

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**EFFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES EN EL
POTENCIAL DE ABSORCIÓN DE COBRE (Cu^{+2}) DE *Eichhornia*
crassipes EN UN REACTOR TUBULAR**

Tesis para optar el grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

ELVIO ENRIQUE BOLAÑOS HOLGADO

TINGO MARÍA – PERÚ

2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°107-2023-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 19 de mayo de 2023, a horas 09:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES EN EL POTENCIAL DE ABSORCIÓN DE COBRE (Cu^{+2}) DE *Eichhornia crassipes* EN UN REACTOR TUBULAR”

Presentado por el Bachiller: **BOLAÑOS HOLGADO, Elvio Enrique** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 06 de diciembre de 2023


Dr. LUIS EDUARDO ORE-CIERTO
PRESIDENTE




Ing. M. Sc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
MIEMBRO


Ing. M. Sc. PATRICIA PILAR ROMERO USHUÑAHUA
MIEMBRO


Ing. M. Sc. PEDRO A. VEJARANO JARA
ASESOR



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 336 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de investigación

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EFFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES EN EL POTENCIAL DE ABSORCIÓN DE COBRE (CU+2) DE <i>Eichhornia crassipes</i> EN UN REACTOR TUBULAR	ELVIO ENRIQUE BOLAÑOS HOLGADO	20 % Veinte

Tingo María, 28 de diciembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
DIRECCION DE GESTION DE LA INVESTIGACION

Dr. Tomás Menacho Mallqui
DIRECTOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



Título : Efecto de la Disponibilidad de Nutrientes en el Potencial de Absorción de Cobre (CU^{+2}) de *Eichornia crassipes* en un Reactor Tubular

Programa de investigación : Calidad de Agua

Línea de investigación : Evaluación de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

Eje temático de investigación: Fitorremediación

Autor : Bolaños Holgado, Elvio Enrique

Asesor : M.Sc. Vejarano Jara, Pedro

Lugar de ejecución : Laboratorio de Calidad de Aguas - UNAS

Duración del Trabajo : 6 meses

Financiamiento : S/. 4015.00

FEDU : No

Propio : Sí

Otros : No

Tingo María – Perú, 2023

DEDICATORIA

A Dios por la fortaleza, conocimientos y voluntad que me brindó para lograr mis objetivos y por guiarme a Tingo María.

A mis queridos padres Eusebio y Erlinda por su amor, cuidado, confianza y apoyo incondicional para lograr mi desarrollo personal y profesional.

A mi hermano, Rodrigo por su paciencia, apoyo y fortaleza en cada una de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

1. A Dios por su protección y bendición durante toda mi vida, por guiarme hacia el buen camino.
2. A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Recursos Naturales Renovables y la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por darme la oportunidad de ser profesional y brindarme su acogedor calor en cada una de sus instalaciones durante toda mi formación profesional.
3. A la asociación Yachay Wasi, por aportar en mis conocimientos, impulsar mis metas y apoyarme en el proceso universitario.
4. A mi asesor, al M.Sc. Pedro Vejarano Jara, por su apoyo incondicional y su ahínco en la ejecución de la tesis.
5. A los miembros del jurado, por su dedicación y paciencia al desarrollo de esta investigación.
6. A mis amigos, por toda su ayuda, consejos, paciencia, comprensión y su gran amabilidad en este proceso de mi vida profesional.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco Conceptual.....	3
2.1.1. Metales pesados y su toxicidad.....	3
2.2. Coeficientes de traslocación (FT).....	4
2.2.1. Factor de bioconcentración (FB)	4
2.2.2. Coeficiente de bioacumulación (TF)	4
2.3. Cobre.....	5
2.3.1. Características generales del cobre	5
2.3.2. Propiedades químicas del cobre.....	5
2.3.3. Fuentes de contaminación de cobre	5
2.3.4. Efectos del cobre en la salud.....	6
2.3.5. Efectos ambientales del cobre.....	6
2.4. Métodos de tratamiento de ambientes acuáticos contaminados	7
2.4.1. Fitorremediación.....	7
2.5. Macrófitas acuáticas	8
2.5.1. Tipos de vegetales acuáticos.....	9
2.5.2. Mecanismos de acumulación de metales en las macrófitas	9
2.6. Jacinto de Agua (<i>E. crassipes</i>).....	9
2.6.1. Taxonomía y características morfológicas	10
2.6.2. Parámetros de crecimiento.....	10
2.7. Nutrición vegetal	11
2.8. Estado del arte.....	12
2.8.1. Antecedentes internacionales.....	12

2.8.2.	Antecedentes nacionales	13
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1.	Descripción del lugar de ejecución.....	14
3.1.1.	Ubicación política	14
3.1.2.	Ubicación geográfica	14
3.2.	Materiales y equipos	14
3.2.1.	Material biológico.....	14
3.2.2.	Reactivos.....	14
3.2.3.	Materiales.....	14
3.2.4.	Equipos	14
3.3.	Criterios de investigación	15
3.3.1.	Nivel y tipo de investigación	15
3.3.2.	Variables de investigación	15
3.3.3.	Operacionalización de variables	15
3.3.4.	Diseño de investigación	16
3.4.	Diseño del reactor tubular.....	17
3.5.	Material vegetal y solución óptima de nutrientes	17
3.6.	Metodología.....	18
3.6.1.	Determinación del porcentaje de remoción de Cu^{+2}	18
3.6.2.	Evaluación de la absorción de Cu^{+2} en <i>E. crassipes</i>	19
3.6.3.	Evaluación del potencial de absorción de Cu^{+2} de <i>E. crassipes</i>	19
3.7.	Análisis de datos	19
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	20
4.1.	Remoción de Cu^{+2} en el reactor tubular	20
4.2.	Absorción de Cu^{+2} en <i>Eichornia Crassipens</i>	23
4.3.	Potencial de absorción de <i>Eichornia Crassipens</i>	27
V.	CONCLUSIONES	32

VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	33
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
VIII. ANEXOS	39

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Propiedades químicas del cobre.	5
Tabla 2. Emisoras directas del cobre y sus compuestos al medio ambiente.	6
Tabla 3. Clasificación taxonómica de la macrófita <i>E. crassipes</i>	10
Tabla 4. Operacionalización de variables	15
Tabla 5. Tratamientos en estudio.....	16
Tabla 6. Composición química de nutrientes	18
Tabla 7. Porcentaje de remoción de Cu^{+2}	20
Tabla 8. Prueba ANOVA remoción de Cu^{+2}	21
Tabla 9. Prueba Tuckey a las dosis de nutrientes utilizadas.....	21
Tabla 10. Prueba Tuckey realizada a los tratamientos	22
Tabla 11. Concentración de Cu^{+2} en la zona aérea de <i>E. crassipes</i>	23
Tabla 12. Concentración de Cu^{+2} en la zona radicular de <i>E. crassipes</i>	24
Tabla 13. Factor de traslocación de <i>E. crassipes</i>	25
Tabla 14. Prueba ANOVA Factor de traslocación.	26
Tabla 15. Prueba Tuckey a las soluciones de nutrientes utilizadas.	26
Tabla 16. Factor de Bioconcentración de <i>Eichornia crassipes</i>	28
Tabla 17. Prueba ANOVA Factor de bioconcentración de <i>Eichornia crassipes</i>	28
Tabla 18. Prueba Tuckey a las soluciones de nutrientes utilizadas.	29
Tabla 19. Prueba Tuckey realizada a los tratamientos	30

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema del reactor tubular.....	17
Figura 2. Comparación de los tratamientos	22
Figura 3. Concentración de Cu+2 en Eichornia crassipes.....	24
Figura 4. Factor de traslocación en Eichornia crassipes	27
Figura 5. Factor de Bioconcentración en Eichornia crassipes.....	29
Figura 6. Eichornia crassipes de la Comunidad Campesina de Las mercedes – Aucayacu (región Huánuco).....	40
Figura 7. Área de trabajo, Universidad Nacional Agraria de la Selva.	40
Figura 8. Eichornia crassipes en estanque de aclimatación.....	41
Figura 9. Reactor tutbular.....	42
Figura 10. Preparación de solución de nutrientes.....	42
Figura 11. Pruebas experimentales con el reactor tubular.....	43
Figura 12. Recolección de muestras de agua tratada.....	43
Figura 13. Muestras de Eichornia crassipes.	44
Figura 14. Preparación de muestras de Eichornia crassipes Para análisis de espectrofotometría.	44
Figura 15. Análisis de concentración de Cu+2 con el espectrofotómetro.....	45

RESUMEN

El trabajo de investigación, tuvo como objetivo general, determinar el efecto de la disponibilidad de nutrientes en el potencial de absorción de cobre de *E. crassipes* en un reactor tubular. La investigación se realizó en el laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, se utilizó un reactor tubular con un tiempo de retención de 6 días; se consideraron 2 factores de estudio: la dosis de nutrientes (0 ml, 0,5 ml y 1 ml) y la concentración de Cu⁺² (100 mg/l y 300 mg/l), en combinación, ambos factores generaban 6 tratamientos en los cuales se evaluaron el porcentaje de remoción de Cu⁺², la absorción de Cu⁺² de *E. crassipes* y el potencial de absorción de *E. crassipes*. Como resultado, se logró remover de manera eficaz el Cu⁺², obteniéndose los mejores valores de remoción en los tratamientos T2 (94,43%), T3 (94,57%) y T4 (94,81%). En cambio, en T1 (90,17 %) y T5 (90,28 %) obtuvieron menores valores de remoción de Cu⁺². Se obtuvieron valores más altos de concentración de Cu⁺² en la zona aérea que en la zona radicular. Los valores del factor de traslocación y el factor de bioconcentración en todos los tratamientos son mayores a 1 indicando una buena capacidad de bioacumular Cu⁺² y traslocarlo a la zona aérea. Existe diferencias significativas entre los tratamientos siendo el tratamiento T3, en el que se utilizó 0,5 ml de dosis de nutrientes y se trabajó con 100 mg/l de Cu⁺², el que obtuvo el valor mayor de factor de absorción (6,55).

Palabras claves: fitorremediación, fito acumulación, bioconcentración, traslocación.

ABSTRACT

The general objective of this research work was to determine the effect of nutrient availability on the copper uptake potential of *E. crassipes* in a tubular reactor. The research was carried out at the Universidad Nacional Agraria de la Selva, using a tubular reactor with a retention time of 6 days; 2 study factors were considered: the dose of nutrients (0 ml, 0.5 ml and 1 ml) and the concentration of Cu⁺² (100 mg/l and 300 mg/l), in combination both factors generated 6 treatments in which which were evaluated the percentage of removal of Cu⁺², the absorption of Cu⁺² of *E. crassipes* and the absorption potential of *E. crassipes*. Cu⁺² was effectively removed, obtaining the best removal values in treatments T2 (94.43%), T3 (94.57%) and T4 (94.81%). In T1 (90.17 %) and T5 (90.28 %), lower Cu⁺² removal values were obtained. Higher values of Cu⁺² concentration were obtained in the aerial zone than in the root zone. The values of the translocation factor and the bioconcentration factor in all treatments are greater than 1, indicating a good capacity to bioaccumulate Cu⁺² and translocate it to the aerial zone. There are significant differences between the treatments, with treatment T3, in which 0.5 ml of nutrient doses was used and 100 mg/l of Cu⁺² was used, which obtained the highest absorption factor value (6, 55).

Keywords: phytoremediation, phytoaccumulation, bioconcentration, translocation.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, toda actividad humana está asociada a la gestión de los recursos naturales, de los cuales, particularmente el agua, se ha convertido en un asunto crítico en muchos países de América Latina. La demografía acrecentada, el desarrollo industrial y la expansión urbana con la generación de aguas residuales, las cuales presentan contaminantes de diferentes características físicas y químicas, han conllevado a la decadencia en la calidad del agua en las regiones.

Esta problemática es particularmente evidente en países como Perú, la contaminación de aguas superficiales como subterráneas, han alcanzado niveles alarmantes, cada vez hay más cuerpos de agua contaminados a causa del avance de las actividades industriales, mineras y agrícolas.

El cobre es una de las principales preocupaciones en cuanto a la contaminación del agua, en concentraciones superiores a las instituidas, por las normas legales del país, son altamente nocivas para la ecología. La responsabilidad por la emisión de estos metales generalmente está relacionada directamente con el campo industrial, cuyos residuos llegan a parar por sedimentación y acumulación en el suelo, posteriormente mediante ciclos naturales llega a acumularse en plantas, animales y el hombre, el cual tiene efectos negativos en la homeostasis de los seres vivos.

Existen especies vegetales que presentan características fisiológicas y biológicas que las hacen potencialmente factibles para un proceso llamado fitorremediación, una técnica que utiliza plantas para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, es una estrategia prometedora para mejorar la calidad del agua, puede desarrollarse como una tecnología que contribuya a la sustentabilidad; la macrófita *Eichornia crassipes*, es una planta acuática flotante que crece en zonas trópicas de América Latina y África, tiene una gran capacidad de absorción de contaminantes del agua.

Como en todo ser vivo, la nutrición es la limitante para un adecuado desarrollo físico de las especies vegetales, los cuales proporcionan de elementos químicos para que la planta realice los procesos; todos los seres vivos absorben del medio en el que están inmersos, sustancias que serán utilizadas para la síntesis y el metabolismo, crecimiento y desenvolvimiento. El tratamiento de aguas residuales, mediante el uso de *E. crassipes* en un reactor tubular, es una alternativa atractiva, porque permite controlar la expansión de esta especie, permitiendo

estudiar los efectos de los nutrientes en estos procesos de remoción y evitando su proliferación descontrolada en los ecosistemas acuáticos.

Esta investigación se focaliza en la evaluación de sistemas de tratamientos de aguas residuales mediante fitorremediación, con el principal estudio de analizar la viabilidad y la eficacia del uso de nutrientes en el potencial de absorción, cómo una estrategia para mejorar la calidad del agua en las regiones, considerando las condiciones ambientales y las particularidades locales.

De acuerdo con lo mencionado, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuál es el efecto de la disponibilidad de nutrientes en el potencial de absorción de cobre (Cu^{+2}) de *E. crassipes* en un reactor tubular? Por lo que se plantea la siguiente hipótesis: La disponibilidad de nutrientes influyen en el potencial de absorción de cobre (Cu^{+2}) en *E. crassipes* en un reactor tubular.

1.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la disponibilidad de nutrientes en el potencial de absorción de cobre de *E. crassipes* en un reactor tubular.

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el porcentaje de remoción de cobre en un reactor tubular.
- Determinar la acumulación de cobre en *E. crassipes*.
- Evaluar el potencial de absorción de cobre de *E. crassipes*.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco Conceptual

2.1.1. Metales pesados y su toxicidad

Diez (2008), hace mención que los metales pesados, son aquellos que tienen un peso específico mayor a 5g/cm^3 o están posicionados en la tabla periódica por encima de 20. Los metales pesados están conformados por 65 elementos que tienen características químicas, físicas y biológicas heterogéneas (Gadd, 1992).

Galán & Romero (2008), mencionan que los metales pesados pueden dividirse en 2 grupos importantes:

- Los micronutrientes: En este grupo se mencionan al As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, V, Zn. Son elementos importantes para la vida de diferentes organismos, requeridos en muy pocas cantidades, que cuando se excede resulta dañino para la salud.
- Metales pesados no esenciales: Encontramos al Be, Cd, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn y Ti. Elementos en gran medida tóxicos, suelen acumularse en los seres vivos y pueden generar alteraciones en el organismo.

Los efectos nocivos que generan los metales pesados no se muestran a corto plazo, pero a mediano plazo y largo plazo pueden aparecer de manera escarpada, su alta persistencia y rápida acumulación en los organismos hace indispensable su monitoreo (Diez, 2008).

Los metales pesados existen de manera natural en muchos ecosistemas, pero se vuelven contaminantes cuando las actividades antropogénicas alteran su distribución en el ambiente. Los orígenes de la contaminación de metales pesados en ecosistemas, son generadas por las actividades industriales, agrícolas, minera y de refinamiento de minerales (Jing *et al.*, 2007).

La concentración de los metales pesados no se reduce con el tiempo y estos pueden acumularse hasta volverse en gran medida tóxicos para los seres vivos (Duffus, 2004). Los metales pesados se distribuyen por medio de distintas vías de absorción, en los ecosistemas acuáticos, Yañez & Molina (2008), indican que esto puede ocurrir por medio atmosférico a través de la sedimentación de partículas de metales emitidas por procesos naturales y antropogénicos.

Paterna (2011) menciona que la absorción de metales pesados en los ecosistemas acuáticos, se da por la vía terrestre a causa de la escorrentía superficial de terrenos contaminados

y también por filtraciones de vertidos de residuos sólidos y aguas residuales urbanas e industriales.

2.2. Coeficientes de traslocación (FT)

La capacidad de las plantas para absorber metales pesados y para trasladarlos desde sus raíces a la parte aérea, se puede conocer a través del análisis de los siguientes factores, según (Lokeshwari & Chandrappa, 2006).

2.2.1. Factor de bioconcentración (FB)

Es nombrado como índice de bioconcentración (BF), Coeficiente de absorción biológica (BAC), Coeficiente de transferencia (TC); sirve para conocer la capacidad de absorción de un metal por la parte aérea y raíz de la planta, con relación a la concentración sustrato que lo contiene. El FB se utiliza en las plantas, para medir la eficacia de almacenamiento de metales en la biomasa, en el cual, valores mayores a >1 , indican que las especies alto potencial de absorción y aquellas especies supresoras, poseen FB menores a <1 (Audet & Charest, 2007). Existen dos tipos de factores de bioconcentración que mencionamos a continuación:

- Factor de bioconcentración de la raíz de la planta: se reconoce como factor de concentración biológica (BCF) o Root accumulation factor (RAF). Se valora como la relación de la acumulación de metales en el área radicular de la planta respecto a la acumulación de metales en el sustrato que lo posee (Yoon, 2006).

- Factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta: reconocido también como Factor de bioacumulación (BAF), Factor de remediación (RC), Coeficiente de acumulación biológica (BAC) o Shoot accumulation factor (SAF). Es la relación del elemento absorbido en la parte aérea de la planta con respecto al sustrato que lo posee (Vyslouzilova, 2003).

2.2.2. Coeficiente de Bioacumulación (TF)

Es un coeficiente cuya relación está determinada por las concentraciones de la planta completa y las concentraciones del metal disuelto en agua (Olivares & Peña, 2009). Los factores de translocación superior a 1 indican una fuerte capacidad para transferir metales pesados. Las plantas hiperacumuladoras se distinguen por una relación de concentración de metal parte aérea/concentración de metal raíz, superior a 1. Por otro lado, las plantas que no acumulan, tienen una concentración mayor en raíces que en las hojas o en los tallos (Baker, 1981).

2.3. Cobre

2.3.1. Características generales del cobre

El cobre (Cu) es un metal de transición, cuyo uso es debido a la conjugación de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, de la misma manera, sus propiedades eléctricas y su gran cantidad. El cobre fue uno de los metales que inicialmente lo usaron los humanos (Water Treatment Solutions Lenntech, 1998).

El cobre se encuentra comúnmente en aguas superficiales. El incremento en las concentraciones de este metal pesado se encuentra asociadas a eventos geológicos y climáticos puntuales (Instituto Noruego de Investigación de Aguas, 2009).

2.3.2. Propiedades químicas del cobre

Tabla 1. Propiedades químicas del cobre.

Propiedades químicas	Descripción
Nombre	Cobre
Numero atómico	29
Valencia	+1, +2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1.9
Radio iónico (Å)	0.69
Radio atómico (Å)	1.28
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹
Masa atómica (g/mol)	63.54
Densidad (g/ml)	8.96
Punto de ebullición (°C)	2595
Punto de fusión (°C)	1083

Fuente: Water treatment solutions Lenntech, (1998).

2.3.3. Fuentes de contaminación de cobre

Los depósitos de cobre natural son en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias en donde se encuentra la calcopirita (CuFeS₂), calcosita (Cu₂S), bormita (Cu₂Fe₂S₄) y minerales carbonatos tales como la malaquita [Cu₂(CO₃)(OH)₂] y azurita [Cu₂(CO₂)₂(OH)₂]. La mayor

concentración promedio de cobre se encuentra en las rocas ígneas (55 mg/kg), secuenciadas por las rocas sedimentarias (5 a 45 mg/kg). La alta densidad de cobre en el medio ambiente, está vinculada mayormente por actividades antropogénicas. El principio industrial de cobre incluye la minería, refinamiento de petróleo y trabajo de metales de fundición (Volesky, 1990).

Tabla 2. Emisoras directas del cobre y sus compuestos al medio ambiente.

Contaminante	Emisores directos
	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sintonización de minerales metálicos (23%)
Cobre y sus compuestos	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (18%)
	Industria química orgánica de base (12%)

Fuente: Rodríguez et al. (2006)

2.3.4. Efectos del cobre en la salud

Los seres humanos necesitan obtener una pequeña cantidad de cobre todos los días, ya que este es esencial para la salud. Los altos niveles de cobre son perjudiciales y tóxicos. La inhalación e ingesta de altas cantidades de cobre produce la irritación de la nariz y la garganta, náuseas, vómitos y diarrea; se pueden dañar seriamente los órganos vitales como el hígado y los riñones que posteriormente causaran la muerte (Serralta, 2005).

2.3.5. Efectos ambientales del cobre

Las partículas metálicas disueltas, al llegar a los ecosistemas, terminan siendo absorbidos por los organismos vivos, integrándose a la cadena trófica y acumulándose hasta que los humanos se vuelven los últimos receptores. Es por eso que existen normas y estándares de calidad y límites máximos permisibles que sirven para controlar y reducir las emisiones de estos contaminantes (Volesky, 1990).

A medida que se va incrementando la producción mundial de Cu, también lo está haciendo la contaminación de este metal pesado en los ecosistemas. El vertimiento de aguas residuales contaminadas con cobre está generando que en los cauces naturales se depositen lodos con altos contenidos de cobre. El cobre entra en el aire, mayormente a través de la liberación durante la combustión fósil; que termina sedimentándose y transportado por causas

fluviales. Mayormente termina en los suelos, y como resultado los suelos serán receptores de altas cantidades de cobre, después de que este haya estado en el aire (Water Treatment Solutions Lenntech, 1998).

2.4. Métodos de tratamiento de ambientes acuáticos contaminados

La gran cantidad de problemas ambientales, principalmente, en ambientes terrestres y acuáticos, han impulsado el desenvolvimiento de métodos cada vez más eficientes en recuperación de estos ambientes.

En virtud al alto costo de que demanda la recuperación de áreas contaminadas por la mayoría de las técnicas convencionales de tratamiento, surgieron métodos alternativos como la fitorremediación que ha demostrado ser bastante viable y principalmente de bajos costos (Freire, 2014).

2.4.1. Fitorremediación

La fitorremediación, como anteriormente mencionado, es una técnica de biorremediación que consiste en el uso de plantas para recuperar total o parcialmente la calidad de un ambiente impactado por contaminantes.

La fitorremediación es una tecnología emergente que propone viabilizar un tratamiento de bajos costos, seguro y aplicable a condiciones reales en ambientes contaminados. Por ello las plantas pueden desarrollar estas funciones mediante procesos (Freire, 2014).

- a) Fitoextracción: las plantas se usan con la finalidad de concentrar metales en las partes cosechadas, principalmente en el la zona aérea de la planta.
- b) Rizofiltración: proceso aplicado en la remediación de medios acuáticos, el área radicular de las plantas es usada para adsorber, concentrar y precipitar metales pesados a partir de aguas residuales contaminados.
- c) Fitoestimulación: Se utilizan los excusados radiculares para remover el crecimiento de microorganismos degradativos como las bacterias y los hongos.
- d) Fitoestabilización: las plantas que soportan metales, son utilizadas para disminuir la movilidad de los mismos y controlar el pase a napas subterráneas o al aire.
- e) Fitotransportación:
 - Fitodegradación: las plantas terrestres y acuáticas captan, acumulan y degradan compuestos orgánicos para generar subproductos menos tóxicos.

- Fitovolatilización: las plantas recogen y transforman metales pesados o compuestos orgánicos, para liberarlo a la atmósfera mediante la transpiración.

Con lo mencionado anteriormente es posible recuperar ambientes contaminados por diversos tipos de sustancias contaminantes como por ejemplo los metales pesados (Pb, Zn, Cu, Ni Hg, Se), compuestos inorgánicos (NO₃, NH₄), elementos radioactivos (U, Cs, Sr), hidrocarburos derivados del petróleo, pesticidas y herbicidas, explosivos (TNT, DNT), entre varias otras, Coutinho y Barbosa (2007), citado por Freire (2014).

La fitorremediación presenta diversas ventajas, primeramente por el gran número de investigaciones y casos de operación con una variedad de contaminantes, es aplicable insitu y a gran escala es una alternativa que tiene efectividad para la remediación de medios contaminados; sin embargo, el déficit es la demanda de periodos largos de tiempo para la fitorremediación, el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales, dependen de los factores climáticos siendo de esta manera limitados, a su vez un inadecuado manejo de las plantas pueden presentar crecimientos desordenados en ambientes altamente contaminados, pudiendo causar perjuicios en vez de mejorías, tornando esta técnica inviable en algunas situaciones.

Por lo tanto, para que la fitorremediación sea aplicada en una determinada área, se deben considerar algunos factores como el tipo de contaminante presente en el medio y la capacidad fitoremediadora de la especie de planta a ser utilizada, Coutinho y Barbosa (2007), citado por Freire (2014). Esto último es fundamentalmente importante, teniendo en cuenta que una determinada especie puede ser capaz de absorber en mayor cantidad un tipo de sustancia que otra especie. De esta manera, se puede obtener mejores resultados en el índice de remoción de los contaminantes y en el menor tiempo; de esta forma, se pueden encontrar una diversidad de especies con capacidad depuradora de ambientes contaminados, Freire (2014).

2.5. Macrófitas acuáticas

Se llaman macrófitas acuáticas a las especies vegetales que necesitan una alta cantidad de agua en sus raíces para poder vivir, crecen en medios muy húmedos y completamente inundado, esencialmente tienen las mismas necesidades nutricionales que los demás vegetales. Las macrófitas acuáticas facilitan la adhesión paisajística de los sistemas y regeneran los ecosistemas complejos donde se encuentran insectos, anfibios y aves, teniendo también usos comerciales tales como cama de ganada, compost y aprovechamientos ornamentales (Rodríguez *et al.*, 2006).

2.5.1. Tipos de vegetales acuáticos

Núñez *et al.* (2004), nos menciona que las plantas utilizadas en los sistemas de fitorremediación acuática, se clasifican en tres grupos:

- a) Emergentes: La planta se encuentra enraizada en el sedimento y se extiende hasta salir de la superficie del agua.
- b) Flotantes:
 - Macrófitas de libre flotación (no fijas): las raíces no se encuentran fijas en ningún sustrato, tanto sus tallos y hojas crecen sobre la superficie del agua. No obstante, sus estructuras vegetativas y reproductivas se mantienen emergentes.
 - Macrófitas de hoja flotante: estos vegetales tienen los órganos vegetales en flotación sobre el agua, pero sus raíces se encuentran fijas en los sedimentos.
- c) Sumergidas: crecen completamente sumergidas. Sus órganos reproductores pueden presentarse inmersos, brotar o aparecer por encima de la superficie del agua.

2.5.2. Mecanismos de acumulación de metales en las macrófitas

La concentración de metales por los organismos acuáticos inicia por la filtración rápida o asociación a la superficie biológica (bioabsorción) y el segundo proceso es el traslado lento e irreparable, manejado por difusión al interior de la célula (bioacumulación), que puede ser por difusión del ion metálico a través de la membrana celular o por el traslado activo de una proteína transportadora (Muñoz, 1991).

La raíz es el primero órgano en contacto directo con el contaminante, es por eso que los efectos empiezan en la zona radicular. En la zona aérea se producen considerables daños en los cloroplastos y las mitocondrias, alterando el desarrollo de fotosíntesis y de respiración. En una fase más avanzada empiezan a ocurrir potentes cambios metabólicos que resultan en la muerte de la macrófita (Muñoz, 1991)

2.6. Jacinto de agua (*E. crassipes*)

Es una micrófita acuática flotante, también conocido como lirio de agua, Jacinto de agua, camalote, lechuguin o bora; se encuentra comúnmente en climas tropicales cálidos, con floración distintivamente de color lila y azulados. Es la octava planta con crecimiento poblacional más rápido del mundo, por lo cual le permite adaptarse a muchos lugares y

condiciones; dichas facultades pueden causar diversos problemas ambientales si no se hace un control adecuado de su población (Romero, 2002)

Jaramillo & Flores (2012), mencionan que se desarrollan en aguas dulces y tranquilas, o de ligero movimiento, como zanjas, canales, arroyos y pantanos; se distribuye en las zonas tropicales y subtropicales del planeta.

La *E. crassipes* se originó en la Amazonía brasileña, con una distribución natural a otras regiones de América del Sur. Aun cuando en su área originaria se ha convertido en maleza, el hombre ya lo ha introducido a varios países tropicales (Romero, 2002)

García (2012), menciona que el Jacinto de agua se propaga por estolones que generan nuevas plantas, también produce semillas pudiendo proliferarse rápidamente, dependiendo del medio y las condiciones; sin embargo, el adecuado manejo de estas especies puede propiciar diversos beneficios. Investigaciones realizadas en diversos medios contaminantes y su comparación con otras especies han demostrado su alta capacidad en la fitorremediación.

2.6.1. Taxonomía y características morfológicas

Romero (2002), menciona que la macrófitas acuática *E. crassipes* se encuentra en la siguiente clasificación:

Tabla 3. Clasificación taxonómica de la macrófitas *E. crassipes*

Clasificación	Taxonomía
Reino	Plantae
División	Angiosperma
Clase	Monocotiledonia
Orden	Pontederiales
Familia	Pontederiaceae
Genero	Eichhornia
Especie	<i>E. crassipes</i>

Fuente: Romero (2002)

2.6.2. Parámetros de crecimiento

Romero (2002), menciona que su desarrollo va a depender del medio en donde se encuentre. Cuando hay escasez de elementos nutricionales se limita el crecimiento del vegetal. Por el contrario, en abundante acumulación de nutrientes, las macrófitas se desarrollan a su máximo crecimiento.

Los parámetros para su adecuado desarrollo óptimo son los siguientes:

- Iluminación intensa.
- Temperatura de 25 a 30 °C, cesando a los 10°C y produciéndose la muerte.
- Dada la relación nitrógeno/fósforo en los tejidos de la *E. crassipes*, siendo este más abundante a la que se encuentra en el agua, es sabido que el nitrógeno se agotara antes que el fósforo, por ello es necesario una fertilización con nitrógeno para lograr la eliminación de fósforo.
- La carga orgánica expresada en términos de DBO5 puede variar entre 1 y 30 ppm al día.
- Necesita un pH que fluctue entre 6.5 y 7.5.
- Requiere una dureza media alrededor de 12 -18 DH.

2.7. Nutrición vegetal

Todos los seres vivos, absorben del medio en el que están inmersos, sustancias que serán utilizadas para la síntesis y el metabolismo, crecimiento y desenvolvimiento. Existen diversos elementos esenciales para las plantas que deben estar presentes en los ambientes a cultivar; algunos de ellos son requeridos en cantidades mayores, tales son el caso de los macronutrientes (N, P, K, Ca y O), en cambio las que se requieren en menores cantidades se les llama micronutriente (Cl, Se, Co, Cu, Fe, B, Mn, Mo, Ni y Zn) (Freire, 2014).

Para que los elementos minerales sean considerados elementos esenciales deben cumplir ciertos criterios:

- a) Un elemento puede ser considerado esencial cuando en su ausencia la planta no permite completar el ciclo de vida.
- b) Un elemento tiene una función específica y no debe ser sustituido.
- c) El elemento debe estar relacionado directamente con el metabolismo de la planta, aparte de ser un contribuyente.

Existen otros elementos que son considerados esenciales para todas las plantas, por ello se consideran elementos beneficiosos (Si, Na y Al), (Kerbaui, 2004), citado por Freire (2014).

Vale destacar que cualquier elemento que sea esencial o beneficioso, cuando se encuentra en altas concentraciones en el medio en el que se cultivan las plantas, pueden llegar a ser tóxicos o nocivos para las mismas, causando daños en los organismos, Freire (2014).

2.8. Estado del arte

2.8.1. Antecedentes internacionales

Barroso *et al.* (2022) determinaron que *E. crassipes* cuenta con un gran potencial de hiper acumulación, ya que los valores de bioacumulación en los metales analizados, fueron superiores a 1. La hoja y raíz presentaron mayor afinidad por bioacumular Pb, mientras que en el tallo el metal con mayor afinidad fue el Al. La tendencia de bioacumulación para las raíces fue $Pb > Cr > Hg > Ni > Al > As$; mientras que para el tallo fue de $Al > Ni > Hg > Cr > Pb$. Para las hojas fue de $Pb > Ni > Al > Cr > Hg$.

Paris *et al.* (2007) obtuvo una remoción de 98 y 97,1% de Cr utilizando *E. crassipes* en los tratamientos con concentraciones de 5 y 10 mg Cr(VI)L-1. *Pistia stratiotes* removió 80,2 y 74,0%. Las raíces presentaron una mayor cantidad de Cr con un factor de bioacumulación 360-370 para *Pistia stratotis* y 490-708 para *Eichhornia crassipes*, en ambos casos se obtuvieron bajos valores en el factor de translocación ($FT < 0,1$).

Barroso *et al.* (2022) indicaron que se realizó una fitorremediación natural con *E. crassipes* de la Laguna Olmeca Veracruz, se encontraron concentraciones de Pb (0.021mg/kg) y Cd ($CT=0.005$ mg/kg) en las plantas, siendo la parte aérea *E. crassipes* la que tenía mayor acumulación de Pb y Cd, en comparación con la parte radicular. Los factores de bioconcentración y translocación fueron superiores a 1, lo que indica que la planta tiene capacidad para la fitoextracción y otros propósitos de fitorremediación.

Briñes *et al.* (2019) a través del proceso de fitorremediación con *E. Crassipes*, obtuvieron una remoción superior al 50% de los componentes de amalgama en aguas residuales, provenientes de una clínica odontológica. También determinaron que las aguas contaminadas con componentes de amalgama, contenían concentraciones de cobre que superan los límites máximos permisibles en aguas residuales, establecidos por la legislación colombiana, también había la presencia de mercurio, plata y estaño en concentraciones reducidas.

Calderón (2017) analizando el factor de bioconcentración de *E. crassipes*, determinó que es fitoextractora para Fe, Cu y Mn. Estos metales presentaron altos valores de factor de bioconcentración: Fe (1 242,495 mg/kg), Cu (1 59,410 mg/kg) y Mn (1 347,055 mg/kg), pero una baja absorción de Cd.

Guevara y Ramírez (2015) señalan los efectos negativos que generan la invasividad de *E. crassipes* en los ecosistemas cuando existen una adecuada disponibilidad de nutrientes. Se

forman colonias densas que causan el descenso del oxígeno disuelto, afectando a la cadena trófica. *E. crassipes* puede generar efectos adversos en ecosistemas naturales, por lo que es recomendable su uso únicamente en medios artificiales, de esta manera se puede evitar la invasión de esta especie controlando su reproducción.

2.8.2. Antecedentes nacionales

Cuba (2022) obtuvo porcentajes de remoción de cadmio (94%) y arsénico (89,5%), utilizando la especie *Pistia stratiotes*; una remoción de 84,7% para arsénico y 90% para cadmio con *E. Crassipes*; y con *Azolla filiculoides* tuvo como resultado un porcentaje de remoción de 92,7% para cadmio y de 74% para arsénico. Las tres especies obtuvieron excelentes resultados en la remoción de los metales, siendo *Pistia stratiotes* la que obtuvo valores más altos en la remoción.

Barreto & Paredes (2017) encontraron un alto potencial de absorción de Cu en *Pistia stratiotes* (98,87%) y *Eichhornia crassipes* (98,34%). La índice de crecimiento relativo de *P. stratiotes* y *E. crassipes* es inversamente proporcional a las concentraciones de cobre en el medio; se determinó alta capacidad de absorción de cobre para las especies *P. stratiotes* y *E. crassipes* en los diversos tratamientos, el factor de bioconcentración superó a 1.

Poma & Valderrama (2014) obtuvieron resultados favorables utilizando *E. crassipes* en la remoción de Cd (II) y Hg (II), determinaron una dosis óptima de nutrientes de 1 ml de solución A y 0,5 ml de solución B, pH óptimo 5. Logrando remover el 16,56% de Cd (II) y 15,6% de Hg (II) en un periodo de 7 días.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política

La presente investigación, fue ejecutada en las instalaciones del laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, políticamente ubicado en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia Leoncio Prado, región Huánuco.

3.1.2. Ubicación geográfica

Geográficamente el laboratorio de Calidad de Aguas está localizado bajo las coordenadas UTM (Este: 390 701; N: 8 970 221); a una altura de 693 m.s.n.m., dentro de la hoja 19-k de la Carta Nacional (Instituto Geográfico del Perú).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Material biológico

- Plantas de *E. crassipes*.

3.2.2. Reactivos

- Sulfato de cobre
- Solución nutritiva (ver cuadro 06)

3.2.3. Materiales

- Envases de muestreo
- Rotuladores
- Tachos
- Mangueras de ¾" de diámetro
- Tubería de ¾" de diámetro
- Cable difásico 20 m

3.2.4. Equipos

- pH-metro, marca Orion Thermo Scientific
- Balanza analítica, marca Ohaus 0 / 200g
- Espectrofotómetro de UV-visible, marca ANAHEM SCIENTIFIC H100
- Estufa, marca Thermo Scientific
- Reactor tubular
- Motobomba de 60 Hz, marca Haman

- Dosificador de nutrientes
- Termómetro ambiental, marca Thermo Scientific
- Laptop, marca Toshiba core i5
- Cámara revel, marca t3i cannon

3.3. Criterios de investigación

3.3.1. Nivel y tipo de investigación

Experimental y transversal.

3.3.2. Variables de investigación

Para el estudio se trabajará con las variables:

Variable dependiente:

- Potencial de absorción de Cu^{+2}

Variables independientes:

- Disponibilidad de nutrientes
- Concentración de Cu^{+2}

3.3.3. Operacionalización de variables

Tabla 4. Operacionalización de variables

Variable	Dimensión
Potencial de absorción de Cu^{+2}	Porcentaje de remoción Coeficiente de traslocación Coeficiente de concentración
Disponibilidad de Nutrientes	Concentración de solución de nutrientes.
Concentración de Cu^{+2}	Concentración de Cu^{+2}

3.3.4. Diseño de investigación

Para el análisis estadístico se aplicó un modelo factorial con diseño completo al azar (DCA) con 3 repeticiones.
$$Y_{ij} = u + A_i + B_j + AB_{ij} + E_{ijk} \quad (1)$$

Donde:

I : 1,2,3, t

J : 1,2,3, n

Y_{ij} : Variable respuesta en la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento.

U : Media general.

A_i : Efecto del Factor A en i.

B_j : Efecto del Factor B en j.

AB_{ij} : Efecto del Factor A en i y del Factor B en j.

E_{ij} : Error aleatorio, donde $E_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$

Siendo los valores para el Factor A (Dosis de nutrientes):

- 0 ml de la dosis de nutrientes.
- 0,5 ml de la dosis de nutrientes.
- 1 ml de la dosis de nutrientes.

Siendo los valores para el Factor B (Concentración de Cu^{+2}):

- 100 mg/l de Cu^{+2}
- 300 mg/l de Cu^{+2}

La combinación de los factores A (Dosis de nutrientes) y B (Concentración de Cu^{+2}) generan 6 tratamientos (**Tabla 5**), para cada uno de los tratamientos se realizaron 3 repeticiones.

Tabla 5. Tratamientos en estudio

Tratamientos	Nutrientes	Cu^{+2} (mg/l)
T1	0	100
T2	0	300
T3	0,5	100
T4	0,5	300
T5	1	100
T6	1	300

3.4. Diseño del reactor tubular

El reactor tubular que cuenta con 5 niveles, 2 tanques de almacenamiento y una bomba de recirculación y dos sistemas de boyas para la automatización del sistema. Se consideró un tiempo de retención de 6 días.

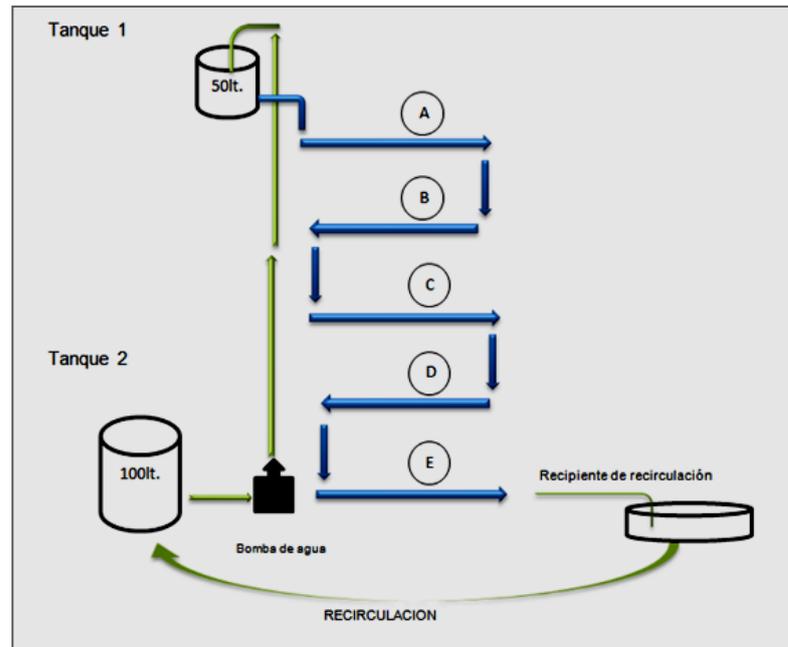


Figura 1. Esquema del reactor tubular.

3.5. Material Vegetal y solución óptima de nutrientes

Las especies vegetales fueron extraídas de 2 humedales que se encuentran en la comunidad campesina de Las Mercedes – Aucayacu (región Huánuco) y Shishiyacu – Tocache (región San Martín); se recogieron en cubetas de plástico debidamente selladas y rotuladas.

Una vez trasladadas fueron lavadas las raíces con agua destilada y luego fueron colocadas en un estanque de estabilización y aclimatación por un periodo de 7 días, se le dosificará los nutrientes según los tratamientos establecidos.

Para la preparación de nutrientes se utilizaron distintas dosificaciones de la dosis óptima de Poma & Valderrama (2014); en dichos estudios se determinó la dosis óptima para *E. crassipes* siendo esta de 1 ml de la solución A y 0.5 ml de la solución B en un litro de agua, para su adecuado desarrollo.

Se utilizaron tratamientos sin la dosis de nutrientes (0 ml), con la mitad de la dosis de nutrientes (0,5 ml) y con la dosis de nutrientes (1 ml)

Tabla 6. Composición química de nutrientes

Tipos de solución	Composición química	Cantidad de cada componente
Solución concentrada A	Nitrato de potasio (KNO ₃)	110 g/l
	Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)	70 g/l
	Superfosfato triple [Ca(H ₂ PO ₄) ₂]	36 g/l
Solución concentrada B	Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	110 g/l
	Quelato de hierro (Fe-o,o-EDDHA)	8.5 g/l
	Solución de micronutriente	200 ml/l
Solución de micronutrientes	Sulfato de manganeso (MnSO ₄ .4H ₂ O)	5.0 g/l
	Ácido bórico (H ₃ BO ₃)	3.0 g/l
	Sulfato de zinc (ZnSO ₄ .7H ₂ O)	1.7 g/l
	Sulfato de cobre (CuSO ₄ .5H ₂ O)	1.0 g/l
	Molibdato de amonio ((NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄)	0.2 g/l

3.6. Metodología

3.6.1. Determinación del porcentaje de remoción de Cu⁺²

Una vez culminado el tiempo de retención de 6 días, en el reactor tubular, se procedieron a tomar muestras de agua de la salida del sistema. La colecta de muestras se realizó siguiendo los parámetros de muestreo y rotulado de las mismas, se usaron recipientes de 150 ml, los cuales fueron almacenados en una caja hermética, para posteriormente ser trasladados al laboratorio para su respectivo análisis y evaluación.

Con el fin de determinar la concentración del cobre se utilizó el método de absorción atómica (Rodier, 1981), para se utilizaron el cobre con el amonio pirrolido diticarbomato, se extrajo a pH 3.5 por la metilsobutilcetona y luego se determinó por espectrofotometría de absorción atómica directamente de la solución obtenida.

Conociendo la concentración de cobre final, se procedió a determinar el porcentaje de remoción. Marcovecchio & Moreno (1991), definen que el porcentaje de remoción del metal se halla bajo la siguiente función matemática:

$$\% \text{Remoción} = \{(CI - CF) / CI\} * 100 \quad (2)$$

Donde:

CI: Concentración inicial del elemento (ml/L)

CF: Concentración final del elemento (mg/L)

3.6.2. Evaluación de la absorción de Cu^{+2} en *E. crassipes*

El equipo cuenta en su funcionamiento con 25 plantas en cada evaluación, se distribuyen en 5 filas (A, B, C, D y E), de las cuales se extrajo aleatoriamente una planta de cada fila para las evaluaciones de concentraciones de Cobre (Cu^{+2}) en el laboratorio.

Para determinar la acumulación de cobre en las especies vegetales macrófitas, se utilizó el método de calcinación de mufla a 500°C , así lo indica (Cottenie, 1984), para preparar las muestras que serán analizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica, siguiendo los procedimientos de Kalra (1998). Esta metodología se seguirá tanto para las muestras en parte aérea y radicular.

Se determinó el Factor de translocación utilizando la fórmula propuesta por Lokeshwari & Chandrappa (2006):

$$\text{TF}=\text{CA}/\text{CR} \quad (3)$$

Donde:

TF: Factor de traslocación.

CA: Concentración del metal en la parte aérea de la planta.

CS: Concentración del metal en la raíz de la planta.

3.6.3. Evaluación del potencial de absorción de Cu^{+2} de *E. crassipes*

El potencial de absorción fue obtenido trabajando con la formula del factor de bioconcentración propuesta por Lokeshwari & Chandrappa (2006):

$$\text{BCF}=\text{CP}/\text{CS} \quad (4)$$

donde:

BCF: Factor de bioconcentracion

CP: Concentración del metal en la planta

CS: Concentración del metal en el sustrato (agua)

3.7. Análisis de datos

Para analizar y comparar los resultados obtenidos del porcentaje de remoción, factor de traslocación y factor de bioconcentración, en cada uno de los tratamientos generados por la combinación de factores, para ello se realizó la prueba ANOVA de varios factores con el software SPSS.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Remoción de Cu^{+2} en el reactor tubular

En la **Tabla 7** se puede apreciar el porcentaje de remoción obtenido por el reactor tubular en cada de uno de los tratamientos realizados, siendo mayores los valores en T3 (94,57 %) y T4 (94,81%). En T1 (90,17 %) y T5 (90,28 %) se obtuvieron menores valores de remoción de Cu^{+2} .

Tabla 7. Porcentaje de remoción de Cu^{+2}

Tratamientos	Nutrientes (ml)	Cu^{+2} (mg/l)	N	Remoción de Cu^{+2}			
				Máx. (%)	Mín. (%)	Media (%)	CV
T1	0	100	3	90,46	89,91	90,17	0,08
T2	0	300	3	94,75	93,88	94,43	0,23
T3	0,5	100	3	95,73	93,65	94,57	1,13
T4	0,5	300	3	95,21	94,25	94,81	0,25
T5	1	100	3	89,88	90,98	90,28	0,37
T6	1	300	3	93,51	91,94	92,82	0,64

N: Cantidad de repeticiones.

Eichornia crassipes presenta una alta capacidad de remoción de Cu^{+2} , logrando alcanzar valores mayores al 90% en todos los tratamientos, se superaron los valores de remoción obtenidos por Briñes *et al.* (2019) que obtuvo 72,017% de remoción de Cu^{+2} con *Eichornia crassipes*, al tratar aguas contaminadas con amalgamas procedentes de actividades de odontología, en las que también se identificó la presencia de otros metales pesados que también pudieron ser removidos con alta efectividad: Sn (99,927 %), Ag (68,945 %) y Hg (99,126 %).

Calderón (2017) determinó que existe una correspondencia negativa en las concentraciones de los metales en *Eichornia crassipes*, que indica, que mientras un metal acrecenta su acumulación en la planta, la disposición de otro metal tiende a disminuir. Esto puede explicar lo valores más reducidos obtenidos por Briñes *et al.* (2019), ya que las aguas contaminadas con amalgamas al contener otros metales estos reducen la capacidad de *Eichornia crassipes* de poder absorber Cu^{+2} ; por otro lado, en este estudio se obtuvieron mejores resultados porque sólo se utilizaron agua contaminada con Cu^{+2} , sin tener la intervención de otros metales en el proceso.

La prueba estadística (**Tabla 8**) indica que existe diferencias significativas entre los tratamientos generados por la combinación entre la concentración de la solución nutrientes y la concentración de Cu^{+2} .

Tabla 8. Prueba ANOVA remoción de Cu^{+2}

Descripción	Significancia
Nutrientes	0,000*
Cu^{+2}	0,000*
Nutrientes x Cu^{+2}	0,001*

*: Existen diferencias estadísticas significativas

En la **Tabla 9** se muestra la comparación de la remoción de Cu^{+2} obtenidas en los tratamientos en cada una de las dosis de solución de nutrientes aplicada, observándose que en los tratamientos en los que se utilizó 0,5 ml de dosis de solución de nutrientes (T3 y T4) presentan diferencias estadísticas significativas con los tratamientos a los que se les aplicaron 1 dosis de la solución de nutrientes (T5 y T6) y con los que no se les aplicó ninguna dosis de la solución de nutrientes (T1 y T2).

Tabla 9. Prueba Tuckey a las dosis de nutrientes utilizadas.

Comparación		Significancia
0	0,5	0,000*
	1	0,172
0,5	1	0,000*

*: Existen diferencias estadísticas significativas

Los tratamientos en los que se utilizaron concentraciones de 100 mg/l de Cu^{+2} (T1, T3 y T5) son diferentes estadísticamente de los que se trabajó con 300 mg/l de Cu^{+2} (T2, T4 y T6) teniendo estos últimos mayores resultados en la remoción de Cu^{+2} (**Tabla 8**).

Al comparar los tratamientos (**Figura 2**) se puede ver que los mejores valores de remoción las tuvieron T2 (94,43%), T3 (94,57%) y T4 (94,81%). En T1 (90,17 %) y T5 (90,28 %) se obtuvieron menores valores de remoción de Cu^{+2} .

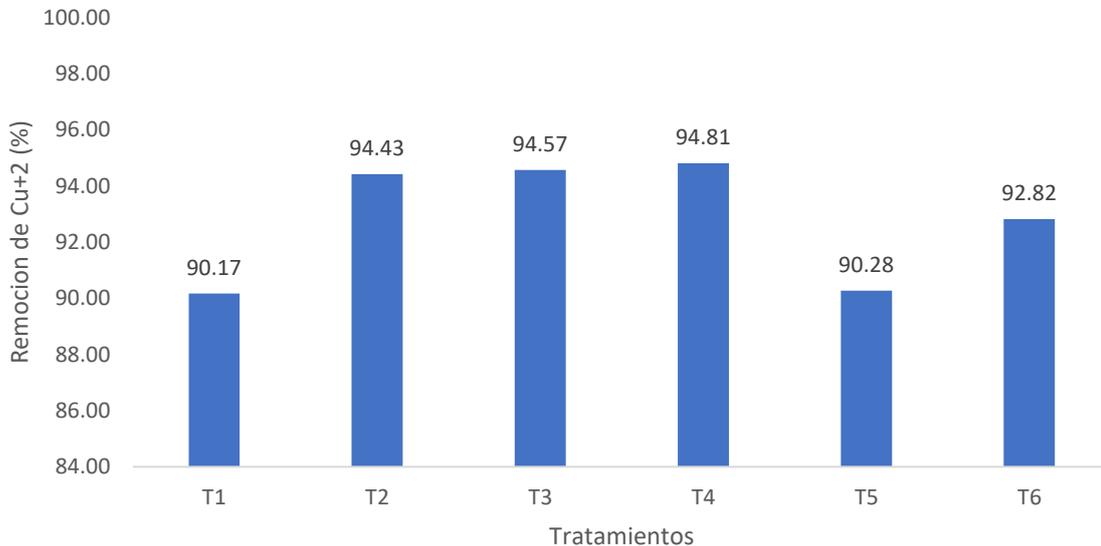


Figura 2. Comparación de los tratamientos

En la **Tabla 10** se puede ver que al comparar los porcentajes de remoción de Cu^{+2} en T1 (90,17 %) y T5 (90,17 %) no poseen diferencias estadísticas significativas, y poseen los valores más bajos de remoción (**Figura 2**), para T1 se utilizaron 0 mg/l de dosis de nutrientes y en T5 1mg/l de dosis de nutrientes, para ambos casos se utilizaron 100 mg/l de Cu^{+2} . En T4 (94,81%) se obtuvo la mayor remoción de Cu^{+2} y se utilizaron 300 mg/l de Cu^{+2} y 0,5 ml de solución de nutrientes; T3 (94,57%), T2 (94,43%) y T6 (92,82%) también presentan valores altos de remoción y no presentan diferencias estadísticas significativas con T4. Calderón (2017) encontró que el almacenamiento de los metales en la biomasa de *E. crassipes* se ve afectado por el agrupamiento inicial de los metales en el medio. Lo que puede explicar los más altos valores de remoción utilizando 300 mg/l de Cu^{+2} .

Tabla 10. Prueba Tuckey realizada a los tratamientos

Comparación		Significancia
T1	T2	0.000*
	T3	0.000*
	T4	0.000*

	T5	1.000
	T6	0.004*
T2	T3	1.000
	T4	0.978
	T5	0.000*
	T6	0.102
T3	T4	0.997
	T5	0.000*
	T6	0.066
T4	T5	0.000*
	T6	0.031
T5	T6	0.006*

*: Existen diferencias estadísticas significativas

4.2. Absorción de Cu^{+2} en *Eichornia Crassipens*

Bonilla & Santamaría (2013) indican que las macrófitas han logrado absorber los metales pesados por medio de la filtración y la acumulación en su tejido vegetal, volviéndose biodisponibles para los animales y seres humanos.

La zona aérea de *E. crassipes* presentó valores más altos en concentración de Cu^{+2} , como se muestra en la **Tabla 11**, el tratamiento T4 (42,84 mg/l) presentó el valor más alto de concentración de Cu^{+2} . El valor más bajo fue obtenido por T5 (31,67mg/l).

Tabla 11. Concentración de Cu^{+2} en la zona aérea de *E. crassipes*.

Tratamientos	Nutrientes	Concentración inicial de cobre	N	Concentración de Cu^{+2} en la zona aérea de <i>Eichornia crassipes</i>			
				Máximo	Mínimo	Media	CV
T1	0	100	3	34.57	30.37	31.94	5.25
T2	0	300	3	39.79	37.57	38.41	1.43
T3	0,5	100	3	37.58	30.48	34.56	13.48
T4	0,5	300	3	43.85	41.28	42.84	1.90
T5	1	100	3	34.09	30.23	31.67	4.43
T6	1	300	3	43.69	39.46	41.06	5.26

N: Cantidad de repeticiones.

En la zona radicular (**Tabla 12**) se obtuvieron valores más reducidos que en la zona aérea (**Tabla 11**), T3 (0,49 mg/l) consiguió el valor más alto de acumulación de Cu^{+2} y T2 (0,18 mg/l) obtuvo el valor más bajo.

Tabla 12. Concentración de Cu^{+2} en la zona radicular de *E. crassipes*.

Tratamientos	Nutrientes	Concentración inicial de cobre	Concentración de Cu^{+2} en la zona radicular de <i>Eichornia crassipes</i>				
			N	Máximo	Mínimo	Media	CV
T1	0	100	3	0.24	0.21	0.22	0.000
T2	0	300	3	0.21	0.14	0.18	0.001
T3	0,5	100	3	0.43	0.56	0.49	0.004
T4	0,5	300	3	0.41	0.33	0.37	0.002
T5	1	100	3	0.29	0.21	0.23	0.002
T6	1	300	3	0.30	0.21	0.25	0.002

N: Cantidad de repeticiones.

En la **Figura 3** se puede apreciar que los tratamientos que presentaron una mayor cantidad de Cu^{+2} en la zona aérea de la planta fueron T4(42,85 mg/kg), T6 (41,07 mg/kg) y T2 (38,42 mg/kg) y los que tuvieron una menor cantidad de Cu^{+2} en la zona aérea fueron T1 (31,94 mg/kg), T5 (31,67 mg/kg) y T3 (34,56 mg/kg). Para la concentración de Cu^{+2} en la zona radicular se puede apreciar que T3 (0,49 mg/kg) y T4 (0,37 mg/kg) presentaron los valores más altos.

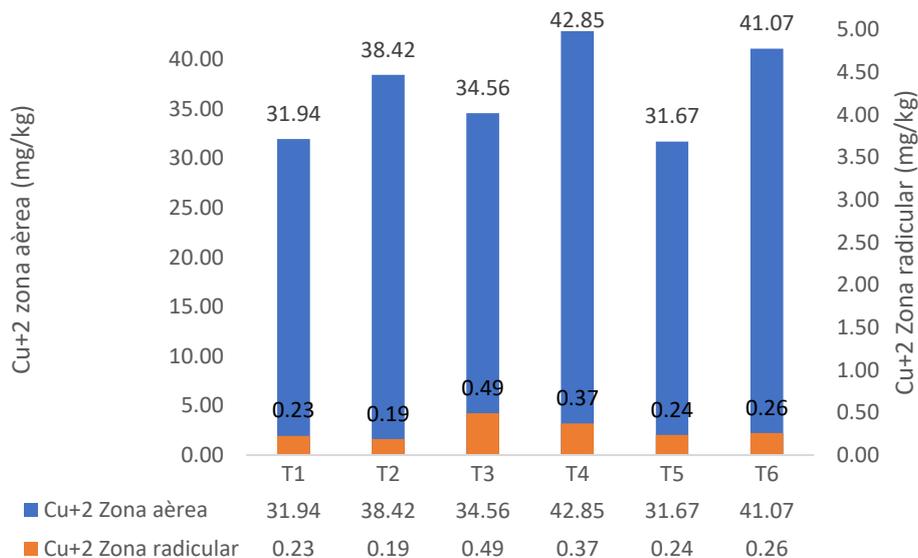


Figura 3. Concentración de Cu^{+2} en *Eichornia crassipes*.

Calderón (2017) tuvo una alta correlación positiva entre las concentraciones de Cu^{+2} en el tejido de *E. crassipes* y la acumulación de este metal en el agua, lo que indicaba que las altas concentraciones de Cu^{+2} y otros metales en el agua, estaban asociadas a altas concentraciones de Cu^{+2} en el tejido vegetal. Explicando esto las razones por las que T4 (42,85 mg/kg), T6 (41,07mg/kg) y T2 (38,42 mg/kg) en los que se trabajó con 300 mg/l de Cu^{+2} , se obtuvieron mayores concentraciones de Cu^{+2} en el tejido vegetal.

Paris (2022) indica que *Eichornia crassipes* presenta un comportamiento diferente de bioacumulación de un metal en cada uno de sus componentes estructurales. Esto puede apreciarse en la **Figura 3** para el caso del Cu^{+2} absorbido por *Eichornia crassipes* existe mayor concentración en la zona aérea.

En la **Tabla 13** se presentan los valores del factor de traslocación en *E. crassipes* en los distintos tratamientos siendo T2 (212,22) y T6 (161,93) lo que presentaron mayores valores, y T3 (70,42) y T4 (116,83) los que obtuvieron menores valores en el factor de traslocación.

Los valores del factor de traslocación en todos los tratamientos fueron mayores a 1 por lo que según Baker y Brooks (1989), si el factor de traslocación es mayor que 1, quiere decir, que la planta transfiere con eficacia los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, debido a lo cual su capacidad es la de hiperacumular metales en la parte aérea.

Tabla 13. Factor de traslocación de *E. crassipes*.

Tratamientos	Nutrientes	Concentración inicial de cobre	N	Factor de traslocación			
				Máximo	Mínimo	Media	CV
T1	0	100	3	157.86	124.48	142.44	283.56
T2	0	300	3	276.32	177.09	212.22	3090.97
T3	0,5	100	3	77.17	63.40	70.42	47.438
T4	0,5	300	3	134.94	106.94	116.83	246.53
T5	1	100	3	147.59	116.74	135.85	278.89
T6	1	300	3	187.88	133.06	161.93	757.80

N: Cantidad de repeticiones.

La prueba estadística (**Tabla 14**) indica que no existe diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos generados por la combinación entre la concentración de la

solución nutrientes y la concentración de Cu^{+2}). Pero, si existen diferencias estadísticas significativas generadas por los factores de manera aislada, se señalan diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en los que se utilizaron concentraciones de 100 mg/l de Cu^{+2} (T1, T3 y T5) y los que se trabajó con 300 mg/l de Cu^{+2} (T2, T4 y T6) teniendo estos últimos resultados más altos en el factor de traslocación.

Tabla 14. Prueba ANOVA Factor de traslocación.

Descripción	Significancia
Nutrientes	0,001*
Cu^{+2}	0,004*
Nutrientes x Cu^{+2}	0,427

*: Existen diferencias estadísticas significativas

En la **Tabla 15** se muestra la comparación de los valores de factor de traslocación obtenidas en los tratamientos en cada una de las dosis de solución de nutrientes aplicada, observándose que en los tratamientos en los que se utilizó 0,5 ml de la dosis de nutrientes (T3 y T4) presentan diferencias estadísticas significativas con los tratamientos a los que se les aplicaron 1 ml dosis de nutrientes (T5 y T6) y con los que no se les aplicó ninguna dosis de la solución de nutrientes (T1 y T2).

Tabla 15. Prueba Tuckey a las soluciones de nutrientes utilizadas.

Comparación	Significancia
0 0,5	0,001*
0 1	0,225
0,5 1	0,013*

*: Existen diferencias estadísticas significativas

Los tratamientos en los que se utilizaron concentraciones de 100 mg/l de Cu^{+2} (T1, T3 y T5) son diferentes estadísticamente de los que se trabajó con 300 mg/l de Cu^{+2} (T2, T4 y T6)

teniendo estos últimos resultados más altos en el factor de traslocación. En la **Figura 4** se puede observar que T2 (212,22) tiene el valor más alto de factor de traslocación y corresponde a un tratamiento, para T2 se utilizaron 0 ml de la dosis de nutrientes y se trabajó con 300 mg/l de Cu^{+2} .

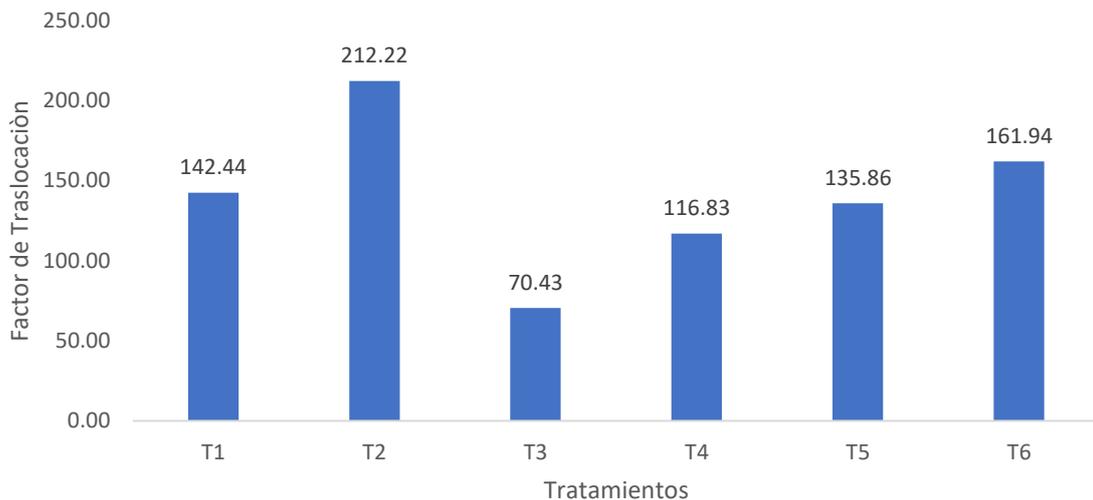


Figura 4. Factor de traslocación en *Eichornia crassipes*

Barroso *et al.* (2022) encontró que algunos metales tienen afinidad por bioacumularse en la zona radicular y otros en la zona aérea. Cuba (2022) obtuvo una mayor acumulación de Pb y Cd en la parte aérea de *Eichhornia crassipes*, los factores de bioconcentración y traslocación fueron superiores a 1 lo que indica que la planta tiene capacidad para la fitoextracción y otros propósitos de fitorremediación de estos metales. La mayor concentración de metales en la estructura aérea en comparación con la raíz está relacionada con la capacidad de la planta de traslocar el metal de la raíz a su estructura aérea.

4.3. Potencial de absorción de *Eichornia Crassipens*

En la **Tabla 16** se indican los valores del factor de bioconcentración obtenidos en los tratamientos, en T3 (6,55) se obtuvo el valor más alto, y el menor valor lo obtuvo T6 (1,92). El factor de bioconcentración hace referencia a la capacidad de una planta (raíces, tallos y hojas) de captar metales dentro de su organismo, y está relacionada con la concentración de estos en el agua (Paris, 2007).

Tabla 16. Factor de bioconcentración de *Eichornia crassipes*

Tratamientos	Nutrientes	Cu ⁺²	N	Factor de bioconcentración			
				Máximo	Mínimo	Media	CV
T1	0	100	3	3.45	3.15	3.27	0.02
T2	0	300	3	2.53	2.06	2.32	0.06
T3	0,5	100	3	7.24	5.70	6.55	0.62
T4	0,5	300	3	3.08	2.42	2.794	0.12
T5	1	100	3	3.81	3.01	3.29	0.19
T6	1	300	3	2.07	1.82	1.92	0.02

N: Cantidad de repeticiones.

Calderón (2017) obtuvo valores altos de factor de bioconcentración de *Eichhornia crassipes* con los metales Fe (1242,4), Cu (159,410) y Mn (1347,055), para los metales Zn (51,884), Ni (14,888) y Pb (59,556) tuvo un valor intermedio; sólo en Cd tuvo un factor de bioconcentración bajo de 0,811. El factor de bioconcentración alto, indica que las plantas pueden ser utilizadas para fitoextracción de metales pesados. También, se estima que la acumulación de los metales en la biomasa de la *Eichhornia crassipes* se ve influido por la concentración inicial de los metales en el medio.

La prueba estadística (**Tabla 17**) indica que existe diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos generados por la combinación entre la concentración de la solución nutrientes y la concentración de Cu⁺². Pero, si existen diferencias estadísticas significativas generadas por los factores de manera aislada, se señalan diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en los que se utilizaron concentraciones de 100 mg/l de Cu⁺² (T1, T3 y T5) y los que se trabajó con 300 mg/l de Cu⁺² (T2, T4 y T6) teniendo estos últimos resultados más bajos en el factor de bioconcentración.

Tabla 17. Prueba ANOVA Factor de bioconcentración de *Eichornia crassipes*.

Descripción	Significancia
Nutrientes	0,000*
Cu ⁺²	0,000*
Nutrientes x Cu ⁺²	0,000*

*: Existen diferencias estadísticas significativas

En la **Tabla 18** se muestra la comparación de los valores de factor de bioconcentración obtenidos en los tratamientos en cada una de las dosis de solución de nutrientes aplicada, observándose que en los tratamientos en los que se utilizó 0,5 mg/l de la solución de nutrientes (T3 y T4) presentan diferencias estadísticas significativas con los tratamientos a los que se les aplicaron 1 dosis de la solución de nutrientes (T5 y T6) y con los tratamientos a los que no se les aplicó ninguna dosis de la solución de nutrientes (T1 y T2).

Tabla 18. Prueba Tuckey a las soluciones de nutrientes utilizadas.

Comparación		Significancia
0	0,5	0,000*
	1	0,734
0,5	1	0,000*

*: Existen diferencias estadísticas significativas

Guevara y Ramírez (2015) señalan los efectos negativos que genera la invasividad de *E. crassipes* en los ecosistemas cuando existen una adecuada disponibilidad de nutrientes, se forman colonias densas que causan el descenso del oxígeno disuelto, afectando a la cadena trófica. Las características de *E. crassipes* favorecen su uso en fitorremediación; sin embargo, debido a los efectos desfavorables que causan en ecosistemas naturales, se aconsejan su uso únicamente en humedales artificiales, para vigilar su reproducción y prevenir la irrupción en los ecosistemas.

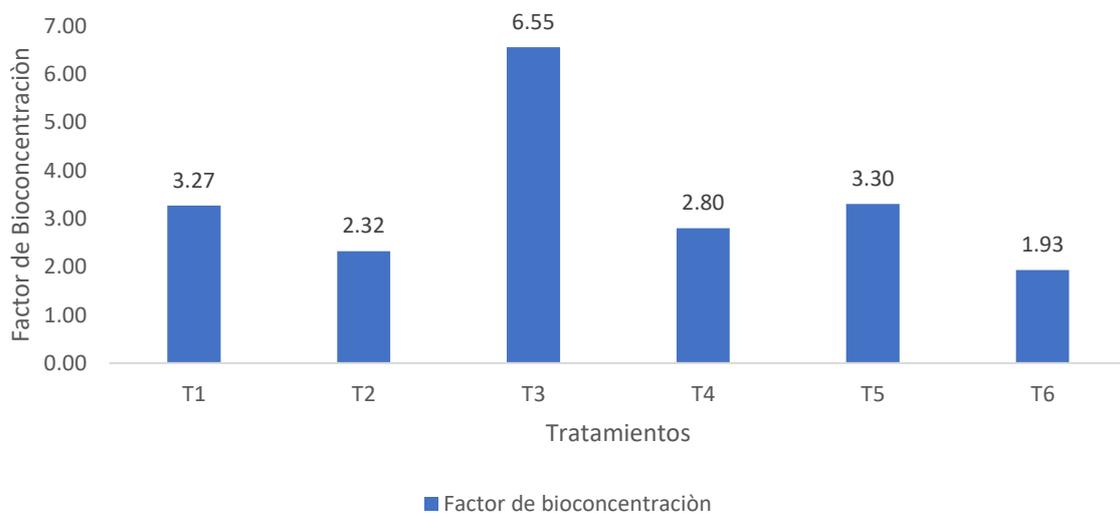


Figura 5. Factor de bioconcentración en *Eichornia crassipes*.

En la **Tabla 19** se puede ver que al comparar los factores de bioconcentración en los tratamientos T6 (1,93), T2 (2,32) y T4 (2,80) no poseen diferencias estadísticas significativas, y poseen los valores más bajos de factor de bioconcentración (Figura 5), para estos tres tratamientos se utilizaron 300 mg/l de Cu^{+2} . El tratamiento que obtuvo mayor valor en el factor de bioconcentración fue el T3 (6,55) en el que se utilizaron 100 mg/l de Cu^{+2} . y 0,5 mg/l de solución de nutrientes, T3 presenta diferencias estadísticas significativas con todos los demás tratamientos.

Tabla 19. Prueba Tuckey realizada a los tratamientos

Comparación		Significancia
T1	T2	0.126
	T3	0.000*
	T4	0.732
	T5	1.000
	T6	0.018*
T2	T3	0.000*
	T4	0.724
	T5	0.109*
	T6	0.846
T3	T4	0.000*
	T5	0.000*
	T6	0.000*
T4	T5	0.683
	T6	0.179
T5	T6	0.016*

*: Existen diferencias estadísticas significativas

Barreto & Paredes (2017) obtuvieron un alto potencial para la absorción de Cu^{+2} con *E. crassipes*, obteniendo una remoción de 98,34% (trabajando con 10 mg/l de Cu^{+2}) que fue reduciéndose hasta 76,61% (trabajando con 90 mg/l de Cu^{+2}), también observaron que a medida que se aumenta la concentración de Cu^{+2} , las plantas se iban viendo afectadas negativamente en su desarrollo, lo que puede conllevar a reducir su potencial de absorción.

Las altas concentraciones de metales en el medio pueden influir en la mayor bioacumulación de estos (Calderón, 2017), pero también afectan al desarrollo de las *E.*

crassipes reduciendo su potencial de absorción. De igual manera la dosis de nutrientes puede aportar a mejorar el potencial de absorción de *E. crassipes*, pero en cantidades excesivas puede generar efectos negativos, como los observados por Poma & Valderrama (2014), dosis mayores a 1ml de la solución de nutrientes utilizada, generaba que las plantas se secaran y mueran.

V. CONCLUSIONES

Se logró remover de manera eficaz el Cu^{+2} , obteniéndose los mejores valores de remoción en los tratamientos T2 (94,43%), T3 (94,57%) y T4 (94,81%). En T1 (90,17 %) y T5 (90,28 %) se obtuvieron menores valores de remoción de Cu^{+2} .

Eichornia crassipes presentó valores más altos de concentración de Cu^{+2} en la zona aérea, siendo el tratamiento T4 (42,84 mg/l) el que presentó el mayor valor; en la zona radicular se obtuvieron valores más reducidos, siendo el tratamiento T3 (0,49 mg/l) el que obtuvo el mayor valor. Los valores del factor de traslocación en todos los tratamientos fueron mayores a 1 indicando una buena capacidad de traslocar Cu^{+2} y acumularlo en la zona aérea.

Eichhornia crassipes absorbe eficazmente Cu^{+2} en todos los tratamientos, los valores del factor de bioconcentración fueron mayores a 1 indicando una buena capacidad de bioacumulación. Existe diferencias significativas entre los tratamientos siendo el tratamiento T3, en el que se utilizó 0,5 ml de dosis de nutrientes y se trabajó con 100 mg/l de Cu^{+2} , el que obtuvo el valor mayor de factor de absorción (6,55).

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Realizar pruebas en las que se consideren el efecto de la presencia de otros metales pesados y contaminantes que puedan afectar al potencial de absorción de *Eichornia crassipes*.

Analizar la absorción de Cu^{+2} en la totalidad de plantas macrófitas que se encuentran en el reactor tubular, para realizar un mejor balance de entradas, salidas y absorción del metal pesado.

Evaluar el potencial de absorción en otras especies de macrófitas para realizar una comparación con *Eichornia crassipes*.

Realizar pruebas con mayores concentraciones de Cu^{+2} para poder determinar las concentraciones en las que *Eichornia crassipes* empieza a reducir drásticamente en su capacidad de absorción de Cu^{+2} .

Producir *Eichornia crassipes* a nivel de laboratorio en condiciones controladas de nutrientes para poder trabajar con unidades experimentales más estandarizadas.

Luego del tratamiento es necesario realizar la disposición final de *Eichornia crassipes*, para lo cual es necesario encapsular al contaminante (Cu^{+2}) o disponerlo en un relleno específico.

Estudiar el comportamiento de las variables fisicoquímicas y de la interacción del Cu^{+2} con la solución de nutrientes.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Audet, P., Charest, C., (2007). *Dinámica de la simbiosis micorrízica arbuscular en la fitorremediación de metales pesados desde una perspectiva metaanalítica*. [En línea]: <http://www.ncbi.nih.gov/pobmed/17045709>
- Baker, A., (1981). *Acumuladores y excluidores: estrategias en la respuesta de las plantas a los metales pesados*: <http://www.books.google.es/about/HeavyMetalToleranceinPlants.html?hl=es&id=kvsPo4Et5scC>
- Baker, A., Brooks, R., (1989). *Terrestrial Higher Plants which Hyperaccumulate Metallic Elements-A Review of their Distribution, Ecology and Phytochemistry*. Biorecovery, Great Britain. https://www.researchgate.net/profile/Alan_Baker2/publication/247713966_Terrestrial_Higher_Plants_Which_Hyperaccumulate_Metallic_Elements_A_Review_of_Their_Distribution_E/links/004635368aaa870046000000.pdf
- Barreto, Y., Paredes, J., (2017). *Determinación del Potencial de Absorción de Cobre En solución Acuosa De Las Especies Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes*. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Perú. 6p. [En Línea]: (<https://www.semanticscholar.org/paper/DETERMINACION-DEL-POTENCIAL-DE-ABSORCION-DE-COBRE-y-Baquerizo-Salazar/385156589b71e6bd377c65aee21d95d821ee7edf>)
- Barroso, D., Muñoz, H., López, H., Gutiérrez, S., Álvarez, A. (2022) *Guanajuato Rumbo al Desarrollo Sustentable, Etapa-2.0: Caracterización del material lignocelulósico proveniente de Eichhornia crassipes dentro del rol de biorremediación en aguas contaminadas*. Universidad de Guanajuato, México. 10p. [En Línea]: (<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3711>)

- Bonilla, J., Santamaría, B., (2013). *Plantas acuáticas exóticas y trasladadas invasoras*, en R. Mendoza y P. Koleff (coords.). *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, 247p.
- Briñez Vásquez, G. N., Solano Aconcha, C. E., Sandoval Echavarría, J. D., Rojas Lomelin, A. L., & Agudelo Jiménez, G. (2019). *Fitorremediación de aguas contaminadas con componentes de amalgama de la preclínica de odontología de la Universidad Antonio Nariño, Ibagué (Colombia)*. *Acta Odontológica Colombiana*, 9(2), 59-70.
- Calderón, J. (2017). *Evaluación del factor de bioconcentración por metales pesados en la Eichhornia crassipes presentes en la Laguna Valle Hermoso*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 77p.
- Cuba, J., (2022). *Fitorremediación Con Macrófitas En La Remoción De Metales Pesados En Aguas Residuales, A Nivel De Laboratorio*. Universidad Nacional Federico Villarreal. Perú. 101p.
- Cottenie, A. (1984). *Los análisis de suelos y de plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Boletín de Suelos de la FAO 38/2, Roma, Italia, 116p.
- Diez, J. (2008). *Fitorreacción de suelos contaminados con metales pesados*. Universidad de Santiago de Compostela. España. 28-30 p.
- Duffus, J. (2004). *Metales pesados en la Minería*. Editorial Fundacion Confemetal. España. 128 p.
- Freire, D. (2014). *Estudo integrado do potencial fitorremediador da Eichhornia crassipes em ambientes naturais e sua utilizacao para obtencao de extratos proteicos*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Ciencias exactas e da terra. Rio Grande, Brasil. 164p.

- Gadd, G. (1992). *Heavy metals pollutants: environments and biotechnological aspects*. Academic Press Inc., 9: 174-185.
- Galán, E., Romero, A. (2008). *Contaminación de suelos por metales pesados*. [En línea]: http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/mada10/Macla10_48.pdf,
- García, Z. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en tratamientos de aguas residuales domésticas*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. 282 p.
- Guevara, M., Ramírez, L. (2015). *Eichhornia crassipes, su invasividad y potencial fitorremediador*. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 22(2): 5-11. ISSNp: 1390-3799, ISSNe: 1390-8596.
- Instituto Noruego De Investigación De Aguas, (2009). *Calidad del agua para el cultivo de smolts en Chile*. Chile. 138 p.
- Jaramillo, M., Flores, E. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lema minor y Eichhornia crassipes en aguas residuales producto de la actividad minera*. Cuenca. 128p.
- Jing, Y., He, Z., Yang, X. (2007). *Role rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soil*. Journal Zhejiang Univ. Sci. B., 8: 192-207.
- Kalra, Y., (1998). *Handbook of reference methods for plant analysis. Soil and Plant Analysis Council, Inc. CRC Press, USA: 300p.*
- Lokeshwari. H., Chandrappa, G. T. (2006), *Impact of heavy metal contamination of Bellandur Lake on soil and cultivated vegetation*, [En línea]: <http://www.iisc.ernet.in/currcsi/sep102006/662.pdf>
- Marcovecchio, J., Moreno, V. (1991). *Metal accumulation in tissues of sharks from the Bahía Blanca Estuary, Argentina*. Marine Environmental Research. Vol. 31: 263-274. [En

línea]: http://www.crlc/l.edu.at/enciclopedia/terminos/Bioac.htm,_documentos, 7 junio, 2017

- Muñoz, M. (1991). *Remoción de metales pesados en aguas residuales utilizando una macrofito acuática*. España. 18 p.
- Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R., Olguin, E. (2004). *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. Julio: 71-72.
- Olivares, E., Peña, E. (2009). *Bioconcentración de elementos minerales en Amaranthus dubius (bledo, pira), creciendo silvestre en cultivos del estado de Miranda, Venezuela y utilizado en alimentación*. [En línea]: <http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v34n9.pdf>
- Paris, C., Hadad, H., Maine, A., Suñe, N. (2007). Eficiencia de dos macrófitas flotantes libres en la absorción de metales pesados. Argentina; Santa Fé: Universidad Nacional del Litoral. (3)02: p 15-12.
- Paterna, J. (2011). *Evaluación de la contaminación por metales pesados en la Ciénaga la Soledad y Bahía de Cispada, Cuenca del Bajo Sinu, departamento de Córdoba*. Julio: 23-24.
- Poma, V., Valderrama, A. (2014). *Estudio de los parámetros físicoquímicos para la Fitorremediación de Cadmio (II) y Mercurio (II) con la especie Eichhornia crassipes*. Revista de Química, Perú. 10p.
- Rodier, J. (1981). *Análisis de aguas. Trad. Por Santiago Balague*. Barcelona, España, Ediciones Omega. 1059p.
- Romero, J. (2002). *Tratamiento de las aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. 25-26p.

- Rodríguez, A., Leton, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., Sans, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. VT MIOD Informe de vigilancia tecnológica. 137p.
- Volesky, B. (1990). *Bioabsorción de metales pesados*. Editorial CRC Press Florida.190 p.
- Vyslozilova, M., Tlutos, O. (2003). *As, Cd, Pb and Zn uptake by different Salix spp. Grown at soils enriched by high loads of these elements*. [En línea]: <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/52849.pdf>
- Water Treatment Solucions Lenntech, (1998). *El cobre y sus efectos*. [En línea]: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.hm#Nombre>, documentos, 15 febrero, 2015.
- Yañez, N., Molina, R. (2008). *La gran minería y los derechos indígenas en el norte de Chile. I ed. Editorial LOM*. Santiago-Chile. 249p.
- Yoon J., (2006). *Acumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site*. [En línea]: <http://www.Igma.ifas.ufl.edu/publication/yoon-06.pdf>

VIII. ANEXOS

ANEXO A. Panel fotográfico

Figura 6. *Eichornia crassipes* de la Comunidad Campesina de Las mercedes – Aucayacu (región Huánuco)



Figura 7. Área de trabajo, Universidad Nacional Agraria de la Selva.



Figura 8. *Eichornia crassipes* en estanque de aclimatación.



Figura 9. Aclimatación de *Eichornia crassipes*.



Figura 9. Reactor tubular.



Figura 10. Preparación de solución de nutrientes.



Figura 11. Pruebas experimentales con el reactor tubular.



Figura 12. Recolección de muestras de agua tratada.



Figura 13. Muestras de *Eichhornia crassipes*.



Figura 14. Preparación de muestras de *Eichhornia crassipes* Para análisis de espectrofotometría.



Figura 15. Análisis de concentración de Cu^{+2} con el espectrofotómetro.

ANEXO B. Análisis realizados.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado

SOLICITANTE : BOLAÑOS HOLGADO, Elvio Enrique
INVESTIGACIÓN : Efecto de la disponibilidad de nutrientes en el agua y su relación con el coeficiente de translocación biológico del cobre(Cu+2) de medios acuáticos mediante *Eichhornia crassipes* en un reactor tubular

N°	CODIGO		DATOS DE LA MUESTRA		Cu mg/kg	
	Área	Año	Muestra	Etiqueta		
1	ICP 001	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T1D1PS	10.086
2	ICP 002	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T1D1PA	34.572
3	ICP 003	2023	Agua	Efluente	T1D1E	0.219
4	ICP 004	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T1D2PS	15.765
5	ICP 005	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T1D2PA	39.79
6	ICP 006	2023	Agua	Efluente	T1D2E	0.144
7	ICP 007	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T2D1PS	4.266
8	ICP 008	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T2D1PA	30.475
9	ICP 009	2023	Agua	Efluente	T2D1E	0.431
10	ICP 010	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T2D2PS	17.244
11	ICP 011	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T2D2PA	41.275
12	ICP 012	2023	Agua	Efluente	T2D2E	0.38
13	ICP 013	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T3D1PS	9.021
14	ICP 014	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T3D1PA	34.087
15	ICP 015	2023	Agua	Efluente	T3D1E	0.292
16	ICP 016	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T3D2PS	24.168
17	ICP 017	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T3D2PA	43.692
18	ICP 018	2023	Agua	Efluente	T3D2E	0.265
19	ICP 019	2023	Agua	Vivero	Vivero	0.026
20	ICP 020	2023	Agua	Efluente	Efluente	0.026

Ing. Melchor Seria Iturrí
CIP: 244231
Director del LCI-UNAS

Método: Lectura de elementos por espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICPOES)

Recibo N°: 668044

Fecha: 04/01/2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA



TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS

SOLICITANTE : BOLAÑOS HOLGADO, Elvio Enrique
INVESTIGACIÓN : Efecto de la disponibilidad de nutrientes en el agua y su relación con el coeficiente de translocación biológico del cobre(Cu+2) de medios acuáticos mediante *Eichhornia crassipes* en un reactor tubular

DEPARTAMENTO : Huancayo
PROVINCIA : Leoncio Prado

N°	CODIGO		DATOS DE LA MUESTRA			Cu mg/kg
	Área	Año	Muestra	Etiqueta		
1	ICP 001	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T1D1PS	9.542
2	ICP 002	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T1D1PA	30.372
3	ICP 003	2023	Agua	Efluente	T1D1E	0.244
4	ICP 004	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T1D2PS	18.356
5	ICP 005	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T1D2PA	37.566
6	ICP 006	2023	Agua	Efluente	T1D2E	0.205
7	ICP 007	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T2D1PS	6.354
8	ICP 008	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T2D1PA	35.633
9	ICP 009	2023	Agua	Efluente	T2D1E	0.562
10	ICP 010	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T2D2PS	14.367
11	ICP 011	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T2D2PA	43.854
12	ICP 012	2023	Agua	Efluente	T2D2E	0.325
13	ICP 013	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T3D1PS	10.125
14	ICP 014	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T3D1PA	30.225
15	ICP 015	2023	Agua	Efluente	T3D1E	0.211
16	ICP 016	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T3D2PS	20.945
17	ICP 017	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T3D2PA	39.455
18	ICP 018	2023	Agua	Efluente	T3D2E	0.21
19	ICP 019	2023	Agua	Vivero	Vivero	0.024
20	ICP 020	2023	Agua	Efluente	Efluente	0.022


Ing. Víctor Soria Huiri
CIP: 248231
Director del LCI-UNAS

Método: Lectura de elementos por espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICPOES)
Recibo N°: 668044
Fecha: 04/01/2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA



TINGO MARIA

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS

SOLICITANTE : BOLAÑOS HOLGADO, Elvio Enrique
INVESTIGACIÓN : Efecto de la disponibilidad de nutrientes en el agua y su relación con el coeficiente de translocación biológico del cobre(Cu+2) de medios acuáticos mediante *Eichhornia crassipes* en un reactor tubular

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado

N°	CODIGO		DATOS DE LA MUESTRA			Cu mg/kg
	Área	Año	Muestra	Etiqueta		
1	ICP 001	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T1D1PS	9.864
2	ICP 002	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T1D1PA	30.864
3	ICP 003	2023	Agua	Efluente	T1D1E	0.213
4	ICP 004	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T1D2PS	16.046
5	ICP 005	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T1D2PA	37.898
6	ICP 006	2023	Agua	Efluente	T1D2E	0.214
7	ICP 007	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T2D1PS	5.667
8	ICP 008	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T2D1PA	37.582
9	ICP 009	2023	Agua	Efluente	T2D1E	0.487
10	ICP 010	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T2D2PS	15.087
11	ICP 011	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T2D2PA	43.417
12	ICP 012	2023	Agua	Efluente	T2D2E	0.406
13	ICP 013	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T3D1PS	10.028
14	ICP 014	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T3D1PA	30.698
15	ICP 015	2023	Agua	Efluente	T3D1E	0.208
16	ICP 016	2023	Eichornia crassipes	Parte aerea	T3D2PS	19.478
17	ICP 017	2023	Eichornia crassipes	Raiz	T3D2PA	40.051
18	ICP 018	2023	Agua	Efluente	T3D2E	0.301
19	ICP 019	2023	Agua	Vivero	Vivero	0.025
20	ICP 020	2023	Agua	Efluente	Efluente	0.024

Ing. Leichor Soria Iturrí
CIP: 244231
Director del LCI-UNAS

Método: Lectura de elementos por espectrofotómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICPOES)

Recibo N°: 668044

Fecha: 04/01/2023