UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS DE CINCO ESPECIES QUE HABITAN EN ENTORNOS MINEROS DE LA REGIÓN AMAZÓNICA ECUATORIANA

AUTOR(ES):

Guerrón Torres Jorge de Jesús

Rosero Sánchez Jenny Elizabeth

DOCENTE - TUTOR:

Msc. Arteaga Crespo Yasiel, PhD

Puyo - Pastaza - Ecuador

2022

POTENCIAL BIOACUMULADOR DE METALES PESADOS DE CINCO ESPECIES QUE HABITAN EN ENTORNOS MINEROS DE LA REGIÓN AMAZÓNICA ECUATORIANA

Guerrón Torres Jorge de Jesús
for2017039@uea.edu.ec

Rosero Sánchez Jenny Elizabeth
for2017098@uea.edu.ec

Arteaga Crespo Yasiel, PhD.
yarteaga@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carrera de Ingeniería Forestal

Resumen

En el presente estudio se determinó las diferentes concentraciones de metales en el suelo y en las hojas de los árboles de la comunidad Yutsupino, perteneciente a la provincia de Napo, con el objetivo de evaluar el potencial bioacumulador de metales pesados que puedan ayudar a mitigar la contaminación provocada por la minería. Se seleccionó plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni), hierro (Fe) y aluminio (Al) para el análisis del material vegetal(hojas) y del suelo en 5 lugares cercanos a la mina. Las especies arbóreas con las que se trabajó son especies nativas de la amazonia Cedro (*Cedrela odorata*), Cutanga (*Parkia multijuga*), Guaba (*Inga edulis*), Guarumo (*Cecropia macrophylla*) Uva de monte (*Pourouma cecropiifolia*). Las muestras de suelo se analizaron con el objetivo de identificar la concentración de metales pesados en los alrededores de la mina. Se empleó el análisis de varianza (ANOVA) y Tukey a todos los datos obtenidos para encontrar diferencias en las concentraciones de metales pesados en las especies vegetales y en el suelo. Se calculó el factor de bioconcentración de todas las especies, en la cual se demostró que las especies de *Inga edulis, Cecropia macrophylla, Pourouma cecropiifolia* y *Parkia multijuga* tiene la capacidad de retener Pb y Ni. La especie arbórea *Cedrela odorata* solo retiene Pb, mientras que los metales pesados restantes son retenidos en menor cantidad.

***Palabras Clave**:* Metales pesados, Potencial bioacumulador, Factor de bioconcentración.

Abstract

The present study determined the different concentrations of metals in the soil and in the leaves of trees in the Yutsupino community, belonging to the Napo province, with the objective of evaluating the bioaccumulative potential of heavy metals that can help mitigate the contamination caused by mining. Lead (Pb), cadmium (Cd), nickel (Ni), iron (Fe) and aluminum (Al) were selected for the analysis of plant material (leaves) and soil at 5 sites near the mine. The tree species we worked with are native species of the Amazon region Cedar (*Cedrela odorata*), Cutanga (*Parkia multijuga*), Guaba (*Inga edulis*), Guarumo (*Cecropia macrophylla*) and Uva de monte (*Pourouma cecropiifolia*). Soil samples were analyzed to identify the concentration of heavy metals in the area surrounding the mine. Analysis of variance (ANOVA) and Tukey were used on all data obtained to find differences in heavy metal concentrations in plant species and soil. The bioconcentration factor of all species was calculated, which showed that the species *Inga edulis, Cecropia macrophylla, Pourouma cecropiifolia* and *Parkia multijuga* have the capacity to retain Pb and Ni. The tree species *Cedrela odorata* only retains Pb, while the remaining heavy metals are retained in smaller quantities.

Keywords: Heavy metal; Potential bio-accumulator; Bioconcentration factor

Introducción

La amazonia ecuatoriana ha sufrido constantemente la contaminación de metales pesados por parte de las industrias petroleras y mineras las cuales representan una amenaza para la naturaleza y la vida humana. La minería en la amazonia se realiza a pequeña escala de manera legal e informal por parte de las comunidades indígenas como lo han venido haciendo generación tras generación, de igual manera se encuentran empresas privadas dedicadas a la extracción de oro(Capparelli et al., 2020) . Durante la extracción y exploración se genera contaminación y dispersión de metales pesados dañinos los cuales pueden estar vigentes en la naturaleza en función de los parámetros físicos y químicos que presenta el suelo (Prieto, Gonzales, Roman&Prieto,2009).

Los metales pesados tienden a ser tóxicos para el ambiente afectando las relaciones ecológicas ya que estos metales no se degradan de forma química ni biológica (Chauhan & Mathur, 2020).Existen diferentes tipos de metales pesados como es el caso de los metales biogénicos que no cumplen funciones biológicas dentro de los organismos

vivos(Londoño Franco et al., 2016). De igual manera se encuentran metales fundamentales para el desarrollo de las plantas que en concentraciones altas provoca afecciones negativas (Parihar et al., 2021).

Muchas especies vegetales son capaces de tolerar elevadas concentraciones de metales pesados y acumular en sus tejidos sustancias toxicas que confirma la presencia de estos (Sawidis et al., 2012).Los efectos en las plantas pueden variar en función de las características del suelo, especie vegetal y el tipo de metal que se encuentra en el área degradada (Greksa et al., 2019). Las plantas pueden ser capaces de absorber metales a través de su sistema radical y almacenar en sus hojas, las cuales pueden detectar la presencia de metales pesados, funcionando como un biomonitor(Takarina & Pin, 2017).El objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial bioacumulador de las 5 especies arbóreas. El resultado de este trabajo permitirá conocer la capacidad de las especies de bioacumular metales pesados en sus partes aéreas.

Materiales y métodos

Área de estudio

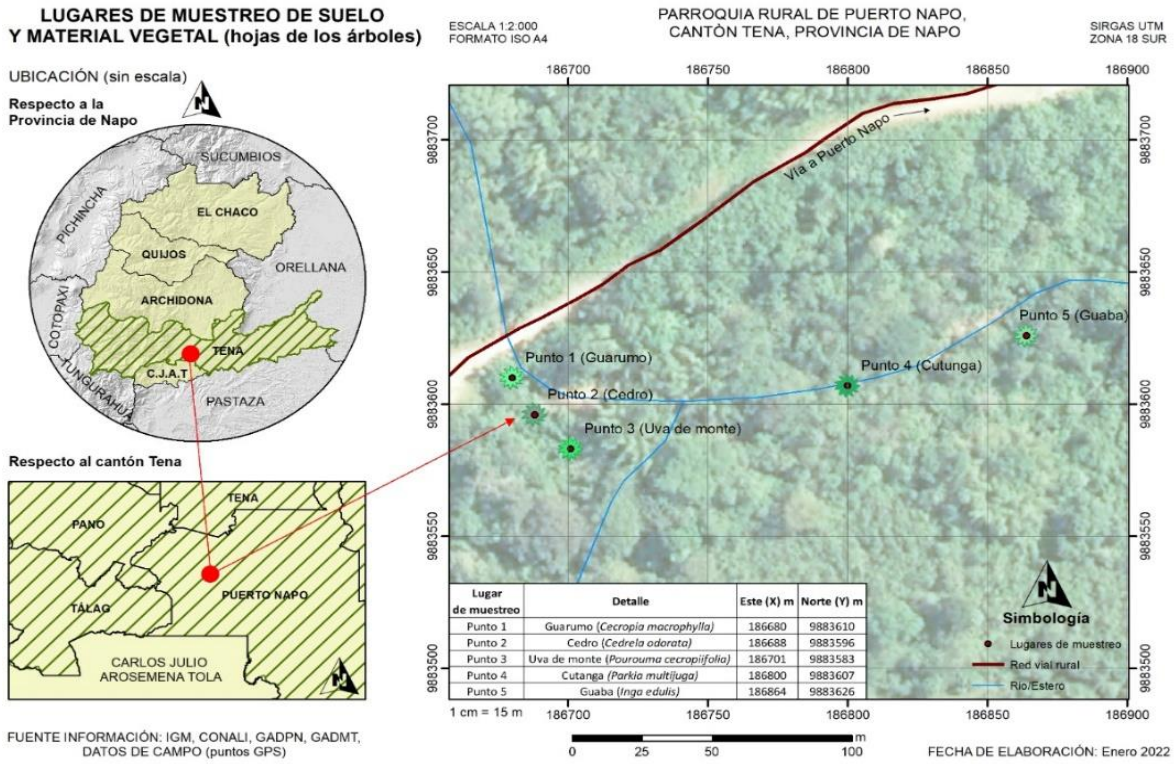
El presente estudio se realizó en la comunidad Yutsupino, parroquia de Puerto Napo perteneciente a la provincia de Napo, la mina se encuentra en una orilla del Rio Jatunyacu y una distancia 5,1/2 Km de la ciudad de Tena. La temperatura promedio mensual de 24 °C, humedad relativa 84%, la precipitación promedio anual es de 295,53mm (INAMHI,2014).

Este estudio incluyo 5 especies arbóreas nativas de la amazonia ecuatoriana, los sitios seleccionados para analizar los metales pesados en los árboles se encontraban cercanas a la mina y las muestras de suelo. El muestro se ejecutó en el mes de enero del 2019.

Muestreo de materia vegetal y del suelo

Para el analizar los metales pesados presentes en el material vegetal(hojas) se seleccionó cinco especies de árboles: Cedro (*Cedrela odorata*), Cutanga (*Parkia multijuga*), Guaba (*Inga edulis*), Guarumo (*Cecropia macrophylla*), Uva de monte (*Pourouma cecropiifolia*). Las especies seleccionadas son especies que se encuentra comúnmente en la amazonia. El material vegetal se recogió directamente de los árboles, seleccionando tanto hojas viejas como jóvenes para la cual se utilizó una tijera podadora, las cuales se etiqueto para posteriormente guardar en bosas ziploc.

Figura 1. Lugares de muestreo de suelo y material vegetal (hojas de los árboles)



Las muestras de suelo se tomaron junto al dosel de los árboles seleccionados previo al muestro, se eliminaron hojarascas y raíces. Las muestras de suelo se tomaron a 30cm de profundidad se recolecto 3 muestras por sitio, estas muestras se las etiqueto para llevarlas al laboratorio y analizar plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni), hierro (Fe) y aluminio (Al).

Análisis de muestras de suelo y plantas

Las muestras recolectadas de suelo y materia vegetal se secaron a temperatura ambiente durante 7 días, antes de ser llevadas a la estufa de circulación forzada a una temperatura de 85 °C por 4 horas. Las muestras ya secas se colocaron en un mortero para triturarlas hasta obtener un material completamente fino.

Para el procesamiento de la digestión de las muestras de suelo y material vegetal se utilizó un vial previamente etiquetado. Se pesaron 0,5g a cada una de las muestras, se agregó 7mL de ácido nítrico((HNO3) 65% y seguidamente 1mL de peróxido de hidrógeno((H_2O_2) 30%, se cerró el vial y se colocó en el equipo de digestión asistido por

microondas (ETHOS ONE) por un tiempo de 50 minutos, culminado el proceso de digestión se dejó reposar la muestra a temperatura ambiente(Wang et al., 2019).

El material de estudio ya digeridas fue transferidas a un matraz aforado anteriormente etiquetado y se enrasó a 25mL con agua destilada. Las muestras fueron filtradas previo al análisis, finalmente las determinaciones de metales pesados se realizaron en el espectrómetro de absorción atómica, previamente establecidas las condiciones de análisis.

Análisis de datos

En el presente análisis está comprendido de análisis de varianza (ANOVA) para establecer diferencias en las concentraciones de metales pesados de (Pb, Cd, Zn, Fe, Al) de los árboles analizados (*Cedrela odorata, Parkia multijuga, Inga edulis, Cecropia macrophylla, Pourouma cecropiifolia)* y las concentraciones de suelo en los diferentes lugares de los árboles (5 sitios). Se utilizó el software Origin 2021, se procedió a realizar un estudio de conglomerados y Pearson para la similitud y la correlación se calculó para definir la igualdad que existía entre en las concentraciones de HM en las plantas como también en las zonas de identificación de cada árbol.

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 los árboles. El factor de bioconcentración (FBC) es utilizado para medir la capacidad de captación de metales pesados por parte de las plantas (parte área y raíz) con relación al suelo (Audet & Charest, 2007). Para el cálculo de FBC se aplicó esta ecuación.

$$FBC = \frac{C.Follaje}{C.Suelo}$$

En este estudio el factor de bioconcentración fue utilizado para saber la cantidad de metales acumulados en cada especie arbórea.

Resultados y Discusión

A continuación, se puede observar los resultados obtenidos de las concentraciones de metales pesados en las especies forestales. Se realizaron medidas de las concentraciones de 5 metales (Pb, Cd, Ni, Fe y Al) tanto en el suelo como en las áreas foliares de 5 especies forestales (*Cedrela odorata, Parkia multijuga, Inga edulis, Cecropia macrophylla y Pourouma cecropiifolia)* con tres réplicas de cada uno.

Tabla 1

Promedio de concentraciones de metales en el suelo circundante de cada especie forestal.

	Concentración metales pesados en el suelo (mg/kg)				
ESPECIE	**Pb**	**Cd**	**Ni**	**Fe**	**Al**
Cedrela odorata	1.735	1.49	1.98	390.8	425.2
Parkia multijuga	1.89	1.93	2.6	239	503.2
Inga edulis	1.27	1.8	3.6	210.3	322.4
Cecropia macrophylla	1.18	1.77	3.03	198	392.62
Pourouma cecropiifolia	1.73	1.49	2.08	321	542.2

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1 se observa el promedio de las 3 réplicas en el análisis del suelo para la concentración de metales.

En el caso de la concentración de metales en el suelo tabla 1, se observó una gran cantidad de concentración de Fe y Al en comparación con los otros metales; por ejemplo, la especie *Cedrela odorata* posee 390.8 mg/kg de Fe siendo la de mayor concentración y la especie *Pouroma cecropiifolia* obtuvo una concentración de 542 mg/kg Al. Mientras que, en los metales como el Ni, la *Inga Edulis* obtuvo 3.6 mg/kg; en el Cd *la Parkia multijuga* obtuvo 1.93mg/kg y también en el Pb con 1.89 mg/kg.

Figura 2. Resultados del análisis estadístico ANOVA de la concentración edáfica de los metales. (Elaborado por Software Origin). A) Concentración de Pb. B) Concentración de Cd. C)Concentración de Ni. E) Concentración de Fe. F) Concentración de Al.

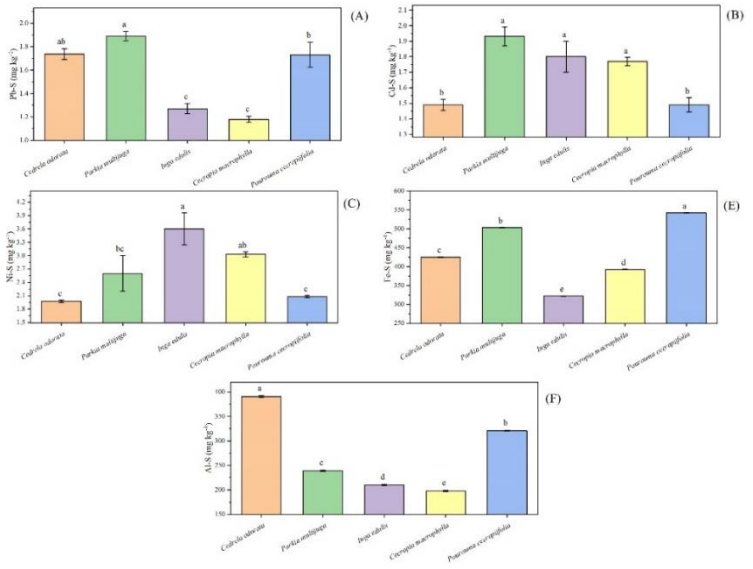
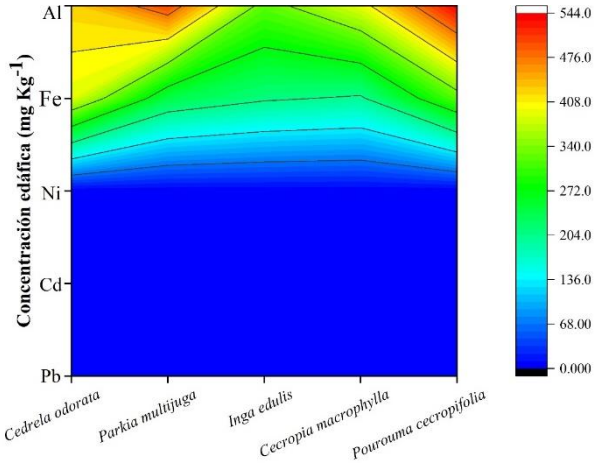


Figura 3. Gráfica de contorno de concentración edáfica de metales pesados y las especies arbóreas.



Según la figura 2 y 3 se puede notar la presencia elevada de los metales Fe y Al, constatando los datos antes descritos. Cabe señalar que en la figura 3 el color verde, amarillo y rojo describen una alta concentración; así pues, la *Parkia multijuga* y la *Pourouma cecropiifolia* son las especies con mayor cantidad de Al.

Tabla 2

Promedio de concentraciones de metales en el área foliar.

	Concentración metal en el área foliar (mg/kg)				
ESPECIE	**Pb**	**Cd**	**Ni**	**Fe**	**Al**
Cedrela odorata	0.25	0.98	4.25	79.03	149.60
Parkia multijuga	4.32	0.6	1.80	70.04	115.40
Inga edulis	3.46	0.23	6.18	99.02	140.00
Cecropia macrophylla	3.47	0.89	6.93	69.03	109.40
Pourouma cecropiifolia	7.05	0.08	2.31	87.03	117.33

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 se observa el promedio de las 3 réplicas en el análisis de la concentración de metales en la zona foliar de cada especie.

Por otro lado, en las concentraciones de metales pesados en el área foliar tabla 2, también el Fe y Al fueron los metales con mayores concentraciones, siendo la especie *Cedrela odorata* con 149.60 mg/kg de Al, la más alta concentración; y en Fe la *Inga edulis* con 99.02 mg/kg fue la más alta; mientras que en el Ni la mayor concentración la obtuvo la *Cecropia macrophylla* con 6.93 mg/kg. La *Cedrela odorata* obtuvo nuevamente una alta

concentración, pero esta vez en el Cd con 0.98 mg/kg. Finalmente, en el Pb la especie con mayor concentración fue la *Pouroma cecropiifolia* con 7.05 mg/kg.

Figura 4. Resultados del análisis estadístico ANOVA de la concentración foliar de los metales. (Elaborado por Software Origin). A) Concentración de Pb. B) Concentración de Cd. C)Concentración de Ni. E) Concentración de Fe. F) Concentración de Al.

.

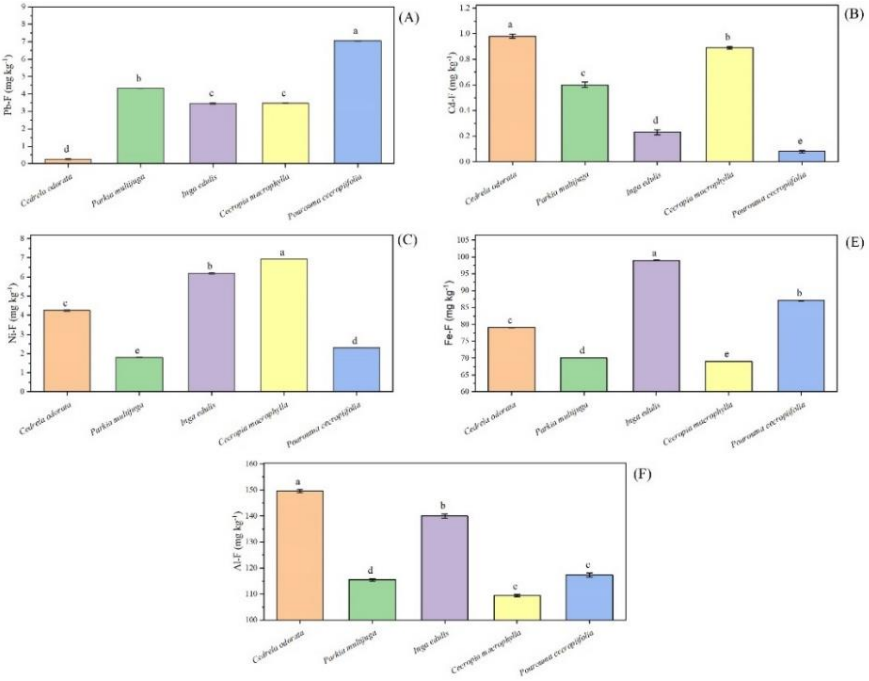
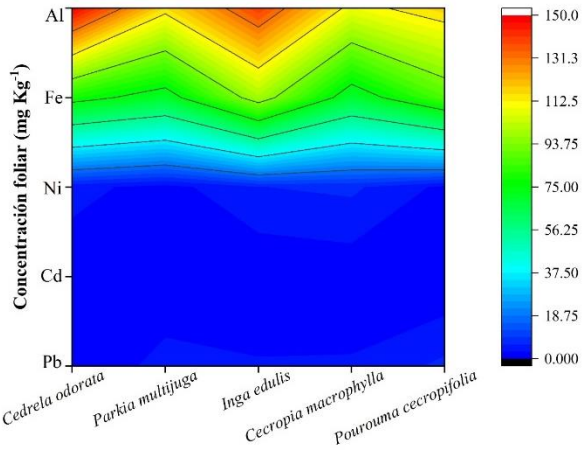


Figura 5. Gráfica de contorno de concentración foliar de metales pesados y las especies arbóreas



Según la figura 4 y 5 se puede observar la presencia elevada de los metales Al y Fe confirmando los datos antes descritos. En la figura 5 el color verde, amarillo y rojo describen las altas concentraciones. Siendo la *Cedrela odorata* y la *Inga edulis* las especies con mayor concentración de Al.

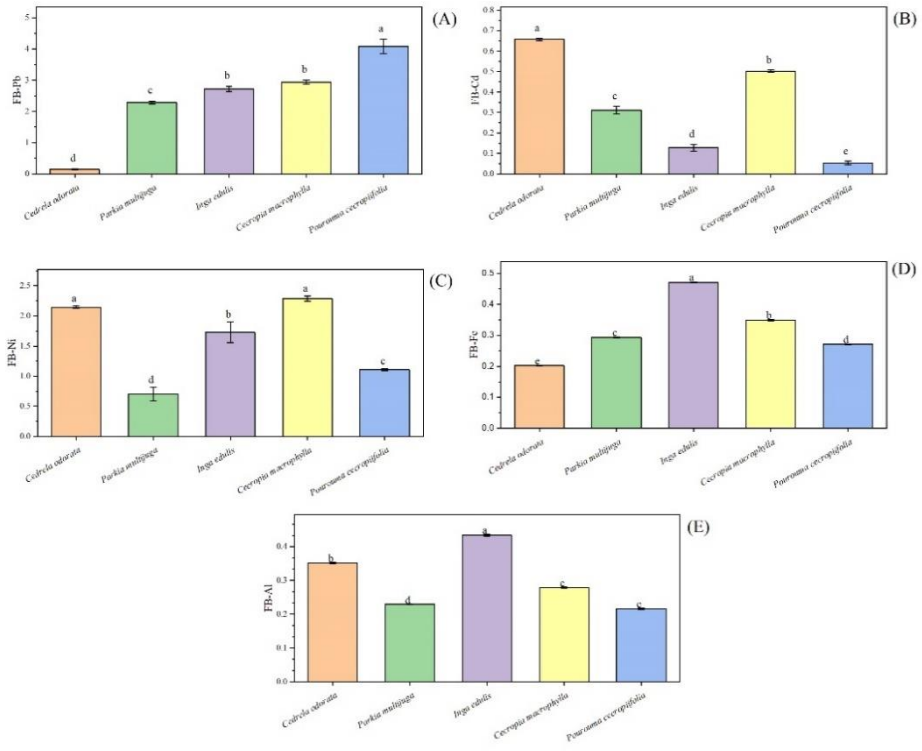
Tabla 3

Promedio del Factor de Bioconcentración las especies arbóreas

Factor de Bioconcentración (FBC)					
ESPECIE	**Pb**	**Cd**	**Ni**	**Fe**	**Al**
Cedrela odorata	0.1444	0.6578	2.147	0.2022	0.3518
Parkia multijuga	2.2864	0.3113	0.702	0.2931	0.2293
Inga edulis	2.7262	0.1283	1.728	0.4708	0.4342
Cecropia macrophylla	2.9416	0.5029	2.288	0.3487	0.2786
Pourouma cecropiifolia	4.0846	0.0538	1.109	0.2711	0.2164

Fuente: Elaboración propia

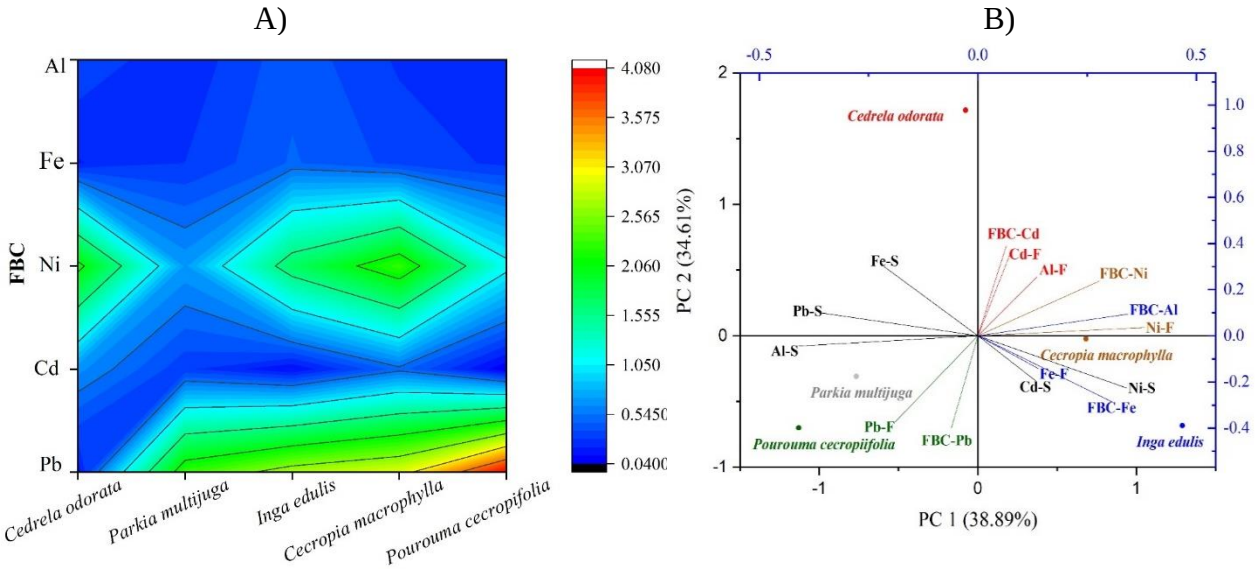
Figura 6. Resultados del análisis estadístico ANOVA del factor de Bioconcentración. (Elaborado por Software Origin). A) Concentración de Pb. B) Concentración de Cd. C)Concentración de Ni. E) Concentración de Fe. F) Concentración de Al.



Utilizando la fórmula del Factor de Bioconcentración pudimos obtener el resultado de las tres réplicas, sacando así el promedio de ella, como se observa en la Tabla 3. Además, en la figura 6 con el resultado de la ANOVA aplicada para estos datos podemos comprobar que existe una relación muy fuerte entre las concentraciones obtenidas en el área foliar y

las concentraciones edáficas, dándonos como resultado las especies con menor y mayor capacidad para bioacumular metales pesados. Así pues, la *Cedrelo Odorata* tiene una baja capacidad para bioacumular Pb, pero posee una alta capacidad para bioacumular el Ni con 2.147 de concentración de este metal. La *Parkia multijuga* posee una baja capacidad para bioacumular Al, mientras que tiene una alta capacidad para bioacumular Pb con 22864 de concentración. La *Inga edulis* tiene una baja capacidad para bioacumular Cd y una alta capacidad para bioacumular Pb con 2.7262. Las especies *Cecropia macrophylla* y *Pourouma cecropiifolia* tienen una baja capacidad de bioacumulación de Al, y poseen una alta capacidad de bioacumulación de Pb de 2.9416 y 4.0846 sucesivamente.

Figura 7. A) Gráfica de contorno del factor de Bioconcentración y las especies arbóreas. B) análisis de componentes principales de concentraciones de los metales pesados.



Según la figura 7 en la parte A se observa la relación que existe entre las especies y los metales pesados observando la capacidad que tienen para bioacumularlos. Por lo tanto, especies como la *Cedrelo odorata y la Cecropia Macrophylla* poseen una alta capacidad de bioacumular Ni. Así mismo las especies *Parkia multijuga, Inga edulis, Cecropia macrophylla y Pourouma cecropiifolia* tiene la capacidad de bioacumular el Pb, destacando entre ellas a la *Pouroma cecropiifolia* ya que su capacidad de bioacumulación es mucho mayor a las demás. Por otro lado, en la parte B de esta figura se ve la correlación entre las líneas de *Pourouma cecropiifolia* con la línea del factor de bioacumulación del

Pb. Sirviendo así para acumular metales en exceso que posee la zona estudiada que está afectada por la minería y siendo un posible agente de fitorremediación para un territorio perturbado por las altas concentraciones de metales pesados.

Conclusiones

En conclusión, se pudo determinar las concentraciones de metales pesados (Fe, Al, Ni, Pb y Cd) que existen en la comunidad de Yutsupino, parroquia de Puerto Napo, que se encuentra cercana a minas. Teniendo como resultado, altas concentraciones de Al y Fe que eran muy superiores a los demás metales.

Especies como la Cecropia macrophylla y la Cedrela odorata poseen un alto factor de bioconcentración con 2.288 y 2.147 sucesivamente en el Níquel (Ni).

La especie Pourouma cecropiifolia posee un alto factor de bioconcentración de Plomo (Pb) teniendo una gran capacidad para bioacumular este metal en sitios afectados por esta toxicidad.

Estas especies al tener una alta capacidad para bioacumular dichos metales, pueden ser parte de un plan de fitorremediación en donde se utilice la plantación de dichas especies para reducir la toxicidad de los metales en una zona afectada por estos metales

Referencias bibliográficas

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

Audet, P., & Charest, C. (2007). Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. *Environmental Pollution*, *147*(1), 231–237. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.08.011

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. *Revista de Medio Ambiente y Mineria*, *4*, 19–36.

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

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*, 29954–29966. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-020-09233-x

Cuentas Alvarado, M., Velasquez Viza, O., Arizaca Avalos, A., & Huisa Mamani, F. (2019). Evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros en la comunidad de Condoraque - Puno. *Revista de Medio Ambiente y Mineria*, *4*, 43–57.

DalCorso, G., Manara, A., & Furini, A. (2013). An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots. *Metallomics*, *5*, 1117–1132. https://doi.org/10.1039/c3mt00038a

Flores Briceño, R. (2018). Efectos adversos de metales pesados en la agricultura de la cuenca baja del rio Huaura-provincia Huaura 2017. *Revista CIENCIA Y TECNOLOGÍA*, *14*, 119–131.

García Gómez, z A. G. (2013). Evaluación de la contaminación por vertimiento de mercurio en la zona minera, Pacarní - San Luis departamento del Huila. *Revista de Tecnología*, *12*, 91–98. https://doi.org/https://doi.org/10.18270/rt.v12i1.653

Greksa, A., Ljevnaić-Mašić, B., Grabić, J., Benka, P., Radonić, V., Blagojević, B., & Sekulić, M. (2019). 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

Guerrero Useda, M. E., & Pineda Acevedo, V. (2016). CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN LA ZONA MINERA DE RASGATÁ BAJO (TAUSA). MODELO CONCEPTUAL. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *26*, 57–74. https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rcin.1664.

INAMHI. 2013. Series Mensuales de Datos Meteorológicos del Cantón Tena. Ecuador

Kashyap, R., Verma, K. S., Thakur, M., Verma, Y., & Handa, S. (2016). Phytoextraction and Bioconcentration of Heavy Metals by Spinacia olera Grown in Paper Mill Effluent Irrigated Soil. *Nature Environment and Pollution Technology*, *15*, 817–824.

La Rotta Latorre, Á. M., & Torres Tovar, M. H. (2017). Explotación minera y sus impactos

ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. *Saúde Em Debate*, *41*, 77–91.

Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnoloía En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *14*(2), 145. https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153

Munive Cerrón, R., Loli Figueroa, O., Azabache Leyton, A., & Gamarra Sánchez, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (Zea mays L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, *9*, 551–560. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11

Navarro Aviñó, J. P., Aguilar Alonso, I., & López Moya, J. R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, *16*, 10–25. http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=488%0D

Parihar, J. K., Parihar, P. K., Pakade, Y. B., & Katnoria, J. K. (2021). Bioaccumulation potential of indigenous plants for heavy metal phytoremediation in rural areas of Shaheed Bhagat Singh Nagar, Punjab (India). *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 2426–2442. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-020-10454-3

Peláez P, M., Casierra Posada, F., & Torres R, G. A. (2014). TÓXIDAD DE CADMIO Y PLOMO EN Pasto Tanner Brachiaria arrecta. *REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS*, *31*, 3–13.

Pérez Martínez, I., & Martín Romero, F. (2015). Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, *67*.

Perez Peralta, M. del R., & Volke Sepúlveda, T. L. (2012). La defensa antioxidante en las plantas: Una herramienta clave para la fitorremediación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *11*, 75–88.

Prieto, Gonzalez, Roman, P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provinentes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *10*(6), 29–44. http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/939/93911238011.pdf

Raja, V., Majeed, U., Kang, H., Andrabi, K. I., & John, R. (2017). Abiotic stress: Interplay between ROS, hormones and MAPKs. *Environmental and Experimental Botany*, *137*, 142–147. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.02.010

Raskin, I., Kumar, P. N., Dushenkov, S., & Salt, D. E. (1994). Bioconcentration of heavy metals by plants. *Urrent Opinion in Biotechnology*, *5*, 285–290. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0958-1669(94)90030-2.

Rodríguez, M., Alvarez Goncalvez, C. V, Fernández Cereli, A., & Pérez Carrera, A. (2016). Efecto del arsénico sobre plantas forrajeras de importancia pecuaria en la Argentina. *InVet*, *18*, 1–7.

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

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

Villegas Torres, O. G., Dominguez Patiño, M. L., Martinez Jaime, P., & Aguilar Cortez, M. (2015). Cobre y Níquel, microelementos esenciales en la nutrición vegetal. *Revista de*

Ciencias Naturales y Agropecuarias, *2*, 285–295.

Vysloužilová, M., Tlustoš, P., Száková, J., & Pavlíková, D. (2003). As, Cd, Pb and Zn uptake by Salix spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements. *Plant, Soil and Environment*, *49*(5), 191–196. https://doi.org/10.17221/4112-pse

Wang, Z., Liu, X., & Qin, H. (2019). Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, *200*(December 2018), 159–166. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.02.005

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, *368*(2–3), 456–464. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016

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*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110856.

ANEXOS.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

Impactos al medio ambiente por la explotación minera

Impactos a la atmósfera.

La calidad de aire se ve afecta por los procesos de exploración y explotación, el mayor impacto se genera durante la quema de oro-mercurio en el proceso de amalgación, incorporando a la atmosfera gases que contiene mercurio ingresando al ciclo hidrológico (García Gómez, 2013). Existen otros contaminantes como las partículas generadas en el yacimiento minero y las emisiones que emanan las máquinas contribuyendo a la contaminación ambiental a través de los gases que provocan éstas actividades (La Rotta Latorre & Torres Tovar, 2017).

Impactos al suelo.

Las actividades antropogénicas que se realizan durante la fase de extracción afecta directamente al suelo alterando su composición física y química por la pérdida de cobertura forestal, por consiguiente, existe una disminución en el contenido de materia orgánica perjudicando a la microfanuna y mesofauna lo que reduce la capacidad productiva del suelo de modo que con el paso del tiempo con las actividades intensivas y la maquinaria pesada la cual es utiliza para la extracción minera provoca la modificación del suelo (Guerrero Useda & Pineda Acevedo, 2016). Por otra parte, durante la extracción también se generan agentes tóxicos que se acumulan en grandes extensiones de suelo durante mucho tiempo de tal forma que el suelo queda con baja fertilidad y disponibilidad de nutrientes, acelerando la erosión del suelo (Pérez Martínez & Martín Romero, 2015).

Impactos en el agua.

El recurso hídrico es de gran importancia para la vida de los seres vivos y se ha visto afectada por la industria minera que contamina las vertientes de agua con metales pesados a través de elementos químicos y físicos que son arrastrados de manera natural o antropogénica, los cuales son depositados en los causes hídricos superficiales, llegando a incorporarse al agua subterránea de modo que estos elementos tóxicos contribuyen a la

turbidez del agua por los metales pesados existentes por consiguiente afecta a la vida acuática (Cuentas Alvarado et al., 2019).

Impactos a la biodiversidad.

Durante la explotación minera se genera el desbroce o la eliminación de cobertura vegetal para realizar sus actividades extractivitas ya que esta activad genera la pérdida de especies nativas de la zona, incluso obliga a los animales a migrar por el ruido que generan las máquinas. Estas afecciones alteran las relaciones ecosistemáticas por la pérdida de flora y fauna de manera que estas se ven afectadas incluso por la presencia de metales pesado en el suelo y en el agua, los cuales son recursos importantes para que se desarrolle la vida (La Rotta Latorre & Torres Tovar, 2017).

Efectos tóxicos de los metales pesados en las plantas.

El efecto tóxico de los metales depende de la concentración, exposición y forma química la cual está relacionada con los efectos que se produce en las plantas, por lo general los daños ocasionados suelen ser genéticos o fisiológicos retardando el desarrollo o su reproducción, en dependencia del tipo de metal esencial o tóxico (Navarro Aviñó et al., 2007).

Cadmio y el zinc. La toxicidad de estos metales está estrechamente relacionada ya que tienen efectos parecidos en las plantas como la reducción del crecimiento de las raíces, almacenan especies reactivas de oxígeno y sobre todo afecta directamente a los procesos y estructuras de la fotosíntesis (Zhang et al., 2020).

Cobre. Es un micronutriente esencial para las plantas, éste se vuele tóxico a niveles elevados a los requeridos**,** generalmente los efectos se reflejan en reducción del contenido de la clorofila, además inhibe las actividades enzimáticas del sistema antioxidante en consecuencia se da un aumento de radicales libres de oxígeno. Las concentraciones de cobre en los tejidos vegetales disminuyen el transporte de otros micronutrientes como Zn, Cu, Pb, Cd, reduciendo las funciones básicas de estos nutrientes (Villegas Torres et al., 2015).

Plomo. La presencia de este metal en las plantas es tóxico debido a que no tiene ninguna función, la toxicidad se da cuando se encuentra como hidroxilo de plomo el cual ingresa a la planta ocasionado estrés iónico (Peláez P et al., 2014). El plomo tiene la tendencia

de acumularse en las raíces, por consiguiente, se reduce el crecimiento radicular, además presentan síntomas como la reducción foliar, baja germinación de las semillas y retrasa el crecimiento (Flores Briceño, 2018).

Arsénico. Es un elemento tóxico para las para los seres vivos, en las plantas reduce la concentración del fósforo en los tejidos vegetales, afecta al crecimiento, causa estrés oxidativo y cambios en su morfología (Rodríguez et al., 2016).

Estrés oxidativo y defensa antioxidante bajo la toxicidad de metales pesados en plantas.

Estrés oxidativo en plantas.

Las plantas tienen la capacidad de evolucionar y ajustarse a las necesidades fisiológicas, bioquímicas y moleculares ante la presencia de agentes perjudiciales como los metales pesados, modificando componentes celulares, por la acumulación excesiva de moléculas reactivas de oxígeno (ROS) que son altamente tóxicos. En función de los niveles de especies reactivas se produce un estrés oxidativo, lo que induce a diferentes afecciones como la desnaturalización de las proteínas afectando a las vías intercelulares generando trastornos y enfermedades a las plantas. Por otra parte, presentan afecciones en el ADN y daños lipídicos (Raja et al., 2017).

La gran similitud de los metales pesados con los elementos esenciales facilita la absorción a través de la xilema trasladando los metales desde la raíz hacia el ápice. Los metales como el cinc (Zn), cobre (Cu), y hierro (Fe) a través del ciclo redox y la reacción de fenton forman ROS, por lo que son considerados metaloides redox-reactivos, mientras que plomo (Pb), mercurio (Hg) y el cadmio (Cd) pueden generar estrés oxidativo, aunque no son metaloides redox (DalCorso et al., 2013).

La defensa antioxidante y la tolerancia a metales pesados.

Las especies reactivas de oxígeno está provista de una defesa antioxidante que controla y protege a las células de los daños oxidativos por enzimas oxidadas alternativas la cual interviene en las cadenas transportadoras ya que se evita la formación de radicales. Las moléculas antioxidantes como los tocoferoles, ascorbato y glutatión por lo general están relacionadas con las funciones de protección de los metales pesados. En función del

desarrollo de las plantas, así como el estrés que se presenta se activa la defensa antioxidante para afrontar el estrés oxidativo (AbdElgawad et al., 2020).

Relación entre la tolerancia de metales pesados y defensa antioxidante.

El medio en donde se desarrollan las plantas influye en las condiciones de estrés por esta razón se produce la formación excesiva de especies reactivas de oxígeno, en la cual cada metal influye de forma diferente sobre las células vegetales, creando una relación de tolerancia y defensa antioxidante (Perez Peralta & Volke Sepúlveda, 2012).

Bioconcentración de metales pesados del suelo a las plantas.

Las plantas al ser expuestas a diversos contaminantes han desarrollado mecanismos para bioacumular metales pesados en sus tejidos los cuales funcionan como filtros vivos (Parihar et al., 2021). La biodisponibilidad de los metales pesados está condicionado por factores climáticos y edáficos como el tipo de metal, pH, estado de desarrollo de planta y la textura para que los metales pesados formen parte de la estructura vegetal (Kashyap et al., 2016). Existen varias investigaciones en las que se mencionan que las plantas han establecido mecanismos de tolerancia ante la toxicidad de los metales pesados como mecanismo de adaptación modificando sus procesos bioquímicos y fisiológicos (Chauhan & Mathur, 2020).

Los contaminantes presentes en el suelo han inducido a las plantas a desarrollar estrategias para subsistir en suelos que contienen metales pesados por lo que existen plantas excluyentes de metales pesados que evitan que ingresen a las partes aéreas, concentrándose únicamente en sus raíces, por otro lado, se encuentran las no excluyentes que se dividen en: hiperacumuladoras e indicadoras. Las especies indicadoras son aquellas en donde existe una correlación entre los metaloides presentes en el suelo y la translocación de los metales hacia la planta, de tal manera que la acumulación en los tejidos de las plantas también se refleja en el suelo, en muchas ocasiones pueden presentar síntomas visibles de toxicidad. Las especies hiperacumuladoras pueden almacenar lo elementos metalíferos tóxicos en mayor cantidad en sus tejidos que en el suelo, se dice

que estas plantas pueden superar el 0.1% de cobre, níquel, cobalto, cromo y 1% de zinc en su área foliar sin tomar en cuenta la acumulación del suelo (Raskin et al., 1994).

Las especies hiperacumuladoras tienen la habilidad de almacenar metales pesados en sus tejidos superando los niveles establecidos como normales sin presentar toxicidad, estas se encuentran normalmente en áreas antropogénicas ricos en metales pesados (Cahuana & Aduvire, 2019)

En las especies vegetales los metales pesados se encuentran acumulados en la en la raíz y en los brotes, el transporte de éstos se ve facilitado por el floema, sin embargo, el xilema tiene la capacidad de retardar la actividad de los cationes metálicos (Raskin et al., 1994). Las plantas hiperacumuladoras son utilizadas para la fitorremediación la cual se considera un método factible ya que no altera el medio ambiente, las plantas utilizadas funcionan como filtros para almacenar contaminantes en el área foliar de las plantas, dado que tiene la función de degradar los metales pesados disponibles presentes en suelo mejorando la calidad del mismo a fin de mejorar el desarrollo de las plantas (Munive Cerrón et al., 2018).

Factores de bioconcentración y traslocación de los metales en las plantas

Las plantas que tienen causas de bioconcentración y translocación uno, puede manipular como bioacumuladores. Los valores de bioconcentración mayor que dos, se consideran valores altos. Las plantas pueden manipularse como Fito estabilizantes si tienen causas de bioconcentración uno y factores de translocación (Takarina, 2016).

Factor de bioconcentración (FBC)

Se emplea para medir la captación de metales pesados por parte de las plantas con respecto a la concentración del suelo. El FBC se usa para determinar la eficiencia de acumulativa de metales pesados en su parte área (hojas) en el cual los valores mayores a 1 indican que las especies vegetales tienen buena capacidad de acumular metales pesados, aquellas que captan valores menores a 1 no son capaces de acumular metales pesados (Raskin et al., 1994). Existen dos factores de bioconcentración que se pueden determinar:

Factor de bioconcentración de la raíz

Se determina en relación a la acumulación de metales pesados en la raíz con relación al suelo(Yoon et al., 2006).

$$FBC = \frac{\text{Concentración en la raíz}}{\text{Concentración en el suelo}}$$

Factor de bioconcentración en la biomasa (hojas)

Se determina el contenido en la biomasa con relación al suelo(Vysloužilová et al., 2003).

$$FBC = \frac{\text{Concentración biomasa}}{\text{Concentración en el suelo}}$$

Factores de translocación

Son varios órganos de la planta que se calculan dividiendo la concentración de la raíz por la concentración del órgano deseado tallo, hoja, flor, semilla o fruto los metales pesados de plantas debe ser un múltiplo para ser considerado un bioacumulador de las plantas que se acumulan en exceso, si se encuentran en su hábitat natural, pueden acumular altas concentraciones de metales pesados en la superficie de tejidos (por encima del suelo) Tiene el coeficiente de desplazamiento de la raíz de la hoja de metal más alto de translocación de metales esenciales (Cu y Zn) en raíces y hojas, generalmente se encuentran en raíces y hojas. El proceso de unión de los metales pesados a las plantas está controlado por mecanismos de acumulación y resistencia de los metales pesados. Por lo tanto, las raíces de los manglares ayudan a la planta a prevenir la acumulación de metales pesados en el ambiente circundante. Los tejidos y las hojas de las plantas pueden almacenar / extraer altas concentraciones de contaminantes de metales pesados en los sedimentos. Las similitudes de los metales pesados en el suelo se analizaron utilizando el software SPSS 19.0. Examinamos la distribución de los diferentes elementos en diferentes órganos vegetales (raíces, tallos, hojas). Se estimaron los coeficientes de bioconcentración y desplazamiento en las muestras de las áreas de control y contaminación(Cerrón et al., 2020).

Biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo

Los metales pesados están adheridos a varios componentes sólidos del suelo y su disponibilidad depende de sus propiedades fisicoquímicas. Las concentraciones y distribuciones biodisponibles de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos. Los oligoelementos en

general están presentes en concentraciones relativamente bajas en la corteza, el suelo y las plantas. La presencia de concentraciones dañinas (anormales) en el suelo es una degradación específica conocida como contaminación. Los oligoelementos en el suelo pueden ser de origen geográfico o humano. Los elementos de origen geográfico provienen del sustrato rocoso, de la actividad volcánica o de los lixiviados y la mineralización. Los metales pesados artificiales se derivan de desechos peligrosos, actividades industriales, industrias mineras y agrícolas y desechos sólidos. Identificar, evaluar y rehabilitar suelos contaminados es uno de los principales desafíos ambientales que deben superarse en los próximos años. El peligro de los contaminantes en el suelo no se debe solo a su concentración total de sino también a su disponibilidad, entre otras cosas. La movilidad de los oligoelementos depende de sus propiedades y también se ve afectada por varios parámetros del terreno. En los últimos años, algunos enfoques para medir oligoelementos han utilizado métodos directos e indirectos. La biodisponibilidad y los riesgos para la salud de los metales del suelo para las plantas y otros organismos siguen siendo una cuestión abierta (Zhou et al., 2020)

La biodisponibilidad del elemento es función de:

a) Las formas químicas y físicas del presente en el medio ambiente.

b) La capacidad de un organismo para absorberlo o ingerirlo

Estos elementos pueden acumularse en el cuerpo (acumularse in vivo) y pueden ser hasta tres o cinco órdenes de magnitud más altos que las concentraciones en el ambiente en el que se encuentran En Vivo (Gonzales, Tornero, & Perez, 2011)