

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y METALURGIA**



TESIS:

**BIOSORCIÓN DE PLOMO Y ARSÉNICO UTILIZANDO BIOMASA
VEGETAL INERTE DE TALLOS DE PUKA KORA (*Rumex acetosella*)**

Para optar el grado académico de:

MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

Bach. Elibet MOSCOSO MOSCOSO

ASESOR:

Dr. David CHOQUE QUISPE

AYACUCHO - PERÚ

2024

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, por ser mi guía espiritual a lo largo de toda mi vida.

A Marcelo, mi pequeño milagro, por llegar a mi vida en el momento más especial y darle un nuevo sentido.

A Edgar, mi querido esposo, por tu amor incondicional y tu constante apoyo en cada paso de este camino.

A mi querida abuelita, quien, con su amor incondicional y cuidado, siempre estuvo a mi lado. Aunque ya no estás físicamente, tu presencia sigue viva en cada uno de mis logros

A mi mama Emilia, por estar siempre a mi lado y brindarme su apoyo inquebrantable en todo momento.

A mis tías Maxi y Petronila, y mi querido José Uriel, gracias por acompañarme en esta travesía.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, cuna de innumerables generaciones de profesionales destacados egresados de diversas disciplinas, expreso mi más profundo reconocimiento. Agradezco a todos mis profesores del posgrado, de quienes he aprendido valiosas lecciones que trascienden las aulas.

A la Universidad José María Arguedas de Andahuaylas, agradezco por facilitarme el acceso a sus laboratorios de investigación, permitiendo que mi trabajo se enriqueciera con recursos avanzados.

A mis asesores, el Dr. David Choque Quispe, y al Dr. Carlos Alberto Ligarda Samanez, les agradezco profundamente su paciencia, cooperación y constante apoyo durante todo el desarrollo de esta tesis.

A los miembros del jurado, les extiendo mi gratitud por sus valiosas sugerencias y observaciones, las cuales han contribuido significativamente a la mejora de este trabajo de investigación.

A mis amigos de la maestría en especial a Nazia y Yossimar, gracias por su amistad y apoyo,

RESUMEN

La contaminación de cuerpos hídricos con metales pesados como el plomo (Pb) y el arsénico (As) representa un grave riesgo para la salud pública y el medio ambiente, haciendo crucial el desarrollo de métodos efectivos de remoción. Este estudio evaluó la biosorción de Pb y As utilizando biomasa vegetal inerte de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*), recolectada en el distrito de San Jerónimo, Andahuaylas, Perú. La biomasa fue activada mediante tratamientos de hidrólisis ácida (T2), alcalina (T3) y una combinación ácida-básica (T4) para ser utilizada en ensayos en batch. Se realizaron pruebas preliminares para determinar la capacidad de remoción de Pb y As en soluciones de 10 ppm a pH 5, utilizando 0.2 g de biosorbente en 800 ml de solución. Los metales en solución se analizaron mediante espectrofotometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente, y se utilizó espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier para caracterizar los biosorbentes activados. Los resultados mostraron que la remoción de Pb osciló entre 76.90% y 94.38%, mientras que la remoción de As estuvo entre 17.73% y 23.52%, siendo el tratamiento mixto (T4) el más efectivo. En la aplicación del biosorbente en efluentes mineros de la Planta Los Chankas, se observó una remoción de 56.78% para Pb, 44.16% para Zn y 39.96% para Cu. Los resultados indican que los tallos de puka kora tratados secuencialmente por hidrólisis ácida y alcalina pueden ser utilizados como un biosorbente eficiente para la remoción de Pb y As.

Palabras claves. *Puka kora, biosorción, biosorbente, efluente minero*

ABSTRACT

Contamination of water bodies with heavy metals such as lead (Pb) and arsenic (As) poses a serious risk to public health and the environment, making the development of effective removal methods crucial. This study evaluates the biosorption of Pb and As using inert plant biomass from the stems of puka kora (*Rumex acetosella*), collected in the district of San Jerónimo, Andahuaylas, Peru. The biomass was activated through acid hydrolysis (T2), alkaline hydrolysis (T3), and a combination of acid-alkaline treatments (T4) for use in batch experiments. Preliminary tests were conducted to determine the removal capacity of Pb and As in 10 ppm solutions at pH 5, using 0.2 g of biosorbent in 800 ml of solution. The metals in solution were analyzed by inductively coupled plasma optical emission spectrometry, and the activated biosorbents were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy. The results showed that Pb removal ranged from 76.90% to 94.38%, while As removal ranged from 17.73% to 23.52%, with the mixed treatment (T4) being the most effective. In the application of the biosorbent to mining effluents from the Los Chankas Plant, a removal of 56.78% for Pb, 44.16% for Zn, and 39.96% for Cu was observed. The results indicate that puka kora stems sequentially treated by acid and alkaline hydrolysis can be used as an efficient biosorbent for the removal of Pb and As.

Key words. *Puka kora, biosorption, biosorbent, mining effluent*

INDICE GENERAL

	Pág.
Dedicatoria	ii
Resumen	iv
Abstract	v
Indice de tablas	ix
Índice de figuras	x
Índice de anexos	xi
Abreviaturas	xii
Introducción	1
I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. HIPÓTESIS	4
1.4.1. Hipótesis General	4
1.4.2. Hipótesis Específicas	4
1.5. JUSTIFICACIÓN	4
II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.1.1. Internacionales	8
2.1.2. Nacionales	12
2.2. BASES TEÓRICAS	13
2.2.1. Puka Kora (<i>Rumex acetosella</i>)	13
2.2.2. Materiales lignocelulósicos	16
2.2.3. Remoción de metales pesados	17

2.2.4.	Tecnologías convencionales de remoción de metales pesados	17
2.2.5.	Biosorción	17
2.2.6.	Factores que afectan la biosorción	19
2.2.7.	Biosorbentes	20
2.2.8.	Punto de Carga Cero (PCC)	20
2.2.9.	Metales pesados	20
2.2.10.	Espectroscopia de infrarrojo	22
2.2.11.	Análisis elemental	23
2.3.	DEFINICIONES DE TÉRMINOS	23
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	25
3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	25
3.3.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	26
3.4.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	26
3.5.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO	27
3.5.1.	Población	27
3.5.2.	Muestra	27
3.5.3.	Tipo de Muestreo	28
3.6.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	29
3.6.1.	Etapas de pre-muestreo	31
3.6.2.	Recolección de la biomasa	31
3.6.3.	Caracterización física y química de la puka kora	31
3.6.4.	Preparación de la biomasa pretratada	32
3.6.5.	Características de la biomasa activada de tallos de puka kora	33
3.6.6.	Proceso de biosorción de plomo y arsénico	34
3.6.7.	Análisis del efecto del pH y la cantidad de masa en el proceso de biosorción	35
3.6.8.	Determinación de la capacidad de biosorción en efluentes mineros	35
3.7.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	35

3.7.1.	Procesamiento de datos	35
3.7.2.	Análisis estadístico	36
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	37
4.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA PUKA KORA (<i>RUMEX ACETOSELLA</i>).	37
4.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA ACTIVADA DE TALLOS DE PUKA KORA	42
4.3.	BIOSORCIÓN DE PLOMO Y ARSÉNICO	44
4.4.	EFFECTO DEL PH Y LA CANTIDAD DE MASA, EN EL PROCESO DE BIOSORCIÓN	49
4.5.	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN EN EFLUENTES MINEROS	54
4.6.	RESUMEN DE RESULTADOS	55
V.	CONCLUSIONES	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXOS	67

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química de <i>Rumex acetosella</i>	16
Tabla 2. Diseño de investigación	27
Tabla 3. Resultados de la Humedad y del pH de la puka kora (<i>Rumex acetosella</i>)	37
Tabla 4. Grupos funcionales en la hoja y el tallo de puka kora (<i>Rumex acetosella</i>)	38
Tabla 5. Valores del pH inicial y final para el cálculo del PCC	40
Tabla 6. Carbono orgánico total (%)	42
Tabla 7. Biosorción de plomo y arsénico	45
Tabla 8. Remoción de Pb y As en relación al pH	50
Tabla 9. Remoción de Pb y As en relación a la cantidad de biosorbente	52
Tabla 10. Caracterización de los efluentes mineros	55
Tabla 11. Resumen de los tratamientos de remoción de Pb y As	56

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Rumex acetosella</i> (A) roseta; (B) diferentes formas de hojas; (C) inflorescencia; (D) primer plano de una porción de inflorescencia que muestra algunas flores abiertas (flecha); (E) flor; (F) semillas (la barra de aumento es solo para semillas).	13
Figura 2. Lugar de recolección de Puka kora	28
Figura 3. Descripción del proceso experimental	29
Figura 4. Espectrograma de las hojas y tallos de la puka kora	38
Figura 5. Punto de carga cero de la puka kora	41
Figura 6. Espectrograma de los tratamientos de biomasa antes de la biosorción.	43
Figura 7. Espectrogramas de la biomasa pretratada después de la biosorción	47
Figura 8. Espectrogramas antes y después del proceso de biosorción de Pb y As.	48
Figura 9. pH óptimo para la remoción de arsénico y plomo	51
Figura 10. Cantidad optima de remoción de As y Pb.	55

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Prueba t-student para la humedad de tallos y hojas de puka kora	68
Anexo 2: Prueba t-student para el pH de tallos y hojas de puka kora	69
Anexo 3: ANOVA y prueba Tukey para el TOC	70
Anexo 4: Resultados de la concentración inicial y final de As y Pb	72
Anexo 5: ANOVA y prueba Tukey para la remoción de As	73
Anexo 6: ANOVA y prueba Tukey para la remoción de Pb	75
Anexo 7: ANOVA y prueba Tukey para el pH óptimo-As	77
Anexo 8: ANOVA y prueba Tukey para el pH óptimo-Pb	79
Anexo 9: ANOVA y prueba Tukey para la cantidad óptima-As	81
Anexo 10: ANOVA y prueba Tukey para la cantidad óptima-Pb	83
Anexo 11: Panel Fotográfico	85

ABREVIATURAS

%T: Porcentaje de Transmitancia

ANVA: Análisis de Varianza

DCA: Diseño Completamente al Azar

EDTA: Ácido etilendiaminotetraacético

ICP-OES: Espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente

FTIR: Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (Espectrofotometría Infrarroja por Transformada de Fourier)

g: Gramos

ICP- OES: Espectrofotómetro de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente

L: Litros

mg: miligramos

mL: Mililitros

NaOH: Hidróxido de Sodio

ppm: Partes por millón

T1: Biomasa de puka kora sin Tratamiento

T2: Biomasa de puka kora con tratamiento ácido

T3: Biomasa de puka kora con tratamiento alcalino

T4: Biomasa de puka kora con tratamiento mixto o secuencial

COT: Carbono orgánico Total

USEPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua por metales pesados es un problema mundial que se intensifica principalmente debido a actividades humanas como la minería, la industria y la agricultura (Peña et al., 2017). Los metales pesados, incluyendo mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), zinc (Zn), cadmio (Cd), cromo (Cr) y níquel (Ni), son persistentes en el medio ambiente, se bioacumulan y son tóxicos. Estos metales ingresan al sistema acuático por diversas vías, impactando negativamente la calidad del ecosistema y la salud humana (Singh et al., 2022; Ali et al., 2013).

Investigaciones recientes han revelado la presencia de metales pesados y metaloides en hortalizas y tubérculos irrigados con aguas superficiales contaminadas, lo que constituye un riesgo considerable para la cadena alimentaria y la salud pública (Singh et al., 2022; Gupta et al., 2018). En este contexto, la biosorción ha surgido como una técnica efectiva y económica para eliminar metales pesados de aguas residuales, empleando materiales de desecho o sin uso como biosorbentes (Zhang, 2014; Volesky, 2007).

La biosorción se destaca por su alta capacidad de remoción de metales pesados y su bajo costo, comparada con otros métodos de tratamiento como la precipitación química, la electrocoagulación y la ósmosis inversa (Volesky, 2007; Wang y Chen, 2009). Diversos estudios han explorado una amplia gama de biomateriales de desecho, como residuos agrícolas, cáscaras de frutas, algas y microorganismos, que han mostrado ser efectivos biosorbentes para la remoción de metales pesados en soluciones acuosas (Zhang, 2014; Demirbas, 2008).

Este estudio de investigación propone utilizar un recurso natural abundante en los campos de cultivo de la provincia de Andahuaylas, específicamente los tallos de puka kora (*Rumex acetosella*), como biosorbente inerte para la eliminación de metales pesados (Pb y As) en aguas residuales. La biomasa vegetal será sometida a tratamientos de hidrólisis ácida y alcalina para mejorar su capacidad de adsorción (Nguyen et al., 2013; Yang y Volesky, 1999). Además, esta investigación busca ofrecer una alternativa ecológica y contribuir a la economía circular, proporcionando una base para el desarrollo y la aplicación de una tecnología ambientalmente amigable a escala industrial.

I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El desarrollo tecnológico y científico desde la revolución industrial ha incrementado considerablemente la capacidad humana para explotar los recursos naturales, resultando en alteraciones significativas en los ciclos geológicos, biológicos y químicos (Canizares-Villanueva, 2000).

En Perú, las fuentes de agua nacen en las montañas altas y, a menudo, se encuentran cerca de explotaciones mineras. Esta proximidad expone las fuentes de agua a niveles peligrosos de metales pesados debido a las actividades extractivas, contaminando y afectando la salud de la producción agropecuaria local, ya que en muchas zonas rurales y urbanas, estas aguas son utilizadas para consumo humano (Larios-Meoño et al., 2015).

La minería, aunque genera importantes beneficios económicos, también ha contribuido a la contaminación de los recursos hídricos debido a los relaves mineros (Villanueva, 2006). Además, el deterioro de los cuerpos hídricos se debe principalmente al vertimiento de efluentes urbanos, industriales y agrícolas. Las aguas residuales urbanas, compuestas por aguas domésticas, municipales y escorrentía pluvial, deterioran significativamente la calidad del agua cuando no son tratadas adecuadamente (Zevallos, 2018). Estas aguas residuales contienen niveles considerables de metales pesados, lo que tiene un impacto negativo considerable en Perú.

La remoción de metales pesados en aguas residuales puede lograrse mediante diversos tratamientos y métodos. Los tratamientos comunes incluyen procesos mecánicos (sedimentación), biológicos (lodos activados) y químicos. Entre los tratamientos químicos más comunes están la precipitación mediante hidróxidos y sulfuros, el intercambio iónico, la oxidación-reducción, la adsorción, la separación mediante membranas y la separación sólido-líquido mediante decantación-flotación (Loarte y Sanabria, 2015). La búsqueda de

métodos y tecnologías más eficaces y sostenibles ha dirigido la atención hacia la biosorción, un proceso económico y amigable con el medio ambiente.

Este estudio propone el uso de un recurso natural abundante en los campos de cultivo de la provincia de Andahuaylas: los tallos de puka kora (*Rumex acetosella*). Se evaluará la capacidad de biosorción de metales pesados (plomo y arsénico) en aguas residuales utilizando esta biomasa vegetal inerte. Adicionalmente, se presenta una alternativa ecológica para la remoción de contaminantes de este tipo. Esta investigación servirá como base para el desarrollo y la aplicación de tecnologías industriales sostenibles, contribuyendo al estudio de tecnologías limpias de biorremediación.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿En qué medida será posible la biosorción de metales pesados (plomo y arsénico) utilizando biomasa inerte de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*)?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo serán las características físicas y químicas de la biomasa de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*)?
- ¿Cómo serán las características de las muestras de biomasa pretratadas de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*)?
- ¿Cuál será la capacidad de biosorción de plomo y arsénico en agua sintética utilizando biomasa vegetal inerte de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*), en sistema batch?
- ¿Cuál será el efecto del pH y la cantidad de masa en el proceso de biosorción?
- ¿Cómo será la capacidad de biosorción del biosorbente en efluentes mineros?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la biosorción de plomo y arsénico utilizando biomasa vegetal inerte de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*), proveniente del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características físicas y químicas de puka kora (*Rumex acetosella*).
- Determinar las características de la biomasa activada de tallos de puka kora
- Determinar la capacidad de biosorción de plomo y arsénico en agua sintética utilizando biomasa vegetal inerte de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*).
- Analizar el efecto del pH y la cantidad de masa, en el proceso de biosorción.
- Determinar la capacidad de biosorción del biosorbente en efluentes mineros.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis General

La capacidad de biosorción de metales pesados (plomo y arsénico) por biomasa pretratada de puka kora (*Rumex acetosella*) presenta rendimientos altos.

1.4.2. Hipótesis Específicas

- La características físicas y químicas de la biomasa de tallos de puka kora (*Rumex acetosella*) son favorables para la biosorción de metales pesados
- Las características de la biomasa activada de puka kora (*Rumex acetosella*) favorecen el proceso de biosorción de metales pesados.
- La remoción de plomo y arsénico en agua sintética, con biomasa pretratada de puka kora (*Rumex acetosella*) presentará altos rendimientos.
- El pH y cantidad de masa influyen considerablemente en el proceso de biosorción.
- El nuevo biosorbente tendrá buena capacidad de biosorción de metales pesados en efluentes mineros.

1.5. JUSTIFICACIÓN

El agua acumula muchas sustancias a medida que fluye a través de áreas agrícolas e industriales, incluyendo contaminantes como herbicidas, pesticidas, fertilizantes químicos, vertidos industriales y residuos generados por actividades humanas. Entre los contaminantes

más riesgosos para la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas se encuentran los metales pesados, que son bioacumulables y presentan toxicidad a bajas concentraciones (Halim et al., 2005). La presencia de estos metales en el agua representa un riesgo significativo para la salud pública y la calidad ambiental (Alloway, 2013).

Estudios recientes han demostrado que es posible utilizar métodos alternativos para la remoción de metales pesados de medios acuosos, empleando materiales de origen biológico como hongos, bacterias, algas, y residuos industriales, urbanos o agrícolas. Estos materiales han demostrado ser viables, eficientes en la remoción y de bajo costo (Volesky, 2001; Vijayaraghavan y Yun, 2008).

La biosorción, una técnica utilizada en la remoción de metales pesados, consiste en adsorber el ion contaminante (sorbato) en un material biológico (biosorbente). Este proceso se caracteriza por el uso de biosorbentes ampliamente disponibles, fáciles de usar, con bajos costos de operación y con la ventaja de generar cantidades mínimas de lodos (Loarte y Sanabria, 2015). Los biosorbentes incluyen materiales como algas, cáscaras de frutas, residuos agrícolas y plantas (Volesky, 2007).

La puka kora (*Rumex acetosella*) contiene fibra cruda en un porcentaje de $26.42\% \pm 2.16$. Esta fibra está constituida por celulosa, lignina, hemicelulosas y cenizas (Rinaudo y Reguant, 2000). La lignina, un biopolímero amorfo y uno de los más abundantes del planeta, posee grupos carboxilo y unidades fenólicas en su estructura macromolecular, capaces de interactuar con iones metálicos. Sin embargo, para la remoción de metales pesados, se prefiere una biomasa con mayor contenido de celulosa y hemicelulosa después de la deslignificación, ya que estos polisacáridos tienen numerosos grupos hidroxilo (-OH) que pueden interactuar con los iones metálicos a través de enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, facilitando la adsorción de metales pesados.

Para mejorar la capacidad de adsorción de la biomasa de puka kora, se aplicaron tratamientos químicos específicos. La hidrólisis ácida rompe las estructuras de la celulosa y hemicelulosa, liberando grupos funcionales que pueden unirse a iones metálicos, aumentando así la capacidad de biosorción. Por otro lado, la hidrólisis alcalina elimina componentes como la lignina y aumenta la porosidad de la biomasa, exponiendo las fibrillas de celulosa que también pueden adsorber metales pesados (Nguyen et al., 2013; Yang y Volesky, 1999). El

tratamiento mixto, que combina la hidrólisis ácida y alcalina, maximiza la eficiencia de remoción de metales al optimizar la estructura de la biomasa y la exposición de los grupos funcionales (Wang y Chen, 2009).

Actualmente, la provincia de Andahuaylas enfrenta una invasión de sus áreas de cultivo por la maleza conocida como puka kora, lo cual representa un problema para los agricultores. Esta diseminación se debe a factores como el viento, animales, insectos, herramientas agrícolas y maquinaria, entre otros, que facilitan su propagación. La falta de un adecuado control de malezas ha convertido la eliminación de la puka kora en una labor principal en los campos de cultivo, incrementando los costos de producción para los agricultores y generando un material de descarte que no se utiliza.

La presencia de metales pesados en los cuerpos de agua es preocupante debido a su impacto en la seguridad de los ecosistemas y la salud humana. Las plantas de tratamiento de agua, tanto potable como residual, carecen de sistemas adecuados para eliminar estos contaminantes, lo que afecta la disponibilidad y calidad del agua (Who, 2011). Ante la necesidad de encontrar soluciones efectivas y sostenibles, el uso de material vegetal para la remoción de metales pesados se plantea como una alternativa viable.

La presente investigación utilizó la puka kora, considerada una maleza en la provincia de Andahuaylas, como un biosorbente para la remoción de metales pesados. Se empleó biomasa de puka kora modificada mediante diferentes pretratamientos y un control. Esta alternativa no solo contribuyó a la remoción de contaminantes, sino que también proporcionó un uso útil para un material de descarte abundante, alineándose con principios de sostenibilidad y economía circular.

1.6. IMPORTANCIA

La investigación en la biosorción de plomo y arsénico utilizando tallos de puka kora (*Rumex acetosella*) es de vital importancia por varias razones. Primero, permite el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente a través del uso de puka kora modificada con diferentes pretratamientos para la remoción de metales pesados en muestras de agua. Cabe destacar que la puka kora está ampliamente disponible en las extensas áreas de cultivo de la provincia de Andahuaylas, donde se ha convertido en un problema significativo. Esta maleza

afecta la fertilización, el control fitosanitario, el riego y otras prácticas culturales, impactando negativamente en el rendimiento de los cultivos y forrajes.

La puka kora es una planta perenne que se propaga a través de rizomas, lo que favorece su capacidad para rebrotar, incrementando así los costos de producción para los agricultores debido a la escasez y el alto costo de la mano de obra. Utilizar esta maleza como opción para eliminar metales pesados es crucial para avanzar en nuevas tecnologías. Esto cobra especial importancia al emplear biosorbentes naturales, de bajo costo y ampliamente disponibles en la naturaleza.

El estudio de nuevos biosorbentes, como los tallos de puka kora, con diferentes tratamientos químicos, es crucial para avanzar en métodos de remediación ambiental eficientes y sostenibles. Los tratamientos aplicados a la puka kora, como la hidrólisis ácida, alcalina y mixta, mejoran su capacidad de adsorción, haciendo de esta planta una solución prometedora para la descontaminación de aguas afectadas por metales pesados.

En resumen, esta investigación no solo aborda un problema ambiental significativo, sino que también ofrece una solución práctica y sostenible. El desarrollo de biosorbentes efectivos a partir de un recurso natural y problemático como la puka kora contribuye a la economía circular y a la implementación de tecnologías limpias, beneficiando tanto a la comunidad agrícola de Andahuaylas como al medio ambiente en general.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Internacionales

Abdel et al. (2013), en su investigación “Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga *Anabaena sphaerica* biomass” evaluaron la capacidad de biosorción del cadmio y el plomo desde una solución acuosa, utilizando como biomasa algas de agua dulce *Anabaena sphaerica*, en función del pH, el tiempo de contacto, la dosis de biosorbente, y la concentración inicial de iones metálicos; reportándose valores de pH óptimo de 5.5 para el Pb. Con respecto a la cantidad de biomasa, para la experimentación se utilizaron dosis entre 0.025 y 0.25 g/100mL de solución acuosa; reportándose mejores porcentajes de remoción a dosis más altas, manteniéndose constante con una dosis superior a 0.1 g/100 mL y 0.2 g/100 mL para Pb y Cd. Asimismo, el análisis de FTIR para la identificación de los grupos funcionales superficiales de la biomasa mostró grupos hidroxilo, carboxilo, amino, y carbonilo, a los que se les atribuye la responsabilidad de la biosorción de Cd y Pb.

Boota et al. (2009), en su investigación "Removal of Cu(II) and Zn(II) Using Lignocellulosic Fiber Derived from Citrus reticulata (Kinnow) Waste Biomass", estudiaron la eliminación de Cu y Zn utilizando biomasa residual de Citrus reticulata seca, tanto sin tratar como pretratada. Descubrieron que la remoción de Cu(II) y Zn(II) depende del pH de la solución acuosa, el tamaño de partícula del biosorbente, la dosis del biosorbente, la velocidad de agitación, la temperatura y el tiempo de contacto. Evaluaron 28 pretratamientos físicos y químicos de la biomasa residual de Citrus reticulata para la sorción de Cu y Zn de soluciones acuosas. Los resultados mostraron que la biomasa pretratada con ácido sulfúrico y ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) tiene una capacidad máxima de absorción de Cu de 87.14 mg/g y de Zn de 86.4 mg/g. También realizaron estudios de FTIR para identificar los grupos

funcionales presentes en la biomasa, encontrando una fuerte banda de estiramiento asimétrico a 3506.59 cm^{-1} , indicativa de la presencia de grupos $-\text{OH}$ y $-\text{NH}$; asimismo, observaron grupos carbonilos en la superficie de la biomasa debido a una banda situada a 1734.01 cm^{-1} ; se detectaron picos por debajo de 800 cm^{-1} , atribuibles a los aminoácidos aromáticos en la superficie celular de la biomasa.

Zhang et al. (2014) en su estudio titulado “Biosorption of lead, cadmium and zinc by inactive *Saccharomyces cerevisiae*: Application of isotherm and kinetic models,” evaluaron la eficiencia de la levadura inactiva de *Saccharomyces cerevisiae* para la remoción de plomo, cadmio y zinc de soluciones acuosas. El estudio demostró que la levadura tiene una alta capacidad de adsorción para estos metales pesados y que los modelos cinéticos de pseudo-segundo orden se ajustan mejor a los datos experimentales. Además, se identificaron grupos funcionales clave en la superficie de la levadura que contribuyen a la biosorción

Castro (2015), en su investigación “Uso de la cáscara de banano (*musa paradisiaca*) maduro deshidratada (seca) como proceso de biosorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas” evaluó los procesos de biosorción de Pb y Cr empleando cáscara de plátano maduro como biosorbente, trabajó a diferentes tamaños de partícula de la cáscara de plátano ($250\text{ }\mu\text{m}$, $400\text{ }\mu\text{m}$ y $845\text{ }\mu\text{m}$), y con diferentes dosis de biosorbente en polvo (10, 15 y 20 g/L). Los tratamientos fueron sometidos a agitación por 48 horas. Los resultados reportaron un porcentaje máximo de remoción de Pb ($80\% \pm 1.75$) y Cr ($51.2\% \pm 5.48$).

Farhan y Khadom (2015), en su investigación "Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by *Saccharomyces Cerevisiae*", estudiaron la biosorción de metales pesados en soluciones acuosas utilizando *Saccharomyces Cerevisiae*. Evaluaron el efecto del pH, la concentración inicial, la temperatura, el tiempo de contacto y la dosis de biosorbente en la capacidad de biosorción. Los resultados del experimento mostraron que la biosorción de metales es un proceso rápido a valores de pH entre 5.0 y 6.0, mencionando que a pH bajos los protones compiten con los metales por los sitios activos responsables de la biosorción, lo que reduciría la biosorción de metales.

Hernández y Triviño (2016), en su investigación “Evaluación de la capacidad de biosorción de Pb (II) y Cd (II) presentes en soluciones sintéticas independientes empleando retamo

espinoso (*Ulex europaeus*) como adsorbente.” estudiaron la capacidad de remoción de Pb y Cd, empleando retamo espinoso como biosorbente. La capacidad máxima de remoción para el Pb fue de 16.75 mg/g a un pH 4 y a una concentración inicial de 75 mg/l; con respecto al Cd fue de 11.44 mg/g a pH 6 y con la misma concentración inicial. Los mayores porcentajes de remoción para el Pb fue de 84.55% y para el Cd de 82.20%.

Choi y Lee (2015), en su investigación “Heavy metal removal from acid mine drainage by calcined eggshell and microalgae hybrid system” estudiaron la remoción de metales pesados de efluentes mineros empleando como biomasa cascara de huevo y microalgas, llegando a remover Fe, Cu, Zn, Mn, As y Cd, en porcentajes de 80.30%, 82.31%, 80.27%, 80.58%, 80.22% y 81.48%, respectivamente.

Gong et al. (2015) realizaron una investigación sobre la biosorción de metales pesados utilizando diferentes tipos de microalgas. En su estudio titulado “Biosorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions by Chemically Modified Microalgae”, evaluaron la eficacia de microalgas modificadas químicamente para la remoción de metales como Cd, Pb y Cu de soluciones acuosas. Los resultados mostraron que las microalgas tratadas con NaOH tenían una capacidad de adsorción significativamente mejorada, con una máxima capacidad de biosorción de 112.5 mg/g para Pb. Los modelos cinéticos de pseudo-segundo orden y los isotermos de Langmuir describieron adecuadamente los procesos de biosorción observados en el estudio

Santos et al. (2017) en su investigación “Removal of Arsenic in Aqueous Solution by Modified Fungal Biomass of *Aspergillus niger*”, estudiaron la capacidad de remoción de As en soluciones acuosas, empleando biomasa fúngica modificada de *Aspergillus niger*. En esta investigación, la mayor remoción fue a las 24 horas a pH 6.0, a una temperatura de 28°C y 1 g de biomasa modificada obteniendo un 69% con 1 mg/L del metaloide. La temperatura también influyó en el proceso de remoción, obteniéndose un 69% de remoción a 28°C, en 24 horas. A mayor concentración de As la remoción fue menor, y al incrementar la concentración del biosorbente se obtuvo una remoción del 96% con 5 g de biomasa. Por lo tanto, concluyeron que la biomasa modificada podría ser utilizada para la eliminación de As de las aguas residuales industriales.

Sellaoui et al. (2017), en su investigación “New insights into single-compound and binary adsorption of copper and lead ions on treated sea mango shell: Experimental and theoretical studies” caracterizaron la cáscara de frutos de mango de mar (*Cerbera manghas*) para la remoción de plomo y cobre. Se determinó el punto de carga cero (PCC), siendo este igual a 4.2, asimismo se identificó los grupos funcionales a través del análisis de FTIR, observándose que la adsorción de metales pesados en los materiales celulósicos a 3405, 2918, 1375 y 889 cm^{-1} .

Vera et al. (2016), en su investigación "Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente", estudiaron la remoción de metales pesados de aguas residuales utilizando bagazo de caña de azúcar como biosorbente para eliminar Pb y Cd de aguas residuales mineras. Evaluaron el efecto del pH, la concentración inicial, la cinética de biosorción y el tiempo de contacto. Los resultados mostraron que la remoción de Cd alcanzó un 77.81% a un pH de 6, mientras que la remoción de Pb fue del 99.76% a un pH de 5, con un tiempo de contacto de 10 minutos.

Kang et al. (2021) investigaron la aplicabilidad de algas marinas (*Hizikia fusiformis*) para la remoción de metales pesados (Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+}) de soluciones acuosas. Su estudio demostró que el tratamiento con NaOH mejoró significativamente la capacidad de biosorción de *H. fusiformis*, con una máxima capacidad de biosorción de 167.73 mg/g para Pb. Los resultados también mostraron que los modelos cinéticos de pseudo-segundo orden y los isotermos de Langmuir describieron adecuadamente los procesos de biosorción observados

Schwantes et al. (2022), en su investigación "Ecofriendly Biosorbents Produced from Cassava Solid Wastes: Sustainable Technology for the Removal of Cd^{2+} , Pb^{2+} , and Cr total", evaluaron biosorbentes ecológicos producidos a partir de residuos sólidos de yuca para la eliminación de Cd, Pb y Cr. Utilizaron SEM, FTIR y PCC para caracterizar el biosorbente. La investigación utilizó una solución contaminada con un pH entre 4.0 y 7.0 y concentraciones de 5.0 a 24 g/L del adsorbente. Los análisis de FTIR antes y después del proceso de adsorción mostraron picos relacionados con grupos funcionales faltantes, sugiriendo un papel importante de alquenos, ácido carboxílico, alcohol, anhídrido y éter. El PCC se encontró entre 6.02 y 6.26, logrando una capacidad de remoción del 94.9%.

2.1.2. Nacionales

Albarracin (2014), en su tesis “Capacidad de adsorción para remover en ion metálico PB (II) por el tanino de la cascara de tarwi (*lupinus mutabilis sweet*), de las aguas del río Ramis Puno, Perú” estudió la biosorción de Pb (II) empleando tanino de la cáscara de tarwi (*Lupinus mutabilis Sweet*) como biosorbente, la biomasa fue tratada con HCl con la finalidad de que presente una mayor estabilidad mecánica. El Pb presentó una remoción del 96.021% a pH 5.5, empleando 0.1 g de biosorbente por un tiempo de contacto de 60 min.

Cabrera (2018), en su investigación “Evaluación de la Capacidad de Biosorción de Plomo (II) Empleando Biomasa Vegetal Inerte (tallo de rosas) como adsorbente” utilizó biomasa de tallos de rosa como biosorbente para la remoción de Pb, para lo cual utilizó tratamientos ácidos, alcalinos y mixtos (hidrolisis acida seguida de la alcalina), siendo esta ultima la que mejores porcentajes de remoción reporto con 99.3%, a comparación del tratamiento alcalino (83.02%), acido (89.05%) y un porcentaje de 60.96% para el biosorbente sin tratamiento. Los valores óptimos de remoción de Pb, fueron a pH 4, cantidad de biosorbente de 0.05 g, a una concentración inicial de 10 ppm, manteniéndoles en agitación por 180 minutos, llegando a remover hasta un 99.66%. En todos los ensayos batch realizados, se reportaron porcentajes de remoción por encima del 97%. Con referencia al análisis FTIR, se concluyó a que la biomasa presentó la capacidad de interacción con el Pb.

Mamani (2016), en su investigación “Biosorción de plomo (II) de las aguas del río Ayaviri, mediante el uso de salvado de cebada” evaluó la remoción de Pb presente en las aguas del río Ayaviri, empleando como biosorbente al salvado de cebada. El biosorbente fue tratado con HCl 0.1 N y secado a 70°C en una estufa de convección forzada. El pH óptimo de remoción fue de 5, con un tiempo de contacto de 60 minutos.

Vizcaíno y Fuentes (2015), en su investigación "Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna", evaluaron la eliminación de metales pesados Cd, Pb y Zn utilizando biomasa de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. La biomasa de algas fue modificada con NaOH 0.1 N, mientras que la biomasa de naranja y tuna fue modificada sucesivamente con NaOH y CaCl₂ 0.2 M, mostrando porcentajes considerables de remoción. Utilizaron un reactor de flujo continuo de columna para determinar la eficiencia de remoción, empleando un volumen líquido de 400 mL, con una biomasa de 75

g y tiempos de retención de 1 a 2 horas. Los tres tratamientos reportaron valores similares para la remoción de Cd y Pb, superando el 95%. Para el Zn, se obtuvieron mejores porcentajes al utilizar tuna modificada como biosorbente, logrando remover hasta un 62%.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Puka Kora (*Rumex acetosella*)

La puka kora (*Rumex acetosella*) es una planta perenne originaria de Eurasia, que puede alcanzar una altura de hasta 40 cm. Se caracteriza por tener hojas rojizas, alternas y pecioladas. Sus frutos son aquenios marrones y su raíz es un rizoma. Esta maleza presenta hojas finas y delgadas, lo que las hace poco perceptibles. La puka kora se encuentra en campos de cultivo y entre la vegetación boscosa de las zonas altas (Navajas, 2005).

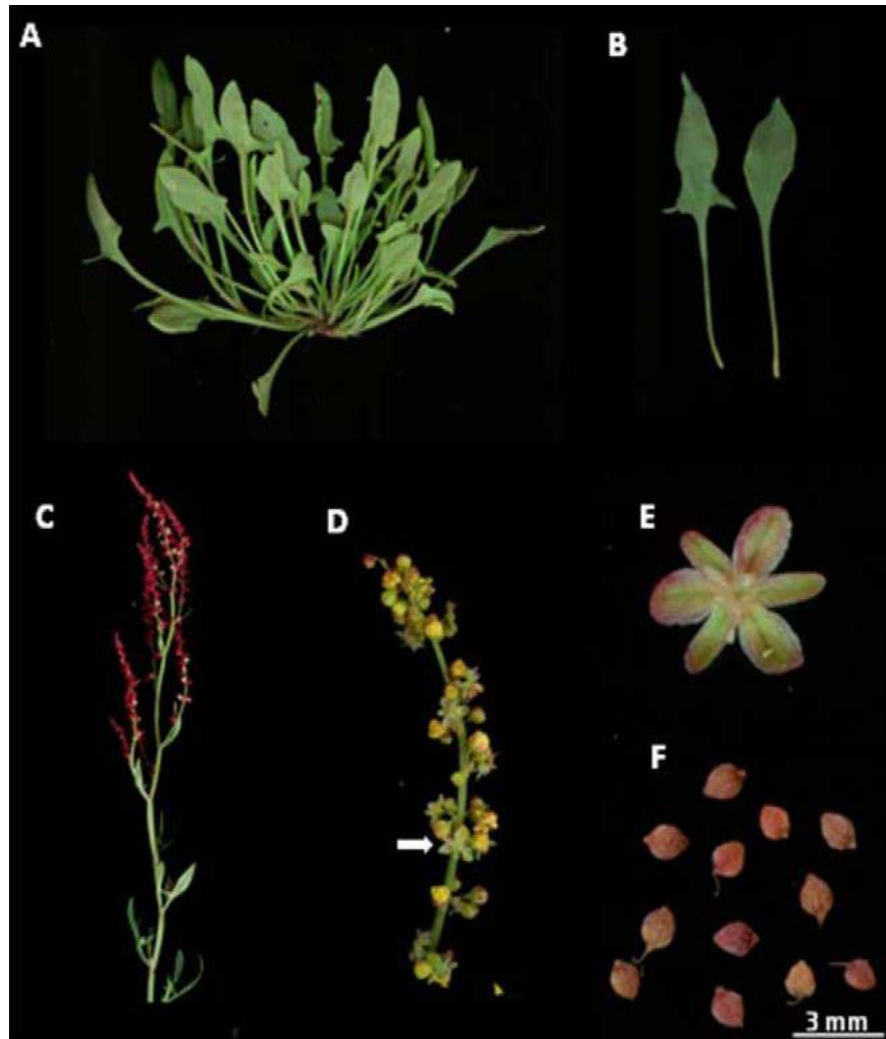
Según Apurimac (2019), la puka kora (*Rumex acetosella*) es considerada como una especie invasora con flores femeninas de color rojizo y pétalos ampliamente ovalados, generalmente las flores aparecen desde finales del mes de mayo hasta junio. En la provincia de Andahuaylas se pueden encontrar en los campos de cultivo de los distritos de San Jerónimo, Kishuara, Pacucha y Andarapa, no habiéndose encontrado hasta la actualidad algún herbicida, para su eliminación, actualmente se realizan las extracciones manuales para su eliminación, ya que esta especie afecta directamente a los agricultores, reduciendo sus áreas de cultivo.

Descripción

Es una especie perenne, que se reproduce tanto por raíces rastreras como por semillas; raíces extensas delgadas, relativamente poco profundas; crecimiento temprano como rosetas basales de hojas ; de forma variable pero que constan principalmente de tres lóbulos, de sabor agrio; tallos de hojas basales largos, de tallos cortos ; vaina membranosa (estípulas modificadas) rodea el tallo por encima de la base de la hoja; múltiples tallos pueden aparecer de una sola corona, , erguidos 15-40 cm de altura (Stopps et al., 2011).

Figura 1.

Rumex acetosella (A) roseta; (B) diferentes formas de hojas; (C) inflorescencia; (D) primer plano de una porción de inflorescencia que muestra algunas flores abiertas (flecha); (E) flor; (F) semillas (la barra de aumento es solo para semillas).



Fuente: Stopps et al. (2011)

Características distintivas

Rumex acetosella se puede confundir comúnmente con *R. acetosa* L. (acedera común o de jardín) en nombre, función y forma. *Rumex acetosa* tiene presencia en Canadá y el norte de los Estados Unidos, donde posiblemente sea nativa en algunas regiones e introducida desde Europa en otras. *Rumex acetosella* y *R. acetosa* pueden haberse usado indistintamente o juntos en medicamentos y alimentos a base de hierbas. (Pieroni, 2000). Tanto *Rumex acetosella* como *Rumex acetosa* contienen ácido oxálico, un compuesto que contribuye a su sabor ácido distintivo. Sin embargo, este ácido también puede ser tóxico si se ingiere en grandes cantidades. Según Pieroni (2000), las propiedades medicinales y culinarias de estas plantas han llevado a su uso común en diversas preparaciones herbales, mientras que Cooper y Johnson (1984) advierten sobre los riesgos asociados con el consumo excesivo debido a la

presencia de ácido oxálico. Este compuesto puede causar efectos adversos si se consume en cantidades elevadas, destacando la necesidad de un uso moderado y bien informado de estas plantas en la alimentación y la medicina tradicional.

Importancia Económica

Rumex acetosella ha sido reconocida como una de las peores malezas del mundo debido a su capacidad invasora y su impacto negativo en la agricultura y los ecosistemas naturales. Esta especie puede competir eficazmente con cultivos agrícolas y plantas nativas, reduciendo la biodiversidad y afectando los rendimientos agrícolas. Se ha reportado que infesta 45 cultivos diferentes en 70 países, lo que resalta su naturaleza altamente invasiva y la dificultad para su control. (Stopps et al., 2011). La maleza puede propagarse rápidamente tanto por semillas como por rizomas, lo que complica los esfuerzos de erradicación.

Al ser una especie de sucesión temprana que invade y coloniza rápidamente sitios alterados, talas, riberas de arroyos y sitios mineros, *R. acetosella* puede ayudar a estabilizar el suelo alterado. Sin embargo, tiene poco valor para su uso en el control de la erosión o la revegetación a largo plazo (Esser, 1995). También tiene poco valor nutricional para bovinos u ovinos, pero podría ser una fuente de alimento importante para la vida silvestre como los ciervos, pequeños mamíferos y aves (Esser, 1995).

Hábitat

Rumex acetosella es una especie cosmopolita bien adaptada a una amplia gama de condiciones climáticas. Se encuentra por lo general en los bordes de las carreteras, en pastizales abiertos, áreas ribereñas y debajo de las copas de los bosques bajo una amplia gama de condiciones de luz y humedad. Sin embargo, hay poca información disponible sobre los requisitos específicos de temperatura, luz o humedad para la germinación de semillas de *R. acetosella* y el crecimiento, supervivencia o reproducción de las plantas en varios hábitats (Stopps et al., 2011).

Composición química

La composición química de la puka kora se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.*Composición química de Rumex acetosella*

Parámetros	Valores
Humedad (%)	80.79 ± 2.13
Ceniza total (%)	22.32 ± 1.70
N (%)	2.82 ± 0.06
Proteína cruda (%)	17.60 ± 0.40
pH	4.86 ± 0.12
Fibra cruda (%)	26.42 ± 2.16

Fuente: Tuncturk et al. (2017)

2.2.2. Materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos se generan básicamente como consecuencia de las actividades agrícolas y que por lo general son denominados desechos agrícolas o subproductos agrícolas. Pueden ser diferentes partes provenientes del material vegetal como tallo, hojas, corteza, raíces, cáscaras de frutas, cáscara, cascarilla, cáscara y salvado, etc. La celulosa, hemicelulosas y lignina son los componentes principales de estos materiales. Los materiales lignocelulósicos se caracterizan por presentar fuertes fuerzas de atracción para la unión de iones metálicos debido a la presencia de un alto contenido de grupo hidroxilo (Anwar et al., 2011) y algunos otros grupos funcionales que incluyen amino, amido, carboxilo, ésteres, alcoholes, carbonilo, grupos que contienen azufre y acetamida también están presentes en la superficie de materiales lignocelulósicos (Salman et al., 2015).

Estos grupos funcionales se unen a los iones metálicos mediante intercambio iónico, adsorción o la donación de pares de electrones para formar complejos. Debido a su riqueza en celulosa, los materiales lignocelulósicos, una vez deslignificados, podrían ser una fuente masiva de adsorbentes para la desintoxicación de aguas contaminadas con metales (Anwar et al., 2011).

2.2.3. Remoción de metales pesados

La eliminación de metales pesados es uno de los procesos destacados para evitar problemas ambientales debido a la descarga directa o indirecta de aguas residuales industriales al medio ambiente. Debido a que se sabe que esos componentes son tóxicos para la salud de los seres humanos y otros organismos vivos, las aguas residuales que contienen metales pesados deben tratarse adecuadamente para cumplir con los estrictos estándares de descarga (Amirnia, 2015). Además, los metales pesados no son biodegradables, por lo que descargar una baja concentración de estos componentes puede provocar una acumulación a largo plazo. Por lo tanto, la recuperación de metales pesados puede ser un enfoque prometedor para abordar este problema (Wenten, 2022).

2.2.4. Tecnologías convencionales de remoción de metales pesados

La eliminación de metales pesados de los efluentes industriales suele lograrse utilizando adsorbentes convencionales, como carbón activado, resinas poliméricas, coagulantes sintéticos y otros materiales en procesos como la precipitación química, la oxidación o reducción química, tratamiento electroquímico, evaporación, filtración, ósmosis, intercambio de iones y tecnologías de membrana (Amirnia, 2015). Aunque estas tecnologías son muy eficaces, la principal desventaja de la precipitación y los coagulantes sintéticos es el gran volumen de producción de lodos. El intercambio iónico tiene unos costos operativos elevados, aunque a menudo es el preferido por la industria.

2.2.5. Biosorción

Puede definirse como la eliminación de metales por enlace pasivo en biomasa viva de soluciones acuosas, al proceso de biosorción, siendo conocido como un atractivo proceso biotecnológico que emplea biomasa naturalmente abundante o de desecho para eliminar la mayoría de los tipos de metales pesados de soluciones acuosas. (Tejada et al., 2014). En general, la biosorción se considera un método de remediación eficiente, económico y respetuoso con el medio ambiente para la eliminación de metales pesados del agua contaminada (Fathollahi et al., 2021).

Según Nilanjana et al. (2008) la biosorción presenta ciertas ventajas comparativas en comparación con los procesos convencionales utilizados para la remoción de metales pesados

- Es de bajo costo, generalmente se usa material que se encuentra en cantidades considerables y residuos de operaciones industriales, como los provenientes de las agroindustrias.
- Presenta un alto rendimiento y propiedades selectivas, se suelen usar biomásas que hacen que los rendimientos de remoción sean elevados.
- Regenerativos, debido a que pueden ser reusados luego que el metal es reciclado.
- La cantidad de lodo generada es menor, debido a que reducen significativamente los problemas secundarios ocasionados por la generación de lodos.

Por otro lado, los procesos de biosorción también presentan ciertas desventajas tales como.

- La saturación es rápida, generalmente se da por que la remoción de metales depende de los sitios activos mediante los cuales se produce una interacción con los metales.

Según Brazesh (2021), la biosorción, debido a su amplia gama de fascinantes propiedades sobre otros métodos de tratamiento, incluidos los métodos electroquímicos, la adsorción química y el intercambio iónico, se puede aplicar en diferentes configuraciones, como filtros y membranas y precipitación:

- La mayoría de las biomásas provienen de desechos agrícolas o industriales que, debido a su menor costo y su mayor disponibilidad, hacen que la biosorción sea un enfoque económico.
- El prefijo “bio” indica la participación de un organismo biológico, lo que significa que la biosorción es un método de tratamiento ecológico.
- La biosorción es aplicable en un amplio rango de pH (pH 3–9) y amplios valores de temperatura de 4 °C a 90 °C.
- Se recomienda enfáticamente la biosorción como un método rápido, fácil de operar con alta eficiencia y la consiguiente posibilidad de recuperación de contaminantes (especialmente en el caso de la recuperación de metales).

2.2.6. Factores que afectan la biosorción

Es necesario realizar el análisis de la naturaleza del biosorbente, así como también el pH, el tiempo de contacto, la cantidad empleada y el tamaño de la partícula.

Tiempo de Equilibrio

Según Blázquez et al. (2005), el tiempo en el que el biosorbente alcanza su máxima capacidad de remoción de metal y ya no se observa un incremento adicional se conoce como tiempo de equilibrio. Es fundamental realizar un estudio sobre el efecto del tiempo de contacto entre el biosorbente y la solución de metales pesados para determinar este tiempo de equilibrio. Este estudio debe complementarse con un análisis cinético para comprender la naturaleza del proceso.

La mayoría de los investigadores coinciden en señalar que la biosorción es un proceso de remoción rápido, generalmente ocurriendo en un lapso de entre 15 y 30 minutos, durante el cual se logran porcentajes considerables de eliminación de metales.

Influencia de la presencia de otros metales pesados

Según Low et al. (2000), algunos metales pesados muestran una mayor afinidad por el material biosorbente utilizado en comparación con otros. El radio iónico, el potencial iónico y la carga eléctrica son propiedades químicas de los iones que se consideran factores que influyen en la selectividad del material hacia ciertos iones metálicos. No obstante, la superficie heterogénea e irregular de la mayoría de los biosorbentes dificulta en cierta medida la modelización y comprensión de los mecanismos involucrados.

Influencia del Tamaño de partícula

La capacidad de remoción y la velocidad de la reacción son influenciadas por el tamaño de partícula de los biosorbentes. Una mayor cantidad de centros activos disponibles para la reacción y la mayor facilidad con la que el adsorbato puede acceder a estos sitios activos, junto con una menor limitación a la difusión dentro de los poros, son las principales razones del aumento en la capacidad de retención al disminuir el tamaño de partícula (Sánchez, 2016).

2.2.7. Biosorbentes

Es considerado un biosorbente cualquier material biológico que muestre su afinidad y concentre los metales pesados incluso en soluciones acuosas muy diluidas se denomina material biosorbente (Amaringo, 2013)

Generalmente, los biosorbentes se preparan a partir de biomasa naturalmente abundante o de residuos. Algunos ejemplos de los tipos de biomateriales que se han probado son: algas pardas, cáscaras de almendra, bagazo de caña de azúcar, cáscaras de maíz y arroz, tallo de girasol, salvado de trigo, fibra de coco, hojas de té e incluso cabello humano. La mayoría de estos biosorbentes son de origen vegetal y principalmente subproductos agrícolas (Amirnia, 2015)

2.2.8. Punto de Carga Cero (PCC)

El valor de pH en el cual el número de sitios cargados positiva y negativamente es igual se denomina punto de carga cero (PCC). En este punto, la carga total interna y externa de las partículas en la superficie de la biomasa adsorbente es nula (Franks y Meagher, 2003).

El PCC refleja la distribución de cargas en la superficie del biosorbente y, por ende, su capacidad para retener contaminantes iónicos. Este valor establece el rango óptimo de pH para lograr una remoción eficiente de contaminantes, ya sean aniónicos o catiónicos, en solución (Amaringo, 2013).

2.2.9. Metales pesados

Los metales pesados se definen como elementos con un número atómico superior a 20 y una densidad atómica mayor a 5 g/cm³, y deben exhibir propiedades metálicas. En términos generales, los metales pesados se pueden clasificar en dos categorías: esenciales y no esenciales. Los metales pesados esenciales son aquellos que los organismos vivos necesitan para procesos fundamentales como el crecimiento, el metabolismo y el desarrollo de diversos órganos. Existen varios metales pesados esenciales, como Cu, Fe, Mn, Co, Zn y Ni, que son necesarios para las plantas, ya que forman cofactores que son vitales estructural y funcionalmente para las enzimas y otras proteínas (Córdova, 2016).

Dentro de los metales pesados se distinguen dos grupos:

- **Oligoelementos o micronutrientes:** Indispensables para el desarrollo de la vida de determinados organismos, por lo que es requerido en pequeñas cantidades, pero en caso que se supere, pueden ser capaces de producir efectos negativos para la salud.
- **Metales pesados sin función biológica conocida:** Son aquellos que no pueden ser metabolizados por el organismo y se son acumulables en los tejidos, de modo que ocasionan efectos negativos para la salud.

A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos vivos. Este grupo también puede ser denominado "elementos tóxicos". Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), los elementos que pertenecen a este grupo incluyen As, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg, Ti, Se y Pb. Es importante destacar que algunos de estos elementos son considerados nutrientes esenciales para el ser humano en bajas concentraciones (Córdova, 2016).

A. Plomo (Pb)

El Pb es un elemento químico muy extendido que no es esencial para la salud humana. Es un metal pesado, más denso que la mayoría de los elementos comunes, y se caracteriza por ser suave y maleable, con un punto de fusión relativamente bajo. Históricamente, el plomo ha sido utilizado en diversas formas. Actualmente, se emplea en baterías de almacenamiento de plomo-ácido, en la construcción, para el revestimiento de cables, como blindaje contra la radiación y en aleaciones (Nava-Ruiz y Méndez-Armenta, 2011)

El efecto del plomo depende de la concentración, tipo de sales y especies de plantas involucradas. Aunque los efectos son más pronunciados en concentraciones y duraciones más altas, en algunos casos, las concentraciones más bajas pueden estimular los procesos metabólicos. Los principales procesos afectados son la germinación de semillas, el crecimiento de plántulas, la fotosíntesis, el estado hídrico de las plantas, la nutrición mineral y las actividades enzimáticas. (Patra et al., 2004)

B. Arsénico (As)

El arsénico es un metaloide natural y uno de los contaminantes ambientales naturales más comunes. Su mayor acumulación es en el agua donde las especies de As predominantes son

el arseniato inorgánico tóxico As (III) y el arsenito V. Gran parte del arsénico presente en las aguas subterráneas, una fuente común de exposición humana, es el resultado de las emisiones metálicas industriales y la lixiviación del arsénico natural de los sedimentos circundantes. (Reyes y Vergara, 2016).

La fitotoxicidad del arsénico se ve afectada considerablemente por la forma química en que se presenta en el suelo y la concentración del metaloide. Debido a su similitud química con el fósforo, el arsénico participa en muchas reacciones celulares. Se han encontrado compuestos organoarsenicales específicos en algunos organismos y se ha informado que el arsénico reemplaza al fósforo en los grupos fosfato del ADN. (Patra et al., 2004)

2.2.10. Espectroscopia de infrarrojo

Según Skoog y West (1987), la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se distingue por emplear un proceso matemático, la transformada de Fourier, para convertir los datos sin procesar (interferograma) en un espectro real. La FTIR se utiliza comúnmente para obtener el espectro infrarrojo de transmisión o absorción de una muestra, permitiendo identificar la presencia de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos.

La espectroscopia FTIR es una herramienta útil para la identificación y cuantificación de grupos funcionales. (Sánchez, 2016). Los espectros infrarrojos, en el eje X corresponden al número de onda (inverso de la longitud de onda), y el eje Y corresponde a la transmitancia o absorbancia (Mayorga, 2016). El análisis por FTIR tiene una mayor aplicación en el campo cualitativo, debido a que cada grupo funcional se caracteriza por producir una banda o pico ancho en cierto número de onda, por lo que, se podría identificar grupos de moléculas o ciertas moléculas presentes en una muestra (Siesler, 2002).

El espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) es uno de los instrumentos basados en la espectroscopia infrarroja. Se caracteriza por su alta precisión, exactitud, velocidad, sensibilidad mejorada, facilidad de operación y muestra no destructiva. El fundamento de la tecnología espectroscópica infrarroja está en las vibraciones atómicas de una molécula que solo absorbe frecuencias y energías específicas de la radiación infrarroja. Las moléculas podrían ser detectadas y clasificadas por FTIR porque diferentes moléculas tendrán un espectro infrarrojo diferente (Undavalli et al., 2021)

2.2.11. Análisis elemental

Según Skoog y West (1987), el análisis elemental es una técnica que determina el contenido total de elementos como C, H, N y S presentes en una amplia variedad de muestras tanto inorgánicas como orgánicas, las cuales pueden ser tanto sólidas como líquidas.

La espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente, es una poderosa herramienta de caracterización utilizada en el proceso de búsqueda de nuevos materiales y en el análisis elemental de varios tipos de muestras, y se ha convertido en la técnica de detección más versátil. Es capaz de identificar y medir con precisión la mayoría de los elementos de la tabla periódica y se implementa en diversos campos, como la biofísica, la ciencia ambiental, la ciencia forense, la ciencia de los materiales, el análisis de especiación, etc. (Sánchez, 2016).

En el espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), las muestras generalmente se introducen como soluciones ácidas y luego se nebulizan para formar un aerosol fino que se transporta al plasma donde sufre desecación, vaporización a gases moleculares y disociación en átomos que pueden ionizarse. Tanto los átomos como los iones se excitan en el plasma, volviendo a su estado fundamental con la emisión de luz, que se mide con un espectrómetro óptico. Todos los elementos presentes en la fuente de radiación emiten sus espectros característicos al mismo tiempo. (De la Guardia et al., 2011).

Así, de los principios de la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente está claro que es un método multielemento, que puede ser operado en modo simultáneo o secuencial (Sánchez, 2016).

2.3. DEFINICIONES DE TÉRMINOS

A. Puka kora

Rumex acetosella es una maleza común en pastos, pastizales, áreas de desechos y a lo largo de los bordes de las carreteras en América del Norte. Ha sido incluida entre las peores malezas del mundo, infestando 45 cultivos diferentes en 70 países (Stopps et al., 2011).

B. Biosorción

La eliminación de sustancias presentes en una solución mediante el uso de un agente biológico, ya sea orgánico o inorgánico, se denomina biosorción. Este proceso es

considerado un método pasivo de unión de cationes a biomasa, tanto muerta como viva (Gadd y Geoffrey, 2009). La biosorción es un proceso fisicoquímico que implica la unión rápida y reversible de iones, e incluye mecanismos como absorción, adsorción, intercambio iónico, precipitación y complejación (Mondragón, 2018).

C. Biosorbente

Los biosorbentes son alternativas más económicas y efectivas para la eliminación de elementos metálicos, especialmente metales pesados, de soluciones acuosas. Es necesario que sean sometidos a pretratamientos químicos con el fin de optimizar la capacidad de remoción para ser utilizados en la remoción de iones metálicos (Muñoz, 2007).

D. Biomasa

La biomasa se refiere a la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de origen orgánico, que provienen de plantas (incluidas las algas), árboles y cultivos, así como a la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales. La biosorción con biomasa muerta es un proceso pasivo que se basa principalmente en la "afinidad" entre el adsorbente y el sorbato (De Lucas y Del Peso, 2012).

E. Metales pesados

Los metales pesados constituyen un grupo diverso de elementos que varían en sus funciones y propiedades químicas. Estos metales se encuentran principalmente entre los elementos de transición en la tabla periódica. Un metal pesado se define como aquel cuya densidad es al menos cinco veces mayor que la del agua. Estos metales pueden ser esenciales para ciertos procesos biológicos, como el molibdeno (Mo), manganeso (Mn), cobre (Cu), níquel (Ni), hierro (Fe) y zinc (Zn), o no esenciales y potencialmente tóxicos, como el cadmio (Cd), arsénico (As), mercurio (Hg) y plomo (Pb) (Duffus, 2002).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El estudio correspondió a una investigación de tipo básica, ya que buscó generar nuevo conocimiento y comprensión sobre los mecanismos de biosorción de metales pesados utilizando biomasa vegetal, específicamente tallos de puka kora (*Rumex acetosella*). Aunque este conocimiento tiene potenciales aplicaciones prácticas, el enfoque principal fue explorar y entender los principios subyacentes y las propiedades fundamentales de la biomasa. Se caracterizó la puka kora y se investigó cómo los tratamientos químicos (hidrólisis ácida, alcalina y mixta) mejoraron la capacidad de adsorción de plomo y arsénico. Esta investigación proporcionó las bases teóricas y experimentales necesarias para el desarrollo de futuras aplicaciones tecnológicas en el tratamiento de aguas contaminadas, avanzando hacia soluciones más efectivas y sostenibles (Hernández et al., 2014).

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación de este estudio corresponde al nivel explicativo. Según Hernández et al. (2014), el nivel explicativo no solo describe fenómenos o conceptos, sino que también busca identificar las causas de los eventos y fenómenos. Este nivel de investigación se enfoca en explicar la ocurrencia de un fenómeno, las condiciones en que se manifiesta y la relación entre dos o más variables.

En este estudio, se evaluó la relación entre la técnica de activación de la biomasa de puka kora (*Rumex acetosella*) pretratada y las variables dependientes relacionadas con la remoción de plomo (Pb) y arsénico (As). Se buscó entender cómo los diferentes tratamientos químicos aplicados a la biomasa (hidrólisis ácida, alcalina y mixta) influían en su capacidad de adsorción de estos metales pesados. Los tratamientos químicos se consideraron como

variables independientes, mientras que la eficiencia de remoción de Pb y As se consideró como variable dependiente.

El análisis incluyó la caracterización de los cambios en la estructura y composición de la biomasa tras los tratamientos y cómo estos cambios afectaron la eficiencia de remoción de Pb y As en soluciones sintéticas. Además, se exploró el impacto del pH y la cantidad de masa de biomasa en el proceso de biosorción, proporcionando una comprensión más profunda de las condiciones óptimas para la remoción de estos contaminantes. Este enfoque permitió identificar las variables críticas y los mecanismos subyacentes que contribuyen a la eficiencia del proceso de biosorción, cumpliendo con los objetivos de una investigación explicativa.

3.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación es cuantitativo, debido a que se trabajó con variables medibles y cuantificables, y se empleó técnicas estadísticas para el análisis de los datos. Además, el método es inductivo debido a que se pretendió evaluar las técnicas de activación de biomasa para llegar a conclusiones.

La investigación fue de carácter prospectivo y explicativo, puesto que para la investigación de tomaron datos numéricos de las variables de estudio y se aplicaron conceptos teóricos y científicos pertinentes al medio ambiente y desarrollo sostenible, los cuales permitieron caracterizar la biomasa pretratada y determinar la capacidad de biosorción.

3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio empleó un diseño experimental, específicamente un diseño completamente al azar (DCA). Según Gutiérrez y De la Vara (2008), el DCA es uno de los diseños más simples y se utiliza para comparar dos o más tratamientos, considerando solo dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio. En este diseño, las corridas experimentales se realizan de manera completamente aleatoria para distribuir equitativamente los posibles efectos ambientales y temporales entre los tratamientos.

En el estudio se consideraron cuatro tratamientos de activación de la biomasa de puka kora (*Rumex acetosella*): sin tratamiento (T1), tratamiento ácido (T2), tratamiento alcalino (T3) y tratamiento mixto (T4). La aleatorización completa permitió que las diferencias observadas

entre los tratamientos se atribuyan únicamente a las técnicas de activación de la biomasa, minimizando la influencia de otros factores externos.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), que es la técnica central en el análisis de datos experimentales, para evaluar la significancia de las diferencias entre los tratamientos. Posteriormente, se llevó a cabo una comparación de cada uno de los tratamientos mediante el método de comparación múltiple de Tukey, con un nivel de significancia del 5%.

El diseño experimental se muestra en la Tabla 2, detallando las variables independientes (técnicas de activación de la biomasa) y las variables dependientes (que fueron utilizadas para el estudio).

Tabla 2.

Diseño de investigación

Tratamiento	Variables de independientes	Variables dependientes	
	Activación de Biomasa	Caracterización de la biomasa activada	Capacidad de biosorción
1	T1 (Sin Tratamiento)		
2	T2 (Activación ácida)		
3	T3 (Activación alcalina)		
4	T4 (Activación Mixta)		

3.5. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

3.5.1. Población

La población del estudio estuvo conformada por aproximadamente 1000 kg de material genético de puka kora (*Rumex acetosella*) presente en los campos de cultivo del distrito de San Jerónimo, provincia de Andahuaylas, región Apurímac.

3.5.2. Muestra

Para la realización del estudio, se recolectaron un total de 10 kg de puka kora de los campos de cultivo del distrito de San Jerónimo, ubicado a 3760 msnm, en las coordenadas 13°40'48.18''S 73°15'06.93''O. El muestreo realizado fue de tipo estratificado no

probabilístico, seleccionando manualmente las plantas disponibles en el área de estudio que cumplieran con las características adecuadas para el experimento. Este tipo de muestreo asegura que se tomen en cuenta diferentes estratos o segmentos del campo de cultivo, proporcionando una muestra representativa del material disponible.

Figura 2.

Lugar de recolección de Puka kora



Fuente: Extraído de Google Earth (2022)

3.5.3. Tipo de Muestreo

El muestreo realizado fue no probabilístico y del tipo discrecional, también conocido como muestreo intencional o a juicio del investigador. Este método se basa en la selección manual de las muestras por parte del investigador, quien utiliza su experiencia y juicio para elegir las plantas que mejor representan las características del material genético de puka kora en la región de estudio. Este tipo de muestreo es práctico y factible, especialmente cuando se necesita asegurar que la muestra obtenida sea representativa de la población en contextos donde el muestreo aleatorio podría no ser adecuado.

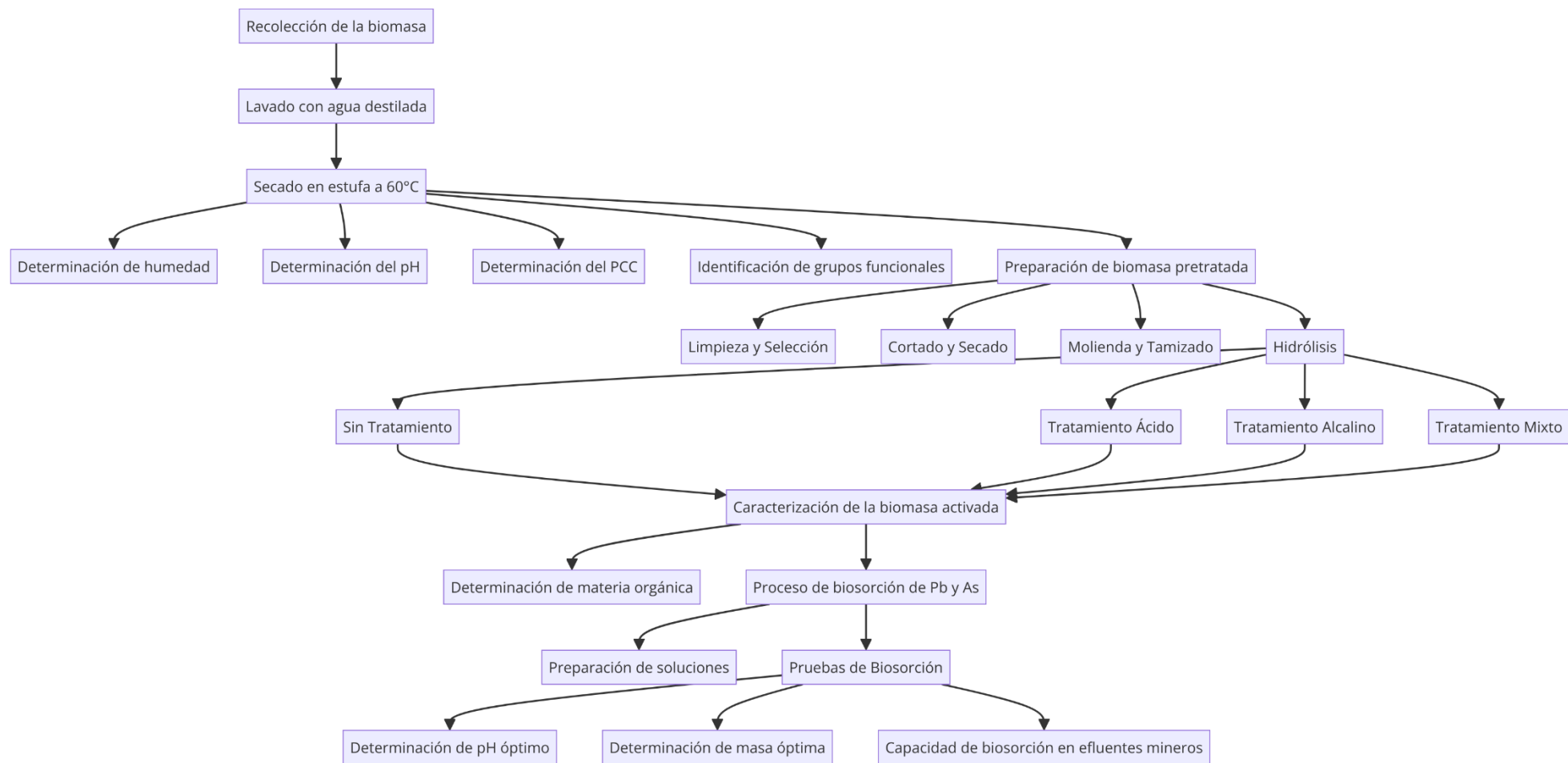
El muestreo discrecional se justifica en este estudio porque permite una selección más cuidadosa y controlada de las plantas, tomando en cuenta factores específicos del terreno y las condiciones ambientales que podrían influir en las características de la biomasa. Al confiar en la experiencia del investigador, se obtiene una muestra que refleja con mayor precisión las variaciones presentes en la población total de puka kora, lo cual es esencial para la validez y fiabilidad de los resultados experimentales.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

El presente trabajo se desarrolló en los laboratorios de investigación de la Universidad Nacional José María Arguedas, desarrollándose por etapas, las mismas que se detallan en la Figura 3. Inicialmente se procedió con la recolección, pretratamiento de la biomasa de puka kora y su caracterización, seguido de las pruebas de biosorción. El análisis de los metales pesados se realizó por espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP), la identificación de los grupos funcionales de la biomasa, antes y después del proceso de remoción de Pb y As, se realizó empleando la espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), módulo de transmisión.

Figura 3.

Descripción del proceso experimental



3.6.1. Etapa de pre-muestreo

Antes de comenzar el trabajo de campo, se llevaron a cabo dos visitas preliminares para realizar un diagnóstico inicial del estado de la puka kora en las áreas agrícolas del distrito de San Jerónimo, ubicado en la provincia de Andahuaylas, región de Apurímac. Durante estas visitas se seleccionaron los puntos de muestreo definitivos para la recolección de muestras del material vegetal.

3.6.2. Recolección de la biomasa

Se empleó la metodología descrita por Vera et al., (2016), con algunas modificaciones. La maleza puka kora fue recolectada de los campos de cultivo en la zona rural del distrito de San Jerónimo, en la provincia de Andahuaylas, región Apurímac. En el laboratorio, los tallos de puka kora se lavaron dos veces para eliminar compuestos que pudieran interferir en los ensayos posteriores. Luego, se lavaron con agua destilada para eliminar las impurezas restantes. Los tallos se cortaron en fragmentos de aproximadamente 1 cm y se secaron en una estufa de convección forzada (BINDER FED 115, Alemania) a 60 °C hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, las muestras se almacenaron en un desecador hasta su uso posterior.

3.6.3. Caracterización física y química de la puka kora

Determinación de la humedad

La humedad se determinó después de secar la muestra en la estufa de convección forzada (BINDER FED 115, Alemania) a 60°C siguiendo la metodología descrita por (Dionisio, 2012).

La humedad de la muestra se calculó por la diferencia de peso, según la relación de la Ecuación 01.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100 \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

m_i = Es la masa inicial del material inerte antes de ingresar a la estufa.

m_f = Es la masa final del material inerte

Determinación del pH

Se determinó el pH de los tallos de puka kora (*Rumex acetosella*), empleando un potenciómetro (SI ANALYTICS, Alemania) previamente calibrado, con los buffers de pH 4.01, 6.87 y 9.18, para lo cual se obtuvo el zumo de los tallos.

Determinación de pH en el punto de carga cero (PCC)

Se utilizaron muestras deshidratadas de biomasa inerte de tallos de puka kora, secadas a 60°C en una estufa de convección forzada (BINDER FED 115, Alemania) hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, se prepararon soluciones de 50 ml de agua destilada en vasos precipitados de 100 ml. El pH de estas soluciones se ajustó a valores de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, utilizando soluciones de NaOH 0.1N y HCl 0.1N. A cada solución, se le añadió 0.5 g de la biomasa deshidratada de puka kora. Las muestras se agitaron en agitadores magnéticos a 150 rpm durante un periodo de 24 horas a una temperatura constante de 25°C.

Después de transcurrir 24 horas, se filtraron las muestras y se midió el pH. Para calcular el valor del PCC, se utilizaron los valores inicial y final del pH, graficándolos y trazando una línea diagonal para encontrar su intersección, según el método propuesto por Regalbuto y Robles (2004).

Identificación de grupos funcionales

Se identificaron los grupos funcionales presentes en las hojas y los tallos de puka kora (*Rumex acetosella*), empleando espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (Thermo Scientific Nicolet IS50, Reino Unido), a través del módulo de transmisión, para lo cual se prepararon pastillas con KBr en una relación de (1:100). Las lecturas se realizaron con 32 barridos y 8 cm⁻¹ de resolución, en el rango medio del espectro infrarrojo (4000 – 400 cm⁻¹).

3.6.4. Preparación de la biomasa pretratada

Se siguió la metodología propuesta por (Cabrera, 2018), con ciertas modificaciones, las mismas que se detallan a continuación:

Limpieza: Selección: Se realizó con la finalidad de eliminar impurezas como raíces extrañas adheridas, tallos deteriorados, con el fin de obtener tallos de la puka kora en buen estado y garantizar el proceso de biosorción.

Cortado: Los tallos de puka kora, se cortaron en tamaños menores de 1 cm, realizándose de manera manual.

Secado: La muestra se colocó dentro de una estufa de convección forzada (BINDER FED 115, Alemania) a 60 °C durante 24 horas, hasta obtener un peso constante.

Molienda – Tamizado: La molienda de la puka kora se realizó con el fin de incrementar la superficie de contacto, con un molino planetario de bolas (Retsch PM 100, Alemania), luego fue tamizado en un tamizador eléctrico (Retsch AS 200, Alemania), colectándose la fracción de 500 µm.

Hidrólisis

La biomasa preparada fue sometida a tratamientos químicos con H₂SO₄ al 1.25 % p/v (T2), alcalino NaOH al 2 % p/v (T3) y uno tratamiento mixto empleando primero el NaOH al 2 %y luego el H₂SO₄ al 1.25% de manera secuencial (T4), de acuerdo a la metodología propuesta por Cabrera (2018), se empleó 130 g de puka kora de la fracción de 500 µm, en una relación sólido: líquido de 1:8 g:ml, para cada tratamiento químico y se mantuvo en agitación constante por 60 minutos.

Posteriormente, las muestras se filtraron al vacío y se lavaron con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro. Finalmente, los biosorbentes se deshidrataron a 60°C durante 16 horas y se almacenaron en un desecador para su uso posterior.

3.6.5. Características de la biomasa activada de tallos de puka kora

Determinación de materia orgánica

Para la determinación del porcentaje de carbono de la biomasa, se pesó 50 mg de cada tratamiento de puka kora (T1, T2, T3 y T4), correspondientes a las biomasa sin tratamiento, con tratamiento ácido, tratamiento alcalino y mixto respectivamente, en recipientes de cerámica y se analizó en un determinador de carbono orgánico total (TOC) (Shimadzu TOC-L CSN – SSM 5000^a, Japón) con un flujo de oxígeno de 150 mL/min y software TOC control L V. 1.07.

Identificación de grupos funcionales

Se identificaron los grupos funcionales presentes en la biomasa sin tratamiento (T1), con tratamiento ácido (T2), alcalino (T3) y mixto (T4). Este análisis se realizó a través del

módulo de transmisión del FTIR (Thermo Scientific Nicolet IS50, Reino Unido), preparándose pastillas con KBr y muestra en una relación de (100:1), con una resolución de 8 cm⁻¹ y 32 barridos.

3.6.6. Proceso de biosorción de plomo y arsénico

Preparación de las soluciones

Antes de la preparación de las soluciones de metales pesados, todos los materiales de vidrio fueron tratados con HNO₃ al 0.1N. Se prepararon soluciones de Pb y As en concentraciones de 10 ppm empleando estándares de Sigma-Aldrich (Alemania) y agua ultra pura, los mismos que fueron almacenados en frascos de vidrio ámbar y en refrigeración hasta las pruebas experimentales.

Pruebas de Biosorción

Los ensayos de biosorción de metales pesados se llevaron a cabo a una temperatura controlada de 20 °C. El pH de las soluciones se ajustó a 4.0 utilizando HCl 0.1 N y NaOH 0.1 N, y se midió con un potenciómetro calibrado (Lab 885, SI Analytics). Se prepararon soluciones utilizando 0.2 g de biosorbente en 800 mL de una mezcla de metales pesados a una concentración de 10 ppm, en vasos de precipitado de 1 L, con agitación constante a 150 rpm durante 120 minutos. Posteriormente, se separó el biosorbente de la solución mediante filtrado al vacío (0.45 µm) y las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES 9820, Shimadzu).

Los cálculos para determinar los porcentajes de biosorción para cada metal (Pb y As) se realizaron empleado la ecuación 2.

$$q = \left(\frac{c_1 - c_2}{c_1} \right) * 100 \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

q: porcentaje de remoción.

C1: concentración inicial del metal pesado (mg/L)

C2: concentración final del metal pesado.

Se guardaron los biosorbentes después de la biosorción para la identificación de grupos funcionales (FTIR Nicolet IS50, Thermo Fisher) en el rango de número de onda de 400 a 4000 cm^{-1} .

3.6.7. Análisis del efecto del pH y la cantidad de masa en el proceso de biosorción

Determinación del pH óptimo para la biosorción

Para determinar el valor de pH en el cual se presenta mayor capacidad de remoción de cada metal (Hidalgo, 2010), se prepararon soluciones de metales pesados a 10 ppm a diferentes pH (3,4,5 y 6), para luego ser leídas a través de un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES 9820, Shimadzu).

Determinación de la cantidad de masa óptima para la biosorción

Para determinar la dosis optima de biomasa, se prepararon soluciones de Pb y As a 10 ppm y en diferentes cantidades de biomasa, empleando el valor de pH óptimo obtenido previamente.

3.6.8. Determinación de la capacidad de biosorción en efluentes mineros

Se evaluó la capacidad de biosorción del tratamiento más efectivo, utilizando los valores óptimos obtenidos para la biosorción en efluentes mineros.

Se evaluó la capacidad de biosorción del tratamiento más efectivo utilizando los valores óptimos obtenidos para la biosorción en efluentes mineros. Los relaves mineros se obtuvieron de la planta de beneficio de cobre Los Chankas, operada por Exc Trading SAC en el Centro Poblado de Huaraccopata, distrito de José María Arguedas, provincia de Andahuaylas. Estos relaves se prepararon en solución acuosa en el laboratorio. En un agitador termo magnético, se mezclaron 500 ml de relaves con un pH de 9,3 con 500 ml de agua a 200 rpm. Se ajustaron los relaves a los parámetros óptimos de biosorción utilizando un tratamiento mixto o secuencial como biosorbente, y posteriormente se analizaron utilizando un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES 9820, Shimadzu).

3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.7.1. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó empleando el paquete estadístico del Statgraphics centurión XVI.II.

3.7.2. Análisis estadístico

A. Prueba de diferencia significativa

Se analizaron los datos a través de un ANVA, empleándose un nivel de significancia del 5%.

La hipótesis estadística probada para la prueba significativa fue:

Hipótesis nula, H_0 : No existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción de Pb y As de muestras tratadas con biomasa de puka kora (*Rumex acetosella*), sin tratamiento, acida, alcalina y mixta para un nivel de significancia del 5%.

Hipótesis alterna, H_A : Existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción de Pb y As de muestras tratadas con biomasa de puka kora (*Rumex acetosella*), sin tratamiento, acida, alcalina y mixta para un nivel de significancia del 5%.

B. Prueba de rangos múltiples

Se aplicó el test Tukey a fin de identificar los tratamientos que mostraron diferencia significativa en los porcentajes de remoción de Pb y As. Este test se realizó con un nivel de significancia del 5%.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA PUKA KORA (*RUMEX ACETOSELLA*).

La Tabla 3 presenta los datos de humedad de las muestras de puka kora en tallos y hojas. Se observa que la humedad de las hojas fue de $82.12\% \pm 1.2$, mientras que la de los tallos fue de $75.27\% \pm 0.60$. Según la prueba t-student, las medias de humedad entre los tallos y las hojas son significativamente diferentes. En cuanto al pH, no se encontraron diferencias significativas entre las muestras de tallo y hoja, con valores de 3.42 ± 0.01 para los tallos y 3.43 ± 0.02 para las hojas, según lo determinado por la prueba t-student.

Tabla 3.

Resultados de la Humedad y del pH de la puka kora (Rumex acetosella)

Puka kora	Humedad	pH
	$\bar{x} \pm s$	$\bar{x} \pm s$
Tallo	75.27 ± 0.60 a	3.42 ± 0.01
Hojas	82.12 ± 0.26 b	3.43 ± 0.02

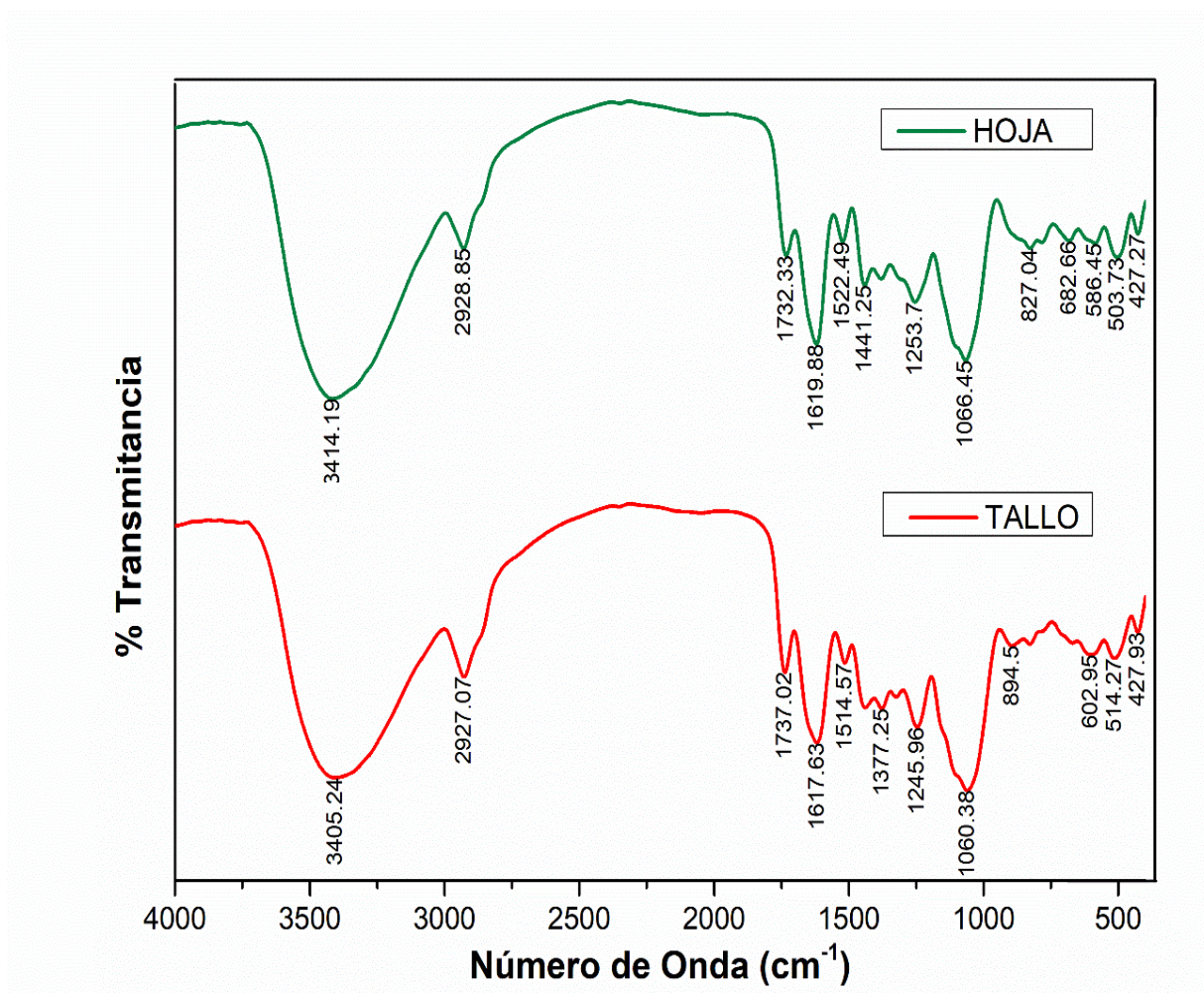
Dónde: $\bar{x}$, promedio aritmético; S, desviación estándar.

Los porcentajes de humedad calculados para la hoja y el tallo de la puka kora fueron similares a los reportados por Tuncturk et al. (2017), quienes reportaron valores de humedad de 80.79 ± 2.13 . Así mismo se determinó el pH, siendo los valores similares para el tallo y las hojas (3.42 ± 0.01 y 3.43 ± 0.002), de acuerdo con Tuncturk, Celen y Tuncturk (2017), el pH de la puka kora fue de 4.86 ± 0.12 .

Asimismo, en la Figura 4., se muestra el espectro de la hoja y del tallo de la puka kora, expresada en Transmitancia (%) y Número de Onda (cm^{-1}). Ambos espectrogramas presentan picos similares, con pequeños desplazamientos en el número de onda (cm^{-1}), observándose estiramientos vibracionales en los diferentes rangos identificados.

Figura 4.

Espectrograma de las hojas y tallos de la puka kora



El detalle de la identificación de los picos y las posibles asignaciones para la hoja y el tallo de la puka kora, se muestran en la Tabla 4., considerando que las vibraciones son aportadas por las estructuras de celulosa, hemicelulosa y lignina (Shen et al., 2010).

Tabla 4.

Grupos funcionales en la hoja y el tallo de puka kora (Rumex acetosella)

Número de onda (cm ⁻¹)		Asignaciones
Hoja	Tallo	
3414.19	3405.24	Vibración de estiramiento (hidratación) correspondientes a los grupos hidroxilos (-OH) (Ravikumar y Udayakumar, 2020), atribuibles a la presencia de agua. (Nandiyanto et al., 2019).
2928.85	2927.07	Vibraciones de estiramiento C-H de los hidrocarburos alifáticos (Santhi y Sengottuvel, 2017)
1732.33	1737.02	Vibraciones de estiramiento de grupos carboxílicos - COOH o derivados, como carboxilatos (Vinod y Sashidhar, 2010), puede deberse a la vibración de los grupos carboxilo de pectina, hemicelulosa y lignina presentes en las biomasas.
1619.88	1617.63	Vibraciones de amidas y alquenos que surgen básicamente al estiramiento de carbonilo en proteínas. (Araujo et al., 2010)
1522.49	1514.57	Vibraciones de estiramiento del enlace C = C de los anillos aromáticos (Halysh et al., 2020)
1253.7	1245.96	Vibraciones de flexión C-OH (Shen et al., 2010)
1066.45	1060.38	Vibraciones de estiramiento C-O y C-C de flexión C-OH en polisacáridos (Halysh et al., 2020)
682.66	602.95	Vibración de flexión fuera del plano, los que pueden ser atribuibles a los aminoácidos aromáticos en la superficie celular de la biomasa. (Boota, Bhatti, y Hanif, 2009)

Según Halysh et al. (2020), la lignina se caracteriza básicamente por una banda entre 1500 y 1550 cm⁻¹ que por lo general son asignadas a las vibraciones de estiramiento de los anillos

aromáticos. Así mismo los picos en 2935 y 2851 cm^{-1} , pueden ser atribuibles a las vibraciones de estiramiento C-H de los grupos $-\text{CH}_2-$ y $-\text{CH}_3$ de lignina (Belmokaddem et al., 2011). En el caso de la puka kora, se pudo observar bandas relacionadas con la lignina, tanto para la hoja (1522.49 cm^{-1}) como para el tallo (1514.57 cm^{-1}) (Halysh et al., 2020). La lignina es un polímero complejo y resistente que se encuentra en las paredes celulares de las plantas, proporcionando rigidez y resistencia estructural (Chen et al., 2023). Sin embargo, para que la biomasa sea efectiva en la biosorción, es necesario modificar su estructura para exponer más sitios activos que puedan interactuar con los metales pesados (Zhou et al., 2023). La lignina protege las fibras de celulosa y hemicelulosa dentro de las paredes celulares. Estas fibras son cruciales para la adsorción de metales pesados debido a los grupos funcionales presentes en ellas, como hidroxilos, carboxilos y grupos fenólicos (Gong et al., 2015).

En la Tabla 5, se observan los resultados del pH inicial y final, datos que son esenciales para la determinación del punto de carga cero (PCC), la intersección de ambos representa el PCC de la biomasa, la misma que fue determinada con la finalidad de conocer el valor de pH correspondiente a un punto de equilibrio tanto de cargas externas e internas en el material adsorbente.

Tabla 5.

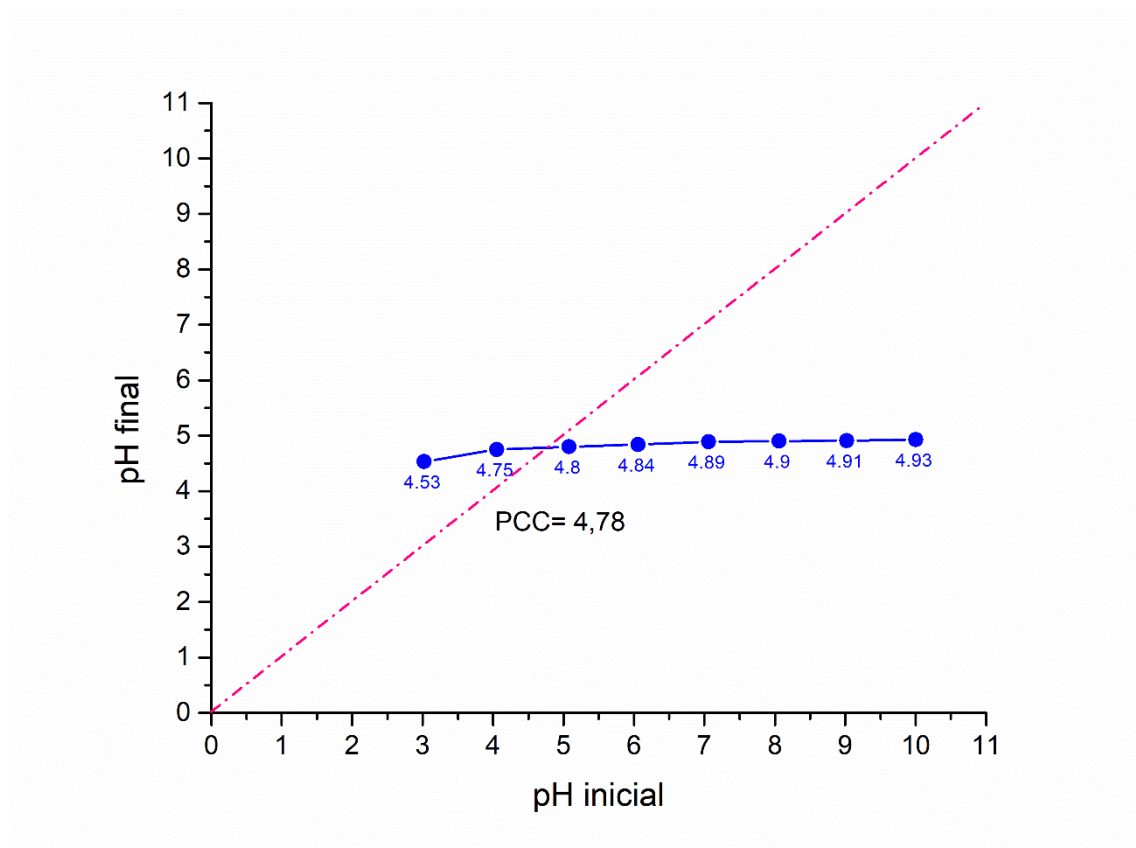
Valores del pH inicial y final para el cálculo del PCC

N°	pH inicial	pH final
1	3.02	4.53
2	4.05	4.75
3	5.08	4.80
4	6.06	4.84
5	7.06	4.89
6	8.06	4.90
7	9.02	4.91
8	10.00	4.93

El PCC, corresponde al punto donde la curva del pH final frente al pH inicial cruza la diagonal, en la Figura 5., se muestra la intersección del pH inicial y el pH final, siendo el valor del PCC de 4.78; lo que indica que la superficie del biosorbente (puka kora), se cargara negativamente y atraerá cationes cuando el pH de la solución sea superior a este valor (4.78), y por lo contrario se cargará positivamente y podrá atraer aniones cuando el pH se inferior al PCC (Rodriguez y Leiva, 2020).

Figura 5.

Punto de carga cero de la puka kora



Sellaoui et al. (2017) menciona que los valores de pH por debajo del PCC, se cargan positivamente, mientras que por encima de este pH la superficie del material será sintetizado y tendrá una carga negativa, y la carga superficial negativa de la adsorbente mejora la adsorción de cationes metálicos de la solución. Las muestras de puka kora reportaron un valor de PCC de 4,78, siendo este cercano a 4,2 valor reportado por Sellaoui et al. (2017) para la cascará del mango mar; asimismo se determinó el PCC de los adsorbentes naturales de yuca en diferentes variedades, encontrándose valores de 6.02 y 6:26, mencionando que

las cargas negativas deberían de predominar en la superficie de los materiales adsorbentes, con la finalidad de favorecer la adsorción de cationes (Schwantes et al., 2022); por otro lado se estudió adsorbentes a base de canola, obteniéndose valores entre 5.95 y 6.04 del PCC (Goncalves et al., 2020),

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA ACTIVADA DE TALLOS DE PUKA KORA

Se encontraron cantidades considerables de carbono orgánico total en los cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4), encontrándose valores entre 22.62 y 24.18%. Con referencia a T1 (Biomasa sin tratamiento) y T2 (tratamiento ácido), no se observó diferencia significativa ($p > 0,05$); con respecto a T3 y T4, que corresponden a la biomasa con tratamiento alcalino y mixto, respectivamente, presentaron valores muy cercanos entre ellos. Asimismo, se cuantifico el contenido de carbono inorgánico, siendo cero para todos los casos, en la Tabla 6, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 6.

Carbono orgánico total (%)

Tratamientos	Carbono Orgánico Total	Carbono Inorgánico	
	$\bar{x} \pm s$	*	$\bar{x} \pm s$
T1	24.18 $\pm$ 0.22	a	0.00 $\pm$ 0.00
T2	24.16 $\pm$ 0.27	a	0.00 $\pm$ 0.00
T3	22.69 $\pm$ 0.21	b	0.00 $\pm$ 0.00
T4	22.62 $\pm$ 0.46	b	0.00 $\pm$ 0.00

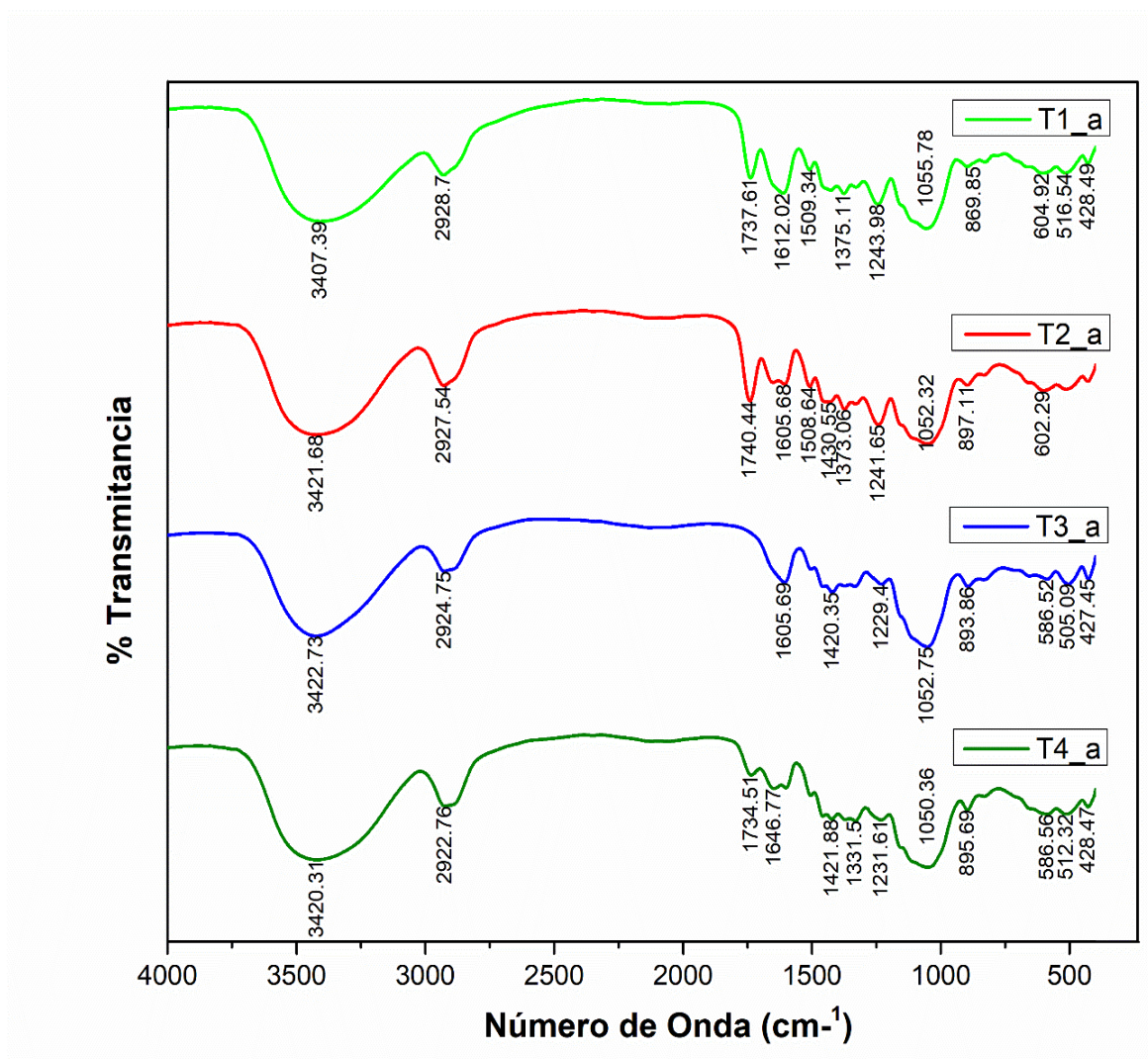
Dónde: $\bar{x}$, promedio aritmético; S, desviación estándar. Diferentes letras indican diferencia significativa (Prueba Tukey al 95%)

La presencia de carbono en cantidades adecuadas es fundamental en los procesos de biosorción de metales pesados (Saravanan et al., 2021), el tratamiento correspondiente a T1 (24.18%), presento valores superiores de carbono orgánico total con referencia a T3 y T4 el contenido de carbono orgánico total se situó entre 22.69 y 22.62%, por lo general los biosorbentes tienen una composición orgánica, y durante los tratamientos de modificación

química, algunos componentes del carbono pueden llegar a disminuir, siendo favorable para el proceso de remoción de metales pesados (Calero et al., 2013). Asimismo, la presencia de cantidades adecuadas de carbono es necesario en los procesos de biosorción de metales pesados (Saravanan et al., 2021)

Se empleó la espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier para la identificación de los grupos funcionales de los cuatro tratamientos de la biomasa (T1, T2, T3 y T4) antes del proceso de remoción de metales pesados, observándose ligeras variaciones en la intensidad y en la posición de los espectros. Según Nandiyanto et al. (2019), la región entre $600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, es la región de las huellas dactilares. Los picos identificados en el rango medio del infrarrojo ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$), para los cuatro tratamientos se muestran en la Figura 6.

Figura 6.



Espectrograma de los tratamientos de biomasa antes de la biosorción.

Los espectros del FTIR de la biomasa de puka kora (*Rumex acetosella*), de los cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4), son considerados biosorbentes lignocelulósicos, que se caracterizan por la presencia de picos en los sectores de los componentes aromáticos y polisacáridos, como se muestra en la Figura 6, los picos de 3407.39, 3421.68, 3422.73 y 3420.31 cm^{-1} para T1, T2, T3 y T4, son atribuibles a bandas de estiramiento (hidratación) del O-H atribuibles a la presencia de agua (Ravikumar y Udayakumar, 2020), con respecto a los picos de 2928.7, 2927.54, 2924.75, 2922.76 cm^{-1} , corresponden a las vibraciones de estiramiento de C-H de los grupos $-\text{CH}_2-$ y CH_3 tanto de lignina y polisacáridos.

Asimismo, se observaron picos entre 1509.34 y 1508.64 cm^{-1} para el caso de T1 y T2, y según Halysh et al. (2020) la lignina se caracteriza por una banda en 1505 – 1513 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de estiramiento de los anillos aromáticos así como una banda dentro de las vibraciones de la región aromática fuera del plano (900-700 cm^{-1}), con referencia a los picos 1055.78, 1052.32, 1052.75 y 1050.36 cm^{-1} , para T1, T2, T3 y T4, pueden ser atribuibles a las vibraciones de estiramiento de C-O y C-C o de flexión C-OH.

La principal diferencia estructural entre los cuatro tratamientos de muestras de puka kora, fue la ausencia de las bandas asignadas a la lignina (1505-1513 cm^{-1} y 900-700 cm^{-1}) para T3 y T4, correspondientes a los tratamientos alcalino y mixto respectivamente, lo que confirma que estas dos últimas modificaciones de la biomasa, conducen a la deslignificación de los materiales.

4.3. BIOSORCIÓN DE PLOMO Y ARSÉNICO

En la Tabla 7, se observan los resultados de remoción de As y Pb para los cuatro tratamientos. El tratamiento T4 presentó los mejores porcentajes de remoción, con 23.52% para As y 94.38% para Pb. Por otro lado, el tratamiento T1 logró remover 17.73% de As y 76.90% de Pb, lo cual sigue siendo significativo. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), indicando que las condiciones de tratamiento influyen considerablemente en la eficacia de la remoción de metales pesados. Estos resultados destacan la efectividad del tratamiento T4 y la importancia de la modificación de la biomasa para mejorar la adsorción de contaminantes.

Tabla 7.*Biosorción de plomo y arsénico*

Tratamientos	As		Pb	
	$\bar{x} \pm s$	*	$\bar{x} \pm s$	*
T1	17.73 $\pm$ 0.16	a	76.90 $\pm$ 0.42	a
T2	19.80 $\pm$ 0.16	b	91.91 $\pm$ 0.26	b
T3	21.38 $\pm$ 0.64	c	93.45 $\pm$ 0.31	c
T4	23.52 $\pm$ 0.47	d	94.38 $\pm$ 0.39	d

Dónde: $\bar{x}$, promedio aritmético; S, desviación estándar. Diferentes letras indican diferencia significativa (Prueba Tukey al 95%)

El tratamiento T4, que combina métodos ácidos y básicos, mostró una mayor eficiencia debido a su capacidad para eliminar hemicelulosa y lignina, dejando un biosorbente rico en celulosa. Según Choccata (2021), el tratamiento ácido contribuye a la eliminación de hemicelulosa, mientras que el tratamiento básico facilita la eliminación de lignina. Este proceso resulta en un material con una alta concentración de celulosa, que es fundamental para la adsorción de cationes metálicos (Chen, Ren, y Wu, 2023; Gong et al., 2015). Los análisis estadísticos confirmaron que las diferencias en los porcentajes de remoción entre los tratamientos fueron significativas ($p < 0.05$), subrayando la importancia de la modificación química de la biomasa para mejorar la eficiencia de la biosorción (Zhou et al., 2023).

Asimismo, el porcentaje de remoción de As (23.52% $\pm$ 0.47), fue inferior a los reportados por Santos et al. (2017) quienes analizaron la capacidad de remoción de As en solución acuosa por la biomasa fúngica modificada de *Aspergillus niger*, reportando porcentajes de remoción para el As del 69% a 24 horas a pH 6.0, 28°C y 1 g de biomasa modificada, asimismo el autor menciona que a mayor concentración de As la remoción fue menor, y al aumentar la concentración del bioadsorbente, la remoción fue más eficiente (96% con 5 g de biomasa), valores que son superiores a los reportados, siendo esto basicamente por la

cantidad de biosorbente empleado en el proceso de biosorción que fue de 0.2 g de biosorbente por 800 ml de solución de As a 10 ppm.

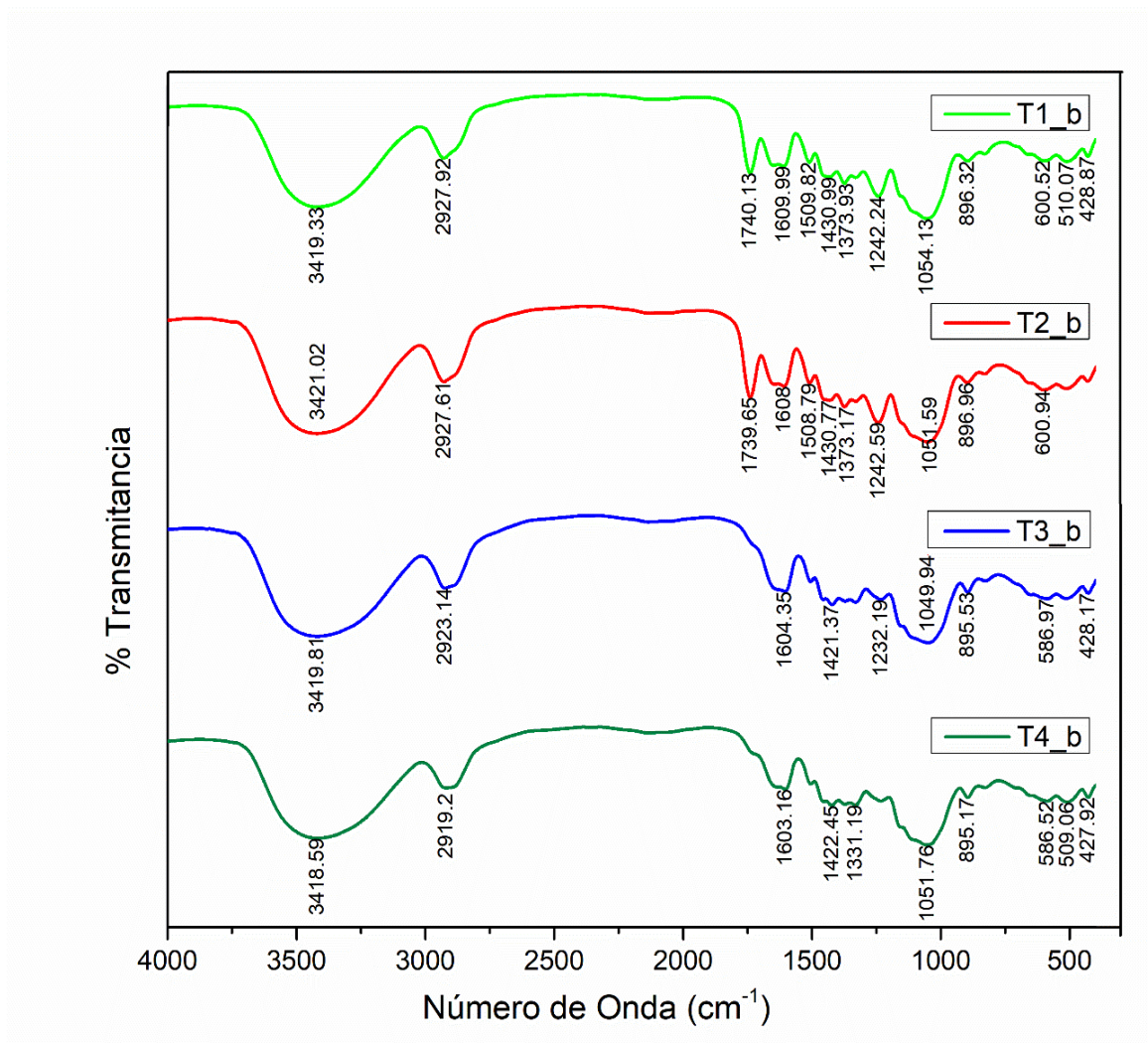
Con respecto al Pb, se alcanzaron porcentajes considerables de remoción, llegando hasta un 94.38% en el tratamiento T4. Estos valores son superiores a los reportados por Castro (2015), quien evaluó la capacidad de biosorción de Pb utilizando cáscara de banano maduro, obteniendo una biosorción del $80\% \pm 1.75$. Por otro lado, Hernández y Triviño (2016) reportaron valores de remoción del 84.55% para Pb empleando biomasa seca de retamo espinoso como adsorbente, a un pH inicial de 4 y con una concentración inicial de 75 mg/L. Los resultados del tratamiento mixto o secuencial con puka kora demostraron ser superiores a los obtenidos con estos otros materiales, subrayando la efectividad del tratamiento T4 en la remoción de plomo.

Asimismo, se realizó la identificación de grupos funcionales de los biosorbentes después de la biosorción, los mismos que se muestran en la Figura 7; los espectros muestran una variación con referencia a los reportados en la Figura 6, debido a la remoción de Pb y As, siendo importante el análisis de los espectros por FTIR antes y después del proceso de remoción, con la finalidad de evaluar el efecto de la retención de los cationes sobre la posición e intensidad de vibración, identificándose algunos de los grupos funcionales a los que se les responsabiliza la biosorción de As y Pb de manera efectiva.

.

Figura 7.

Espectrogramas de la biomasa pretratada después de la biosorción

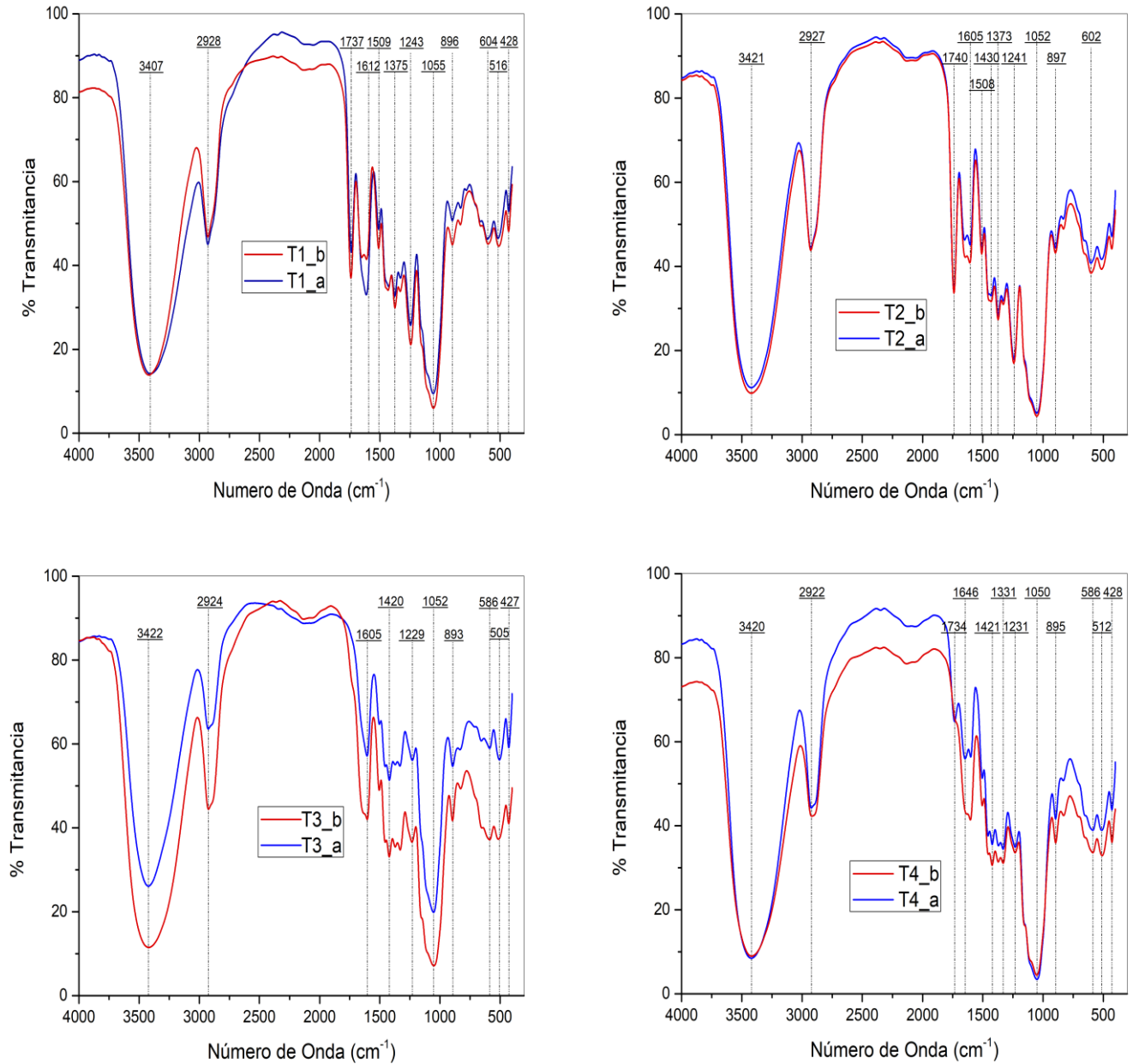


Dónde: T1, es la biomasa sin tratamiento; T2, es el tratamiento ácido; T3, es el tratamiento alcalino; T4, es el tratamiento mixto, b, hace referencia al espectrograma después del proceso de biosorción.

En la Figura 8, se muestra la comparación del número de picos, la posición (cm^{-1}) y la intensidad (%Transmitancia) de los cuatro tratamientos, antes y después del proceso de biosorción, observándose el desplazamiento de los espectros y la caída de algunas bandas sobre todo en el tratamiento T3 y T4, los mismos que podrían ser atribuibles a la remoción de As y Pb.

Figura 8.

Espectrogramas antes y después del proceso de biosorción de Pb y As.



Dónde: T1, es la biomasa sin tratamiento; T2, es el tratamiento ácido; T3, es el tratamiento alcalino; T4, es el tratamiento mixto, a, hace referencia al espectrograma antes del proceso de biosorción y b, después del proceso de biosorción.

Con respecto los picos en la posición de 3407.39, 3421.68, 3422.73 y 3420.31 para T1, T2, T3 y T4, fueron desplazados a la posición de 3419.33, 3421.02, 3419.81, 3418.59 cm^{-1} , respectivamente después del proceso de biosorción de Pb y As. Los picos en la ubicación de 2928.7, 2927.54, 2924.75, 2922.76 cm^{-1} antes del proceso de biosorción son atribuibles a las vibraciones de estiramiento de C-H de los grupos $\text{-CH}_2\text{-}$ y CH_3 tanto de lignina y polisacáridos, también fueron ligeramente desplazados después del proceso de biosorción ubicándose en posiciones de 2927.92, 2927.61, 2923.14, 2919.20 para T1, T2, T3 y T4. Es notable la diferencia de la ubicación de los picos y la intensidad de los mismos, de los cuatro tratamientos antes y después del proceso de biosorción de Pb y As, las regiones identificadas pueden ser indicativas de grupos funcionales responsables de la remoción de los metales pesados, debido a los cambios estructurales y los posibles sitios de unión inducidos por la presencia de un contaminante metálico.

Por otro lado, con referencia al tratamiento mixto (T4), se observa que el pico correspondiente a la posición 1734.51 cm^{-1} y atribuible a la tensión de banda de los grupos carboxilo (-C=O y -C=OH), ya no es observada después del proceso de biosorción, por lo que podrían ser atribuibles a los porcentajes altos de remoción de As y Pb, los mismos que estarían relacionados con la captación de metales pesados por la biomasa (Abdallah et al., 2019; Amar et al., 2020; Díaz et al., 2016; Neto et al., 1995).

4.4. EFECTO DEL PH Y LA CANTIDAD DE MASA, EN EL PROCESO DE BIOSORCIÓN

Se analizó el efecto del pH en el proceso de biosorción del tratamiento mixto (mejor tratamiento), empleando soluciones de As y Pb con pH de 3.0; 4.0; 5.0 y 6.0. En la tabla 8 se reportan los valores obtenidos, En caso del As se observa porcentajes de remoción de 5.82% a pH 3; 23.52% a pH 4; 25.62% a pH 6, estos dos últimos valores no muestran diferencia significativa, para un nivel de significancia del 5%. Con respecto al Pb se tuvieron mejores porcentajes de remoción siendo de 30.01% a pH 3; 94.18% a pH 4; 94.99% a pH 5 y de 94.99% a pH 6, y al igual del As estos dos últimos porcentajes fueron iguales estadísticamente, según la prueba de comparación de rangos múltiples – Tukey.

Tabla 8.*Remoción de Pb y As en relación al pH*

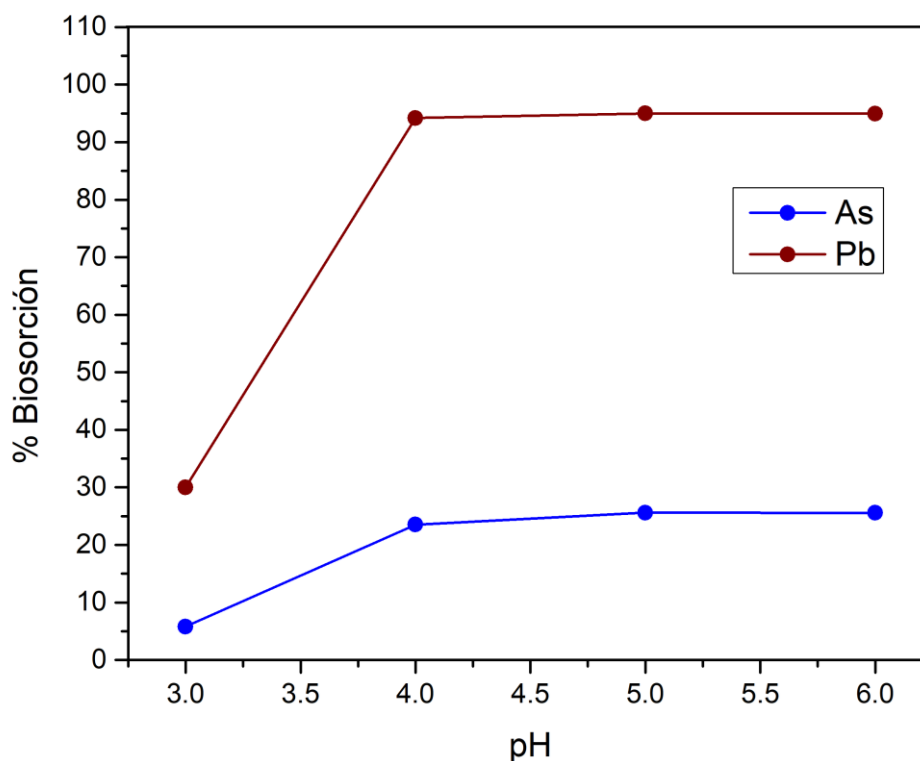
pH	As		Pb	
	$\bar{x} \pm s$	*	$\bar{x} \pm s$	*
3.0	5.82 $\pm$ 0.82	a	30.01 $\pm$ 0.40	a
4.0	23.52 $\pm$ 0.47	b	94.18 $\pm$ 0.21	b
5.0	25.62 $\pm$ 0.41	c	94.99 $\pm$ 0.02	c
6.0	25.59 $\pm$ 0.41	c	94.95 $\pm$ 0.02	c

Dónde: $\bar{x}$, promedio aritmético; S, desviación estándar. En las columnas diferentes letras indican diferencia significativa (Prueba Tukey al 95%)

En la Figura 9 se ilustra la relación entre el pH y el porcentaje de biosorción para arsénico (As) y plomo (Pb). A un pH de 3.0, se observa un porcentaje relativamente bajo de remoción de ambos metales. Sin embargo, este porcentaje aumenta considerablemente a partir de un pH de 4.0. Los mejores porcentajes de remoción se encuentran en un rango de pH entre 5 y 6 para ambos metales, lo que indica que la biosorción es más eficiente en condiciones ligeramente ácidas. Estos resultados sugieren que el pH del medio es un factor crítico en la optimización del proceso de biosorción, y que un ajuste adecuado del pH puede mejorar significativamente la eficiencia de remoción de As y Pb. La tendencia observada destaca la importancia de mantener el pH en un rango óptimo para maximizar la capacidad de adsorción de la biomasa utilizada.

Figura 9.

Remoción de Pb y As a diferentes pH



El análisis del pH óptimo es un parámetro fundamental que es considerado en la remoción de metales pesados, debido a que interviene en la solubilidad de los metales, así como también en la activación de los grupos funcionales en el biosorbente, haciendo que la interacción de los cationes metálicos con los sitios de unión de la biomasa sea muy sensible a los valores de este parámetro (Blázquez et al., 2005), en este caso se analizó el efecto del pH para la remoción de As y Pb, observándose mayores porcentajes a pH 5 y 6, siendo cercano al valor del PCC determinado a la biomasa inicial (4.78). Según Farhan y Khadom (2015) a pH bajos los iones de hidrogeno competirán con los metales por los sitios activos responsables de la biosorción, lo que disminuirá considerablemente los porcentajes, asimismo menciona que a pH bajos algunos grupos funcionales se encuentran cargados positivamente, y no suelen interactuar con los iones metálicos.

Los valores de pH óptimo para el Pb tiene relación con los valores reportados por Vízcaíno et al. (2017), para el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), quienes señalaron que se obtuvieron mejores porcentajes de remoción para en el rango de pH de 5.0 a 6.0, obteniéndose porcentajes de 95.67 y 96.82%, señalando que pH ácidos hacen que se reduzca

la capacidad del biomaterial para poder capturar y retener los metales pesados como el Pb, como consecuencia de la solubilización del catión en la matriz acuosa así como la hidrólisis del material biológico. Por su parte (Abdel et al., 2013), reportó valores de pH óptimo de 5.5. para la biosorción de plomo empleando como biomasa el alga de agua dulce *Anabaena sphaeric.*, coincidiendo con los resultados de biosorción de la puka kora, asimismo Farhan y Khadom (2015) reportaron mejores porcentajes de biosorción de plomo a pH en el rango de 5.0 y 6.0, empleando como biosorbente *Saccharomyces Cerevisiae*.

Se determinó la cantidad óptima de biomasa para la remoción de Pb y As, en la Tabla 9, se muestran los resultados, para el tratamiento mixto (T4), observándose que los porcentajes de remoción de As y Pb mejoran considerablemente cuando la masa del biosorbente es mayor. Los tratamientos correspondientes a 0.20g, 0.28g y 0.36 son iguales para un nivel de significancia del 5%, empleando la prueba de comparación múltiple Tukey; con respecto a la biosorción de Pb se observa un panorama similar siendo los últimos tratamientos (0.20g; 0.28g y 0.36g) iguales estadísticamente para un nivel de significancia de 5%, logrando una remoción de 94.995%, 95.00% y de 95.07%, respectivamente.

Tabla 9.

Remoción de Pb y As en relación a la cantidad de biosorbente

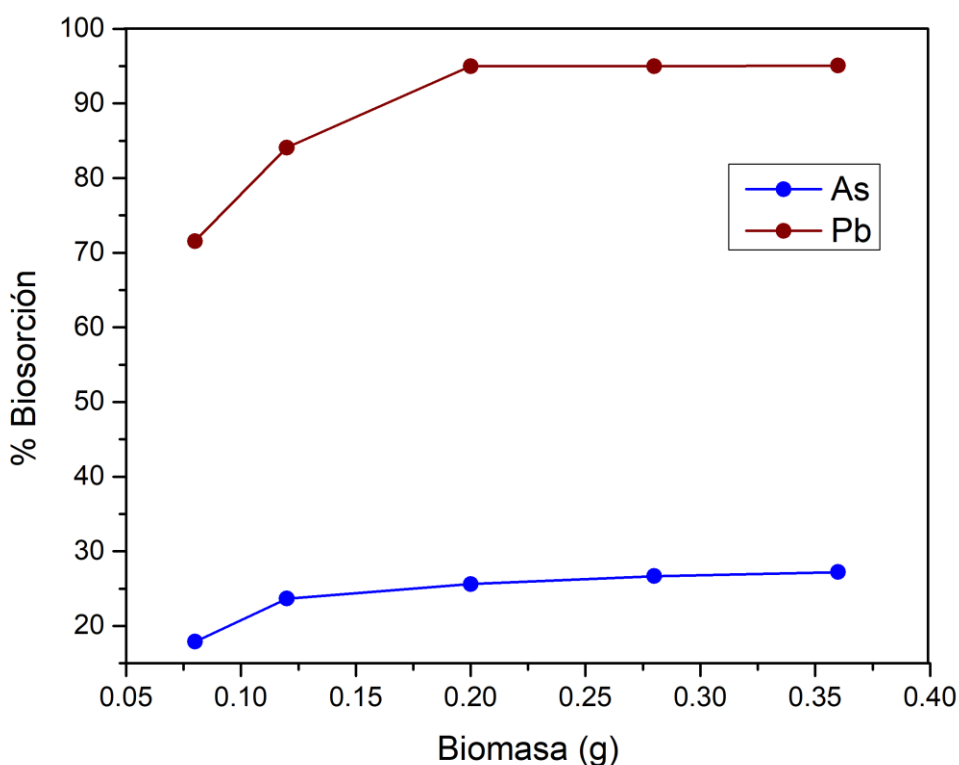
Cantidad (g)	As		Pb	
	$\bar{x} \pm s$	*	$\bar{x} \pm s$	*
0.08	17.89 $\pm$ 1,01	a	71.56 $\pm$ 0.57	a
0.12	23.66 $\pm$ 0.30	b	84.08 $\pm$ 0.38	b
0.20	25.62 $\pm$ 0.41	c	94.99 $\pm$ 0.02	c
0.28	26.66 $\pm$ 0.51	c	95.00 $\pm$ 0.05	c
0.36	27.20 $\pm$ 0.71	c	95.07 $\pm$ 0.08	c

Dónde: $\bar{x}$, promedio aritmético; S, desviación estándar. En las columnas, diferentes letras indican diferencia significativa (Prueba Tukey al 95%)

En la figura 10, se muestra una gráfica de relación correspondiente a la cantidad de biomasa empleada durante el proceso y el porcentaje de biosorción, observándose una relación directa entre el porcentaje de biosorción y la cantidad de biosorbente utilizada para la biosorción de As y Pb.

Figura 10.

Remoción de As y Pb con diferentes cantidades de biosorbente.



En referencia a los resultados, se puede señalar que con 0.08 g de biomasa se obtiene una biosorción de As y Pb de 17.89 y 71.56%, respectivamente, los mismos que según Cabrera (2018) son causados básicamente por la escases de sitios activos para la unión de los metales, con referencia a las cantidades de 0.20, 0.28 y 0.36 g, se obtuvieron porcentajes significativos de biosorción estando estas entre 25.62 - 27.20% para el As y de 94.99 - 95.97% para el Pb, observándose una relación directa entre la cantidad de biomasa empleada y el porcentaje de remoción, la misma que estaría relacionada con el incremento del área y sitios activos de biosorción los mismos que se encuentran disponibles para la unión de los metales en estudios (As y Pb) y la biomasa tratada por el método secuencial (T4). De acuerdo

a las pruebas experimentales se podría señalar que la cantidad optima de biomasa sería de 0.20 g por 800 ml de metales pesados, debido a que según el análisis estadístico esta cantidad presenta porcentajes similares a las de 0.28 y 0.36 g ($p\text{-value} < 0.05$).

Los resultados obtenidos presentan relación con los reportados por Vízcaíno et al. (2017), para el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), quienes emplearon 0.4 g de biomasa en 100 ml de solución de plomo a 30.951 ppm, logrando valores de biosorción de 97%, los mismos que observaron que el incremento del porcentaje de biosorción estaba relacionado con el área de contacto del biosorbente.

4.5. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN EN EFLUENTES MINEROS

Después de los experimentos de biosorción, se empleó una muestra de relave minero previamente tratada, para la determinación de la capacidad de remoción de metales pesados empleando el T4 (Tratamiento mixto). Para lo cual se determinó la concentración inicial de la muestra de relaves mineros, observándose algunos metales como el As, Cu, Pb, Sb y Zn, en diferentes concentraciones, encontrándose el As en mayor concentración (7.05 ± 0.06 mg/L), seguido del Al (5.17 ± 0.01 mg/L), la concentración inicial del Pb fue de 4.22 ± 0.01 mg/L, se encontraron concentraciones de 2.92 ± 0.01 mg/L de Sb, 1.88 ± 0.02 de Cu y en menor concentración el Zn con 0.23 ± 0.01 mg/L, los mismos que se detallan en la Tabla 10.

Después del proceso de biosorción, con el tratamiento mixto (T4), por un tiempo de 2 horas a pH 5 y con 0.2 g de biosorbente en 800 ml de efluente de relave minero previamente tratado, se determinó la concentración final, observándose una disminución significativa con respecto al inicial para el Pb, Zn y Cu. El porcentaje de biosorción fue mayor para el Pb (56.78 ± 0.27), seguido del Zn (44.16 ± 1.30) y del Cu (39.96 ± 0.31), observándose porcentajes menores para el As (13.33 ± 0.38); Al (11.54 ± 0.30) y Sb (10.06 ± 0.40).

Tabla 10.*Caracterización de los efluentes mineros*

Composición	Co (ppm)	Cf (ppm)	% Biosorción
Al	5.17 ± 0.01	4.57 ± 0.02	11.54 ± 0.30
As	7.05 ± 0.06	6.11 ± 0.03	13.33 ± 0.38
Cu	1.88 ± 0.02	1.13 ± 0.01	39.96 ± 0.31
Pb	4.22 ± 0.01	1.82 ± 0.01	56.78 ± 0.27
Sb	2.92 ± 0.01	2.62 ± 0.01	10.06 ± 0.40
Zn	0.23 ± 0.01	0.12 ± 0.01	44.16 ± 1.30

Dónde: $\bar{x}$, promedio aritmético; S, desviación estándar. En las columnas diferentes letras indican diferencia significativa (Prueba Tukey al 95%)

Con respecto a los resultados, se observa valores superiores de remoción para el Pb, Zn y Cu, encontrándose porcentajes de 56.78, 44.16 y 39.96%, siendo estos inferiores a los reportados por Choi y Lee (2015), quien utiliza como biosorbente cascara de huevo y micro algas, llegando a remover Fe, Cu, Zn, Mn, As y Cd, en porcentajes de 80.30, 82.31, 80.27, 80.58, 80.22 y 81.48%, respectivamente. Cabe señalar que los porcentajes de remoción de Pb y As, fueron menores a los realizados previamente, esto debido a la presencia de más de un ion metálico en el efluente minero, ya que según Bhattacharjee et al. (2020), esto puede influir en la eliminación de un ion metálico sobre otro, ya que un ion metálico podría tener una mayor afinidad con los sitios de unión del biosorbente, lo que generaría competencia en la disponibilidad de sitios de unión.

4.6. RESUMEN DE RESULTADOS

La tabla 11. presenta un resumen comparativo de la remoción de arsénico (As) y plomo (Pb) utilizando diferentes tratamientos aplicados a la biomasa de puka kora (*Rumex acetosella*). Los tratamientos evaluados incluyen: sin tratamiento (T1), tratamiento ácido (T2), tratamiento alcalino (T3), y tratamiento mixto (T4).

Tabla 11.

Resumen de los tratamientos de remoción de Pb y As

N°	Detalle	Co (ppm)	Cf (ppm)	Remoción (%)	Co (ppm)	Cf (ppm)	Remoción (%)
		As			Pb		
1	T1	9.68 ± 0.08	7.96 ± 0.02	17.73 ± 0.16	9.84 ± 0.01	2.27 ± 0.04	76.90 ± 0.42
2	T2	9.68 ± 0.08	7.76 ± 0.02	19.80 ± 0.16	9.84 ± 0.01	0.80 ± 0.03	91.91 ± 0.26
3	T3	9.68 ± 0.08	7.61 ± 0.06	21.38 ± 0.64	9.84 ± 0.01	0.64 ± 0.03	93.45 ± 0.31
4	T4	9.68 ± 0.08	7.40 ± 0.05	23.52 ± 0.47	9.84 ± 0.01	0.55 ± 0.04	94.38 ± 0.39

V. CONCLUSIONES

1. Se evaluó la biosorción de plomo y arsénico utilizando como biosorbente tallos de puka kora (*Rumex acetosella*) con cuatro tratamientos. El tratamiento mixto (T4) mostró los mejores porcentajes de remoción de As y Pb, con valores de 23.52% para As y 94.38% para Pb. Estos resultados indican una alta afinidad del Pb con la biomasa tratada. Los valores p obtenidos para la comparación de los tratamientos fueron significativos ($p < 0.05$), confirmando la eficacia del tratamiento T4 (Tabla 7 y Figura 10); La puka kora puede ser empleada como un biosorbente natural debido a su amplia disponibilidad y bajo costo, lo que la convierte en una opción efectiva para la remoción de metales pesados..
2. Las características físicas y químicas de la puka kora muestran condiciones favorables para la remoción de metales pesados. El punto de carga cero (PCC) se reportó en un valor de pH 4.8, lo cual favorece la remoción en condiciones ácidas (Figura 5) debido zonas activas que favorecen la remoción. El tallo y la hoja de puka kora, muestran bandas características de las estructuras de celulosa, hemicelulosa y lignina, que son asignadas a las vibraciones de estiramiento de los anillos aromáticos (Figura 4).
3. Los cuatro tratamientos de la biomasa mostraron diferencias en el contenido de carbono orgánico. Los tratamientos T4 y T3 presentaron valores de carbono orgánico total de 22.62% y 22.69% respectivamente, los cuales fueron inferiores a los tratamientos T1 y T2 (24.18% y 24.16%). Esto se debe a la modificación química sufrida por la biomasa, que mejora la capacidad de remoción de metales pesados. El análisis FTIR mostró la ausencia de bandas asignadas a la lignina en los tratamientos T3 y T4, confirmando la deslignificación de los materiales como resultados de los tratamientos químicos, proceso que es favorable para la remoción de los metales pesados.
4. La capacidad de biosorción de plomo utilizando biomasa vegetal inerte de tallos de puka kora varió entre 76.90% y 94.38%. En el caso del arsénico, los valores de remoción oscilaron entre 17.73% y 23.52%. Los tratamientos químicos empleados mejoraron significativamente la eficiencia de remoción, siendo el tratamiento mixto (T4) el más efectivo. Los análisis estadísticos ANOVA y pruebas de Tukey

confirmaron la significancia de las diferencias observadas entre los tratamientos ($p < 0.05$) (Tabla 7 y Figura 9).

5. Se utilizó el tratamiento mixto para el análisis del pH y la cantidad de masa, obteniéndose valores considerables de remoción a pH 5, para el As (25.62%) y Pb (94.99%). Con respecto a la cantidad óptima, se obtuvieron mayores porcentajes en cantidades altas, es decir el porcentaje de remoción tiene una relación directa con la cantidad del biosorbente. Por lo que los valores óptimos para la biosorción de Pb y As fueron a pH 5.0; cantidad de biosorbente de 0.2 g por 800 ml de solución de metales pesados a 10 ppm, empleando el tratamiento secuencial o mixto (Tabla 8 y Figura 9).
6. La investigación confirma que la biomasa de puka kora tratada puede ser empleada como un biosorbente natural, económico y eficiente para la remoción de metales pesados de soluciones acuosas contaminadas. La concentración inicial del relave minero contenía 7.05 ± 0.06 ppm de As, 5.17 ± 0.01 ppm de Al, 4.22 ± 0.01 ppm de Pb, 2.92 ± 0.01 ppm de Sb, 1.88 ± 0.02 ppm de Cu, y 0.23 ± 0.01 ppm de Zn. Después del tratamiento, las concentraciones se redujeron significativamente, con porcentajes de biosorción de 56.78% para Pb, 44.16 % para Zn, y 39.96% para Cu. Estos resultados destacan la efectividad del tratamiento mixto T4 (Tabla 10).

VI. RECOMENDACIONES

Establecer modelos de cinética del proceso de biosorción de metales con la finalidad de tener una mejor interpretación de los resultados. Estos modelos pueden proporcionar ecuaciones matemáticas válidas tanto para la simulación como para el diseño de un proceso de biosorción a escala industrial

Evaluar el proceso de biosorción en un sistema multi-metálico usando metales como Cd, Zn, As, Pb, Cu y Sb, los mismos que fueron reportados en los efluentes mineros de la Planta Los Chankas del distrito de José María Arguedas- Andahuaylas. Esto permitirá entender mejor la interacción entre diferentes metales y la capacidad del biosorbente para removerlos eficientemente .

Realizar más estudios de biosorción empleando efluentes industriales. Estos estudios ayudarán a determinar los parámetros óptimos para mejorar los porcentajes de biosorción de Pb y As, y evaluar la viabilidad del uso de puka kora en diferentes tipos de aguas residuales.

Llevar a cabo estudios de escalamiento del proceso de biosorción utilizando puka kora, para evaluar la factibilidad técnica y económica de su aplicación a mayor escala. Esto incluye el diseño y la operación de unidades piloto que reproduzcan las condiciones de operación a escala industrial.

Diseñar un sistema de filtración utilizando puka kora tratada, destinado a comunidades y localidades con altos contenidos de metales pesados en sus fuentes de agua. Este sistema debe ser eficiente, de bajo costo y fácil de operar, asegurando que las aguas tratadas cumplan con los estándares de calidad para consumo humano.

.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdallah, M. M., Ahmad, M. N., Walker, G., Leahy, J. J., & Kwapinski, W. (2019). Batch and continuous systems for Zn, Cu, and Pb metal ions adsorption on spent mushroom compost biochar. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(17), 7296-7307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00749>
- Abdel, A. M., Ammar, N. S., Abdel, H., & Ali, R. (2013). Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga *Anabaena sphaerica* biomass. *Journal of Advanced Research*, 367-374.
- Amar, M. B., Walha, K., & Salvadó, V. (2020). Evaluation of olive stones for Cd (II), Cu (II), Pb (II) and Cr (VI) biosorption from aqueous solution: equilibrium and kinetics. *International Journal of Environmental Research*, 14(2), 193-204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41742-020-00246-5>
- Amaringo, F. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoelectrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 27–36.
- Amirnia, S. (2015). *Biosorption Processes for Removal of Toxic Metals from Wastewaters*.
- Anwar, J., Shafique, U., Waheed, Z., Zaib, N., & Munawar, A. (2011). Removal of Chromium on *Polyalthia longifolia* Leaves Biomass. *International Journal of Phytoremediation*, 410-420.
- Apurimac, G. (2019). *Recuperación de ecosistema de pajanal de puna húmeda, matorral interandino, bosque relicto mesoandino y las lagunas de Pacucha, Churrubamba, Pucullococha y Huampica en la mancomunidad Sondor-Curamba de la provincia de Andahuaylas* [Proyecto de Inversión Pública].
- Araujo, C., Alves, V. N., Rezende, H. C., Almeida, I., Assuncao, R., & Tarley, C. (2010). Characterization and use of *Moringa oleifera* seeds as biosorbent for removing metal ions from aqueous effluents. *Water Sci Technology*.
- Belmokaddem, F., Pinel, C., Huber, P., Petit, M., & Da Silva, D. (2011). Green synthesis of xylan hemicellulose esters. *Carbohydrate Research*, 2896-2904.
- Bhattacharjee, C., Dutta, S., & Saxena, V. K. (2020). A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent.

- Blázquez, G., Hernaninz, M., Calera, M., & Ruiz, L. (2005). Removal of cadmium ions with olive stones: the effect of some parameters. *Process Biochemistry*, 2649-2654.
- Boota, R., Bhatti, H., & Hanif, M. (2009). Removal of Cu(II) and Zn(II) Using Lignocellulosic Fiber Derived from Citrus reticulata (Kinnow) Waste Biomass. *Separation Science and Technology*.
- Cabrera, D. (2018). *Evaluación de la Capacidad de Biosorción de Plomo (II) Empleando Biomasa Vegetal Inerte (Tallo de Rosas) como Adsorbente*.
- Calero, M., Pérez, A., Blázquez, G., Ronda, A., & Martín, M. A. (2013). Characterization of chemically modified biosorbents from olive tree pruning for the biosorption of lead. *Ecological Engineering*, 344– 354.
- Canizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 131-143.
- Castro, B. (2015). *Uso de la cáscara de banano (musa paradisiaca) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas* [Tesis de Maestria].
- Chen, W., Ren, J., & Wu, W. (2023). Preparation and Adsorption Properties of Lignin/Cellulose Hydrogel. *Materials*, 16(12), 4260.
<https://doi.org/10.3390/ma16124260>
- Choccata, D. Y. C. (2021). Evaluation of lead (II) biosorption capacity using inert plant biomass (rose stems) as adsorbent. *Advances in Mechanics*, 9(3), 868-907.
<https://doi.org/https://www.advancesinmechanics.com/view-215.php>
- Choi, H., & Lee, S. (2015). Heavy metal removal from acid mine drainage by calcined eggshell and microalgae hybrid system. *Environ Sci Pollut Res*.
- Cooper, M., & Johnson, A. (1984). *Poisonous plants in Britain and their effects on animals and man*. Ministry of Agriculture Fisheries and Food Reference Book.
- Córdova, C. (2016). *Biosorción de Pb²⁺ y Cd²⁺ en solución bajo diferentes condiciones de laboratorio usando la macrófita acuática Typha latifolia inerte*.
- De Lucas, A., & Del Peso, C. (2012). *Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad*.
- Díaz, M. L., Bonilla, P. A., Reynel, Á. H., & Mendoza, C. D. (2016). Sorption of heavy metal ions from aqueous solution using acid-treated avocado kernel seeds and its

- FTIR spectroscopy characterization. *Journal of Molecular Liquids*, 215, 555-564.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2016.01.022>
- Dionisio, E. (2012). *Aprovechamiento de residuos vegetales para la eliminación de cobre presente en medios acuosos mediante biosorción*. [Tesis de Doctorado].
- Esser, L. (1995). *Rumex acetosella*. In *Fire effects information*.
- Farhan, S. N., & Khadom, A. A. (2015). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by *Saccharomyces Cerevisiae*. *Int J Ind Chem*, 119-130.
- Fathollahi, A., Khasteganan, N., Coupe, S. J., & Newman, A. P. (2021). A meta-analysis of metal biosorption by suspended bacteria from three phyla. *Chemosphere*, 268, 129290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129290>
- Franks, G., & Meagher, L. (2003). The isoelectric points of sapphire crystals and alpha-alumina powder, The isoelectric points of sapphire crystals and alpha-alumina powder. *Elsevier Science BV*.
- Gadd, G., & Geoffrey, A. (2009). Biosorption: critical review of scientific rationale environmental importance and significance for pollution treatment. *Chem Technol Biotechnol*, 13–28.
- Goncalves, A. C., Braccini, A. L., & Schwantes, D. (2020). Adsorbents developed from residual biomass of canola grains for the removal of lead from water. *Desalination and Water Treatment*, 261–279.
- Gong, R., Ding, Y., Liu, H., Chen, Q., & Liu, Z. (2015). Biosorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions by Chemically Modified Microalgae. *Bioresource Technology*, 193, 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.120>
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill.
- Halysh, V., Sevastyanova, O., Pikus, S., Dobelev, G., & Pasalskiy, B. (2020). Sugarcane bagasse and straw as low-cost lignocellulosic sorbents for the removal of dyes and metal ions from water. *Springer Nature*, 8181–8197.
- Hernández, C., & Triviño, L. (2016). *Evaluación de la capacidad de Bioadsorción de Pb (II) y Cd (II) presentes en soluciones sintéticas independientes empleando retamo espinoso (Ulex europaeus) como adsorbente*. [Tesis para obtener el título profesional de Biólogo].
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mc Graw Hill.
- Hidalgo, V. (2010). *Biosorción de plomo y cadmio mediante el aprovechamiento de residuos de madera (aserrín de pino) y extractos de algas marinas (alginato de calcio)* [Tesis para obtener el título profesional de Biólogo].
- Kang, J.-K., Lee, C.-G., & Park, S.-J. (2021). Removal of Heavy Metals (Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+}) from Aqueous Solution Using *Hizikia fusiformis* as an Algae-Based Bioadsorbent. *Applied Sciences*, 11(18), 8604. <https://doi.org/10.3390/app11188604>
- Larios-Meño, J., Gonzales, C., & Morales, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la USIL*, 10-23.
- Loarte, A., & Sanabria, V. (2015). *Efecto del pH de adsorbente en la remoción de manganeso de aguas superficiales contaminadas por relaves mineros*.
- Low, K., Lee, C., & Liew, S. (2000). Sorption of cadmium and lead from aqueous solutions by spent grain. *Process Biochemistry*, 59-64.
- Mayorga, O. (2016). *Estructura de Macromoléculas*.
- Mondragón, C. (2018). *Efecto del pH en la biosorción de metales pesados (Pb, Cu, Cd) en solución acuosa mediante los xantatos sintetizados a partir de desechos de cáscara de naranja* [Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico].
- Muñoz, M. (2007). *Remoción de metales pesados en aguas residuales utilizando una macrofita acuática (eleocharis acicularis) muerta*.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., Ragadhita, R., & Technology. (2019). How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material. *J Indonesian Journal of Science*, 4(1), 97-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
- Nava-Ruiz, C., & Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 140-147.
- Navajas, R. (2005). *Evolución de los sistemas reproductivos y de los mecanismos de determinación sexual en el género Rumex (polygonaceae)*.
- Neto, C. P., Rocha, J., Gil, A., Cordeiro, N., Esculcas, A., Rocha, S., Delgadillo, I., De Jesus, J. P., & Correia, A. F. (1995). ^{13}C solid-state nuclear magnetic resonance and Fourier transform infrared studies of the thermal decomposition of cork. *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 4(3), 143-151. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0926-2040\(94\)00039-F](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0926-2040(94)00039-F)

- Nilanjana, D., Vimala, R., & Karthika, P. (2008). Biosorption of heavy metals– an overview. *Indian Journal of Biotechnology*, 159-169.
- Peña, E., Montoya, H., & Sanchez, T. (2017). Metales pesados en *Calamagrostis rigida* y *Myriophyllum quitense* en cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa*.
- Pieroni, A. (2000). Medicinal plants and food medicines in the folk traditions of the upper Lucca Province, Italy. *J. Ethnopharmacol.*, 235-273.
- Ravikumar, K., & Udayakumar, J. (2020). Preparation and characterisation of green clay-polymer nanocomposite for heavy metals removal. *Chemestry And Ecology*, 270-291.
- Regalbuto, J. R., & Robles, J. O. (2004). *The engineering of Pt/carbon catalyst preparation*.
- Reyes, Y., & Vergara, I. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingenieria, Investigación y Desarrollo*, 66-77.
- Rodriguez, C., & Leiva, E. (2020). Enhanced Heavy Metal Removal from Acid Mine Drainage Wastewater Using Double-Oxidized Multiwalled Carbon Nanotubes. *Molecules*, 25(21), 111.
- Salman, M., Athar, M., & Farooq, U. (2015). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 211–228.
- Sánchez, N. (2016). *Biosorción en tanque agitado de Cd y Pd con cáscará de cacao* [Tesis para obtener el título de ingeniero ambiental].
- Santhi, K., & Sengottuvel, R. (2017). Functional group analysis of *Moringa concanensis* Nimmo (Moringaceae) by FTIR spectrum. *IOSR Journal Of Pharmacy*, 28-33.
- Santos, E., Vargas, J., Cásrdenas, J., & Acosta, I. (2017). Removal of Arsenic (V) in Aqueous Solution by Modified Fungal Biomass of *Aspergillus niger*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 1-10.
- Saravanan, A., Kumar, P., Yaashikaa, P., & Karishma, S. (2021). Mixed biosorbent of agro waste and bacterial biomass for the separation of Pb (II) ions from water system. *Chemosphere*, 10 , 75–87.
- Schwantes, D., Goncalvez, A. C., Perina, H. A., Teixeira, C. R., & Dragunski, D. C. (2022). Ecofriendly Biosorbents Produced from Cassava Solid Wastes: Sustainable

- Technology for the Removal of Cd^{2+} , Pb^{2+} , and Cr^{total} . *Adsorption Science & Technology*.
- Sellaoui, L., Soetaredjo, F. E., Ismadji, S., Lima, E., Dotto, G., Lamine, A. B., & Erto, A. (2017). New insights into single-compound and binary adsorption of copper and lead ions on treated sea mango shell: Experimental and theoretical studies. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(38).
- Shen, Y. S., Wang, S. L., Huang, S. T., Tzou, Y. M., & Huang, J. H. (2010). Biosorption of Cr(VI) by coconut coir: Spectroscopic investigation on the reaction mechanism of Cr(VI) with lignocellulosic material. *Journal of Hazardous Materials*, 160-165.
- Siesler, H. (2002). *Near-infrared spectroscopy*.
- Skoog, D., & West, D. (1987). *Análisis Instrumental*. Nueva Editorial Interamericana.
- Stopps, G., White, S., Clements, D., & Upadhyaya, M. (2011). The Biology of Canadian Weeds. 149. *Rumex acetosella* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 10371052.
- Tejada, C., Villabona, A., & Garcés, L. (2014). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Termo Lógicas*, 109-123.
- Tuncturk, M., Celen, A., & Tuncturk, R. (2017). Nutrient content of three edible wild planta from polygonaceae family. *Technological aspects of oxidation processes of special interest to petrochemistry, food and pharmaceuticals*, 327–334
- Vera, L., Uguña, M., Garcia, N., Flores, M., & Vázquez, V. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *AFINIDAD LXXIII*, 43–49.
- Vinod, V., & Sashidhar, B. (2010). Surface morphology, chemical and structural assignment of gum Kondagogu (*Cochlospermum gossypium* DC.): An exudate tree gum of India. *Indian Journal of Natural Products and ResourceS*, 181-192.
- Vízcaíno, L., Fuentes, N., & Gonzáles, H. (2017). Adsorción de plomo en solución acuosa con tallos y hojas de *Eichhornia crassipes*. *Ciencias Naturales*, 435-444.
- Zevallos, S. (2018). *Calidad de agua, bioacumulación de metales pesados y niveles de estrés en la trucha arcoíris (Oncorhynchus mykiss) en Challhuahuacho, Apurímac*.
- Zhang, W., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2014). Biosorption of lead, cadmium and zinc by inactive *Saccharomyces cerevisiae*: Application of isotherm and kinetic models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 1081-1090. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0303-y>

Zhou, X., Wang, Y., Zhang, L., Zhang, X., & Zhang, Y. (2023). A Review of Adsorbents for Heavy Metal Decontamination: Growing Approach to Wastewater Treatment. *Materials*, 16(5), 2018. <https://doi.org/10.3390/ma16052018>

ANEXOS

Anexo 1: Prueba t-student para la humedad de tallos y hojas de puka kora

Resumen Estadístico

	Humedad_Hojas	Humedad_Tallos
Recuento	3	3
Promedio	82.1241	75.2651
Desviación Estándar	0.264055	0.60239
Coefficiente de Variación	0.321532%	0.800357%
Mínimo	81.8848	74.6313
Máximo	82.4074	75.8302
Rango	0.5226	1.1989
Sesgo Estandarizado	0.51476	-0.357833
Curtosis Estandarizada		

Comparación de Medias

Intervalos de confianza del 95.0% para la media de Humedad_Hojas: 82.1241 +/- 0.65595 [81.4682; 82.7801]

Intervalos de confianza del 95.0% para la media de Humedad_Tallos: 75.2651 +/- 1.49642 [73.7686; 76.7615]

Intervalos de confianza del 95.0% intervalo de confianza para la diferencia de medias

suponiendo varianzas iguales: 6.85907 +/- 1.05432 [5.80475; 7.91339]

Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: $\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis Alt.: $\mu_1 \neq \mu_2$

suponiendo varianzas iguales: $t = 18.0627$ valor-P = 0.000055232

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Anexo 2: Prueba t-student para el pH de tallos y hojas de puka kora

Resumen Estadístico

	pH_Hojas	pH_Tallos
Recuento	3	3
Promedio	3.43	3.42
Desviación Estándar	0.01	0.02
Coefficiente de Variación	0.291545%	0.584795%
Mínimo	3.42	3.4
Máximo	3.44	3.44
Rango	0.02	0.04
Sesgo Estandarizado	0	0
Curtosis Estandarizada		

Comparación de Medias

Intervalos de confianza del 95.0% para la media de pH_Hojas: 3.43 +/- 0.0248414 [3.40516; 3.45484]

Intervalos de confianza del 95.0% para la media de pH_Tallos: 3.42 +/- 0.0496828 [3.37032; 3.46968]

Intervalos de confianza del 95.0% intervalo de confianza para la diferencia de medias suponiendo varianzas iguales: 0.01 +/- 0.0358439 [-0.0258439; 0.0458439]

Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis Alt.: media1 <> media2

suponiendo varianzas iguales: t = 0.774597 valor-P = 0.481817

No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0.05.

Anexo 3: ANOVA y prueba Tukey para el TOC

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Desviación</i>
T1	3	72.56	24.19	0.05	0.22
T2	3	72.49	24.16	0.08	0.28
T3	3	68.07	22.69	0.04	0.21
T4	3	67.87	22.62	0.22	0.47

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Probabilidad F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	6.923491667	3	2.307830556	23.74	922 0.000245
Dentro de los grupos	0.7774	8	0.097175		4.066181
Total	7.700891667	11			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T4	3	22.6233	X
T3	3	22.69	X
T2	3	24.1633	X
T1	3	24.1867	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T1 - T2		0.0233333	0.81479
T1 - T3	*	1.49667	0.81479
T1 - T4	*	1.56333	0.81479
T2 - T3	*	1.47333	0.81479
T2 - T4	*	1.54	0.81479
T3 - T4		0.0666667	0.81479

* indica una diferencia significativa.

.

Anexo 4: Resultados de la concentración inicial y final de As y Pb

Código	As (mg/L)				
	1	2	3	Promedio	%
Co	9.77	9.64	9.63	9.68	
T1	7.96	7.98	7.95	7.96	17.73%
T2	7.78	7.75	7.76	7.76	19.80%
T3	7.54	7.63	7.66	7.61	21.38%
T4	7.36	7.4	7.45	7.4	23.52%

Código	Pb (mg/L)				
	1	2	3	Promedio	%
Co	9.84	9.84	9.85	9.84	
T1	2.32	2.26	2.24	2.27	76.90%
T2	0.799	0.77	0.82	0.80	91.91%
T3	0.67	0.65	0.61	0.64	93.45%
T4	0.59	0.51	0.56	0.55	94.38%

Anexo 5: ANOVA y prueba Tukey para la remoción de As

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Desviación
T1	3	53.2024793	17.73	0.024902	0.16
T2	3	59.4008264	19.80	0.024902	0.16
T3	3	63.7396694	21.25	0.174311	0.42
T4	3	70.5578512	23.52	0.216999	0.47

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	53.3710983	3	17.7903661	161.3225806	1.7095E-07	4.06618055
Dentro de los grupos	0.88222571	8	0.110278214			
Total	54.253324	11				

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T1	3	17.7343	X
T2	3	19.8003	X
T3	3	21.2467	X
T4	3	23.5193	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T1 - T2	*	-2.066	1.07982
T1 - T3	*	-3.65	1.07982
T1 - T4	*	-5.785	1.07982
T2 - T3	*	-1.584	1.07982
T2 - T4	*	-3.719	1.07982
T3 - T4	*	-2.135	1.07982

* indica una diferencia significativa.

Anexo 6: ANOVA y prueba Tukey para la remoción de Pb

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Desviación
T1	3	230.714528	76.90	0.17889479	0.42
T2	3	275.729766	91.91	0.06505578	0.26
T3	3	280.362343	93.45	0.09632797	0.31
T4	3	283.145953	94.38	0.14934275	0.39

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	610.378401	3	203.459467	1662.17826	1.6188E-11	4.06618055
Dentro de los grupos	0.97924258	8	0.12240532			
Total	611.357643	11				

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T1	3	76.9047	X
T2	3	91.9097	X
T3	3	93.454	X

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T4	3	94.382	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T1 - T2	*	-15.005	0.914272
T1 - T3	*	-16.5493	0.914272
T1 - T4	*	-17.4773	0.914272
T2 - T3	*	-1.54433	0.914272
T2 - T4	*	-2.47233	0.914272
T3 - T4	*	-0.928	0.914272

* indica una diferencia significativa.

Anexo 7: ANOVA y prueba Tukey para el pH óptimo-As

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Desviación
pH=3	3	17.453	5.82	0.672	0.820
pH=4	3	70.558	23.52	0.217	0.466
pH=5	3	76.848	25.62	0.167	0.409
pH=6	3	76.758	25.59	0.165	0.406

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	828.59	3	276.19732	904.686876	1.8338E-10	4.06618055
Dentro de los grupos	2.4424	8	0.305296			
Total	831.03	11				

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
pH=3	3	5.82	X
pH=4	3	23.52	X
pH=6	3	25.5833	X
pH=5	3	25.6167	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
pH=3 - pH=4	*	-17.7	1.44349
pH=3 - pH=5	*	-19.7967	1.44349

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
pH=3 - pH=6	*	-19.7633	1.44349
pH=4 - pH=5	*	-2.09667	1.44349
pH=4 - pH=6	*	-2.06333	1.44349
pH=5 - pH=6		0.0333333	1.44349

* indica una diferencia significativa.

Anexo 8: ANOVA y prueba Tukey para el pH óptimo-Pb

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Desviación
pH=3	3	90.023	30.01	0.161	0.401
pH=4	3	282.548	94.18	0.046	0.215
pH=5	3	284.964	94.99	0.000	0.015
pH=6	3	284.849	94.95	0.000	0.022

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	9419.66846	3	3139.88949	60454.5596	9.3148E-18	4.06618055
Dentro de los grupos	0.41550408	8	0.05193801			
Total	9420.08396	11				

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
pH=3	3	30.01	X
pH=4	3	94.1833	X
pH=6	3	94.95	X
pH=5	3	94.9833	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
pH=3 - pH=4	*	-64.1733	0.593832
pH=3 - pH=5	*	-64.9733	0.593832
pH=3 - pH=6	*	-64.94	0.593832
pH=4 - pH=5	*	-0.8	0.593832
pH=4 - pH=6	*	-0.766667	0.593832
pH=5 - pH=6		0.0333333	0.593832

* indica una diferencia significativa.

Anexo 9: ANOVA y prueba Tukey para la cantidad óptima-As

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Desviación
0.08 g	3	53.6618	17.887	1.025	1.012
0.12 g	3	70.9754	23.658	0.092	0.304
0.20 g	3	76.8478	25.616	0.167	0.409
0.28 g	3	79.9865	26.662	0.260	0.510
036 g	3	81.6065	27.202	0.502	0.709

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	171.6711	4	42.91778	104.8389	4.0323E-08	3.47805
Dentro de los grupos	4.093688	10	0.409369			
Total	175.7648	14				

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
0.08 g	3	17.8867	X
0.12 g	3	23.6567	X
0.20 g	3	25.6167	X
0.28 g	3	26.66	X
0.36 g	3	27.2	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0.08 g - 0.12 g	*	-5.77	1.72207
0.08 g - 0.20 g	*	-7.73	1.72207
0.08 g - 0.28 g	*	-8.77333	1.72207
0.08 g - 0.36 g	*	-9.31333	1.72207
0.12 g - 0.20 g	*	-1.96	1.72207
0.12 g - 0.28 g	*	-3.00333	1.72207
0.12 g - 0.36 g	*	-3.54333	1.72207
0.20 g - 0.28 g		-1.04333	1.72207
0.20 g - 0.36 g		-1.58333	1.72207
0.28 g - 0.36 g		-0.54	1.72207

* indica una diferencia significativa.

Anexo 10: ANOVA y prueba Tukey para la cantidad óptima-Pb

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Desviación</i>
100 ppm	3	214.677	71.559	0.323	0.568
150 ppm	3	252.243	84.081	0.143	0.378
250 ppm	3	284.964	94.988	0.000	0.015
350 ppm	3	285.003	95.001	0.002	0.047
450 ppm	3	285.213	95.071	0.006	0.078

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1300.2485	4	325.062115	3426.66598	1.2349E-15	3.47804969
Dentro de los grupos	0.948625	10	0.0948625			
Total	1301.1971	14				

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
0.08 g	3	71.5633	X
0.12 g	3	84.0767	X
0.20 g	3	94.9833	X
0.28 g	3	94.9967	X
0.36 g	3	95.0667	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0.08 g - 0.12 g	*	-12.5133	0.828455
0.08 g - 0.20 g	*	-23.42	0.828455

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0.08 g - 0.28 g	*	-23.4333	0.828455
0.08 g - 0.36 g	*	-23.5033	0.828455
0.12 g - 0.20 g	*	-10.9067	0.828455
0.12 g - 0.28 g	*	-10.92	0.828455
0.12 g - 0.36 g	*	-10.99	0.828455
0.20 g - 0.28 g		-0.0133333	0.828455
0.20 g - 0.36 g		-0.0833333	0.828455
0.28 g - 0.36 g		-0.07	0.828455

* indica una diferencia significativa.

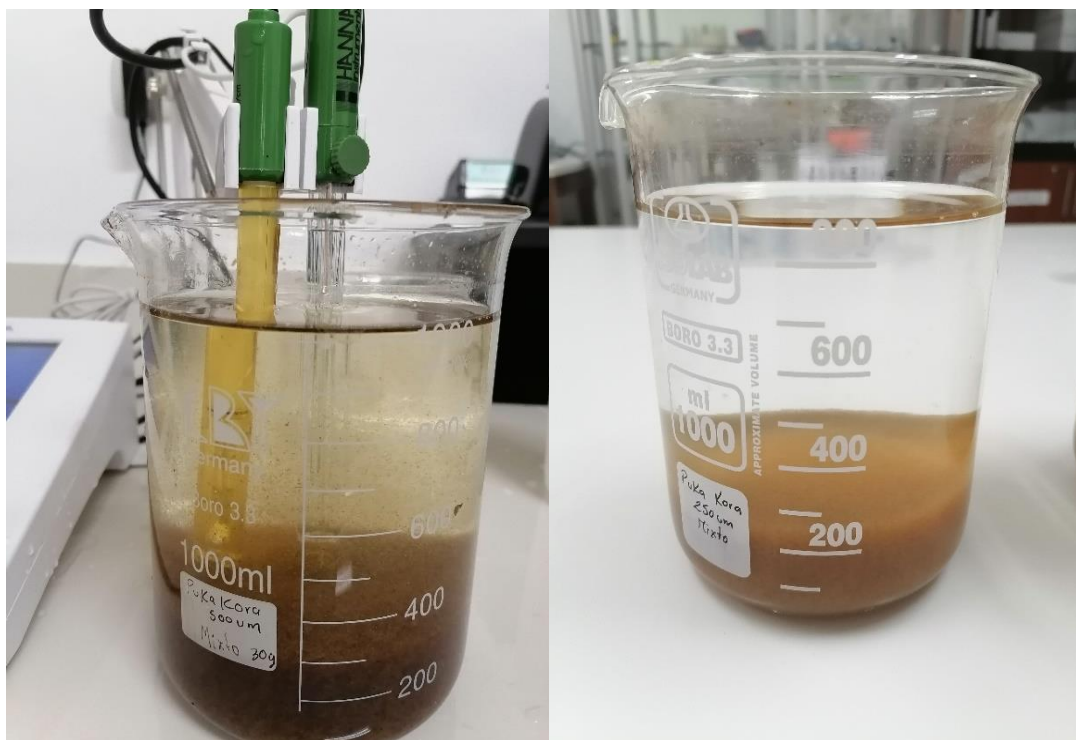
Anexo 11: Panel Fotográfico



Fotografía 1: Puka kora (*Rumex acetosella*)



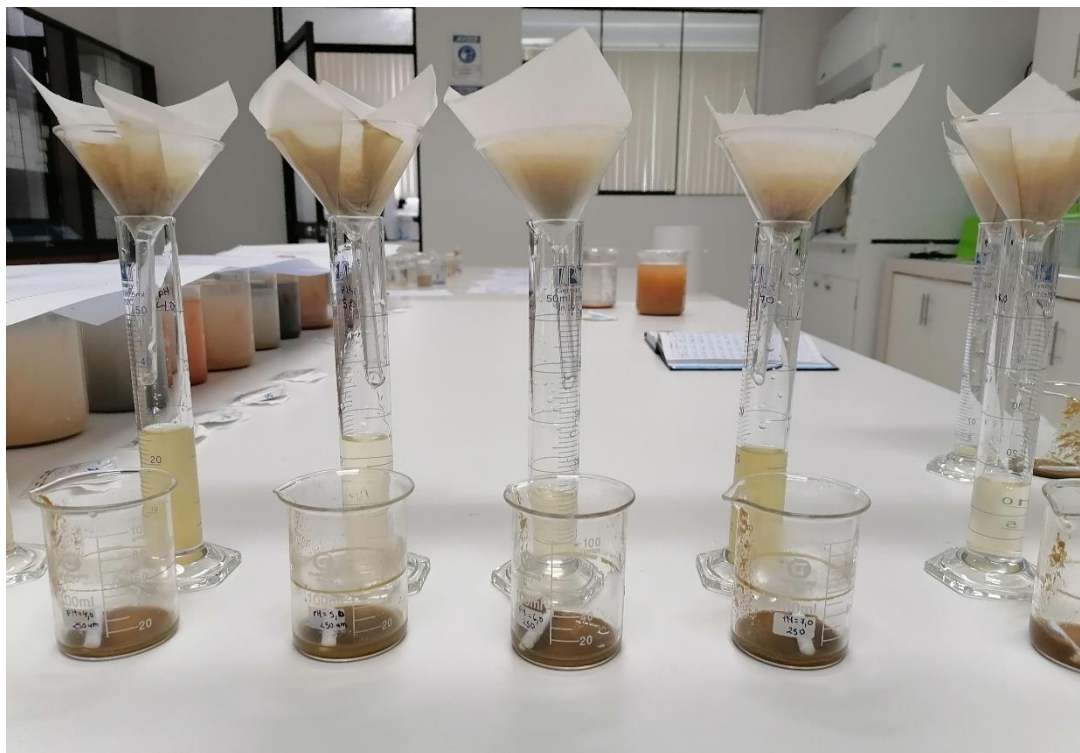
Fotografía 2: Molienda y tamizado de tallos de Puka kora (*Rumex acetosella*)



Fotografía 3. Activación de la biomasa



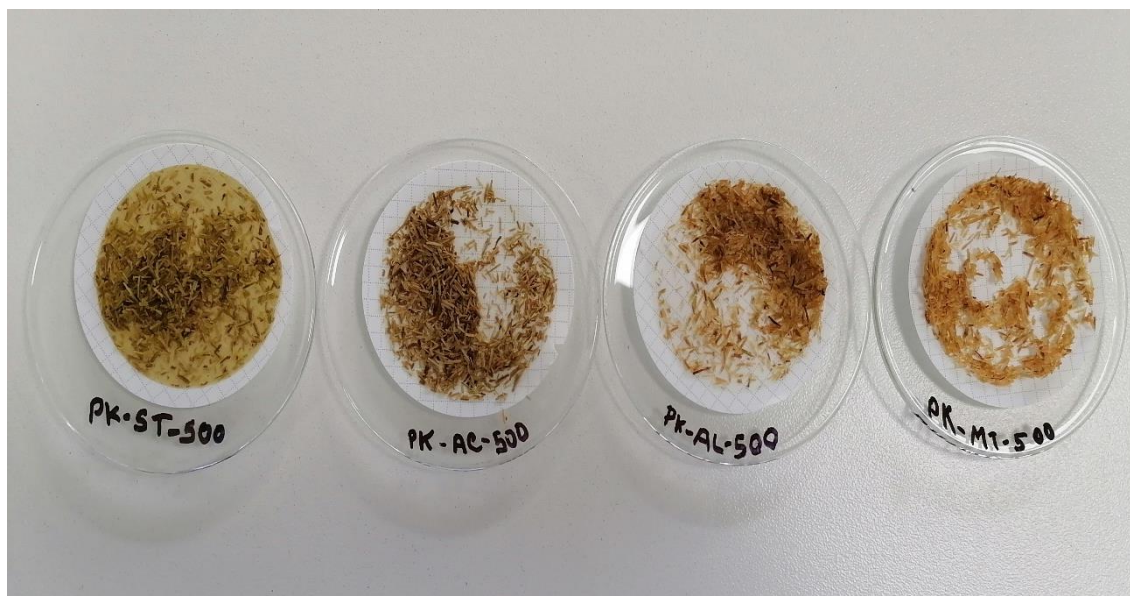
Fotografía 4. Biomasa de Puka kora activada



Fotografía 5. Determinación del PCC



Fotografía 6. Proceso de biosorción



Fotografía 7. Biosorbentes (T1, T2, T3 y T4) después del proceso de biosorción de Pb y As.



Fotografía 8. Preparación de pellets y lectura por el FTIR



ESQUELA DE

POSGRADOUNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD 024-2024-UNSCH-EPG/OGH**

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de Posgrado en segunda instancia para la **Escuela de Posgrado – UNSCH**; en cumplimiento a la Resolución De Consejo Directivo N°109-2024-UNSCH-EPG/CD, Reglamento de Originalidad de trabajos de Investigación de la UNSCH, otorga lo siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

AUTOR	Bach. Elibet Moscoso Moscoso
DENOMINACIÓN DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS	MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
GRADO ACADÉMICO QUE OTORGA	MAESTRO
DENOMINACIÓN DEL GRADO ACADÉMICO	MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL
TÍTULO DE TESIS	BIOSORCIÓN DE PLOMO Y ARSÉNICO UTILIZANDO BIOMASA VEGETAL INERTE DE TALLOS DE PUKA KORA (Rumex acetosella)
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD	12% de similitud
N° DE TRABAJO	2467014321
FECHA	27 de setiembre de 2024

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es procedente otorgar la constancia de originalidad con depósito.

Se expide la presente constancia, a solicitud del interesado para los fines que crea conveniente.

27 de setiembre de 2024.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN
CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Escuela de Posgrado
Dr. Oscar Gutiérrez HuamaniCC
Archivo
OGH/

BIOSORCIÓN DE PLOMO Y ARSÉNICO UTILIZANDO BIOMASA VEGETAL INERTE DE TALLOS DE PUKA KORA (*Rumex acetosella*)

por Elibet Moscoso Moscoso

Fecha de entrega: 27-sep-2024 12:33a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2467014321

Nombre del archivo: Elibet_Moscoso.docx (8.12M)

Total de palabras: 21155

Total de caracteres: 112470

BIOSORCIÓN DE PLOMO Y ARSÉNICO UTILIZANDO BIOMASA VEGETAL INERTE DE TALLOS DE PUKA KORA (Rumex acetosella)

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	bibliotecas.unsa.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1%
7	pdffox.com Fuente de Internet	<1%
8	www.repositorio.unam.edu.pe Fuente de Internet	<1%

9	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to unajma Trabajo del estudiante	<1 %
12	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
13	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	riaa.uaem.mx Fuente de Internet	<1 %
16	ru.dgb.unam.mx Fuente de Internet	<1 %
17	eprints.uanl.mx Fuente de Internet	<1 %
18	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	ddd.uab.cat Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

21

sedici.unlp.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

22

Submitted to Universidad Nacional del Centro
del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

23

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR
EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (A) EN INGENIERIA AMBIENTAL
RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 00622-2023-UNSCH-EPG/D**

Siendo las 04:00 p.m. de 13 de Octubre de 2023 se reunieron en el auditorium de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, el Jurado Examinador y Calificador de tesis, presidido por el Dr. Emillo Germán RAMÍREZ ROCA director (e) de la Escuela de Posgrado, el Mtro. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH Director de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, por los siguientes miembros: M.Q. Hernán Pedro QUISPE MISAICO y el Mtro. Pedro INGA ZARATE; para la sustentación oral y pública de la tesis titulado, BIOSORCIÓN DE PLOMO Y ARSÉNICO UTILIZANDO BIOMASA VEGETAL INERTE DE TALLOS DE PUKA KORA (*Rumex acetosella*). En la Ciudad de Ayacucho del 2023, presentada por la Bach. Elibet MOSCOSO MOSCOSO. Teniendo como asesor al Dr. David CHOQUE QUISPE.

Acto seguido se procedió a la exposición de la tesis, con el fin de optar al Grado Académico de MAESTRO (A) EN INGENIERIA AMBIENTAL, Formuladas las preguntas, éstas fueron absueltas por la graduanda. A continuación el Jurado Examinador y Calificador de tesis procedió a la votación, la que dio como resultado el siguiente calificativo:

010015615 (16)

CALIFICACION (*)

Aprobado por unanimidad	X
Aprobado por Mayoría	-
Desaprobada por Unanimidad	-
Desaprobada por mayoría	-

(*) Marcar con aspa

Luego, el presidente del Jurado recomienda que la Escuela de Posgrado proponga que se le otorgue a la Bach. Elibet MOSCOSO MOSCOSO el Grado Académico de MAESTRO (A) EN INGENIERIA AMBIENTAL. Siendo la... 5:45 p.m. hrs. Se levanta la sesión.

Se extiende el acta en la ciudad de Ayacucho, a las... 5:45 p.m. hrs. Del 13 de octubre 2023.

Dr. Emillo Germán RAMÍREZ ROCA
Director (e) de la Escuela de Posgrado

Mtro. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH
Director de la Unidad de Posgrado – FIQM

M.Q. Hernán Pedro QUISPE MISAICO
Miembro

Mtro. Pedro INGA ZARATE
Miembro

Dr. Edward Eusebio BARBOZA PALOMINO
Secretario Docente (e)

Observaciones: