



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

DECANATO DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN SILVICULTURA CON MENCIÓN EN MANEJO Y
CONSERVACIÓN DE RECURSOS FORESTALES**

**PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
Y/O DESARROLLO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER
EN SILVICULTURA**

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS EN TRES ESPECIES
FORESTALES EN UN ÁREA DE EXTRACCIÓN MINERA, YUTZUPINO -
PROVINCIA DE NAPO**

AUTORA:

VIVIANA DEL ROCÍO CHICO CAIZA

DIRECTOR:

PhD. YUDEL GARCIA QUINTANA

PUYO – ECUADOR

2022-2023

FORMATO DP-UT-013A: DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, VIVIANA DEL ROCÍO CHICO CAIZA con cédula de identidad 1600451916, declaro ante las autoridades educativas de la Universidad Estatal Amazónica, que el contenido del Proyecto con componentes de Investigación y/o Desarrollo titulado: “POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS EN TRES ESPECIES FORESTALES EN UN ÁREA DE EXTRACCIÓN MINERA, YUTZUPINO - PROVINCIA DE NAPO”, es absolutamente original, auténtico y personal.

En tal virtud y según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente, certifico libremente que los criterios y opiniones que constan en el Proyecto de Titulación con componentes de Investigación y/o Desarrollo son de exclusiva responsabilidad de la autora; y que los resultados expuestos pertenecen a la Universidad Estatal Amazónica.

VIVIANA DEL ROCÍO CHICO CAIZA

C.I. 1600451916

AUTOR

FORMATO DP-UT-013B: CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO FINAL DE TITULACIÓN

EL TRIBUNAL DE EVALUACIÓN DEL PROYECTO TITULACIÓN CON COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DESARROLLO

CERTIFICA QUE:

El presente trabajo “POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS EN TRES ESPECIES FORESTALES EN UN ÁREA DE EXTRACCIÓN MINERA, YUTZUPINO - PROVINCIA DE NAPO”, bajo la responsabilidad de la egresada VIVIANA DEL ROCÍO CHICO CAIZA, ha sido meticulosamente revisado, autorizando su presentación:

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

PhD. BRAVO MEDINA CARLOS ALFREDO
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

PhD. RADICE MATTEO
MIEMBRO 1 DEL TRIBUNAL

PhD. BRAVO SÁNCHEZ LUIS RAMÓN
MIEMBRO 2 DEL TRIBUNAL

FORMATO DP-UT-011: AVAL DEL DIRECTOR DE TRABAJO TITULACIÓN

MAESTRÍA EN SILVICULTURA	
MENCIÓN MANEJO Y CONSERVACION DE RECURSOS FORESTALES	
COHORTE: III	FECHA ELABORACIÓN: 16-11-2022
INFORME FINAL Y AVAL	
<p>Quien suscribe, Yudel García Quintana, portador de la cédula de identidad número: 1757016231, en calidad de Director del trabajo de titulación denominado: “POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS EN TRES ESPECIES FORESTALES EN UN ÁREA DE EXTRACCIÓN MINERA, YUTZUPINO - PROVINCIA DE NAPO”, opción Proyecto de trabajo de titulación con componentes de investigación aplicada y/o desarrollo, a cargo del/la maestrante VIVIANA DEL ROCÍO CHICO CAIZA, portador del número de cédula de identidad: 1600451916, certifico haber acompañado y revisado el documento entregado a mi persona, considero que cumple con los objetivos planteados, los lineamientos y orientaciones establecidas en la normativa vigente de la institución.</p> <p>Por lo antes expuesto se avala el trabajo de titulación para que sea presentado para la sustentación correspondiente.</p>	

ELABORADO POR:
Dr. Yudel García Quintana CI: 1757016231 DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

FORMATO DP-UT-013C: CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD EN EL SISTEMA ANTIPLAGIO

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD EN EL SISTEMA ANTIPLAGIO

Quien suscribe el presente Dr. Yudel García Quintana con CI: 1757016231, certifica que el Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo titulado: **“POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS EN TRES ESPECIES FORESTALES EN UN ÁREA DE EXTRACCIÓN MINERA, YUTZUPINO - PROVINCIA DE NAPO.”** ha sido examinado a través del sistema Antiplagio _____ y presenta un porcentaje de similitud del ____%

En el cantón Pastaza, a los _____ días del mes de _____ del 20_____

Dr. Yudel García Quintana

DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

Agradecimiento

Quiero expresar mi agradecimiento sincero a la Universidad Estatal Amazónica por brindarme la oportunidad de estudiar esta Tercera Cohorte de la Maestría en Silvicultura, además de ayudarme a y ser perseverantes en cada una de las etapas de formación para la obtención del título de Magister.

A mi Tutor y sabio consejero el Doctor Yudel García quien siempre ha sido un apoyo fundamental en mi formación profesional e incluso ha impulsado mi carrera al área científica con la guía en este proyecto innovador que permite apreciar, valorar y rescatar los recursos del Ambiente desde una perspectiva nueva de respeto y armonía.

Al Doctor Yasiel Arteaga quien ha sido una persona ejemplo de superación personal, que con su apoyo, paciencia y constancia me han animado a seguir adelante como persona y ser humano.

Agradezco a todos mis docentes de la UEA que sin duda alguna sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes mis profesores queridos, les debo mis conocimientos. Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a:

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy.

A mis padres Mario y Beatriz quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis queridos hijos Emily y Jared quienes se han forjado como el motor, el impulso que mi vida necesita para levantarme en las más duras pruebas de la vida; y de la mano de mi esposo John Veliz he tenido en quien apoyarme y compartir derrotas y triunfos.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad es cada vez más importante orientar estudios para la identificación de especies fitorremediadoras que disminuyan la contaminación por metales pesados producto de la actividad minera. Esta investigación se realizó con el objetivo de evaluar el potencial bioacumulador de metales pesados en *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris* en un área de extracción minera, en la comunidad Yutzupino, Napo. Para ello se recolectaron muestras de hoja y suelo de tres especies y se determinó la concentración de metales pesados de Cd, Pb, Ni y Fe, mediante espectrometría de absorción atómica, y el factor de bioconcentración (FBC). La concentración de metales pesados en hojas, demostraron la potencialidad de *B. vulgaris* para la acumulación foliar de Ni y Fe con valores medios de 6,89 y 156,33 mg/kg respectivamente y de *P. discolor* para Cd y Pb con valores de 0,35 y 55,67 mg/kg respectivamente. La concentración de metales pesados en suelo mostró diferencias significativas, existiendo un patrón de variación a nivel de especies, con un comportamiento superior en Cd, Ni y Pb para *B. vulgaris* y Fe para *O.pyramidale*. Se demostró la capacidad de bioacumulación de metales pesados de Cd, Ni, Fe y Pb de las especies *P. discolor*, *B. vulgaris* y *O.pyramidale*, obtenido a partir del factor de bioconcentración (FBC), lo que facilita su inclusión como especies fitorremediadoras para áreas contaminadas por las prácticas de extracción minera en la comunidad Yutzupino.

Palabras clave: Metales pesados, fitorremediación, contaminación

Abstract

Currently, it is increasingly important to guide studies for the identification of phytoremediation species that reduce contamination by heavy metals resulting from mining activity. This research was carried out with the objective of evaluating the bioaccumulator potential of heavy metals in *O. pyramidale*, *P. discolor* and *B. vulgaris* in an area of mining extraction, in the Yutzupino community, Napo. For this, leaf and soil samples of the three species were collected and the concentration of heavy metals of Cd, Pb, Ni and Fe was determined by atomic absorption spectrometry, and the bioconcentration factor (BCF). The concentration of heavy metals in leaves demonstrated the potential of *B. vulgaris* for foliar accumulation of Ni and Fe with mean values of 6.89 and 156.33 mg/kg respectively, and of *P. discolor* for Cd and Pb with values of 0.35 and 55.67 mg/kg respectively. The concentration of heavy metals in soil showed significant differences, existing a pattern of variation at the species level, with a higher behavior in Cd, Ni and Pb for *B. vulgaris* and Fe for *O.pyramidale*. The bioaccumulation capacity of heavy metals of Cd, Ni, Fe and Pb of the species *P. discolor*, *B. vulgaris* and *O.pyramidale*, obtained from the bioconcentration factor (BCF), was demonstrated, which facilitates their inclusion as species phytoremediators for areas contaminated by mining practices in the Yutzupino community.

Keywords: Heavy metals, phyoremediation, contamination

Tabla de contenidos

Agradecimiento	6
Dedicatoria.....	7
RESUMEN EJECUTIVO	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras	13
CAPÍTULO I.....	16
1.1. PROBLEMA CIENTÍFICO	18
1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN O IDEAS A DEFENDER	19
1.3. OBJETIVOS	19
1.4. OBJETIVO GENERAL	19
1.5. Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO II.....	20
2.1. La contaminación.....	20
2.2. Contaminantes	20
2.2.1. Tipos de agentes contaminantes	21
2.3. Contaminantes metálicos	23
2.3.1. Contaminación por cadmio.....	23
2.3.2. Contaminación por cobre.....	24
2.3.3. Contaminación por plomo	24
2.4. Minería a nivel mundial.....	24
2.5. Minería en Ecuador.....	25

2.6.	Contaminación minera en Napo	27
2.7.	Descripción botánica de las especies	27
2.7.1.	<i>Ochroma pyramidale</i> (Balsa)	27
2.7.2.	<i>Piptocoma discolor</i> (Pigüe).....	29
2.7.3.	<i>Bambusa vulgaris</i> (Bambú).....	30
2.8.	Propiedades del potencial bioacumulador en especies forestales.	31
CAPÍTULO III.		33
3.1.	LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	33
3.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	34
3.3.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	34
3.4.	TRATAMIENTO DE DATOS	35
3.5.	RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES	38
3.5.1.	Recursos Humanos	38
3.5.2.	Material de campo	38
3.5.3.	Material de oficina.....	38
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		40
5.1.	Conclusiones.....	50
5.2.	Recomendaciones	51
BIBLIOGRAFÍA.....		52
ANEXOS.....		63

Índice de tablas

Tabla 1. Información taxonómica de <i>O. pyramidale</i>	28
Tabla 2. Información taxonómica de <i>P. discolor</i>	30
Tabla 3. Información taxonómica de la especie <i>B. vulgaris</i>	31

Índice de figuras

Figura 1. Imagen de la especie <i>O. pyramidale</i> (Cav. Ex. Lam.) Urb. (Balsa).....	28
Figura 2. Imagen de la especie <i>P. discolor</i> (Kuth) Pruski) (Pigüe).....	29
Figura 3 Imagen de la especie <i>B. vulgaris</i>	30
Figura 4. Ubicación geográfica del área de estudio perteneciente a la comunidad Yutzupino, Napo.	33
Figura 5. Ubicación geográfica de los puntos de toma de muestras en el área de estudio (comunidad Yutzupino, Napo).	34
Figura 6. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) de la concentración de los metales pesados (a) Cd, (b) Ni, (c) Pb y (d) Fe, presentes en hojas de las especies <i>O. pyramidale</i> , <i>P. discolor</i> y <i>B. vulgaris</i>	41
Figura 7. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) de la concentración de los metales pesados (a) Cd, (b) Ni, (c) Pb y (d) Fe, presentes en el suelo donde se desarrollaron las especies <i>O. pyramidale</i> , <i>P. discolor</i> y <i>B. vulgaris</i>	43
Figura 8. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) para el factor de bioconcentración de pesados (a) Cd, (b) Ni, (c) Pb y (d) Fe, de las especies <i>O. pyramidale</i> , <i>P. discolor</i> y <i>B. vulgaris</i>	45
Figura 9. Correlación entre la concentración de metales pesados en las hojas de las especies analizadas y el suelo (el valor numérico corresponde al coeficiente de correlación de Pearson).	46
Figura 10. Análisis de clúster a partir de la concentración de metales pesados (Cd, Ni, Pb y Fe) en hojas de las especies <i>O. pyramidale</i> , <i>P. discolor</i> y <i>B. vulgaris</i>	47

Figura 11. Resultados del análisis de PCA de las concentraciones de metales pesados (Cd, Ni, Pb y Fe) en hojas, suelo y factor de bioconcentración de tres especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*..... 49

Índice de anexos

Anexo 1. Actividad minera en la comunidad Yutzupino	63
Anexo 2. Toma de muestras de <i>O. pyramirale</i>	64
Anexo 3. Toma de muestras de <i>B. vulgaris</i>	65
Anexo 4. Toma de muestras de <i>P. discolor</i>	66
Anexo 5. Valores medios de metales pesados	67

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

A fines del siglo XVIII se produjo la revolución industrial, la cual trajo consigo una transformación económica, social y tecnológica donde se inician los procesos de producción utilizando materiales que eliminaban contaminantes al entorno. La contaminación ambiental es una actividad inherente al ser humano, desde épocas muy antiguas los residuos producidos por este se eliminaban al medio ambiente; a través de la historia el hambre, la enfermedad y la muerte eran infortunios colectivos frecuentes, provocados por cambios climáticos y ecológicos desfavorables, así como por la agresión de otras fuerzas naturales muchas veces incomprensibles e imprescindibles por el estado primitivo del conocimiento y de la técnica (Leon, 2019).

Una de las consecuencias más negativas de la revolución industrial ha sido la dispersión de contaminantes en aire, agua y suelo (Vullo, 2003; Becerril et al., 2007; Navarro et al., 2007). El suelo es el medio más estático donde los contaminantes pueden permanecer durante mucho tiempo, esta permanencia a largo plazo es especialmente grave en el caso de contaminantes inorgánicos como los metales pesados que no pueden ser degradados (Becerril et al., 2007; Azpilicueta et al., 2010; Martí et al., 2011).

En la actualidad la contaminación de suelos y tejidos foliares por metales pesados producto de la actividad minera constituye uno de los problemas ambientales más serios provocados fundamentalmente por la actividad antrópica. De ahí, que los estudios del potencial bioacumulador de especies forestales resultan una herramienta factible para aportar con soluciones a esta problemática.

Los metales pesados se encuentran naturalmente presentes en el medio ambiente, en concentraciones que generalmente no dañan las diferentes formas de vida, mientras que los que provienen de actividades antropogénicas como la contaminación industrial, tecnológica, agrícola, minera y el mal uso de los suelos por diversos fertilizantes químicos pueden elevar los niveles de concentración en relación a los parámetros normales. Estos contaminantes se incorporan a los ríos, hortalizas, animales y alimentos, alterando así la sostenibilidad de la cadena alimentaria, presentando riesgos potenciales para la naturaleza y la sociedad, ya que causan graves problemas de salud humana y animal (Londoño Franco et al., 2016a). Dentro de estos contaminantes se encuentran, cromo (Cr), níquel (Ni), zinc (Zn), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), cobre (Cu), entre otros, que han atraído considerables atenciones

debido a su persistencia ambiental, toxicidad y bioacumulación (Kołodzyńska et al., 2017; Li et al., 2018; Szymanowska et al., 1999).

Los árboles pueden filtrar el aire del ambiente y liberar oxígeno, regular la temperatura del aire y acumular sustancias potencialmente tóxicas (Sawidis et al., 2012). Debido a que algunos órganos (raíces y hojas) acumulan metales pesados (Liang et al., 2017; Ugolini et al., 2013) pueden servir como biomonitores de contaminación ambiental, por ende la acumulación de elementos en las plantas confirma que los metales pesados (MP) se encuentran presentes en el suelo o el aire, por otro lado la toxicidad de los metales en las plantas varía según la especie vegetal, el tipo de metal, la concentración, forma química, composición, pH y tipo de fuente (natural o antropogénica) (Greksa et al., 2019a). Sin embargo, las concentraciones de metales en los órganos de los árboles no son un indicador suficiente de la contaminación de los mismos, ya que la absorción depende de la especie vegetal y sus factores de bioconcentración (FMC), es decir, la capacidad de una planta para acumular metales pesados del suelo y el aire (Alahabadi et al., 2017).

En países en vías de desarrollo, las regulaciones ambientales inexistentes o ineficientes exacerbaban el problema de contaminación ambiental (Tarras-Wahlber et al., 2000). Dada la importancia de la minería aurífera para la economía ecuatoriana y la proliferación de concesiones mineras, la información sobre los impactos ambientales que genera esta actividad es crucial. Hasta 2020, se registraron 152 concesiones en el catastro minero nacional (ARCOM), la mayoría ubicadas a lo largo de los ríos Anzu y Jatunyacu sector de Puerto Napo, donde predomina la minería de oro aluvial; alrededor del 60% de las concesiones fueron autorizadas para minería artesanal, quedando las restantes para minería industrial o de mediana escala (Capparelli et al., 2020).

En la presente investigación se pretende conocer la capacidad de bioacumulación de metales pesados de Cd, Pb, Ni y Fe de tres especies forestales de importancia ecológica y económica, por su abundancia y uso en la región amazónica ecuatoriana, lo que permitirá a corto, mediano y largo plazo mitigar la contaminación en áreas contaminadas por la minería ilegal en el sector de Yutzupino, provincia de Napo. Estos estudios aportarían nuevos conocimientos sobre especies bioacumulativas de elementos biotóxicos, generando fitorremediación eficiente en las áreas contaminantes. El presente proyecto responde a la línea de investigación de Gestión y Conservación Ambiental de la Universidad Estatal Amazónica.

1.1.PROBLEMA CIENTÍFICO

Los ecosistemas boscosos del oriente ecuatoriano son amenazados por las malas prácticas de extracción minera, reconocidas como uno de los principales problemas ambientales que inciden en la deforestación de extensas superficies de bosques, facilitando de esta manera procesos como deslizamientos de suelos, derrumbes, erosión y altos niveles de contaminación en el suelo por la extracción de minerales.

La minería de oro artesanal y en pequeña escala se encuentra entre las fuentes más importantes de metales pesados en los ecosistemas, lo que provoca una grave contaminación. En la parroquia de Puerto Napo, provincia de Napo, se han identificado 32 procesos de explotación minera de forma inadecuada, lo cual ha promovido la destrucción de playas, cambio del cauce y contaminación de ríos, así como la falta de infraestructura para el tratamiento de aguas negras ha generado que los desechos mineros (metales pesados) se descarguen directamente en las fuentes de agua provocando contaminación ambiental (PDyOT, 2019).

En la comunidad de Yutzupino, provincia de Napo, cantón Tena, parroquia Puerto Napo existe una modificación gradual del paisaje forestal, debido a la explotación a cielo abierto realizada por la extracción de minerales metálicos (oro), presuntamente por mineros ilegales dentro de la concesión minera Yutzupino. Las actividades mineras realizadas en la zona propician la acumulación de relaves de grava lavada y la generación de sedimentos, que al no contar con ningún tipo de consideración técnica aceleran la erosión el suelo, cambio en el relieve, formación de pozos artificiales (ciénagas), deslizamientos de suelo y producción de montículos de gravas de diferentes tamaños. Estas actividades han provocado la contaminación de metales pesados en el suelo y en los tejidos foliares de las diferentes especies forestales que habitan en este importante reservorio de bosque.

De ahí que se formula el siguiente problema científico: ¿Cómo el potencial bioacumulador de metales pesados en tres especies forestales *Ochroma pyramidale* (Cav Ex. Lam?) Urb. (balsa), *Piptocoma discolor* (Kunth) Pruski (pigüe) y *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J. C. Wendl (bambú) permite la identificación de especies fitorremediadoras para áreas contaminadas por la extracción minera en la comunidad Yutzupino, Provincia de Napo?.

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN O IDEAS A DEFENDER

Para la presente investigación se planteó la siguiente hipótesis a comprobar:

El potencial bioacumulador de los metales pesados (cadmio, plomo, níquel e hierro), en las especies forestales *O. pyramidale* (balsa), *P. discolor* (pigue) y *B. vulgaris* (bambú) permitirá la identificación de especies promisorias para la fitorremediación, lo que contribuiría a remediar ambientalmente y de manera sostenible el área de extracción minera, Yutzupino en la Provincia de Napo.

1.3.OBJETIVOS

1.4.OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial bioacumulador de metales pesados (cadmio, plomo, níquel e hierro) en *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris* en un área de extracción minera, ubicado en Yutzupino, Provincia de Napo.

1.5.Objetivos específicos

- Determinar la concentración de metales pesados (cadmio, plomo, níquel e hierro) en hojas de *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*.
- Determinar la concentración de metales pesados (cadmio, plomo, níquel e hierro) en el suelo donde habitan las especies forestales de estudio.
- Identificar las especies forestales fitorremediadoras de acuerdo al factor de bioconcentración para los metales pesados analizados.

CAPÍTULO II.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. La contaminación

El problema de contaminación del agua y del ambiente está llegando a niveles críticos, en especial en países de bajos y medianos recursos en donde las grandes o medianas ciudades no cuentan con plantas de tratamiento de agua y donde los ríos contaminados terminan afectando a las poblaciones cercanas y destruyen a su paso los recursos naturales de flora y fauna hasta llegar al océano. De acuerdo a la National Oceanic and Atmospheric Administration, 1 400 millones de libras de basura terminan en el mar cada año. Así, los océanos también sufren contaminación por metales pesados, químicos, drogas, insecticidas, sustancias radioactivas y demás contaminantes hidrosolubles (WHO, 2020).

La mayoría de países de altos recursos tiene conciencia del problema de contaminación ambiental y lo que implicaría para sus pobladores la afectación de sus recursos hídricos naturales. En dichos países hay medidas de prevención y control de la contaminación de agua con base en una legislación que prohíbe a las empresas e industrias la liberación de desechos contaminantes a los ríos. Además, se canalizan las aguas residuales para que no contaminen recursos hídricos naturales o artificiales y se establecen plantas de tratamiento de agua en las ciudades grandes y de mediano tamaño, las cuales limitan el nivel de los contaminantes. Aunque muchos países de bajos y medianos recursos también poseen políticas regulatorias, en su mayoría estas no logran implementarse (Gómez, 2018).

Las aplicaciones de los pesticidas se esparcen a la atmósfera, contaminando directamente el medio que lo rodea: suelos agrícolas, canales de regadío, animales, poblaciones rurales, colegios rurales entre otros. Sumando a ello, la contaminación por la erradicación de las malezas que afectan a los cultivos en los primeros meses de la siembra por aplicaciones tóxicas de herbicidas. Consecuencia, de ello provoca la desaparición de especies nativas de la zona y la destrucción de insectos benéficos, alterando los ecosistemas, lo cual repercute en el clima (Camacho et al., 2020).

2.2. Contaminantes

La mayoría de contaminantes químicos ambientales producen efectos perjudiciales en función de su concentración, por lo que se hace necesario identificar su existencia y el control de los niveles de cada uno de estos elementos potencialmente peligrosos. Atendiendo a la

Resolución 44/228 de la ONU, en 1992, celebrada en Río de Janeiro, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, conocida como la Cumbre de la Tierra, fue la primera vez que se reunieron un alto número de jefes de estado para abordar un tema tan importante como el relacionado con el desarrollo y la protección del ambiente (Amable et al., 2017).

El término de contaminantes emergentes (CE) generalmente se utiliza para referirse a compuestos de distinto origen y naturaleza química, cuya presencia en el medio ambiente no se considera significativa en términos de distribución y/o concentración, por lo que pasan inadvertidos; no obstante, ahora están siendo ampliamente detectados y tienen el potencial de acarrear un impacto ecológico, así como efectos adversos sobre la salud (Gil et al., 2018).

2.2.1. Tipos de agentes contaminantes

2.2.1.1. Agentes físicos

Los principales agentes físicos presentes en el ambiente laboral, pueden ser: el ruido, la iluminación, la temperatura, la humedad y en ocasiones la vibración y las radiaciones (INS, 2019).

Los contaminantes físicos son manifestaciones físicas, especialmente de la mecánica y la energía, capaces de provocar daños permanentes e irreversibles a los trabajadores. Estos corresponden a ondas como el ruido, o a las transferencias de energía como temperatura o iluminación. Además, existen otros agentes como la humedad que inciden sobre la temperatura, que también puede transportar patógenos peligrosos para la salud humana (ECOSEG, 2021).

2.2.1.2. Agentes biológicos

En cuanto a los contaminantes biológicos, se encuentran agentes representados por organismos vivos (la mayoría suelen ser microorganismos como bacterias, virus, hongos entre otros) (INS, 2019).

Los agentes biológicos son seres vivos microscópicos que pueden causar daño a humanos, como: los virus, las bacterias, los endoparásitos humanos (protozoos y helmintos), los hongos, los cultivos celulares y los agentes transmisibles no convencionales (priones). También, se pueden incluir en la definición, los productos o sustancias secretadas o liberadas por estos agentes biológicos con capacidad patógena para humanos, como, por ejemplo: endotoxinas, micotoxinas, exotoxinas, glucanos, ergosterol, etc.; siempre que su presencia

en el ambiente laboral se deba a la presencia del agente biológico que la produce (INSST, 2019).

2.2.1.3. Agentes químicos

Los principales agentes químicos que pueden estar presentes son: los gases, vapores, aerosoles, y los metales (INS, 2019).

El uso de combustibles fósiles, los productos de desecho domésticos e industriales, la minería y la agricultura contaminan el aire, el agua y el suelo. Los productos químicos contaminantes pueden tener implicaciones considerables para la salud, la seguridad humana, el bienestar y el valor de la naturaleza (Grijalva et al., 2020).

Con el desarrollo de la tecnología se han producido muchos compuestos químicos sintéticos, lo que ha generado un incremento en el número de contaminantes que son considerados un potencial amenazador para el ambiente y todo organismo vivo. Hoy en día se habla de contaminantes emergentes y se refiere a productos farmacéuticos, del cuidado personal, surfactantes, aditivos industriales, plastificantes, plaguicidas y una gran variedad de compuestos químicos que alteran las funciones endocrinas. Estos compuestos se encuentran en bajas concentraciones (generalmente en partes por millón o partes por trillón) y la mayoría de estos siguen sin estar regulados o reglamentados por la mayoría de los países (Kuster et al., 2008).

Actualmente uno de los mayores problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo por metales pesados, ya que es debido a la toxicidad que presentan los metales pesados en el agua de los ríos, que son considerados como un grave problema para los habitantes de las poblaciones que se abastecen de dichos ríos en especial si se considera que el incremento en la concentración de estos metales en las fuentes hídricas procede de las diversas actividades antropogénicas, elevando además los efectos potenciales nocivos sobre los diferentes sistemas ecológicos y el ambiente. Dentro de los principales factores que desprenden los ecosistemas por contaminación por metales pesados, se encuentran las actividades humanas donde destacan como mayoritarias las operaciones de tipo minero y de fundición entre otras actividades de tipo industrial y urbana, donde se tiene que la tasa de contaminación del agua puede rondar cerca de los 200 millones de metros cúbicos diarios (Pabón et al., 2020).

2.3. Contaminantes metálicos

Los metales pesados son considerados según la tabla periódica como elementos químicos de alta densidad (mayor a 4 g/cm³), masa atómica por encima de 20 y no son tóxicos en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son Aluminio (Al), berilio (Be), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros (Pabón et al., 2020).

Los metales pesados son considerados contaminantes ambientales tóxicos debido a su alta densidad y toxicidad inclusive en bajas concentraciones, al no ser biodegradables y su presencia en la cadena alimentaria resultan un problema medio ambiental y para la salud humana (Chauhan & Mathur, 2020).

Según la Agencia de Protección Ambiental (USA.GOV, 2020) los metales pesados como (Pb, Cd, Cu, Cr, As, Hg y Ni) se consideran los más extendidos en el medio ambiente.

Las plantas gracias a sus propiedades tienen la facultad de absorber los metales pesados, pero genera consecuencias como la reducción de la germinación de las semillas, el crecimiento de brotes y raíces, la clorosis, el marchitamiento, la reducción del contenido de clorofila, el contenido proteínico y reducen la eficiencia del proceso fotosintético y la actividad de varias enzimas (Chauhan & Mathur, 2020).

2.3.1. Contaminación por cadmio

Según (Zhang et al., 2020), el cadmio (Cd) se considera un elemento no esencial para las plantas además de ser uno de los metales pesados más tóxicos. De igual manera menciona que los efectos de toxicidad de Cd y Zn son similares. Por lo tanto, para conocer el nivel de contaminación sobre el ecosistema se debería establecer una acción de control donde es importante determinar si el contenido total de metales pesados por encima de los límites de concentración de acuerdo con la legislación nacional y evaluar la tasa de movilidad de metales pesados en el suelo para una mejor evaluación del impacto ambiental de un evento de contaminación (Sastreñ et al., 2002). De la misma forma el Cd ingresa a las plantas en su forma divalente Cd²⁺ por las raíces, luego es transportado por el xilema y finalmente es almacenado en las hojas o en algunos órganos de las plantas, por ende en altas concentraciones su toxicidad influye negativamente sobre la inhibición de crecimiento, activación o inhibición de enzimas, reducción de la tasa de transpiración y contenido de agua, en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua provocando severos desequilibrios nutricionales e hídricos de la planta (Reyes, 2020a).

2.3.2. Contaminación por cobre

El cobre se usa en equipo eléctrico, maquinaria industrial, construcción, en aleaciones de bronce, latón, níquel, clavos, pernos, objetos decorativos. Tuberías. Techos, monedas, utensilios de cocina, joyería, muebles, maquillaje, pinturas y medios de transporte (Londoño Franco et al., 2016b). La toxicidad del Cu provoca el retraso del crecimiento de las plantas, clorosis foliar y necrosis (AbdElgawad et al., 2020a). Esencial para los humanos y animales está asociado con las proteínas y enzimas, elemental para la reproducción, en concentraciones entre 25 a 100 mg/kg es tóxico para animales, se acumula en el cerebro, hígado y pelo; tóxico para el ser humano pero no venenoso los efectos graves que puede causar son úlceras gastrointestinales, necrosis, y daño renal y es tóxico para las plantas en dosis de 25 a 40 mg/kg (BIOECO, 2021).

2.3.3. Contaminación por plomo

Definitivamente la actividad humana en relación al plomo ha llevado a través de los tiempos a crecientes descargas de dicho metal hacia los diferentes componentes ambientales, aumentando y diversificando paralela y progresivamente las condiciones de exposición a niveles cada vez más altos en el ambiente (Hazin, 2013). Las fuentes más comunes de emisión de Pb que contamina la atmósfera, suelo y agua, son aquellos que involucran a los procesos industriales y artesanales que utilizan puro o con subproductos que contienen altos niveles de naftas, la principal contaminación ambiental se debe a compuestos inorgánicos de Pb (Danza, 2017). También el Pb ingresa a la planta enlazándose a grupos carboxilos en la raíz, pero se desconocen transportadores que influyen en la absorción, translocación y compartimentalización (Reyes, 2020b).

2.4. Minería a nivel mundial

Desde fines del siglo pasado, el comercio mundial alcanzó una nueva etapa en el proceso de división internacional del trabajo gracias a la formación de cadenas globales de valor (CGV), vislumbrando un escenario que hace posible nuevas oportunidades de industrialización para economías en desarrollo. Sin embargo, existe todavía un buen número de países cuya canasta exportadora se concentra en materias primas con poco valor agregado. Se considera importante identificar cuáles son las CGV en las que los recursos mineros tienen un peso dominante o estratégico; cuáles son los principales países proveedores de minerales; cuáles son las empresas que lideran los eslabones más importantes de la cadena, y evaluar los casos

en los que un país ha podido dar el salto hacia un eslabón más sofisticado de esta cadena (Landa, 2019).

América Latina registró desde la década de los noventa un crecimiento importante en el sector minero. Ello se debe principalmente a dos factores: la creciente demanda de las economías emergentes, sobre todo de China y de la India, y las reformas neoliberales introducidas en toda la región para combatir las hiperinflaciones y graves endeudamientos públicos generados en las décadas anteriores. En el ámbito de la minería (como en otros sectores), la estrategia neoliberal impuso privatizaciones, nuevas regulaciones para atraer inversiones transnacionales y una serie de incentivos sobre todo tributarios para las empresas. Aunque económicamente importante para los Estados que reciben los ingresos en términos de impuestos y regalías, la minería suele representar un costo muy alto para los lugares donde opera: degradación ambiental y daños sobre la salud pública de poblados cercanos por el uso de agentes tóxicos, escasez de agua y tierra, reasentamientos humanos y migración forzosa, para nombrar los más importantes. En consecuencia, se multiplicaron en toda la región las movilizaciones sociales en contra de proyectos o instalaciones mineras, redundando en un panorama de conflictividad social importante (Schorr, 2018).

Por su parte, en México las grandes empresas mineras que operan en México se han enfocado en controlar y automatizar de manera aislada algunas actividades y sistemas. Muy pocas empresas han comenzado a colocar infraestructura y servicios de telecomunicaciones en todos los espacios de la mina, para luego automatizar, controlar y digitalizar todas las actividades, aunque esta es la tendencia. De hecho, los nuevos avances tecnológicos en la minería tratan de que el nuevo sistema de control centralizado que se instale reconozca las actividades mineras automatizadas previamente (Robles et al., 2020).

2.5. Minería en Ecuador

En las últimas décadas, el presupuesto fiscal del Estado, que depende significativamente de los ingresos petroleros, ha sido afectado por la reducción en la producción de hidrocarburos que contribuyen al boom petrolero en los años 60 y 70. Por eso, el gobierno neoextractivista del presidente Correa, que ganó las elecciones del 2006 con el apoyo de organizaciones y movimientos sociales promovió la expansión de la minería a gran escala en el sur del país para asegurar nuevas fuentes de ingreso. El gobierno dio concesiones mineras de gran escala a varias compañías transnacionales, frecuentemente dentro de áreas protegidas y territorios de comunidades locales e indígenas. Con esto, cambió su posición inminente crítica frente a

la minería de gran escala y la respaldó públicamente, proclamándola como facilitadora del buen vivir (Espinosa, 2021).

En Ecuador, la continua presencia de empresas transnacionales mineras, ha puesto a los recursos naturales en situación de análisis tanto en espacios académicos como sociales. Las actividades de exploración y explotación se realizan en medio del no respeto a los derechos e intereses de los habitantes, lo que ha ocasionado problemas sociales como: el desalojo de los habitantes de sus propiedades, la inconformidad de los comuneros por la continua contaminación del medio ambiente, la apropiación de los representantes de las transnacionales mineras de las viviendas y tierras, entre otros. La problemática social, económica y ambiental que ocasiona la minería, es considerada como despojo de la nación, la falta de interés por parte de las entidades gubernamentales en relación con la participación libre de los habitantes en convenios mineros ha generado reclamos de los nativos sobre el no respeto a su integridad, posesión de tierras, contaminación del agua y del ambiente en general (Massa et al., 2018).

En Ecuador, el incremento de la minería artesanal e ilegal, ha provocado un aumento de la contaminación por metales pesados, siendo a su vez causante de graves daños en los sectores cercanos a ríos y afluentes, la minería artesanal se consolida por métodos convencionales, donde se aprovecha el peso específico del oro y separa a los sedimentos pesados por concentración gravimétrica (Oviedo-Anchundía et al., 2017).

La minería artesanal se practica en todo el país. La minería de metales preciosos se realiza en lecho de río (aluvial), a cielo abierto o por túneles. La minería es relativamente generosa en el Ecuador, ya que la persona que trabaja en río lo menos que obtiene son tres gramos al día. Usualmente este tipo de minería contamina mediante el uso de cianuro y sobre todo del mercurio (Castro, 2020). Las principales consecuencias son para los mismos mineros, quienes manipulan el mercurio sin ninguna protección ni cuidado, debido fundamentalmente a la falta de conocimiento, a la desvalorización del saber científico y el apego a métodos tradicionales de trabajo. Otro problema importante es el desconocimiento de la ley, la falta de capacitación técnico-ambiental y de técnicas de minería. Los factores que inciden en la baja capacitación son de carácter fundamentalmente cultural, considerando los mineros artesanales que ellos tienen el conocimiento necesario y que no requieren más (Vásconez & Torres, 2018).

2.6. Contaminación minera en Napo

El río Yutzupino es uno de los afluentes del Napo y la actividad minera es constante, pues, no solo hay mineros artesanales, sino, bajo el régimen de pequeña minería, por lo que las concesiones dedicadas a la misma práctica revelan que se hacen en áreas reducidas de los márgenes de los ríos. Los afluentes de la cuenca alta del río Napo, en la provincia de Napo, reflejaron en diciembre de 2019, que el agua posee niveles de concentración de cadmio, aluminio, hierro, cobre, zinc, níquel, plomo y mercurio en 500 veces más altos de lo que se establece por la normativa ecuatoriana y norteamericana. Las altas concentraciones de los metales observados en el agua se deben a la cercanía de la minería de oro a pequeña escala, rellenos sanitarios, piscicultura no nativa y el uso intensivo de agroquímicos tóxicos, lo cual representa una potencial afectación al ecosistema y la salud humana (Castro, 2020).

2.7. Descripción botánica de las especies

2.7.1. *Ochroma pyramidale* (Balsa)

Se cultiva de manera natural y por reforestación, especialmente en la selva sub-tropical de Ecuador, donde es uno de los recursos forestales y maderables de mayor aprovechamiento; por tal razón es uno de los rubros económicos de importancia en la economía. En el comercio internacional se conoce por su nombre común de balsa ecuatoriano (Figura 1). La especie ha alcanzado un alto nivel de desarrollo, desde su reforestación hasta su posterior transformación, convirtiéndola en la madera de balsa de mayor calidad a nivel mundial (Moncayo & Narváez, 2019).

Es una de las maderas más ligeras del mundo. Su densidad varía dentro del rango de 40 – 380 kg/m³ dependiendo de la edad y hábitat del árbol. La microestructura celular de la madera de balsa incluye un volumen muy importante de espacio vacío, lo que hace que tenga una rigidez y resistencia axial específica superior en relación a otros materiales; exhibe, además, destacadas características de absorción de energía que se derivan de su relativamente baja densidad. De hecho, puede ser el único material con absorción de energía específica similar a la de los paneles metálicos hexagonales de la misma densidad. En lo que a materiales compuestos se refiere, estas propiedades hacen que la madera de balsa sea uno de los materiales más atractivos para el uso como núcleos en estructuras tipo sándwich (estructuras formadas por la adhesión de dos caras o revestimientos relativamente delgados a un núcleo central espeso y de baja densidad), particularmente para aplicaciones marinas. Además, tiene aplicaciones en otras industrias comerciales tales como: aeronáutica,

transporte, energía eólica. Ecuador es uno de los principales productores y exportadores de balsa; sin embargo, existen muy pocas referencias en el país sobre la caracterización de las propiedades mecánicas de esta madera (Núñez et al., 2018).



Figura 1. Imagen de la especie *O. pyramidale* (Cav. Ex. Lam.) Urb. (Balsa).

Fuente: (Stang, 2008)

Información taxonómica

Urbano e Ignacio (1920) reportaron la clasificación botánica de la balsa de la siguiente manera (Tabla 1):

Tabla 1. Información taxonómica de *O. pyramidale*

Reino	Plantae
Clase	Magnoliopsida
Orden	Malvales
Familia	Malvaceae
Género	<i>Ochroma</i>
Especie	<i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb.

Fuente: (Trópicos b., 2022)

2.7.2. *Piptocoma discolor* (Pigüe)

La mayor densidad de los árboles de *P. discolor* se presenta en el bosque secundario del cantón y provincia Pastaza, donde comprende un radio de 25 a 30 km. Pastaza se encuentra desde los 500 hasta los 1500 m.s.n.m y la temperatura media es de 20 °C. La dispersión de semillas es realizada por el viento, gracias a las escamas florales típicas de la familia Asteraceae, existe naturalmente en los sistemas de rotación de cultivos, cuenta con alto contenido de semillas por kilogramo, de 3571428 a 3731343. Esta especie presenta un promedio del 95 % de germinación y en estudios previos realizados, la sobrevivencia de las plántulas de esta especie, al ser trasplantadas, muestra una supervivencia de 95,8 % y a los 2.5 años su altura es de 3,21 m., y el diámetro de 7,2 cm (González et al., 2018b).

En la figura 2 se presenta una imagen de la especie *P. discolor*.

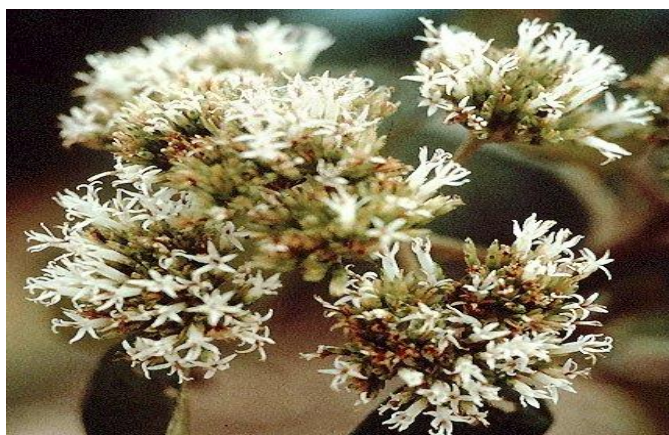


Figura 2. Imagen de la especie *P. discolor* (Kuth) Pruski (Pigüe).

Fuente: (Nobleza, 2018)

Información taxonómica

El registro deriva de TICA (datos suministrados en 2012-02-11) que lo reporta como un nombre aceptado (registro D67CE7A5-8AB8-42FE-9CCB-F0536002C896) con detalles de publicación original: *Novon* 6(1) 97 1996. En la Tabla 2 se presenta información taxonómica de la especie *P. discolor*.

Tabla 2. Información taxonómica de *P. discolor*

Reino	Plantae
Clase	Equisetosida
Orden	Asterales
Familia	Asteracea
Género	<i>Piptocoma</i>
Especie	<i>Piptocoma discolor</i> (Kunth)

Fuente: (WFO, 2022)

2.7.3. *Bambusa vulgaris* (Bambú)

Los bambúes de la familia Bambusoideae son plantas que crecen naturalmente en climas tropicales y templados, con excepción de Europa y Asia Occidental (Figura 3). Actualmente el bambú se ha convertido en una prominente alternativa forestal sostenible considerado de alta importancia económica, social y cultural (Aguirre et al., 2018).

Los beneficios ecosistémicos que nos brinda el bambú como biotipo vegetal son numerosos tales como: captura CO₂; conforma el hábitat de biodiversidad de fauna y flora, protección de riveras de cursos de agua y protección de suelos especialmente de los deslizamientos que ocurren en las laderas. Por ejemplo, China y Japón tienen una larga historia en el cultivo del bambú en áreas propensas a la erosión (Garay & Orellana, 2022).

En la figura 3 se presenta una imagen de la especie *B. vulgaris*.



Figura 3. Imagen de la especie *B. vulgaris*.

Fuente: (Hammel, 2003)

Información Taxonómica

Según el sistema de clasificación sugerido por Watson, G A y Wyatt-Smith (1961), la taxonomía es la siguiente (Tabla 3):

Tabla 3. Información taxonómica de la especie *B. vulgaris*

Reino	Plantae
Phylum	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Género	<i>Bambusa</i>
Especie	<i>Bambusa vulgaris</i> Schard

Fuente: (Trópicos a., 2022)

2.8. Propiedades del potencial bioacumulador en especies forestales.

Las plantas pueden adoptar distintos mecanismos específicos para absorber, trastocar y acumular nutrientes frente a la presencia de metales en su entorno al igual que toleran las elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción del paso hacia las hojas como estrategia de exclusión, sin embargo, otras los absorben y acumulan activamente en su biomasa aérea (Cahuana & Aduvire, 2019).

Entre los metales de mayor impacto al ambiente por su alta toxicidad y difícil eliminación se encuentran el cromo, níquel, plomo, cadmio y mercurio, estas sustancias tienden a persistir indefinidamente en el medio ambiente, comprometiendo el bienestar y equilibrio no solo de la flora y fauna sino también la salud de las personas residentes en comunidades aledañas por su acumulación e ingreso a la cadena trófica (Tejada et al., 2015). El impacto ambiental generado por estos metales pesados ha llevado a la comunidad científica a desarrollar diferentes métodos para el tratamiento de los efluentes contaminados a causa de

la minería con: precipitación, oxido-reducción, intercambio iónico, filtración, tecnologías de membranas, entre otros, sin embargo, estos métodos han resultado costosos e ineficientes, en especial cuando la concentración de los metales es baja (Jiménez-Oyola et al., 2021).

Un estudio de (AbdElgawad et al., 2020) indican que la bioacumulación, surge como alternativa que llama la atención en la remoción de iones de metales pesados en los afluentes auríferos, ya que permite no solo removerlos, sino también darles un tratamiento a los desechos generados.

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó en la comunidad Yutzupino, ubicada en la región oriental ecuatoriana, perteneciente a la provincia de Napo, cantón Tena, parroquia Puerto Napo (Figura 4). Los límites geográficos del área de estudio se encontraron desde la ciudad de Tena en dirección SE aprox. 6,4 km con la parroquia de Puerto Napo, en dirección SW antes del puente sobre el río Napo a mano derecha aprox.3,7 km. La mina de Yutzupino tiene una extensión de 25 ha, lo cual se encuentra formando una isla al margen derecho del río Jatunyacu.

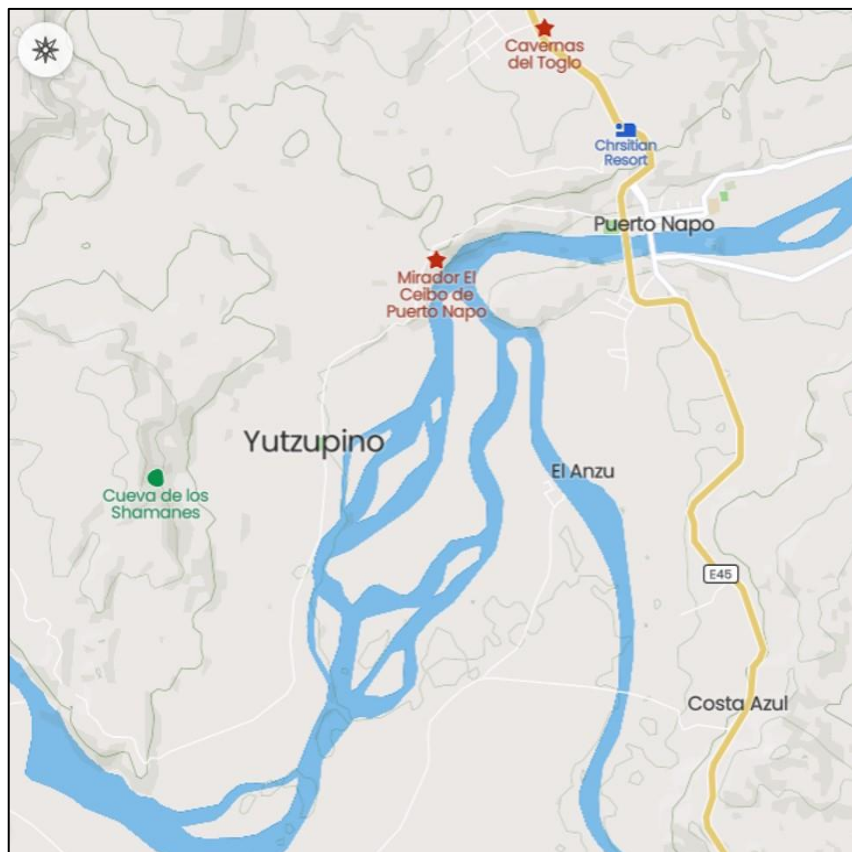


Figura 4. Ubicación geográfica del área de estudio perteneciente a la comunidad Yutzupino, Napo.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se encuentra la localización geográfica de cada uno de los puntos donde se recolectaron las muestras de hojas y suelo de las tres especies de estudio (balsa, bambú y pigüe).



Figura 5. Ubicación geográfica de los puntos de toma de muestras en el área de estudio (comunidad Yutzupino, Napo).

Fuente: Elaboración propia

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación fue de tipo experimental debido a que se tomaron datos de campo de tres especies forestales para analizar a escala de laboratorio la concentración de metales pesados en muestras de suelos y hojas. También tuvo carácter descriptivo y analítico debido a que se describieron los valores obtenidos del análisis de metales pesados a nivel de suelo y tejido foliar de las tres especies forestales seleccionadas, lo que facilitó describir, analizar e interpretar el potencial bioacumulador de metales pesados para su recomendación como especies con potencial fitorremediador.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación que se empleó en este proyecto fue el experimental, debido a que implicó la observación, manipulación y registro de las variables que afectan un objeto

(sujeto) de estudio. En la investigación de enfoque experimental el investigador manipula una o más variables de estudio, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas. En este caso se recolectaron las muestras de suelo y planta de cada especie objeto de estudio con el propósito de determinar las concentraciones de metales pesados en la planta y el suelo y analizar el efecto de estas variables.

3.4. TRATAMIENTO DE DATOS

3.4.1 Selección de especies y recolección de muestras de suelo y hoja.

Se seleccionaron tres especies forestales para el estudio (*O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*) tomando como criterio que fueran especies de alta importancia ecológica y económica con predominio en los ecosistemas de bosques siempreverde piemontano de la región amazónica ecuatoriana, de rápido crecimiento y amplia distribución en la región amazónica.

La identificación botánica de las especies objeto de estudio se realizó con la ayuda de un nativo de la zona (Kichwa), el cual posee conocimiento y experiencia en flora local, además se procedió con la verificación taxonómica de cada especie según información plasmada en el Libro de Árboles de Ecuador (Palacios, 2016) y recursos virtuales (The Plant List, 2019).

Para la recolección de las muestras de hoja y suelo de las tres especies de estudio se realizó un reconocimiento del área de extracción minera de la comunidad Yutzupino, lo cual fue posible a través de la coordinación con el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica de la provincia de Napo, mediante la Autorización de recolección de especímenes de especies de la diversidad biológica No. 2427, realizado con el trámite administrativo en el sistema digital del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica: <http://biodiversidad.ambiente.gob.ec:8099/biodiversidad-web/login.xhtml>.

La selección de las muestras vegetales se realizó a partir de la recolección de hojas adultas y jóvenes de los árboles con exposición al sol. Las hojas se encontraron en buen estado físico, sin daños mecánicos ni presencia de plagas y enfermedades visibles. El material vegetal se recolectó de diferentes lados de los árboles, para lo cual se cortaron las ramas para evitar el contacto de las hojas con el metal de las tijeras (Hu et al., 2014).

Las muestras de suelos se tomaron en tres puntos diferentes alrededor de la copa de los árboles seleccionados, a una profundidad de 0-30 cm con el uso de un barreno y en un área

que estuviera dentro de los 30 cm alrededor de los árboles seleccionados (Greksa et al., 2019b). A las muestras de suelo se les eliminó la hojarasca, raíces presentes y fueron etiquetadas y trasladadas al Laboratorio de Estudios Ambientales del Centro Experimental de Investigación y Producción Amazónica (CEIPA) para los análisis correspondientes.

Las hojas de cada especie de estudio se fusionaron en una sola muestra para su posterior análisis y se aplicó el mismo procedimiento para las muestras de suelo.

3.4.2 Procedimiento metodológico para determinación de la concentración de metales pesados en muestras de hojas y suelo.

Se determinaron los metales pesados de cadmio, plomo, níquel y hierro en las muestras de plantas y suelo recolectadas de las tres especies de estudio. Las muestras de material vegetal se lavaron con agua potable y luego con agua destilada y se dejaron secar naturalmente sobre papel de filtro durante cuatro días, después se secaron en una secadora a 40 °C durante 48 h y se pulverizaron sin uso de metales cortantes (20 g aproximadamente) (ISO, 1995).

La digestión del material vegetal se realizó con una mezcla de HNO₃ y HClO₄ — ácido nítrico-perclórico (digestión húmeda), en un recipiente abierto (Kalra, 1997). Las concentraciones de los metales pesados se determinaron mediante espectrometría de absorción atómica (ISO, 1995).

Las muestras de suelo (aproximadamente 100 g) fueron secadas al aire a temperatura ambiente durante cuatro días sobre papel de filtro. Posteriormente trituradas y tamizadas a través de un tamiz de malla de 2 mm y luego secadas en estufa a temperatura de 40 ° C durante 48 h (Šichorová et al., 2004; Sun et al., 2016; Wu et al., 2013). La determinación de los elementos en las muestras de suelo se realizó mediante espectrometría de absorción atómica, 0,5 g de digestión de suelo secado al aire con 12 mL de agua regia (1/3 HNO₃ + 2/3 HCl), a ebullición durante 2 h, seguido de filtración y ajuste de volumen en un matraz aforado de 100 mL (Tarras-Wahlber et al., 2000) (ISO, 1995).

La cuantificación de metales pesados en hojas y suelo se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer 2380. El espectrofotómetro es un instrumento utilizado para determinar a qué longitud de onda la muestra absorbe la luz y la intensidad de la absorción. Todos los espectrofotómetros consisten en una fuente de luz, un selector de longitud de onda, un contenedor transparente en el cual se deposita la muestra, un detector de luz y el medidor, detectan elementos. Se utilizó para la curva de calibración del equipo un estándar de 1 000 ppm de cada metal y se colocó la lámpara correspondiente.

3.4.3 Procedimiento metodológico para el análisis del factor de bioconcentración

Se calculó el factor de bioconcentración (BCF), el cual representa la capacidad de la planta para absorber metales pesados (o cualquier otro elemento químico) de los medios de crecimiento que se puede determinar como una proporción de la concentración de elementos en las plantas y el suelo (Alahabadi et al., 2017). El BCF se calculó mediante la ecuación 1:

$$BFC = C_{follaje} / C_{suelo} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde $C_{follaje}$ y C_{suelo} representan la concentración de un elemento específico en el material vegetal (follaje) y del suelo, respectivamente.

En este trabajo se utilizó el BCF para determinar la cantidad de metales pesados retenidos/acumulados para cada especie arbórea.

El cálculo del factor de bioconcentración o bioacumulación (BCF) se realizó para estimar la relación entre los residuos químicos en las plantas y las concentraciones medidas en el medio donde viven (suelo). Los BCF se calcularon dividiendo la concentración de cada elemento en la raíz con la del suelo respectivo. Los factores de traslocación a los diferentes órganos vegetativos se calcularon dividiendo la concentración en el órgano de interés (hojas) entre la concentración en el suelo. Los factores de bioconcentración y traslocación indican que especies de plantas pueden ser consideradas acumuladoras, tolerantes o exclusoras de los elementos de interés.

Las plantas con $BCF > 1$ son considerados como acumuladoras o híper acumuladoras (si las concentraciones exceden 0,1 %), las que presentan valores entre 0,1 y 1, respectivamente, son consideradas como tolerantes y las que presentan valores $< 0,1$ se consideran como plantas exclusoras (Agoramoorthy et al., 2009).

3.4.4 Análisis de datos

El método estadístico empleado para determinar la significancia de las diferencias en las concentraciones de metales pesados (Cd, Pb, Ni y Fe) entre las especies estudiadas y las concentraciones en el suelo consistió en el análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey al 95% de confiabilidad Sun et al., 2016; Wu et al., 2013).

Se realizó un análisis de conglomerados para determinar la similitud entre la capacidad de absorción de metales pesados de las especies a nivel de tejido foliar. El análisis de

conglomerados permitió la clasificación de objetos o casos en grupos relativamente homogéneos llamados conglomerados o clústeres.

Se obtuvo la matriz de correlación con el coeficiente de correlación de Pearson para determinar las correlaciones existentes entre las concentraciones de metales pesados analizados en las plantas y el suelo y el factor de bioconcentración.

Se empleó el análisis de componentes principales (PCA) para establecer la separación de las plantas analizadas en dependencia de las concentraciones de los metales pesados en el suelo y en la planta. Para los análisis estadísticos anteriormente descritos se utilizó el software Origin 2021.

3.5. RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES

3.5.1. Recursos Humanos

- Investigador
- Analista de laboratorio
- Director de Proyecto de Titulación

3.5.2. Material de campo

- Barreno
- Muestras de plantas y suelo
- Bolsa ziploc
- Cooler
- Ficha de registro de datos de campo

3.5.3. Material de oficina

- Computadora
- Esferos
- Impresora
- Libros, documentos digitales
- Cámara
- Registros

- USB
- Libreta de apuntes

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Concentración de metales pesados en hojas de tres especies forestales

Los resultados obtenidos en la concentración de metales pesados a nivel foliar (Figura 6) mostraron diferencias significativas según la prueba de Tukey para Cd, Ni, Pb y Fe en las tres especies de estudio (*O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*).

En cuanto al Cd la especie *P. discolor* presentó valores mayores con medias de 0,35 mg/kg, mientras que *B. vulgaris* presentó los menores valores (0,04 mg/kg).

La concentración de Ni foliar indicó que la especie *B. vulgaris* presentó los valores más altos, con medias de 6,89 mg/kg, y *P. discolor* valores más bajos, con medias de 4,90 mg/Kg.

La concentración de Pb resultó con valores medios de 55,67 mg/kg para *P. discolor* y valores menores (9,65 mg/kg) para *B. vulgaris*.

En cuanto al Fe la concentración foliar fue superior en *B. vulgaris* con valores de 156,33 mg/kg y *O. pyramidale* con valores menores de 32,85 mg/kg.

Estos resultados revelaron el potencial que presenta la especie *B. vulgaris* para la acumulación de metales pesados como Fe y Ni y *P. discolor* para Cd y Pb a nivel foliar. Esto aporta información valiosa para promover la silvicultura de plantaciones o regeneración natural de estas especies en sitios donde se presentan niveles de contaminación por metales pesados, siendo estas especies un recurso vegetal poco explorado para fines de fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados en la Amazonía ecuatoriana.

Estudios realizados por Kabata, (2010), sobre la concentración de metales pesados en hojas de diferentes especies indicaron valores referenciales de suficiente, tolerable y toxicidad para las plantas. Se encontró que la mayor concentración de Cd y Ni no supera los valores de tolerancia para las plantas (0,05-0,5 mg/kg), mientras que el Pb superó los valores permisibles de toxicidad para las plantas (30-300 mg/kg).

El bambú es un grupo taxonómico compuesto por grandes pastos leñosos (subfamilia Bambusoideae, familia Poaceae). Existen alrededor de 116 géneros y 1439 especies de plantas de bambú en todo el mundo, que son distribuidos principalmente en los trópicos y subtrópicos, pero también ocurren naturalmente en las zonas templadas de todos los continentes, excepto Europa y la Antártida (Group, 2012). Las especies de bambú tienen una alta capacidad para adaptarse a ambientes metalíferos y una alta capacidad para absorber metales pesados. Se ha demostrado que las especies de bambú, tienen alta productividad de biomasa, rotación corta y alto valor económico, y se pueden utilizar para la fitorremediación. Los tejidos de bambú en el rizoma y el culmo pueden acumular una gran cantidad de metales

pesados principalmente en la pared celular, la vacuola y el citoplasma. Ciertas especies de bambú como *Phyllostachys praecox* (Moso bambú), tienen una alta resistencia en suelos contaminados con metales, permitiendo una absorción y acumulación considerable de metales pesados (Bian et al., 2020).

Los resultados obtenidos a nivel foliar para *B. vulgaris* en el presente estudio fueron inferiores a lo reportado por Liu et al., (2015) que obtuvo valores de 400 mg/kg para el elemento Pb y Liu et al., (2016) que reportó valores de 120 mg/kg para el Cd.

P. discolor de la familia Asteraceae es una especie pionera abundante en bosques secundarios de la Amazonía con facilidad para colonizar ambientes antropizados y la alta capacidad para acumular metales pesados en los tejidos foliares, reportada en el presente estudio, le otorga un papel fundamental dentro de estos sitios contaminados por la minería. En un estudio realizado en especies para fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, en Perú, *P. discolor* presentó la mayor concentración de hidrocarburos en sus hojas, resaltando su potencial como especie bioacumuladora (Yoplac & Tuesta, 2018).

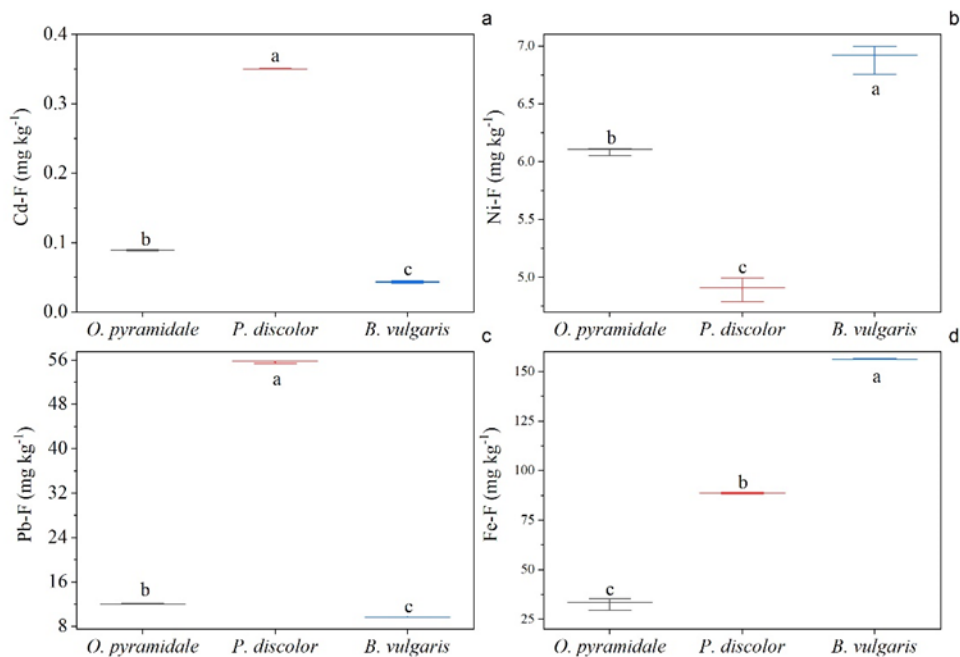


Figura 6. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) de la concentración de los metales pesados (a) Cd, (b) Ni, (c) Pb y (d) Fe, presentes en hojas de las especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*.

Letras desiguales indicaron diferencias significativas

4.2 Concentración de metales pesados en el suelo donde habitan tres especies forestales

En la Figura 7 se muestran los resultados de la concentración de metales pesados Cd, Ni, Pb y Fe presentes en el suelo donde se desarrollaron las especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*, los cuales mostraron diferencias significativas en la concentración de metales pesados a nivel de suelo, existiendo un patrón de variación a nivel de especies similar a lo encontrado en el análisis foliar. En relación al comportamiento del Cd, Ni y Pb los resultados indicaron que el suelo donde se desarrolla *B. vulgaris* presentó los mayores valores y *O. pyramidale* presentó los menores valores, mientras que para la concentración de Fe los valores fueron superiores en *O. pyramidale* e inferiores para *B. vulgaris*. En cuanto al Cd a nivel del suelo la concentración se encontró entre 0,04 y 0,13 mg/kg, en el Ni osciló de 7,27 a 18,24 mg/kg, en Pb fue de 22,7 a 57,67 mg/kg y en Fe fue de 536,21 a 845,28 mg/kg.

De acuerdo a la regulación Ecuatoriana (TULSMA, 2012) se encontró que la concentración de Cd no superó los valores permisibles (0,5 mg/kg), el Ni se encontró próximo a los valores críticos considerados como tóxicos (19,0 mg/kg), el Pb superó los valores permisibles (19,0 mg/kg) y el Fe no se encuentra regulado. Esto indicó un alto nivel de toxicidad en el suelo para Pb.

El suelo es un recurso natural con una capacidad de renovación muy complicada, con naturaleza viva y dinámica, la importancia de la conservación de este recurso surge a partir de que este es considerado como base para la supervivencia humana; y de ahí nace el interés por mantener o incrementar su fertilidad. La especie *B. vulgaris* es reconocida como una alternativa para la recuperación de suelos degradados, lo cual mejora la actividad biológica y ciertos indicadores de estructura y consistencia como contribución a la recuperación de suelos afectados (Cairo et al., 2019).

El análisis de suelo realizado a una profundidad entre 0-30 cm fue usado como indicador de la contaminación, ya que de acuerdo a algunos autores la concentración máxima promedio se encuentra en la capa del suelo entre 0 y 30 cm (Šichorová et al., 2004; Sun et al., 2016; Wu et al., 2013). Las concentraciones de metales pesados podrían ser mayores a una profundidad superior a 30 cm, pero sus formas químicas difieren con la profundidad y, por lo tanto, pueden no ser fácilmente disponible para las plantas (Hu et al., 2003; Wu et al., 2013).

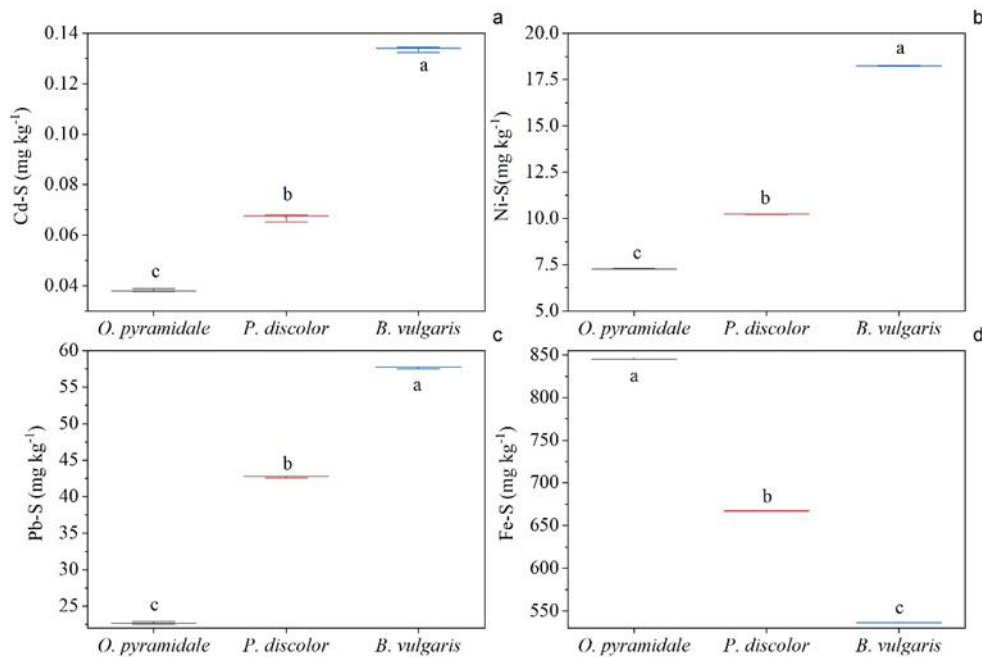


Figura 7. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) de la concentración de los metales pesados (a) Cd, (b) Ni, (c) Pb y (d) Fe, presentes en el suelo donde se desarrollaron las especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*.

Letras desiguales indicaron diferencias significativas

4.3 Especies forestales fitorremediadoras de acuerdo al factor de bioconcentración para metales pesados en hojas y suelo.

El factor de bioconcentración (FBC) reconocido como la relación entre la concentración de metales pesados en las hojas y el suelo, es reconocido como una forma de medir la eficiencia de la acumulación de metales pesados en las plantas, lo que permite identificar especies con potencial fitorremediador para sitios contaminados por la actividad de la minería. En la figura 8 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del factor de bioconcentración de las especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris* para los metales pesados Cd, Ni, Pb y Fe. La especie *P. discolor* se reportó con mayor potencialidad para la absorción de Cd con valores de 5,23 resultando con diferencias significativas con el resto de las especies, lo que indicó su alta capacidad bioacumuladora en Cd. Este mismo comportamiento resultó para el elemento Pb, con valores superiores a 1,3. Esto facilita su uso como especie fitorremediadora de áreas contaminadas con Cd y Pb, siendo un resultado interesante por cuanto se trata de

una especie pionera de la familia Asteraceae que crece de forma natural en los claros de bosques, con alto grado de cobertura en bosques secundarios (González et al., 2018), por lo que sería conveniente fomentar su uso en sitios donde se realicen prácticas de extracción minera.

La especie *O. pyramidale* presentó la mayor capacidad de acumulación de Ni con valores superiores a 0,8, indicando su potencialidad para sitios con alto contenido de Ni.

La especie *B. vulgaris* resultó con mayor capacidad de acumulación de Fe con valores superiores a 0,29, por lo que se sugiere su uso potencial para sitios contaminados por Fe.

Las especies de plantas con altos valores del factor de bioconcentración se consideran adecuadas para fitoextracción, lo cual se basa en la translocación de metales pesados en partes de plantas fácilmente cosechables, como los brotes (Malik y Husain, 2006). Los resultados del presente estudio para la especie *P. discolor* indicaron altos valores de BCF>1, por lo que puede ser considerada como acumuladora o híper acumuladoras (Agoramoorthy et al., 2009).

En los últimos años ha crecido el interés en las plantas que pueden acumular y tolerar cantidades inusualmente alta de metales pesados, esto debido a su potencial utilidad para el hombre como herramienta en la limpieza de suelo contaminado (Llugany et al., 2007). Este tipo de plantas llamadas hiperacumuladoras son relativamente raras y frecuentemente se encuentran en áreas geográficas remotas (Kidd y Monterroso, 2003).

El uso de especies vegetales tolerantes a altos niveles de metales en suelos y agua, permite actividades de restauración con menor impacto ambiental sobre los terrenos que otras técnicas tradicionales, más invasivas y con efectos secundarios adversos (Robinson et al., 1997).

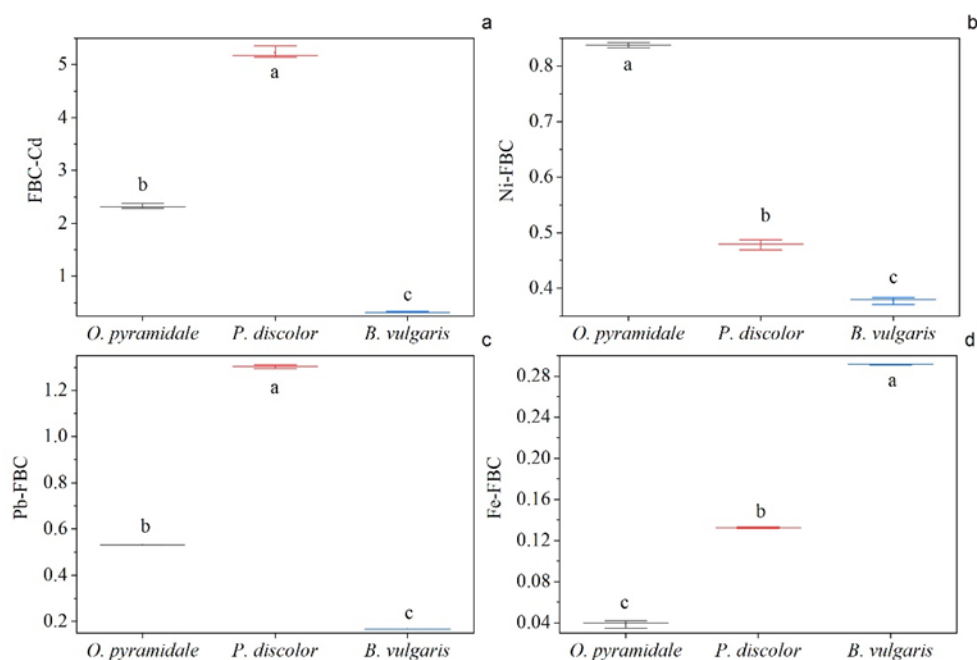


Figura 8. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) para el factor de bioconcentración de pesados (a) Cd, (b) Ni, (c) Pb y (d) Fe, de las especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*.

Letras desiguales indicaron diferencias significativas

La matriz de correlación de Pearson (Figura 9) obtenida para el conjunto de metales pesados Cd, Ni, Pb y Fe en hoja y suelo, así como los valores del factor de bioconcentración proporcionó información relevante para identificar las variables con mayor relación. Los resultados reflejaron una correlación positiva y negativa, cercana o superior al 50%, en la concentración de metales pesados en las hojas y el suelo.

Las correlaciones positivas superiores al 50% entre las concentraciones de los elementos fueron entre Cd-F y Pb-F ($r=1,00$), Cd-S y Fe-F ($r = 0,99$), Pb-S y Fe-F ($r = 0,99$), Ni-S y Fe-F ($r = 0,98$) y Ni-S y Cd-S ($R=1,00$).

Las correlaciones negativas superiores al 50% entre las concentraciones de los elementos fueron entre Ni-F y Cd-F ($r = -0,96$), Pb-F y Ni-F ($r = -0,93$), Fe-S y Cd-S ($r = -0,95$), Fe-S y Ni-S ($r = -0,94$) y Fe-S y Pb-S ($r = -1,00$).

El factor de bioconcentración para Cd, Pb y Fe presentó una alta correlación, superior al 95%, con la concentración foliar de cada elemento, exceptuando el Ni que no presentó correlación entre el factor de bioconcentración y el elemento a nivel foliar. Estos resultados

indicaron la capacidad que tienen las plantas para absorber los metales pesados del sedimento donde crecen, acumulándolos en sus tejidos.

Los resultados del análisis de correlación permitieron identificar que no existe alta correlación entre el elemento en el suelo y la hoja, lo que pudiera estar relacionado con la capacidad de bioconcentración de la especie. Resultados similares han sido encontrados por otros autores, los cuales han indicado que la capacidad de las plantas de bioacumulación no depende completamente de la concentración de metales pesados en el suelo, sino que está relacionado con la fisiología de la planta y la capacidad de protección de la misma (Song et al., 2007). Cuando las plantas están estresadas por metales pesados, tienen la capacidad de regular activamente la concentración de los elementos (Fernández et al., 2017; Miao et al., 2011).

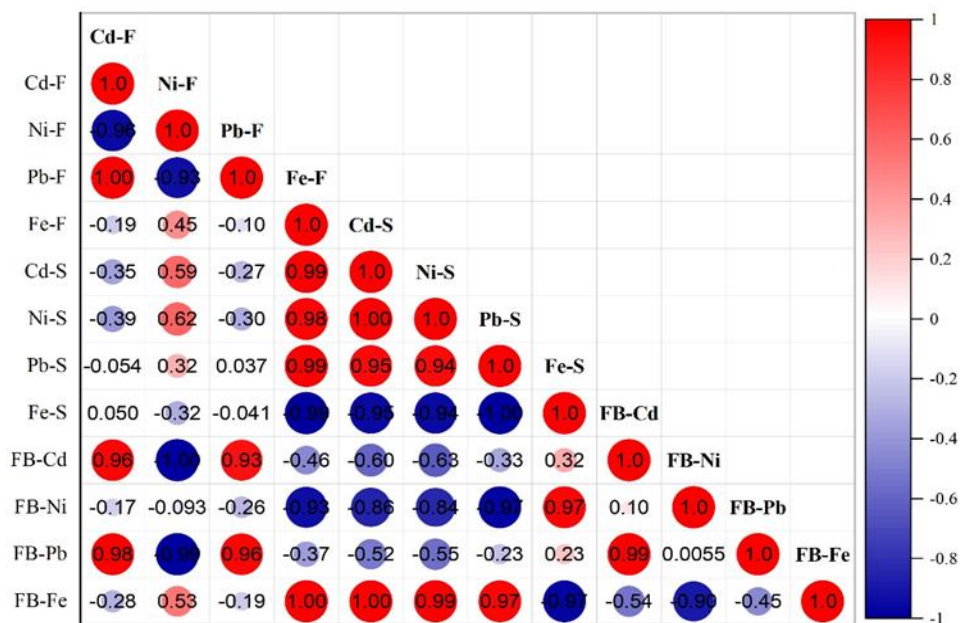


Figura 92. Correlación entre la concentración de metales pesados en las hojas de las especies analizadas y el suelo (el valor numérico corresponde al coeficiente de correlación de Pearson).

El análisis de clúster permitió la clasificación de tres grupos a partir de la concentración de los metales pesados (Cd, Ni, Pb y Fe) en las hojas de las tres especies estudiadas (Figura 10). La concentración de Fe en hojas de *O. pyramidale* y Pb en tejidos foliares de *P. discolor* formaron un grupo, las concentraciones de Fe de *B. vulgaris* y *P. discolor* formaron el segundo grupo, mientras que el tercer grupo incluyó las concentraciones de Ni en las tres

especies (*O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*), las concentraciones de Cd en las tres especies (*O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*), y las concentraciones de Pb de *O. pyramidale* y *B. vulgaris*).

Estos agrupamientos permitieron clasificar a las especies de acuerdo con su capacidad de acumular los distintos metales pesados, lo que facilita su selección como especies fitorremediadoras para áreas de suelos contaminados por la actividad de extracción minera.

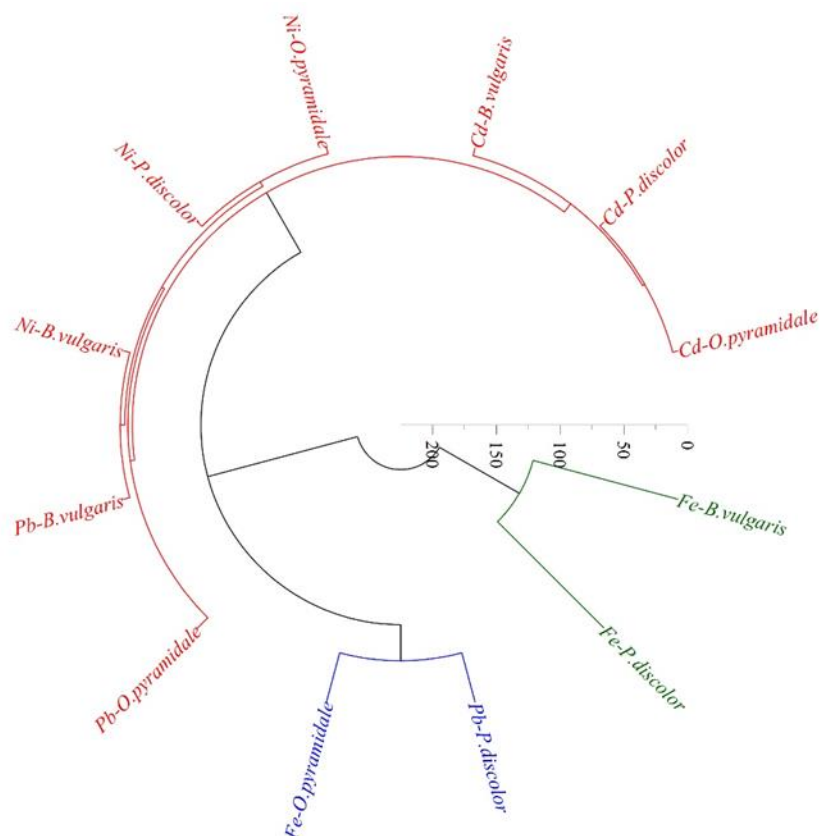


Figura 103. Análisis de clúster a partir de la concentración de metales pesados (Cd, Ni, Pb y Fe) en hojas de las especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*.

Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales (PCA), indicaron que el conjunto inicial de los datos se redujo a dos componentes principales que explicaron el 100% de la variabilidad total de los datos. El análisis de PCA, reportó que las concentraciones de Fe en el suelo fueron superiores al resto de los elementos analizados (PC 1).

El sistema de coordenadas, determinado por los componentes principales, permitió identificar que en el eje PC 1 se separa la especie *B. vulgaris*, que se haya en el lado positivo del eje. La especie *B. vulgaris* mostró mayor relación con la concentración de Pb en el suelo, Fe en la planta, Cd en el suelo y Ni en el suelo. La especie *P. discolor* se encontró en el lado negativo del PC1 resultando con mayores concentraciones de Pb y Cd en la planta.

La especie *O. pyramidale* se encontró en el lado negativo del eje, y se caracterizó por mayores concentraciones de Fe en el suelo.

El análisis del factor de bioconcentración en el sistema de coordenadas resultó con un patrón diferenciado entre las especies forestales analizadas, reflejando para *P. discolor*, mayor retención para Cd y Pb, en *O. pyramidale* mayor retención en el Ni y en *B. vulgaris* para el Fe. Estos resultados corroboran lo expresado anteriormente en relación a la capacidad bioacumuladora de estas especies.

La fitorremediación es el uso de plantas y microbios del suelo asociados para reducir la concentración o los efectos tóxicos de los contaminantes en el medio ambiente. La tecnología de fitorremediación es considerada una medida de remediación de la contaminación por metales pesados con muchas ventajas, como remediación *in situ*, bajo costo, respeto al medio ambiente, falta de contaminación secundaria y mejoras del paisaje (Ramírez et al., 2019). La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas. Los problemas de contaminación que existen actualmente requieren de tecnologías costo-efectivas, ambientalmente amigables y que puedan aplicarse a gran escala, tal es el caso de la fitorremediación (Delgadillo et al., 2011).

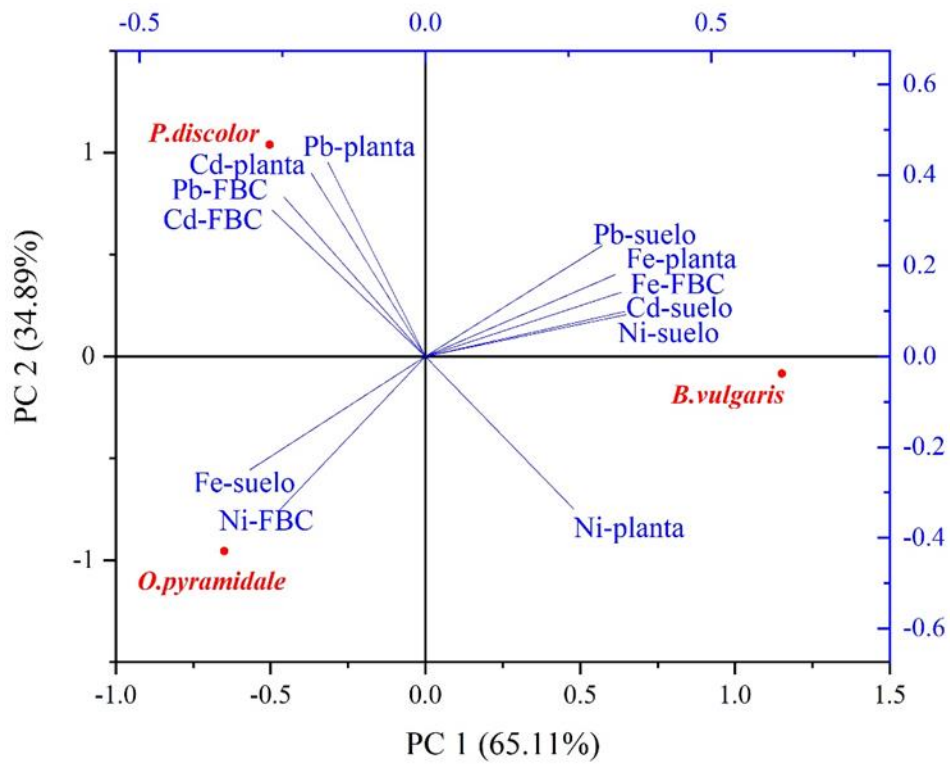


Figura 11. Resultados del análisis de PCA de las concentraciones de metales pesados (Cd, Ni, Pb y Fe) en hojas, suelo y factor de bioconcentración de tres especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*.

5.1. Conclusiones

- La concentración de metales pesados en hojas de las tres especies en estudio (*O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*), demostraron la potencialidad de *B. vulgaris* para la acumulación foliar de Ni y Fe con valores medios de 6,89 y 156,33 mg/kg respectivamente y de *P. discolor* para Cd y Pb con valores de 0,35 y 55,67 mg/kg respectivamente.
- La concentración de metales pesados en el suelo donde se desarrollaron las especies *O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*, mostraron diferencias significativas, existiendo un patrón de variación a nivel de especies, con un comportamiento superior en Cd, Ni y Pb para *B. vulgaris* y Fe para *O. pyramidale*. El Cd se encontró entre 0,04 y 0,13 mg/kg, el Ni de 7,27 a 18,24 mg/kg, Pb de 22,7 a 57,67 mg/kg y el Fe de 536,21 a 845,28 mg/kg.
- La baja correlación existente entre los elementos del suelo y la planta pudiera estar relacionado con la capacidad de bioconcentración de cada especie, lo que indica que para la selección de las especies es necesario conocer el potencial bioacumulador de elementos contaminantes.
- La capacidad de bioacumulación de metales pesados de Cd, Ni, Fe y Pb de *P. discolor*, *B. vulgaris* y *O. pyramidale*, obtenido a partir del factor de bioconcentración (FBC), facilita su inclusión como especies fitorremediadoras para áreas contaminadas por las prácticas de extracción minera en la comunidad Yutzupino. Esto aporta información valiosa como contribución a la silvicultura de estos grupos taxonómicos con alto potencial para la mitigación de los impactos ambientales negativos que se derivan de la minería.

5.2.Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio con las mismas especies (*O. pyramidale*, *P. discolor* y *B. vulgaris*), con otros metales pesados, con la finalidad de determinar el potencial de biorremediación de las especies forestales.

Extender el estudio con diferentes especies forestales de la zona para determinar el factor de bioconcentración de metales pesados y conformar un listado de especies con un alto potencial para la fitorremediación ambiental en la comunidad de Yutzupino.

Implementar acciones de fitorremediación con las especies forestales de mayor bioconcentración, con la finalidad de recuperar áreas contaminadas y disminuir el impacto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

AbdElgawad, H., Zinta, G., Hamed, B. A., Selim, S., Beemster, G., Hozzein, W. N., Wadaan, M. A. M., Asard, H., & Abuelsoud, W. (2020a). Maize roots and shoots show distinct profiles of oxidative stress and antioxidant defense under heavy metal toxicity. *Environmental Pollution*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113705>

AbdElgawad, H., Zinta, G., Hamed, B. A., Selim, S., Beemster, G., Hozzein, W. N., Wadaan, M. A. M., Asard, H., & Abuelsoud, W. (2020b). Maize roots and shoots show distinct profiles of oxidative stress and antioxidant defense under heavy metal toxicity. *Environmental Pollution*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113705>

Aguirre, J., Cadena, J., Ramírez, B., Caso, L., Martínez, D., & Juárez, J. (2018). *Vista de bambú (Bambusoideae) comestible: cultivo promisorio para México*. <https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1214/987>

Alahabadi, A., Ehrampoush, M. H., Miri, M., Ebrahimi Aval, H., Yousefzadeh, S., Ghaffari, H. R., Ahmadi, E., Talebi, P., Abaszadeh Fathabadi, Z., Babai, F., Nikoonahad, A., Sharafi, K., & Hosseini-Bandegharai, A. (2017). A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air. *Chemosphere*, 172, 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.045>

Amable, I., Méndez, J., Bello, M., Fuentes, B., Escobar, L., & Zamora, R. (2017). Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Revista Médica Electrónica*, 39(5), 1160–1170.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242017000500017&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Bian, F., Zhong, Z., Zhang, X., Yang, C., & Gai, X. (2020). Bamboo - An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 246. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.125750>

BIOECO. (2021). *¿Metales pesados en los alimentos? - Bio Eco Actual*. <https://www.bioecoactual.com/2020/10/04/metales-pesados-en-los-alimentos/>

Cahuana, L., & Aduvire, O. (2019). *Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos Ambientales Mineros en el Perú*. 2(ISSN 2519-5352), 19–36.

Cairo, P., Alvares, O., Year, Y., Rodríguez, A., Mollineda, A., Torres, P., & Rodríguez, O. (2019). Efecto agronómico y económico de tres cepas nativas de actinomicetos en la producción de plántulas de tomate (Original). *Redel. Revista Granmense de Desarrollo Local*, 3(4), 167–176. <https://revistas.udg.co.cu/index.php/redel/article/view/1132>

Camacho, W., Colmenares, J., & Acuña, S. (2020). Estimación del riesgo de contaminación de fuentes hídricas de pesticidas (Mancozeb y Carbofuran) en Ventaquemada, Boyacá - Colombia. *Acta Agronomica*, 65(4). <https://doi.org/10.15446/ACAG.V65N4.50325>

Capparelli, M. V., Moulatlet, G. M., Abessa, D. M. de S., Lucas-Solis, O., Rosero, B., Galarza, E., Tuba, D., Carpintero, N., Ochoa-Herrera, V., & Cipriani-Avila, I. (2020). An integrative approach to identify the impacts of multiple metal contamination sources on the Eastern Andean foothills of the Ecuadorian

- Amazonia. *Science of The Total Environment*, 709, 136088.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.136088>
- Castro, M. (2020). *Ecuador: contaminación en afluentes del río Napo apunta a la minería*. <https://es.mongabay.com/2020/03/mineria-de-rio-afecta-afluentes-riotenena-en-ecuador/>
- Chauhan, P., & Mathur, J. (2020). Phytoremediation efficiency of *Helianthus annuus* L. for reclamation of heavy metals-contaminated industrial soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 29954–29966.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09233-x>
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., & Villagómez, J. (2011). *Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*. 300.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002
- ECOSEG. (2021). *Contaminantes Físicos*. <https://ecoseg.org/servicios/estudios-contaminantes-fisicos/>
- Espinosa, C. (2021). Conocimiento como causa y medio de resistencia a la minería de gran escala: casos heurísticos del Ecuador. *Íconos. Revista de Ciencias Sociales*, 69, 53–75. <https://doi.org/10.17141/ICONOS.69.2021.4481>
- Fernández, E., Bacchetta, G., Lallena, A. M., Navarro, F. B., Ortiz, I., & Jiménez, M. N. (2017). Use of BCR sequential extraction procedures for soils and plant metal transfer predictions in contaminated mine tailings in Sardinia. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 133–141.
<https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2016.09.013>

- Garay, E., & Orellana, L. (2022). *Relación entre la estructura forestal con la dominancia del bambú (Poaceae - Bambusoideae) en Bosques montanos andinos de la parroquia Molleturo*.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/39060/1/Trabajo%20de%20Titulacion.pdf>
- Gil, M., Soto, A., Usma, J., & Gutiérrez, O. (2018). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7(2), 52–73.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000200005&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Gómez, O. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Revista de La Facultad de Medicina*, 66(1), 7–8.
<https://doi.org/10.15446/REVFACMED.V66N1.70775>
- González, J., Papue, A., González, V., Borja, A., & Oliva, D. (2018a). *Crecimiento y conservación de Piptocoma discolor (Pigüe) en la Provincia de Pastaza, Ecuador*. 6(3). <https://doi.org/10.17528/CIFOR/004424>
- González, J., Papue, A., González, V., Borja, A., & Oliva, D. (2018b). *El uso de pigüe (Piptocoma discolor) por los pequeños productores de Napo, Ecuador: Manejo sostenible de una especie pionera de madera para los medios de vida locales*. <https://doi.org/10.17528/CIFOR/004424>
- Greksa, A., Ljevnaić-Mašić, B., Grabić, J., Benka, P., Radonić, V., Blagojević, B., & Sekulić, M. (2019a). Potential of urban trees for mitigating heavy metal pollution in the city of Novi Sad, Serbia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7791-7>

- Greksa, A., Ljevnaić-Mašić, B., Grabić, J., Benka, P., Radonić, V., Blagojević, B., & Sekulić, M. (2019b). Potential of urban trees for mitigating heavy metal pollution in the city of Novi Sad, Serbia. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7791-7>
- Grijalva, A., Jiménez, M., & Ponce, H. (2020). *Vista de Contaminación del agua y aire por agentes químicos*. <https://www.recimundo.com/index.php/es/article/view/883/1425>
- Hazin, M. S. (2013). Desarrollo minero y conflictos socioambientales. *Macroeconomía Del Desarrollo*, *137*, 58. <http://www.cepal.org/es/publicaciones/5369-desarrollo-minero-conflictos-socioambientales-casos-colombia-mexico-peru>
- Hu, S., Ran, W., & Fan, H. (2003). *Geochemical behaviour of heavy metals in soil-crops system*. *39*(5), 84–87.
- INS. (2019). *Los Contaminantes Ambientales*. *4*(5), 1–12. https://www.ins-cr.com/media/2731/1007783_folletoloscontaminantes_web.pdf
- INSST. (2019). *¿Qué son los agentes biológicos? ¿Qué es y Cómo se Usa?* . <https://www.insst.es/-/que-son-los-agentes-biologicos->
- ISO, 11466. (1995). *Soil quality - extraction of trace elements soluble in aqua regia*.
- 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>

- Kabata, A. (2010). Trace elements in soils and plants. *Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition, 4*, 1–520. <https://doi.org/10.1201/B10158/TRACE-ELEMENTS-SOILS-PLANTS-ALINA-KABATA-PENDIAS>
- Kalra, Y. (1997). *Handbook of reference methods for plant analysis* (Yash Kalra, Ed.). CRC Press.
- Kołodzyńska, D., Krukowska, J., & Thomas, P. (2017). Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon. *Chemical Engineering Journal, 307*, 353–363. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.088>
- Landa, Y. (2019). Los recursos mineros en las cadenas globales de valor. *Problemas Del Desarrollo, 50(199)*, 31–58. <https://doi.org/10.22201/IIEC.20078951E.2019.199.68330>
- Leon, R. (2019). *Contaminación ambiental y sus efectos en la salud* [Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/26511/Leon%20Rojas%2c%20Roberto%20Carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Li, X., Li, Z., Lin, C. J., Bi, X., Liu, J., Feng, X., Zhang, H., Chen, J., & Wu, T. (2018). Health risks of heavy metal exposure through vegetable consumption near a large-scale Pb/Zn smelter in central China. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 161*, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.080>
- Liang, J., Fang, H. L., Zhang, T. L., Wang, X. X., & Liu, Y. D. (2017). Heavy metal in leaves of twelve plant species from seven different areas in Shanghai, China.

Urban Forestry and Urban Greening, 27, 390–398.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.006>

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

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

Massa, P., Cisne, R., & Maldonado, D. (2018). Minería a gran escala y conflictos sociales: un análisis para el sur de Ecuador. *Problemas Del Desarrollo*, 49(194), 119–141. <https://doi.org/10.22201/IIEC.20078951E.2018.194.63175>

Miao, L., Ma, Y., Xu, R., & Yan, W. (2011). Environmental biogeochemical characteristics of rare earth elements in soil and soil-grown plants of the Hetai goldfield, Guangdong Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 63(3), 501–511. <https://doi.org/10.1007/S12665-010-0718-9>

Moncayo, G., & Narváez, C. (2019). *Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (Ochroma Pyramidale) Ecuatoriana*.
<https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt/issue/view/22>

Núñez, C., Moncayo, G., Muñoz, C., & Melo, J. (2018). Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (Ochroma Pyramidale) Ecuatoriana.

Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE, 13(1).

<https://doi.org/10.24133/CCTESPE.V13I1.788>

Oviedo-Anchundia, R., Moina-Quimí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). Contamination by heavy metals in the south of Ecuador associated to the mining activity. *Bionatura*, 2(4), 437–441. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.02.04.5>

Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>

PDyOT. (2019). *Plan De Desarrollo Y Gobierno Parroquial Rural*. <http://repositorio.iaen.edu.ec/bitstream/24000/76/1/IAEN-011-2007.pdf>

Reyes, Yulieth. (2020a). Estudio de bioacumulación de metales pesados en plantas de consumo humano para sensado molecular In situ. *Pontificia Universidad Javeriana*.

Reyes, Yulieth. (2020b). Estudio de bioacumulación de metales pesados en plantas de consumo humano para sensado molecular In situ. *Pontificia Universidad Javeriana*.

Robinson, B., Chiarucci, A., Brooks, R., Petit, D., Kirkman, J., Gregg, P., & de Dominicis, V. (1997). The nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel. *Journal of Geochemical Exploration*, 59(2), 75–86. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00010-1)

- Robles, R., Foladori, G., & Záyago Lau, É. (2020). Industria 4.0 en la minería mexicana. *Revista de El Colegio de San Luis*, 10(21). <https://doi.org/10.21696/RCSL102120201167>
- Sastreý, J., Sahuquillo, A., Vidal, M., & Vidal, G. (2002). *Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction.*
- Sawidis, T., Krystallidis, P., Veros, D., & Chettri, M. (2012). A study of air pollution with heavy metals in Athens city and Attica basin using evergreen trees as biological indicators. *Biological Trace Element Research*, 148(3), 396–408. <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9378-9>
- Schorr, B. (2018). Oportunidades desiguales: empresas y Estado en conflictos sobre la minería en Chile. *Estudios Atacameños*, 57(57), 239–255. <https://doi.org/10.4067/S0718-10432018005000601>
- Šichorová, K., Tlustoš, P., Száková, J., Kořínek, K., & Balík, J. (2004). Horizontal and vertical variability of heavy metals in the soil of a polluted area. *Plant, Soil and Environment*, 50(12), 525–534. <https://doi.org/10.17221/4069-pse>
- Song, C., Lei, L., & Yang, Q. (2007). Pb, Cu botanogeochemical anomalies and toxic effects on plant cells in Pb-Zn (Sn) ore fields, Northeast Guangxi Autonomous Region, China. *Chinese Journal of Geochemistry* 2007 26:3, 26(3), 329–332. <https://doi.org/10.1007/S11631-007-0329-7>
- Sun, Z., Chen, J., Wang, X., & Lv, C. (2016). Heavy metal accumulation in native plants at a metallurgy waste site in rural areas of Northern China. *Ecological Engineering*, 86, 60–68. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2015.10.023>

- Szymanowska, A., Samecka-Cymerman, A., & Kempers, A. J. (1999). Heavy metals in three lakes in West Poland. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *43*(1), 21–29. <https://doi.org/10.1006/eesa.1998.1747>
- Tarras-Wahlber, N. H., Flachier, A., Fredriksson, G., Lane, S., Lundberg, B., & Sangfors, O. (2000). Environmental impact of small-scale and artisanal gold mining in southern Ecuador: Implications for the setting of environmental standards and for the management of small-scale mining operations. *Ambio*, *29*(8), 484–491. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.8.484>
- Tejada, C., Villabona, Á., & Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, *18*(34), 109. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- TULSMA. (2012). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, TULSMA. *Registro Oficial Edición Especial 2 de 31-Mar.-2003*, 1–319.
- Ugolini, F., Tognetti, R., Raschi, A., & Bacci, L. (2013). Quercus ilex L. as bioaccumulator for heavy metals in urban areas: Effectiveness of leaf washing with distilled water and considerations on the trees distance from traffic. *Urban Forestry and Urban Greening*, *12*(4), 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.05.007>
- USA.GOV. (2020). *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos | USAGov*. 2020. <https://www.usa.gov/espanol/agencias-federales/agencia-de-proteccion-ambiental-de-estados-unidos>
- Vásconez, M., & Torres, L. (2018). Minería en el Ecuador: sostenibilidad y licitud. *Revista Estudios Del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, *6*(2), 83–103.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-01322018000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=pt

WFO. (2022). *World Flora Online*. <http://www.worldfloraonline.org>

WHO. (2020). *Agua potable*. <https://www.who.int/en/news-room/factsheets/detail/drinking-water>

Wu, Y., Peng, X., & Hu, X. (2013). Vertical distribution of heavy metal in soil of abandoned vehicles dismantling area. *Asian Journal of Chemistry*, 25(15), 8423–8426. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.14770>

Yoplac, K., & Tuesta, O. (2018). Prospección de especies arbóreas para la fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en el Distrito de Imaza, Bagua, Amazonas. *Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas - UNTRM*. <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1364>

Zhang, H., Xu, Z., Guo, K., Huo, Y., He, G., Sun, H., Guan, Y., Xu, N., Yang, W., & Sun, G. (2020). Toxic effects of heavy metal Cd and Zn on chlorophyll, carotenoid metabolism and photosynthetic function in tobacco leaves revealed by physiological and proteomics analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202(June), 110856. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110856>

ANEXOS

Anexo 1. Actividad minera en la comunidad Yutzupino



Anexo 2. Toma de muestras de *O. pyramirale*



Anexo 3. Toma de muestras de *B. vulgaris*



Anexo 4. Toma de muestras de *P. discolor*



Anexo 5. Valores medios de metales pesados

VALORES MEDIOS DE METALES PESADOS EN HOJAS Y SUELO POR PLANTA								
Especie	Cdfoliar	Nifoliar	Pbfoliar	Fefoliar	Cdsuelo	Nisuelo	Pbsuelo	Fesuelo
Balsa	0.0888	6,0517	12,1465	35,4733	0.0388	7,2633	22,9232	845,1532
Pigue	0.3500	4,7871	55,8296	88,5379	0.0653	10,2086	42,5871	667,4222
Bambú	0.0415	6,7544	9,6404	156,5420	0.1324	18,2201	57,7421	536,2353