacumuladora o hiperacumuladora respecto a su capacidad de capturar los metales Ni (con el valor de 1,9 *mg*/kg), Co (con 0,9 *mg*/kg) presentando dos de los valores más altos en el factor de bioconcentración; así mismo la especie *M. longipes* presentó los valores más altos en relación a su capacidad de capturar los metales Cd (con un coeficiente de 1,7 *mg*/kg) y el metal Mn (con 0,5 mg/kg). El resto de las especies como: *A. diversifolia, T. cacao, H. asperifolia, P. cecropiifolia, T. gigantea* se

destacaron por su comportamiento similar al presentar valores parejos en su potencial de captura de los metales analizados (Cd), (Ni), (Co), (Mn). De igual manera (Al-Sayaydeh et al., 2022) afirma que el uso de especies forestales, frutales, arbustivas en la fitorremediación tiene un potencial prometedor para el biomonitoreo y limpieza de áreas contaminadas por metales pesados.

Los elementos se pueden relacionar mediante grupos de asociación/similitud de forma que los objetos de un mismo grupo sean muy similares entre sí, y los diferentes sean distintos; lo que puede estar determinado por la capacidad de bioacumulación de cada especie y su propia fisiología. Una correlación positiva significativa indica una alta posibilidad de fuentes iguales o similares. Por lo tanto, (Xiao et al., 2021) menciona que al analizar las correlaciones entre los elementos de las plantas, logró identificar fuentes similares para estos elementos. Hubo una relación positiva muy fuerte entre Ni y Co, así como entre Cd y Ni, al igual que Cd y Co, Cd y Pb, y Zn y Mn fueron fuertes ($r > 0{,}01$). En contraste, las correlaciones fuertes, muy fuertes o positivas entre los metales comparados como en los metales analizados cadmio (Cd), níquel (Ni), cobalto (Co), manganeso (Mn); indicaron que estos elementos pueden derivarse de las mismas o similares fuentes y/ o estar afectados por factores similares. Además, (Méndez et al., 2003) menciona que el níquel puede formar quelatos con la materia orgánica presente en la capa superficial y formar quelatos con una solubilidad significativa y (Suazo et al., 2010) que la capacidad de biosorción de Ni se incrementa conforme el pH aumenta y fue más alta a pH 7.5. Lo que indica que pH y MO puede favorecer la absorción de Ni al suelo.

El análisis de conglomerados ordena los objetos en grupos de asociación/similitud, como lo menciona (Quinteros et al., 2012) en su estudio; reportando en este estudio cuatro grupos diferenciados. De izquierda a derecha, el primer y cuarto grupo son bien diferenciados, mientras que el segundo y el tercero presentan estrechas diferencias. En referencia al estudio presente, el grafico circular facilitó la clasificación de grupos y permitió descubrir asociaciones y estructuras de especies con metales que tienen relaciones entre sí (similitudes); con el fin de obtener informaciones sobre la posible existencia de grupos homogéneos (Alsehli, 2021), (Carrión et al., 2012), (Prócel, 2022).

Actualmente, no existe la suficiente información o estudios que mencionen la capacidad de absorción de metales pesados de las especies: *A. diversifolia, T. cacao, M. longipes, H. asperifolia, H. succuba, P. cecropiifolia, T. gigantea* para tomarlas en cuenta

como especies fitorremediadoras y disminuir el efecto de la contaminación por metales pesados. Sin embargo, pocos estudios hablan de la especie *T.* cacao, que resulta eficiente para la fitorremediación de suelos contaminados por Pb y Cd en la minería (Casteblanco, 2018), (Wilber Oc et al., 2018). También el uso de *P. cecropiifolia* en áreas contaminadas por Ni y Mn, siempre y cuando la concentración de metales pesados resultante no superan los valores máximos permisibles(Guzmán & León, 2018), (Buendía et al., 2014), (Sánchez Rodríguez & Rengifo Trigozo, 2017; Takarina & Pin, 2017). Además, una serie de investigadores han propuesto el uso de técnicas de fitorremediación para eliminar la contaminación por metales pesados, seleccionando plantas resistentes para reparar suelos contaminados (Bini et al., 2017; Domínguez et al., 2008; Jiménez et al., 2011; Wang et al., 2019; Zhan et al., 2014). Lo que conlleva un menor coste de reparación y puede aplicarse en grandes superficies, recuperar sedimentos, aguas contaminadas y eliminando los contaminantes del ambiente o haciéndolos inocuos (Salt et al., 1998), (Gamalero et al., 2009; Liu & Liu, 2015; Moore et al., 2016; Wang et al., 2019).

5. Conclusiones

La especie *H. succuba* mostró mayor capacidad de bioacumulación de Ni con un valor medio de (1,9 mg/kg), Co (con 0,9 mg/kg), así mismo *M. longipes* presentó mayor potencial bioacumulador de Cd con un valor de (1,7 mg/kg) y Mn con (0,5 mg/kg). El resto de las especies estudiadas (*A. diversifolia, T. cacao, H. asperifolia, P. cecropiifolia, T. gigantea)* presentaron comportamientos similares en su potencial de absorción de metales pesados (Cd), (Ni), (Co), (Mn). Estos resultados demostraron la utilidad de estas especies para fines de fitorremediación.

La matriz de correlación de Pearson indicó una correlación negativa en Ni- F y Ni-S y Cd-F y Cd-S y positiva en Mn-F y Mn-S; Co-F y Co-S. Esto indicó relaciones directas e inversas entre los metales pesados, lo que reflejó que estos elementos pueden derivarse de las mismas o similares fuentes y/o estar afectados por factores similares, siendo esto un dato de importancia a tener en cuenta para el uso en fitorremediación de suelos contaminados por la minería. También se pude evidenciar correlaciones positivas significativas entre pH-S y Ni-S y MO-S y Ni-S, lo que indicó que el pH y MO facilitan la absorción de Ni al suelo.

El análisis de componentes principales (ACP) reportó la respuesta diferenciada de las especies forestales en cuanto a su mayor potencial de bioacumulación de metales pesados. *P. cecropiifolia* presentó una mayor capacidad de acumular Co y Ni en el suelo; en

cambio *T. gigantea* Ni a nivel foliar y Cd en el suelo; *T. cacao* en Mn en el suelo y *M. longipes* con mayor facilidad para la absorción de Co y Cd a nivel foliar. Estos resultados son de relevancia para recomendar su uso con fines de fitorremediación en este pasivo ambiental minero metálico.

Referencias.

Al-Sayaydeh, R. S., Al-Hawadi, J. S., Al-Habahbeh, K. A., Al-Nawaiseh, M. B., Albdaiwi, R. N., & Ayad, J. Y. (2022). Phytoremediation Potential of Selected Ornamental Woody Species to Heavy Metal Accumulation in Response to Long-Term Irrigation with Treated Wastewater. *Water (Switzerland)*, *14*(13). https://doi.org/10.3390/w14132086

Alsehli, B. R. M. (2021). Evaluation and comparison between a conventional acid digestion method and a microwave digestion system for heavy metals determination in mentha samples by ICP-MS. *Egyptian Journal of Chemistry*, *64*(2), 869–881. https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2020.43322.2874.

Bavaresco. (2013). *Proceso metodológioco en la investigación (Cómo hacer un diseño de Investigación) sexta edición.* Maracaibo: Imprenta Internacional, CA. Obtenido de http://listado.mercadolibre.com.ve/_CustId_84453555

Bini, C., Maleci, L., & Wahsha, M. (2017). Potentially toxic elements in serpentine soils and plants from Tuscany (Central Italy). A proxy for soil remediation. *CATENA*, *148*, 60–66. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.014

Beretta, A. B., & Musselli, R. (2014). Measure Soil pH at Rest or Stirring the Soil: water Mixture. *Agrociencia (Uruguay)*, *18*(2), 18(2), 90-94. Obtenido de http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482014000200010&lng=es&tlng=.

Buendía, H., Cruz, F., Meza, C., & Arévalo, J. (2014). Fitorremediación De Suelos Contaminados Por Hidrocarburos De Petróleo. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, *I*(30), 114.

Bustos, Y. (2021). *Uso de plantas hiperacumuladoras en minería conceptos y aplicaciones.* Universidad Nacional de Colombia(Trabajo de grado - Maestría)., medellín-Colombia.

Calero, A. L. (2021). *Efecto cicatrizante del látex de Himatanthus sucuuba (Spruce) Woodson en ratones (Mus musculus) cepa Balb/C.* (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Nacional Mayor de San Marcos., Lima-Perú. Recuperado de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/16716/Calero_al.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carrión, C., León Ponce-de, C., Cram, S., Sommer, I., Hernández, M., & Vanegas, C. (2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (Eichhornia crassipes) en xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia*, *46*(6), 609–620.

Casteblanco, J. A. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *La Granja*, *27*(1), 21–35. https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02

Castañeda, N. (2022). *"Bioacumulación de metales en cultivo de lupinus albus l. emergentes en suelos contaminados" (Tesis de Ingeniería, Universidad privada del Norte).* Repositorio Institucional, Perú.

Corpus, M. (2018). *"Eficiencia de especies altoandinas como plantas fitorremediadoras de suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de minerales santa rosa de jangas, en condiciones de invernadero, 2015-2016" (Tesis de Ingeniería).* Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo", Huaraz, Ancash, Perú.

Correa, O., Fuentes, F., & Coral, R. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray. *Revista de la Sociedad Química del Perú, 87*(1), 87(1), 26-38. doi:http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320

Domínguez, M. T., Marañón, T., Murillo, J. M., Schulin, R., & Robinson, B. H. (2008). Trace element accumulation in woody plants of the Guadiamar Valley, SW Spain: A large-scale phytomanagement case study. *Environmental Pollution*, *152*(1), 50–59. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.05.021

Fernandéz, J. (2021). *Germinación de semilla botánica de hieronyma alchorneoides allemão utilizando tratamientos pre-germinativos químico y mecánico, San Ignacio – Perú.* (Trabajo de grado). Pontificia Universidad Nacional de Cajamarca, Jaén-Perú.

Galicia, A., Landa, L., y Cabrera, A. (2017). Reconstitución de prácticas sociales de modelación: lo lineal a partir de análisis químicos. El caso de la curva de calibración. *IE Revista de investigación educativa de la REDIECH,*, 8(15), 29-55. Recuperadoen17deagostode2023,dehttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-85502017000200029&lng=es&tlng=es.

Gamalero, E., Lingua, G., Berta, G., & Glick, B. R. (2009). Beneficial role of plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on plant responses to heavy metal stress. *Canadian Journal of Microbiology*, *55*(5), 501–514. https://doi.org/10.1139/W09-010

Gonzáles, E. (2014). Método general por microondas de digestión ácida en matrices ambientales.

Guzmán, M., & León, M. (2018). *Evaluación Del Estado Actual De Flora Y Fauna En La Concesión Minera Congüime I Regentada Por La Compañía Exploken S.a. Cantón Paquisha, Provincia De Zamora Chinchipe*. 111. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15357/1/UPS-CT007547.pdf

Jara-Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano, N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*. doi:http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9817

Jiménez, M. N., Bacchetta, G., Casti, M., Navarro, F. B., Lallena, A. M., & Fernández-Ondoño, E. (2011). Potential use in phytoremediation of three plant species growing

on contaminated mine-tailing soils in Sardinia. *Ecological Engineering*, *37*(2), 392–398. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.030

Jiménez-Oyola, S., Chavez, E., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Bolonio, D., Guzmán-Martínez, F., García-Garizabal, I., & Romero, P. (2021). Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *224*. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112629

Kidd, P., Becerra Castro, C., García Lestón, M., y Monterroso, C. (2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género Alyssum L.: . *Ecosistemas,*, 16(2). https://doi.org/Recuperado a partir de https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/126

Liu, Z., & Liu, S. (2015). [Development of bioremediation in China--a review]. *Sheng wu gong cheng xue bao = Chinese journal of biotechnology*, *31*(6), 901–916.

Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *14*(2), 145. https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153

Mauricio, R. (9 de Agosto de 1997). *Investigacion agropecuaria para el desarrollo rural.* Articulo 37: https://lrrd.cipav.org.co/lrrd9/4/mauro942.htm

Medina, K., & Montano, Y. (2014). Determinación del factor de Bioconcentración y Traslocación de metales pesados en el Juncus arcticus Willd. y Cortaderia rudiuscula Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza - Ancash 2013. *Repositorio Institucional UNASAM.* Huaraz-Ancash-Perú. Obtenido de http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1775.

Méndez, Blanquer, García, y Marqués. (2003). Relación estadística entre metales pesados y propiedades de suelos de cultivo regados con aguas residuales no depuradas. *INCI [Internet].*, 28(5): 281-286. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442003000500007&lng=es.

Mendoza, Parra, Almao, & Rodríguez. (2014). Evaluación de dos métodos de digestión ácida en el análisis de tejido foliar de caña (Saccharum officinarum L.). *Revista Ciencia y Tecnología*, 7(2): 9-20.

Moore, F., Dehbandi, R., Keshavarzi, B., & Amjadian, K. (2016). Potentially toxic elements in the soil and two indigenous plant species in Dashkasan epithermal gold mining area, West Iran. *Environmental Earth Sciences*, *75*(3), 268. https://doi.org/10.1007/s12665-015-5026-y

Ortega, H., Adalverto, B., Arteaga, R., & Alejandro, Z. (2003). *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*.

Paz, D., Escobar, K., & Jiménez, S. (2022). Evaluación de la calidad del suelo en núcleos poblados cercanos a la zona minera aurífera de Ponce Enríquez. *Enfoque UTE*, *13*(04), 13(4), 29-38. doi:https://doi.org/10.29019/enfoqueute.811

Prócel, M. (2022). La eficiencia financiera en empresas exportadoras a través del método combinado de análisis de conglomerados y análisis discriminante multivariado. In *Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Ambato*.

Quiroz, J. (2019). *"Efecto del ácido giberélico en la germinación de semilla de Hieronyma asperifolia Pax & K. Hoffm. (Chupica)".* (Trabajo de grado) Pontificia Universidad Nacional de Cajamarca, Jaén-Perú.

Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, *49*(1), 643–668. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.643

Seebaluck, R., Gurib-Fakim, A., y F. Mahomoodally. (15 de enero de 2015). Medicinal plants from the genus Acalypha (Euphorbiaceae)–A review of their ethnopharmacology and phytochemistry,. *Journal of Ethnopharmacology,, 159*, 137-157. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.10.040.

Sanmiguel, T. J., & Guerrero, C. S. (2017). *Validación del método para determinar Pb, Cd, Ni por espectrometría de absorción atómica de llama en agua y suelo.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Orellana-Ecuador.

Sánchez Rodríguez, M., & Rengifo Trigozo, J. P. (2017). Evaluación del contenido de metales pesados (Cd y Pb) en diferentes edades y etapas fenológicas del cultivo de cacao en dos zonas del Alto Huallaga, Huánuco (Perú). *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, *1*(1), 87. https://doi.org/10.25127/aps.20171.356

Soria-Maldonado, y Romero, C. (2022). La minería ilegal y sus efectos en la vulneración de los derechos de la naturaleza. *Revista Científico-Académica Multidisciplinaria*. https://doi.org/10.23857/pc.v7i4.3910

Souza, P. A., Moreira, L. F., Sarmento, D. H., y Franciscleudo B. da Costa. (2018). Cacao—Theobroma cacao, *Academic Press*, 69-76. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00010-1

Suárez, P. L. (2021). *Las consecuencias de la minería ilegal en Colombia a través del análisis de datos: caso departamento de Chocó.* Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá-Colombia. https://doi.org/http://hdl.handle.net/10654/39362

Suazo, Morales, Cristiani, y CristianiUrbina. (2010). Efecto del pH sobre la biosorción de níquel (II) por Saccharomyces cerevisiae var. ellipsoideus. *Revista CENIC. Ciencias Químicas,, vol. 41,*, pp. 1-12.

Takarina, N. D., & Pin, T. G. (2017). Bioconcentration Factor (BCF) and Translocation Factor (TF) of Heavy Metals in Mangrove Trees of Blanakan Fish Farm. *Makara Journal of Science*, *21*(2). https://doi.org/10.7454/mss.v21i2.7308

Torres, S. A. (2018). *Factor de bioconcentración y traslocación de especies altoandinas para suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de MESAPATA, en condiciones de invernadero, 2015 - 2016.* Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo", Perú.

Wang, Z., Liu, X., & Qin, H. (2019). Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, *200*.

https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.02.005.

Walkley, A., & Black, I. (1934). Un examen del método Degtjareff para determinar la materia orgánica del suelo y una modificación propuesta del método de titulación del ácido crómico. *Ciencia del suelo*, 37 (1), 29-38.

Wilber Oc, L., Saavedra Gonza, C. J., Wagner Guzmán, C., & Mondragón Pariente, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (Theobroma cacao) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal Del Perú*, *33*(1), 63–75. http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1156/pdf_29.

Xiao, J., Han, X., Sun, S., Wang, L., & Rinklebe, J. (2021). Heavy metals in different moss species in alpine ecosystems of Mountain Gongga, China: Geochemical characteristics and controlling factors. *Environmental Pollution*, *272*. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115991.

Yadav, K. K. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: a review on application and future prospects. En Elsevier, *Ecological Engineering 120.* (págs. 274-298.). William J. Mitsch.

Zhan, H., Jiang, Y., Yuan, J., Hu, X., Nartey, O. D., & Wang, B. (2014). Trace metal pollution in soil and wild plants from lead–zinc smelting areas in Huixian County, Northwest China. *Journal of Geochemical Exploration*, *147*, 182–188. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.10.007.

Anexos

Marco Teórico

Minería

La minería se ha convertido en un problema muy arduo y difícil de controlar a lo largo del tiempo, tanto en países desarrollados como subdesarrollados donde cada día crece de manera exponencial, afectando a la economía y a nivel ecológico, llegando al punto que, en varias ocasiones, no permita tomar asuntos de control y organizar planes de manejo que reduzcan el impacto ambiental producido y frenar dichas actividades (Suárez, 2021). El interés por el oro a gran escala fortaleció verdaderas empresas sin control, su ilegalidad trae consecuencias destructivas hacia el ecosistema y al ambiente de sectores cercanos a las minas (Soria-Maldonado y Romero, 2022).

La minería de oro artesanal se encuentra entre los principios más significativos de metaloides en los ecosistemas, lo que provoca un gradiente alto de contaminación. Esto se ha expandido hasta los países en desarrollo donde las regulaciones ambientales ineficientes o inexistentes empeoran el problema. Este hecho es exclusivamente preocupante en Ecuador ya que la minería ilegal y descontrolada ha producido una severa contaminación ambiental, principalmente en cuanto a descargas de elementos

potencialmente tóxicos. Los metales pesados presentes en los desechos mineros se liberan fácilmente a muchos medios ambientales con efectos potencialmente adversos sobre la salud humana y los ecosistemas (Jiménez-Oyola et al., 2021).

Bioacumulación de metales

La bioacumulación es el proceso mediante el cual los metales pesados son absorbidos por los organismos y se acumulan en sus tejidos a lo largo del tiempo, a concentraciones mayores que las presentes en el medio ambiente cambiante. Esto puede tener efectos adversos en la salud humana y el equilibrio ecológico, ya que los metales pesados pueden afectar la función de los sistemas biológicos esenciales y causar daños en órganos como el hígado, los riñones y el sistema nervioso (Birnin-Yauri, 2018).

En ambientes tropicales que permite ser una actividad cotidiana en la minería, los organismos se exponen de manera crónica a elevadas cantidades de contaminantes las cuales provocan la muerte de una o varias especies; sin embargo, sufren alteraciones a niveles moleculares que se traducen en cambios estructurales y funcionales. En general, para la mayoría de los organismos la exposición a metales pesados por encima de un valor umbral puede ser extraordinariamente tóxico, siendo el Zn, Co, Cd, Ni entre otros los de mayor relevancia ecotoxicológica (Argota et al., 2012).

Metales pesados en organismos vegetativos

Esta diversidad de elementos afecta tanto al tipo de suelo y a la planta, los cuales se encuentran sometidos a concentración críticas de toxicidad. Lógicamente, el tipo y composición del suelo, las características de las sustancias orgánicas e inorgánicas y su poder quemante, el valor y márgenes de pH y la especiación química, así como las interacciones suelo/planta ocupan un lugar central en las relaciones de disponibilidad, toxicidad y respuestas de las plantas al estrés por metales. El síntoma más característico de la toxicidad por metales pesados es la reducción del crecimiento radicular. Dado que las membranas y la pared celular son potencialmente el blanco de acción inicial que comporta cambios en las propiedades de semipermeabilidad y de transporte, en un caso, y de extensibilidad y crecimiento en otro, se comprende la multiplicidad de procesos fisiológicos que secundariamente afectan a todo tipo de estrato vegetativo (Barceló & Poschenrieder, 1992), (Londoño Franco et al., 2016).

Fitorremediación

La fitorremediación representa una tecnología alternativa para la restauración de ambientes y efluentes contaminados. Es una tecnología de bajo costo, puesto que no

requiere de infraestructura sofisticada. Puede implementarse *in situ* para remediar grandes extensiones de áreas contaminadas o para tratar grandes volúmenes de aguas diluidas, es decir, con bajas concentraciones de contaminantes. En general, es una tecnología barata, simple, sustentable, compatible con el ambiente y estéticamente más agradable que las tecnologías convencionales (Bernal et al., 2007). Se ha convertido en una tecnología aplicable, eficiente para remover, transformar o degradar diversos tipos de contaminantes. En el caso de metales pesados, la fitorremediación puede ser más eficiente cuando se incrementa la biodisponibilidad del metal por la adición de agentes extractantes, que forman complejos solubles fácilmente asimilados por las plantas. Asimismo, el uso de plantas genéticamente modificadas, con mayor tolerancia y capacidad de acumulación, puede representar otra opción viable para aumentar la eficiencia de la fitorremediación (Aurelio et al., 2004).

Especies hiperacumuladoras

Algunos estudios recientes sugieren que la acumulación inusual de metales confiere a estas plantas la capacidad de limitar su depredación y las infecciones microbianas causantes de enfermedades vegetales. Hasta la actualidad, se han identificado aproximadamente 400 especies hiperacumuladoras, distribuidas entre familias y especies. No obstante, la lista sigue creciendo. Muchas especies toleran las elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y/o translocación hacia las hojas, lo que les permite mantener concentraciones constantes y relativamente bajas en la biomasa aérea independientemente de la concentración metálica del suelo en un intervalo amplio. Sin embargo, otras absorben los metales activamente a partir del suelo y los acumulan en formas no tóxicas en su biomasa aérea (estrategia acumuladora) (Kidd et al., 2007), (Bustos, 2021).

Descripción de las características ecológicas de las especies forestales

- *Pourouma cecropiifolia* (Ubilla de monte)

Perteneciente a la familia de las Urticaceae, comúnmente llamado caimarón o uvilla, es una especie de árbol frutal originario de la selva amazónica (norte de Bolivia, oeste de Brasil, sudeste de Colombia, este de Ecuador, este de Perú, sur de Venezuela), que produce una fruta denominada caimarona o uva de monte. Los amerindios la cultivan, desde mucho antes de la llegada de los españoles y portugueses a América. Aún es posible encontrar variedades silvestres. Tiene de 12 a 15 m. El tronco es cilíndrico, delgado, con copa, corteza gris provista de anillos. Sus hojas son alternas, profundamente lobuladas,

compuestas. Flores blancas juntas en una inflorescencia; su fruto ovoide, la pulpa es blancuzca, dulce y jugosa y envuelve una semilla. Se consume directamente como fruta o se utiliza en la preparación de bebidas refrescantes o en la fabricación de néctares, jaleas, mermeladas y vino. Se desarrolla en zonas húmedas no inundables con precipitación anual entre 1.000 y 3.400 mm, a menos de 1.200 msnm con temperaturas entre 17 y 25 °C (Huxley et al., 1992).

- *Trichantera gigantea* (Nacedero)

  Un árbol de la familia de las Acanthaceae y aparentemente es originario de las estribaciones andinas de Colombia, pero también se encuentra a lo largo de arroyos y en áreas pantanosas desde Costa Rica hasta el norte de Sudamérica y en bosques húmedos desde América Central hasta Perú y la cuenca del Amazonas, siendo también bastante común en ciertas islas del estuario del Amazonas. Es un árbol forrajero muy prometedor para una amplia gama de ecosistemas (Mauricio, 1997).

  (Suárez & Milera, 2012) describen al nacedero como un árbol mediano que alcanza 4-12 m de altura y copa de 6 m de diámetro, muy ramificado; sus ramas poseen nudos muy pronunciados. Sus flores, de color ocre, dispuestas en racimos terminales, son acampanadas y poseen anteras pubescentes (de ahí el nombre de su género) que sobresalen de la corola. El fruto es una cápsula redonda con varias semillas orbiculares blancas. Crece en suelos profundos, aireados y de buen drenaje, tolera valores de pH ligeramente ácidos (6,0) y bajos niveles de fósforo y otros elementos asociados a los suelos de baja fertilidad.

- *Myriocarpa longipes* (Ortiga silvestre)

  Esta especie pertenece a la familia de las Urticaceae. Es una planta leñosa originaria de América Central y del Sur que varía en tamaño desde un arbusto hasta un árbol pequeño (de 2 a 12 m de altura) y se distinguen por ser dioicas o raramente monoicas. Tiene hojas ovaladas u ovaladas y presenta inflorescencias, los ejemplares son unisexuales, y la especie es común en zonas con suelo alterados. Debido a los grandes cambios en el entorno ecológico, la especie está ampliamente distribuida por todo el país, principalmente a una altitud de 0 a 800 metros, la más alta a una altitud de 800 a 1500 metros (WFO, 2023).

- *Hieronyma asperifolia* (Motilón)

  Pertenece a la familia de las Euphorbiaceae, es una especie forestal de gran valor comercial, endémica de la zona del bosque de neblina “Señor de Huamantanga”, muy

utilizada por los agricultores en sus diversos usos como madera en construcciones de viviendas (vigas, cintas), postes para cercos de invernas y de fincas cafetaleras); así mismo, el fruto, por su sabor agradable, es consumido como fruta fresca y por sus propiedades antioxidantes, es consumida como bebida macerada en alcohol etílico; sin embargo, la deforestación masiva y la agricultura migratoria ha incrementado la extinción progresiva de esta especie debido a la escasa regeneración natural. Especie de porte arbóreo de hasta 20 m de altura, dioico con indumento lepidoto. Hojas enteras, pinnatenervias, coriáceas, con nervaduras arqueadas hacia el margen, presencia de estípulas, posee diámetros de hasta 1.7 m. Fuste: recto y cilíndrico y gambas bien desarrolladas. Copa: amplia, densa, con múltiples ramas ascendentes. Las ramas inferiores tienen extremos terminales descendentes. Corteza: la externa de color pardo rojizo o gris claro, con 23 desprendimiento en láminas delgadas que exponen la corteza interna de color rosado o rojizo. (Quiroz, 2019), (Fernandéz, 2021).

- *Himatanthus sucuuba* (Bellaco caspi)

  Es un árbol que pertenece a la familia de las Apocynaceae de selva tropical que crece de 8 a 16 m de altura con una corona piramidal alta y angosta. El tronco tiene 30-40 cm de diámetro con corteza moteada áspera. El árbol produce flores blancas perfumadas y una vaina de semillas de 20 cm con numerosas semillas aladas en su interior. Las hojas son de color verde brillante y de unos 25-30 cm de largo por 3-5 cm de ancho. Cuando las hojas se rompen de sus tallos y los tallos se rompen de las ramas, se exuda un látex blanco lechoso (Calero, 2021).

- *Acalypha diversifolia* (Arenillo-Arbustivo)

  Acalypha es el cuarto género más grande de la familia Euphorbiaceae. En algunas citas, se ha informado que este género abarca unas 450 especies, mientras que algunos informes mencionan que consta de unas 570 especies. Aproximadamente 65 especies *de Acalypha* se encuentran en África tropical y Madagascar, mientras que unas 35 especies se encuentran en otras islas del Océano Índico. Abarca arbustos, árboles y plantas anuales de hoja perenne de regiones tropicales a subtropicales, principalmente en los trópicos de África, América y Asia. La tribu está compuesta por varios grupos de plantas económicas, ecológicas y ornamentales. Las hojas son suculentas con tallos llenos de savia que tienden a perder la savia con la edad. Son alternos, estipulados y se caracterizan por tener bordes aserrados, nervios y nervios centrales evidentes. Las flores estaminadas tienen de 4 a 8 estambres y anteras vermiformes. Las flores pistiladas suelen ser

prominentemente bracteadas con 3 sépalos, 3 carpelos y 1 óvulo por carpelo y estilos divididos (Seebaluck et al., 2015).

- *Theobroma cacao* (Cacao-Arbustivo)

  Es un Árbol que pertenece a la familia Malvaceae, de pequeña talla, perennifolio, de 4 a 7 m de altura (cultivado), pero en condiciones silvestre puede crecer hasta 20 m o más, presenta hojas grandes, alternas, colgantes, elípticas u oblongas, presentan muchas flores color rosa, púrpura y blanca en racimos a lo largo del tronco y de las ramas. El fruto una baya grande comúnmente denominada "mazorca" de 15 a 30 cm de largo por 7 a 10 cm de grueso contiene en general entre 30 y 40 semillas (Velasco Alonso & Reynaldo, 1987). Según (Souza et al., 2018) El cacao es originario de las selvas tropicales de América desde Perú hasta México. Aproximadamente el 80% del cacao está contenido en la cáscara, mientras que el 20% restante está formado por semillas, pulpa y otros componentes. El cacao se utiliza principalmente en la producción de chocolate. Otros productos como la cosmética también utilizan esta fruta como ingrediente. En la industria del chocolate, el proceso comienza con la cosecha de la fruta, la eliminación de la pulpa y las semillas, la fermentación (una serie de reacciones que conducen a la creación del sabor y aroma del chocolate), el secado y el tostado.