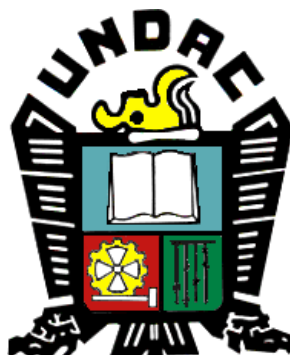


**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**T E S I S**

**Evaluación de la capacidad de absorción metálica de la Planta Scirpoides**

**Holoschoenus o Junco Churrero en Cerro de Pasco – 2019**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Ambiental**

**Autor:**

**Bach. Danitza Kemberly BUENO SINCHE**

**Asesor:**

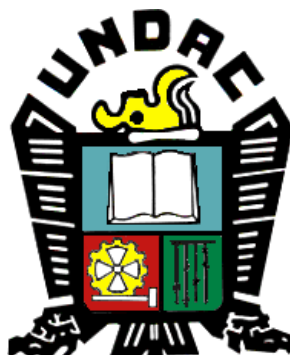
**Mg. Anderson MARCELO MANRIQUE**

**Cerro de Pasco – Perú – 2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**T E S I S**

**Evaluación de la capacidad de absorción metálica de la Planta Scirpoides**

**Holoschoenus o Junco Churrero en Cerro de Pasco – 2019**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

Dr. Luis Alberto PACHECO PEÑA

**PRESIDENTE**

---

Mg. Lucio ROJAS VITOR

**MIEMBRO**

---

Mg. Edgar Walter PEREZ JUZCAMAYTA

**MIEMBRO**



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

**INFORME DE ORIGINALIDAD N° 322-2025-UNDAC/UIFI**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**Evaluación de la Capacidad de Absorción Metálica de la Planta Scirpoides**

**Holoschoenus o Junco Churrero en Cerro de Pasco – 2019**

Apellidos y nombres del tesista

**Bach. Danitza Kemberly BUENO SINCHE.**

Apellidos y nombres del Asesor:

**Mg. Anderson MARCELO MANRIQUE**

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería Ambiental**

Índice de Similitud

**5 %**

**APROBADO**

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 19 de setiembre del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO  
ISIDRO Ruben Edgar FAU  
20154605046 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 19.09.2025 14:34:22 -05:00

## **DEDICATORIA**

A Dios, por ser mi guía en este camino, por darme las fuerzas de haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, por cuidarme y bendecirme siempre.

A mis padres, que son el motor que me impulsa a seguir adelante, por confiar en mí, creer en mí y por su apoyo incondicional y sus sabios consejos.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por cada una de sus bendiciones y por ser mi guía a lo largo de mi formación y desarrollo profesional, por brindarme fortaleza en los momentos de dificultad y por darme la oportunidad de compartir la vida con las personas que más amo.

A mi padre, que descansa en el cielo, por sus enseñanzas, por cuidarme siempre y ser mi pilar de fortaleza; y a mi madre, por ser mi guía en cada paso que doy y por sus sabios consejos que iluminan mi camino.

Expreso mi gratitud a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y a todos los docentes, personas de gran sabiduría, quienes con sus enseñanzas y conocimientos han fortalecido mi confianza y pasión por el campo profesional, motivándome a crecer y superarme día a día.

Muchas gracias a todos.

## RESUMEN

Se presenta esta investigación como una alternativa para solucionar un problema álgido de contaminación de aguas y suelos mejorando las condiciones del medio ambiente y poder tener la oportunidad de dejar nuestra naturaleza en óptimas condiciones de sobrevivencia a nuestras generaciones futuras.

En una forma sencilla de entender la recuperación de aguas y suelos es recurrir a las propiedades que poseen las plantas para absorber metales pesado y distribuirlos en sus raíces, tallos y hojas; de esta manera se puede conseguir mermar estos contaminantes empleando estas propiedades.

El resultado de la investigación será detallar los 4 capítulos que consta la tesis: En el capítulo I se considera entrar al problema de la investigación y se plantea el problema general y los específicos, el capítulo II está referido a los antecedentes que tiene este estudio, el aspecto teórico- científico, los conceptos empleados y se formulan las hipótesis, el capítulo III trata sobre la metodología empleada, las muestras y las variables de estudio y finalmente, el capítulo IV, el corazón de la tesis, se informa de todas las pruebas y se discute los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones y recomendaciones de todo el trabajo desarrollado.

**Palabras clave:** contaminación de agua y suelos mejorando sus condiciones, absorción metálica, Espectrofotometría de Absorción Atómica, análisis químicos, concentraciones de los metales.

## **ABSTRACT**

This research is presented as an alternative to solve a critical problem of water and soil pollution, improving environmental conditions and having the opportunity to leave our nature in optimal conditions of survival for our future generations.

In a simple way to understand the recovery of water and soil is to resort to the properties that plants have to absorb heavy metals and distribute them in their roots, stems and leaves; In this way, these contaminants can be reduced using these properties.

The result of the research will be to detail the 4 chapters that make up the thesis: Chapter I considers entering the research problem and poses the general and specific problems, chapter II refers to the background of this study, the theoretical-scientific aspect, the concepts used and the hypotheses are formulated, chapter III deals with the methodology used, the samples and the study variables and finally, chapter IV, the heart of the thesis, reports on all the tests and the results obtained are discussed and the conclusions and recommendations of all the work developed are presented.

**Keywords:** contamination of water and soil, improving their conditions, metallic absorption, Atomic Absorption Spectrophotometry, chemical analysis, metal concentrations.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo central de la presente investigación es evaluar la capacidad de absorción de metales pesados —arsénico (As), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y plomo (Pb)— considerados altamente peligrosos para la calidad del agua, bajo las condiciones de temperatura propias de Cerro de Pasco. Para ello, se emplea la especie vegetal *Scirpus holoschoenus*, conocida comúnmente como “junco de churrero”, abundante en zonas ribereñas y pantanosas.

La metodología consiste en recolectar ejemplares de esta planta y adaptarlos en un medio acuoso con nutrientes durante un periodo de tres meses, realizando análisis cada 15 días para evaluar su desarrollo y capacidad de absorción metálica. Los ensayos se llevan a cabo en el laboratorio químico de la especialidad de Ingeniería Ambiental, empleando bandejas o cubetas adecuadas. Las plantas frescas, recolectadas en las orillas pantanosas del Lago Chinchaycocha (Junín), son expuestas a soluciones con nutrientes y metales en prueba. Asimismo, se implementa un sistema de aireación con bomba de acuario para garantizar la oxigenación del medio y evitar reacciones de reducción que puedan generar gases indeseables como  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  o  $\text{CH}_4$ .

Los análisis químicos se realizan en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (Tingo María), mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica, durante 12 semanas consecutivas, tiempo suficiente para cuantificar las concentraciones metálicas en cada etapa y el crecimiento de las plantas.

Finalmente, los resultados son procesados estadísticamente con el fin de determinar el orden de absorción metálica del junco, aportando así al conocimiento de especies vegetales con potencial para mitigar la contaminación de aguas y suelos en diferentes regiones del país.

La Tesista

## **INDICE**

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

|                                                       |   |
|-------------------------------------------------------|---|
| 1.1. Identificación y determinación del problema..... | 1 |
| 1.2. Delimitación de la investigación.....            | 3 |
| 1.3. Formulación del Problema .....                   | 6 |
| 1.3.1. Problema general.....                          | 6 |
| 1.3.2. Problemas Específicos .....                    | 6 |
| 1.4. Formulación de objetivos.....                    | 6 |
| 1.4.1. Objetivo general .....                         | 6 |
| 1.4.2. Objetivos específicos .....                    | 6 |
| 1.5. Justificación de la Investigación .....          | 7 |
| 1.6. Limitaciones de la Investigación.....            | 8 |

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Antecedentes de estudio.....                                   | 10 |
| 2.2. Bases teóricas – científicas .....                             | 15 |
| 2.2.1. Descripción de Scirpus holoschoenus (“junco churrero”) ..... | 15 |
| 2.2.2. La Fitorremediación .....                                    | 17 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.3. Definición de términos básicos .....                    | 21 |
| 2.4. Formulación de hipótesis .....                          | 25 |
| 2.4.1. Hipótesis general .....                               | 25 |
| 2.4.2. Hipótesis Específicas .....                           | 25 |
| 2.5. Identificación de variables .....                       | 25 |
| 2.6. Definición operacional de variables e indicadores ..... | 26 |

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Tipo de Investigación.....                                                 | 28 |
| 3.2. Nivel de la Investigación.....                                             | 28 |
| 3.3. Método de investigación .....                                              | 29 |
| 3.4. Diseño de investigación .....                                              | 29 |
| 3.5. Población y Muestra.....                                                   | 32 |
| 3.5.1. Población.....                                                           | 32 |
| 3.5.2. Muestra.....                                                             | 32 |
| 3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....                       | 32 |
| 3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de medición..... | 35 |
| 3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....                        | 36 |
| 3.8.1. Procesamiento de datos .....                                             | 36 |
| 3.8.2. Análisis e interpretación de los datos .....                             | 36 |
| 3.9. Tratamiento Estadístico.....                                               | 36 |

### **CAPITULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Descripción del trabajo de campo.....                        | 37 |
| 4.2. Presentación y análisis e interpretación de resultados ..... | 41 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 4.2.1. Resultados .....           | 41 |
| 4.3. Pruebas de Hipótesis .....   | 49 |
| 4.4. Discusión de resultados..... | 51 |
| CONCLUSIONES                      |    |
| RECOMENDACIONES                   |    |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS        |    |
| ANEXOS                            |    |

## INDICE DE ILUSTRACIONES

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i><b>Ilustración 1.</b> Scirpus Holoschoenus- Junco Churrero .....</i>                                                        | <i>2</i>  |
| <i><b>Ilustración 2.</b> Ubicación de la Región Pasco en el Mapa del Perú.....</i>                                             | <i>4</i>  |
| <i><b>Ilustración 3.</b> Mapa de la Región Pasco y sus 3 provincias.....</i>                                                   | <i>5</i>  |
| <i><b>Ilustración 4.</b> Laboratorio de la UNDAC, donde se desarrolló la investigación.....</i>                                | <i>5</i>  |
| <i><b>Ilustración 5.</b> Etapas de la investigación.....</i>                                                                   | <i>30</i> |
| <i><b>Ilustración 6.</b> Sacando muestras del Junco Churrero para ser conducido al laboratorio .....</i>                       | <i>33</i> |
| <i><b>Ilustración 7.</b> Muestra de raíces en un soporte de Tecnopor para el desarrollo de los juncos.....</i>                 | <i>33</i> |
| <i><b>Ilustración 8.</b> Observando el desarrollo del crecimiento del junco para llevar el análisis instrumental A.A. ....</i> | <i>34</i> |
| <i><b>Ilustración 9.</b> Preparando los nutrientes para los juncos .....</i>                                                   | <i>34</i> |
| <i><b>Ilustración 10.</b> Equipo de Absorción atómica de la UNAS .....</i>                                                     | <i>35</i> |
| <i><b>Ilustración 11.</b> Preparando la solución metálica .....</i>                                                            | <i>40</i> |
| <i><b>Ilustración 12.</b> Preparando la cubeta para el cultivo del Junco .....</i>                                             | <i>40</i> |

## INDICE DE TABLAS

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Operacionalidad de variables e indicadores .....                                                      | 26 |
| <b>Tabla 2.</b> Concentraciones de iones metálicas para las pruebas de absorción para 20 L de solución metálica ..... | 39 |
| <b>Tabla 3.</b> Análisis físico - químico .....                                                                       | 41 |
| <b>Tabla 4.</b> Absorción metálica .....                                                                              | 47 |
| <b>Tabla 5.</b> Reducción y Absorción promedio por quincena (mg/L) .....                                              | 48 |

## INDICE DE GRÁFICOS

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gráfico 1.</b> <i>Variación del contenido de Cadmio en 3 meses</i> .....    | 43 |
| <b>Gráfico 2.</b> <i>Variación del contenido de plomo en 3 meses</i> .....     | 43 |
| <b>Gráfico 3.</b> <i>Variación del contenido de Antimonio en 3 meses</i> ..... | 44 |
| <b>Gráfico 4.</b> <i>Variación del contenido de Arsénico en 3 meses</i> .....  | 45 |

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

En las últimas décadas se ha incrementado de manera significativa el número de estudios sobre la fitorremediación de aguas contaminadas, empleando diversas especies vegetales acuáticas. Esta tecnología constituye una alternativa sostenible de tratamiento, pues aprovecha la capacidad natural de ciertas plantas para absorber, acumular o transformar metales pesados, contribuyendo así a reducir las concentraciones de contaminantes en los recursos hídricos.

Entre las especies con potencial fitorremediador destaca el *Scirpus holoschoenus*, conocido comúnmente como “junco churrero”, una planta ampliamente distribuida en zonas pantanosas y de alta humedad.

Taxonomía de *Scirpus holoschoenus*

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Cyperaceae

Género: Scirpus

Especie: *S. holoschoenus*

El “junco churrero” se caracteriza por presentar tallos de sección circular y carecer de hojas verdaderas, ya que estas se transforman en vainas basales. Con el envejecimiento, dichas vainas se secan y forman un retículo fibroso rico en material orgánico, el cual puede ser aprovechado incluso como combustible natural

***Ilustración 1. Scirpus Holoschoenus- Junco Churrero***



El principal problema identificado es la contaminación por metales pesados en las aguas de ríos y lagunas, lo cual representa un riesgo ambiental y de salud pública. Frente a esta situación, resulta necesario recurrir a métodos de fitorremediación como alternativa sostenible para reducir estos contaminantes.

Dado que ciertas plantas acuáticas poseen la capacidad de absorber metales pesados del agua, el presente estudio se orienta a evaluar el potencial de absorción metálica de la especie *Scirpus holoschoenus*, conocida comúnmente como “junco churrero”. Durante este proceso, los elementos tóxicos son acumulados en las raíces, tallos y hojas de la planta, contribuyendo a la descontaminación del medio acuático.

## **1.2. Delimitación de la investigación.**

El presente estudio aborda el problema de la remediación de aguas contaminadas con metales pesados, una situación que se presenta a nivel mundial y que afecta directamente a los recursos hídricos naturales. La técnica seleccionada para este trabajo es la fitorremediación, que consiste en el empleo de plantas acuáticas capaces de absorber y acumular iones metálicos presentes en el agua, muchos de los cuales son altamente tóxicos para la salud humana y animal. En este contexto, la investigación busca evaluar el potencial de la especie vegetal *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”) en la absorción de metales pesados, contribuyendo así a la mejora de la calidad de los recursos hídricos.

### **A. Delimitación espacial**

La investigación se realizó en la ciudad de Cerro de Pasco, considerada la más alta del mundo, ubicada en la zona central del Perú a una altitud de 4380 m s. n. m. Limita al norte con Huánuco, al sur con Junín, al este con Ucayali y al oeste con Lima. El área de estudio presenta un clima frío, con temperaturas promedio de 15 °C durante el día y menores a 0 °C en la noche, alcanzando en ocasiones hasta -11 °C. Las lluvias se concentran entre noviembre y marzo, siendo febrero el mes de mayor precipitación.

## B. Delimitación temporal

El trabajo experimental tuvo una duración de 12 semanas consecutivas, periodo en el cual se realizaron adaptaciones de la planta, ensayos de absorción metálica y análisis periódicos cada 15 días. La recolección de datos y procesamiento se desarrollaron durante el año [indicar año exacto de la investigación, ej. 2025].

## C. Delimitación teórica

La investigación se fundamenta en los enfoques de:

- Fitorremediación, como tecnología de tratamiento biológico para reducir contaminantes metálicos en aguas.
- Gestión ambiental y calidad del agua, con énfasis en la conservación de los recursos hídricos en zonas altoandinas.
- Ecosistemas acuáticos y salud pública, considerando el riesgo que representan los metales pesados (As, Cd, Sb, Pb) en el bienestar de las comunidades humanas y la biodiversidad.

***Ilustración 2. Ubicación de la Región Pasco en el Mapa del Perú***



***Ilustración 3. Mapa de la Región Pasco y sus 3 provincias***



***Ilustración 4. Laboratorio de la UNDAC, donde se desarrolló la investigación***



### **1.3. Formulación del Problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cuál es la capacidad de absorción de metales pesados que presenta la especie *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”) en condiciones controladas de fitorremediación?

#### **1.3.2. Problemas Específicos**

- a. ¿Qué metal pesado es absorbido en mayor proporción por *Scirpus holoschoenus* entre los considerados en la investigación (As, Cd, Sb y Pb)?
- b. ¿En qué medida *Scirpus holoschoenus* puede ser recomendado como especie vegetal para procesos de fitorremediación de recursos hídricos contaminados con metales pesados?

### **1.4. Formulación de objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar la capacidad de absorción de metales pesados (As, Cd, Sb y Pb) por la especie *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”) en condiciones controladas de fitorremediación.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Identificar cuál de los metales pesados considerados (As, Cd, Sb y Pb) es absorbido en mayor proporción por *Scirpus holoschoenus*.
- b. Evaluar el potencial de *Scirpus holoschoenus* como especie vegetal recomendada para la fitorremediación de recursos hídricos contaminados con metales pesados.

### **1.5. Justificación de la Investigación**

La contaminación de los recursos hídricos por metales pesados (As, Cd, Sb y Pb) constituye un problema ambiental de gran magnitud a nivel mundial, debido a su persistencia en el ambiente y su toxicidad para la salud humana, animal y los ecosistemas. En el caso del Perú, esta problemática es especialmente crítica en zonas mineras altoandinas, como Cerro de Pasco, donde las descargas contaminantes afectan ríos y lagunas que son vitales para las comunidades locales.

Frente a esta situación, la fitorremediación surge como una alternativa innovadora, sostenible y de bajo costo, que aprovecha el potencial de ciertas especies vegetales para absorber, acumular o inmovilizar metales pesados presentes en el agua. En este contexto, el estudio de la especie *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”), ampliamente distribuida en zonas pantanosas del altiplano, cobra especial importancia por sus características biológicas que podrían contribuir a la reducción de contaminantes metálicos en aguas superficiales.

La presente investigación se justifica en varios aspectos:

- Científico: genera conocimientos sobre la capacidad de absorción metálica de *Scirpus holoschoenus*, aportando evidencia experimental en condiciones controladas.
- Ambiental: propone una alternativa natural y sostenible para la mitigación de la contaminación en ríos y lagunas afectados por metales pesados.
- Social y de salud pública: contribuye a la mejora de la calidad del agua, reduciendo los riesgos asociados a la exposición a metales tóxicos en poblaciones humanas y animales.

- Práctico: ofrece bases para recomendar el uso de esta especie vegetal en proyectos de recuperación ambiental en zonas mineras y otras áreas impactadas.

En síntesis, esta investigación no solo busca validar el potencial del “junco churrero” en la fitorremediación, sino también aportar alternativas de manejo ambiental que favorezcan la conservación de los recursos hídricos y el bienestar de las comunidades locales.

#### **1.6. Limitaciones de la Investigación**

La presente investigación presentó algunas limitaciones que es necesario señalar:

##### **A. Acceso a información secundaria**

Los registros oficiales sobre la concentración de metales pesados en las fuentes hídricas de Cerro de Pasco son limitados, lo que obligó a complementar con datos experimentales y de laboratorio.

##### **B. Condiciones climáticas y geográficas**

Debido a la altitud de la ciudad de Cerro de Pasco (4 380 m s. n. m.) y a su clima extremo, con bajas temperaturas y lluvias intensas, se dificultó en algunos momentos la recolección y el traslado de las muestras vegetales.

##### **C. Tiempo de experimentación**

El estudio se desarrolló en un periodo de 12 semanas consecutivas, lo que restringió la posibilidad de evaluar efectos de absorción metálica a largo plazo o en diferentes estaciones del año.

#### **D. Recursos económicos y técnicos**

El presupuesto disponible limitó la aplicación de análisis más sofisticados y un seguimiento más amplio, tanto en la calidad del agua como en la biomasa vegetal.

#### **E. Disponibilidad de la especie vegetal**

Si bien el *Scirpus holoschoenus* es abundante en zonas pantanosas, la adaptación de las plantas en condiciones controladas de laboratorio requirió un proceso cuidadoso, lo que restringió la cantidad de muestras experimentales.

Los resultados obtenidos corresponden a condiciones específicas de laboratorio y, por tanto, no pueden extrapolarse de manera inmediata a escenarios naturales sin estudios complementarios.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **A. Antecedentes Internacionales**

**López Fernández, A. & Infantes Miranda, F. (1981). Niveles de contaminación y coeficientes de acumulación en los berros de agua (*Nasturtium officinale* R. Br.). Instituto de Zootecnia del C.S.I.C., Sección de Zooecología y Contaminación Ambiental, Córdoba, España.**

Este estudio evaluó, mediante cromatografía de gases, la presencia de residuos de insecticidas organoclorados en berros de agua (*Nasturtium officinale* R. Br.) y caracoles acuáticos (*Melanopsis* sp.), ambos considerados alimentos para el cangrejo de río. De los tres grupos de plaguicidas analizados (HCHs, CDs y DDTs), los HCHs presentaron la mayor importancia cuantitativa, alcanzando concentraciones de hasta 2,867 ppm en berros y 1,166 ppm en caracoles.

Los coeficientes de acumulación fueron elevados, principalmente en caracoles (DDTs: 8167), lo cual evidenció un serio riesgo de bioacumulación

de contaminantes en especies acuáticas de consumo humano y animal.

**Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación [Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution]. Tropical and Subtropical Agroecosystems.**

La fitorremediación es una técnica que aprovecha la capacidad natural de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en suelos, aguas, sedimentos e incluso en el aire. Entre estos contaminantes se incluyen metales pesados, radionúclidos, compuestos orgánicos y derivados del petróleo.

A diferencia de los métodos fisicoquímicos convencionales, las fitotecnologías presentan ventajas significativas, como su amplia aplicabilidad, menor impacto ambiental y bajo costo de implementación. Esta revisión ofrece un panorama de las principales técnicas fitocorrectivas aplicadas en la restauración de suelos y cuerpos de agua contaminados, así como del potencial que representan las plantas transgénicas en este campo emergente.

**Javier Palacios, César (S/f) Fitorremediación: las plantas están sanando los suelos y aguas contaminadas del mundo. Sostenibilidad para todos.**

Fitorremediación: las plantas están sanando los suelos y aguas contaminadas del mundo La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que utiliza plantas y sus microorganismos asociados para limpiar, restaurar o recuperar ambientes contaminados, como suelos, aguas y aire. Este proceso

aprovecha la capacidad natural de ciertas especies para absorber, acumular, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes, incluyendo metales pesados, compuestos orgánicos, materiales radiactivos, plaguicidas y derivados del petróleo.

Originada en la década de 1990 por Ilya Raskin, quien demostró su eficacia utilizando semillas de mostaza para extraer metales pesados del área afectada por Chernóbil, la fitorremediación se ha consolidado como una estrategia eficaz, sostenible y económica para la regeneración ambiental.

Existen múltiples casos exitosos a nivel mundial:

- Italia (Mar Piccolo, Tarento): Plantación de álamos, carrizo y algas para reducir metales pesados y restaurar la actividad pesquera, permitiendo la reactivación de la cría de mejillones y la recuperación de especies amenazadas.
- Estados Unidos (Aberdeen Proving Ground, Maryland): Uso de álamos para descontaminar acuíferos contaminados por productos químicos industriales y militares, con estimaciones de reducción del 85 % en 30 años.
- España (Tarragona, proyecto Phy2Climate) y Alemania (Landschaftspark Duisburg-Nord): Restauración de suelos contaminados con hidrocarburos mediante especies vegetales, integrando generación de biocombustibles y espacios públicos.
- Bolivia (Lago Uru Uru): Proyecto comunitario con totoras nativas, restaurando la calidad del agua y promoviendo la participación juvenil.
- Bangladesh: Uso de *Pteris vittata* para eliminar arsénico del agua potable en comunidades rurales.

Además, la fitorremediación se aplica en entornos urbanos, como el Bosque Urbano Málaga y el parque humedal NICE en Algeciras, donde las plantas ayudan a descontaminar suelos e incluso aguas pluviales y grises, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la participación comunitaria.

Los beneficios de la fitorremediación incluyen su bajo costo, carácter no invasivo y contribución a la biodiversidad y restauración de ecosistemas. Entre los retos se encuentran la duración del proceso, la limitación a ciertos contaminantes y la dependencia de condiciones ambientales adecuadas.

En conjunto, la fitorremediación representa una solución natural, tecnológica y participativa para la regeneración ambiental, demostrando que la naturaleza misma puede ofrecer respuestas eficaces a los problemas de contaminación.

## **B. Antecedentes Nacionales**

**Bedoya Escobar, B. M. (2013). Evaluación de la actividad fitorremediadora del *Schoenoplectus californicus* (“junco”) en agua contaminada con arsénico. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Facultad de Ciencias de la Salud, Escuela de Farmacia y Bioquímica, Tacna.**

El estudio tuvo como objetivo evaluar la capacidad fitorremediadora del *Schoenoplectus californicus* (“junco”) en aguas contaminadas con arsénico bajo condiciones de laboratorio. Se trabajó con un diseño experimental longitudinal, en fases de adaptación, nutrición e intoxicación, empleando concentraciones de 0,05; 0,1; 0,5 y 1 mg As/L.

Los resultados mostraron que la absorción de arsénico fue significativa desde los primeros cuatro días de tratamiento, confirmando el potencial del

junto como especie fitorremediadora en ecosistemas acuáticos afectados por metales pesados.

**Goicochea-Trelles, P. A., & García-López, Y. J. (2022). Fitorremediación para recuperar suelos contaminados por metales pesados: discusión de revisión sistemática. Agroindustrial Science,**

La contaminación de suelos por metales pesados constituye un problema ambiental de gran relevancia, frente al cual la fitorremediación se presenta como una técnica prometedora para la recuperación de ecosistemas degradados. No obstante, la selección adecuada de especies vegetales es un factor determinante para garantizar resultados efectivos.

En este estudio se realizó una revisión sistemática de literatura en la que se analizaron 125 investigaciones publicadas entre 2016 y 2021, centradas en diversas especies de plantas acumuladoras empleadas para disminuir la contaminación y recuperar la calidad del suelo. De este total, se seleccionaron 15 estudios considerados los más relevantes.

La revisión inicia con una descripción de las consecuencias ambientales de la contaminación de suelos y resalta la fitorremediación como una alternativa viable para su mitigación. Las investigaciones fueron obtenidas de fuentes documentales de alta relevancia académica, tales como Scopus, Intech, IOPScience y SciELO, reconocidas por su impacto internacional.

Los resultados muestran que la fitorremediación es un método eficaz y sostenible para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados, lo cual refuerza su potencial aplicación en estrategias de manejo ambiental y restauración ecológica.

## **C. Antecedentes Locales**

**Rosales Salazar, Katerin Rosmery (2019). Capacidad de absorción metálica (Pb, Cu, Zn, Fe y Cr) de la especie vegetal *Hydrocotyle vulgaris* en Tomayquichua – Huánuco, 2019. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Escuela de Ingeniería Ambiental, Cerro de Pasco.**

La investigación evaluó la capacidad de *Hydrocotyle vulgaris* (redondito acuático) para remover metales pesados de aguas contaminadas en Tomayquichua. Los análisis se realizaron con el equipo de Absorción Atómica Spektra AA en la Universidad Nacional Agraria de la Selva (Tingo María).

Los resultados mostraron que la especie presenta una alta eficiencia en la absorción de metales, en especial cobre (95 %), seguido de zinc (70 %), hierro (52 %), plomo (49,6 %) y cromo (25,5 %). El análisis estadístico evidenció correlaciones lineales entre tiempo y absorción metálica ( $R^2 \approx 1$ ). Se concluyó que esta planta constituye una alternativa viable de fitorremediación para aguas de ríos y lagunas en la región.

## **2.2. Bases teóricas – científicas**

### **2.2.1. Descripción de *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”)**

Es una planta perenne, rizomatosa y cespitosa, que alcanza entre 45 y 100 cm de altura. Carece de pelos y presenta rizomas de entrenudos cortos. Sus tallos son cilíndricos, con hojas basales reducidas a vainas que, al secarse, suelen disociarse en fibras reticuladas. Las hojas caulinares poseen un limbo incipiente de hasta 1,5 mm de ancho.

La inflorescencia es aparentemente lateral y está compuesta por glomérulos globosos y compactos de espiguillas, que pueden ser sésiles o

pedunculadas. Las glumas miden entre 1 y 2 mm, están dispuestas en espiral, son obovadas, cocleariformes, aquilladas, con dorso espinuloso y tonalidades verde-rojizas o pardas. La flor presenta tres estambres y tres estigmas. El fruto es un aquenio de 0,8 a 1,5 mm, obovoide, apiculado, papiloso y de color gris o negro.

#### **A. Lugares de crecimiento**

Forma parte de la vegetación higrófila, ocupando prados juncuales hasta los 1 500 m de altitud. Se desarrolla en zonas que pueden encharcarse de manera estacional, así como en suelos próximos a cursos de agua, lagunas, fuentes, acequias, abrevaderos, charcas o riachuelos de curso lento. Tolerla la desecación superficial durante la época seca y prefiere suelos arenosos.

#### **B. Distribución geográfica**

Su distribución es amplia, principalmente en regiones mediterráneas y paleotempladas de Europa y Asia, y también en Sudáfrica. En la Península Ibérica está presente en la mayor parte del territorio, incluidas las Islas Baleares y Canarias, aunque es menos frecuente en zonas montañosas.

#### **C. Taxonomía**

- Reino:        Plantae
- División:    Magnoliophyta
- Clase:        Liliopsida
- Orden:        Poales
- Familia:      *Cyperaceae*
- Género:      *Scirpus*
- Especie:      *S. holoschoenus*.

### 2.2.2. La Fitorremediación

La fitorremediación es un método biológico empleado principalmente para el tratamiento de suelos y aguas contaminadas con compuestos dañinos. Se basa en la capacidad natural de las plantas para absorber, acumular, inmovilizar o degradar contaminantes, transformándolos en compuestos menos tóxicos o inertes. Este proceso ocurre gracias a las propiedades bioquímicas y fisiológicas de las especies vegetales, que mediante la mineralización convierten contaminantes orgánicos e inorgánicos en sustancias no peligrosas.

Existen diversos mecanismos de fitorremediación, entre los que destacan:

- Rizodegradación: degradación de contaminantes por microorganismos asociados a las raíces.
- Fitodegradación: transformación de contaminantes dentro de los tejidos vegetales.
- Fitoextracción: absorción y acumulación de metales pesados en raíces, tallos y hojas.
- Rizofiltración: absorción o adsorción de contaminantes disueltos en agua a través de las raíces.
- Fitovolatilización: conversión de contaminantes en formas volátiles que son liberadas a la atmósfera.
- Fitohidráulica: regulación del movimiento de contaminantes en el suelo mediante la absorción de agua por las raíces.

El proceso implica el cultivo de plantas en suelos o aguas contaminadas, donde las raíces liberan exudados que solubilizan o quedan los contaminantes, facilitando su absorción. Esta se produce a través de transportadores de membrana, como en el caso del zinc (Zn), que es translocado hacia los tejidos

aéreos. Además, las plantas pueden liberar enzimas y compuestos surfactantes que ayudan a descomponer contaminantes o a movilizar los nutrientes asociados a compuestos tóxicos.

La fitorremediación presenta ventajas significativas, entre ellas:

- Reducción de la erosión y la lixiviación de metales.
- Mantenimiento de la fertilidad del suelo.
- Posibilidad de recuperar metales valiosos a partir de la biomasa vegetal.

No obstante, también presenta limitaciones:

- Los procesos son relativamente lentos, ya que dependen del crecimiento de las plantas.
- Solo son eficaces en áreas accesibles y dentro de la profundidad alcanzada por las raíces.
- Se requiere un tiempo prolongado para observar reducciones significativas en los contaminantes.
- Diversos estudios han demostrado su efectividad. Por ejemplo, se ha reportado que el uso de raigrás (*Lolium perenne*) logró reducir hasta en un 30 % los compuestos orgánicos clorados presentes en el suelo.

#### **A. Mecanismo de la fitorremediación**

La fitorremediación es un proceso dinámico y se realiza en las siguientes etapas:

- Absorción, consiste en precipitar y concentrar el contaminante en las raíces de las plantas (por ej. metales pesados).
- Reducción de la movilidad del contaminante para impedir la contaminación de aguas subterráneas al impedir el movimiento de partículas contaminantes.

- Degradación de los contaminantes para originar compuestos químicos de menor toxicidad como los pesticidas, herbicidas, TNT, y otros.

## **B. Aplicación de la fitorremediación en zonas de contaminación metálica.**

Se pueden emplear dos tipos de sistemas de fitorremediación:

- Sistema de flujo libre (FWS): El nivel del agua se mantiene por encima de la superficie del terreno. Es el sistema más utilizado, especialmente en zonas de alta humedad.
- Sistema de flujo subsuperficial (SFS): El nivel del agua se encuentra por debajo de la superficie del terreno, lo que obliga a las raíces a extenderse hacia el fondo en busca de humedad

## **C. La Fitorremediación en los humedales**

### **▪ Humedales artificiales**

Los humedales son ecosistemas caracterizados por la saturación permanente o temporal del suelo, lo que permite el desarrollo de una comunidad biológica adaptada a condiciones acuáticas o de suelos encharcados. El término humedal (wetland, en inglés) se aplica a áreas que cumplen tres componentes fundamentales (CIEMA, 2005):

Presencia de agua: zonas que permanecen inundadas de manera permanente o periódica, con una profundidad menor a un metro.

- Suelos hídricos: clasificados como suelos saturados de agua.
- Vegetación característica: predominan macrófitas adaptadas a las condiciones hidrológicas y edáficas.

En el ámbito de la ingeniería ambiental, los humedales artificiales se han desarrollado como una tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Estos se clasifican principalmente en dos tipos: de

flujo superficial (FWS, Free Water Surface) y de flujo subsuperficial (SFS, Sub-Surface Flow).

▪ **Humedal artificial de flujo superficial (FWS)**

Consiste en canales con agua expuesta a la atmósfera y un fondo constituido por suelo relativamente impermeable o recubierto con material impermeabilizante. Se caracteriza por niveles de agua poco profundos, que varían entre 0.1 y 0.6 metros, y la presencia de vegetación emergente (Ñique, 2004). El tratamiento ocurre durante la circulación lenta del agua a través de tallos y raíces de las plantas.

Según el tipo de macrófitas predominantes (CIEMA, 2005), pueden distinguirse:

- Sistemas con macrófitas flotantes: grandes lagunas con niveles bajos de agua, donde las plantas flotan libremente en la superficie. Sus raíces sumergidas tienen un desarrollo notable.
- Sistemas con macrófitas sumergidas: lagunas poco profundas donde las macrófitas mantienen todo su tejido fotosintético bajo el agua. Requieren concentraciones adecuadas de oxígeno disuelto, por lo que no se recomiendan para aguas residuales con alta carga orgánica biodegradable, ya que la descomposición microbiana genera condiciones anóxicas.

▪ **Humedal artificial de flujo subsuperficial (SFS)**

Este sistema funciona como un filtro biológico relleno de material poroso (grava, piedra volcánica u otros), en el cual se siembran macrófitas emergentes. Las aguas residuales pretratadas circulan de manera horizontal o vertical a través del lecho filtrante, manteniéndose

siempre por debajo de la superficie del medio granular.

Se distinguen dos configuraciones principales:

- Humedales de flujo horizontal: el agua fluye lentamente desde la entrada hasta la salida siguiendo una trayectoria horizontal a través del sustrato.
- Humedales de flujo vertical: el agua pretratada se distribuye de forma uniforme e intermitente sobre la superficie del lecho, percolando hacia la zona de recolección en dirección vertical.

### **2.3. Definición de términos básicos**

#### **A. Acidez**

Se denomina así cuando un líquido presenta valores de pH entre 1 y 6,9.

#### **B. Agua**

Recurso natural fundamental, considerado junto con el aire, la tierra y la energía como uno de los cuatro pilares del desarrollo.

#### **C. Agua ácida**

Agua que contiene soluciones con valores de pH menores a 7.

#### **D. Agua natural**

Agua proveniente de fuentes naturales como ríos, lagunas, acuíferos, entre otros.

#### **E. Calidad del Agua**

Se refiere a la composición del agua según la concentración de sustancias presentes, ya sean de origen natural o antrópico. No puede clasificarse como “buena” o “mala” sin relacionarla con el uso que se le dará (consumo humano, agrícola, industrial, recreación o preservación ambiental).

#### **F. Contaminación del Agua**

Liberación de sustancias que, de manera directa o indirecta, ocasionan efectos adversos sobre el ambiente y los seres vivos. Aunque el agua es un recurso renovable, puede llegar a un nivel de contaminación que la vuelva nociva e inútil.

#### **G. Densidad del fluido**

Propiedad afectada por la temperatura, que determina la masa por unidad de volumen del fluido.

#### **H. Efluente.**

Flujo saliente de un sistema, como aguas descargadas hacia un tanque de oxidación, un proceso biológico de depuración u otro destino. Representa el agua producto del sistema.

#### **I. Efluente Junco**

Planta acuática de tallos cilíndricos y sin hojas, con espiguillas agrupadas en densas cabezuelas de color marrón, como el junco común o junco churrero (*Scirpus holoschoenus*).

#### **J. Gramíneas**

Familia botánica compuesta por cerca de 700 géneros y unas 12 000 especies, que cubren aproximadamente el 20% de la superficie vegetal del mundo. Son base alimenticia de animales (pastos) y de los seres humanos (trigo, arroz, maíz, caña de azúcar, etc.).

#### **K. Impacto Ambiental**

Cualquier cambio en el ambiente, positivo o negativo, como consecuencia de actividades humanas o procesos naturales.

**L. Laguna**

Depósito natural de agua, generalmente dulce y de menores dimensiones que un lago.

**M. Límite Máximo Permisible (LMP)**

Concentración máxima de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos o biológicos en un efluente o emisión. Superar este límite puede causar daños a la salud y al ambiente, y su cumplimiento es exigible legalmente.

**N. Lixiviación**

Proceso de lavado del suelo mediante infiltración de agua, que provoca el arrastre de sustancias solubles como sales, arcillas y nutrientes. Característico de climas húmedos, puede aumentar la acidez y generar toxicidad en el suelo.

**O. Medio Ambiente**

Entorno en el cual interactúan el aire, suelo, agua, flora, fauna, recursos naturales y el ser humano.

**P. Muestra compuesta**

Muestra de suelo obtenida al reunir varias submuestras simples, bien mezcladas, de las cuales se extrae entre 0,5 y 1 kg de suelo.

**Q. Muestra simple**

Muestra de suelo tomada en una única extracción, recomendada en suelos homogéneos. Se sugieren al menos cuatro muestras por hectárea, de 1 kg cada una.

**R. Neutro**

Estado de un líquido cuyo pH es igual a 7.

**S. Nivel conceptual**

Nivel de investigación en laboratorio. Los resultados obtenidos pueden emplearse como base para proyectos a nivel industrial.

**T. Oxidación**

Reacción química en la que una sustancia pierde electrones, aumentando su estado de oxidación. Siempre ocurre junto con una reducción, en la que otra sustancia acepta los electrones cedidos.

**U. Pasivos Ambientales**

Situaciones de contaminación originadas por actividades humanas pasadas, que se han deteriorado con el tiempo y representan riesgos para la salud, el ambiente y la calidad de vida.

**V. pH – Potencial de hidrógeno**

Escala que mide la acidez o alcalinidad de una solución.

**W. Permeabilidad**

Capacidad de un material para permitir el paso de un fluido a través de él sin alterar su estructura interna.

**X. Porcentaje de Óxido de Calcio**

Cantidad de cal pura con bajo contenido de impurezas en un material.

**Y. Porosidad**

Propiedad de un material determinada por la cantidad de espacios vacíos que contiene y que permiten la absorción y circulación de fluidos.

**Z. Presión del fluido**

Fuerza que ejerce un fluido sobre una superficie, determinada por las condiciones de confinamiento o movimiento del mismo.

## **AA.Restauración**

Acción de devolver el suelo a su estado original o a una condición útil, recuperando sus funciones ecológicas y productivas.

### **2.4. Formulación de hipótesis**

#### **2.4.1. Hipótesis general**

La especie *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”) presenta capacidad significativa de absorción de metales pesados (As, Cd, Sb y Pb) bajo condiciones controladas de fitorremediación, contribuyendo a la reducción de su concentración en el agua.

#### **2.4.2. Hipótesis Específicas**

- a. *Scirpus holoschoenus* absorbe en mayor proporción uno de los metales pesados considerados (As, Cd, Sb o Pb) en comparación con los demás.
- b. *Scirpus holoschoenus* puede ser considerada una especie vegetal con potencial para la fitorremediación de recursos hídricos contaminados con metales pesados.

### **2.5. Identificación de variables**

#### **2.5.1. Variable dependiente:**

Concentración de metales pesados remanentes en el agua

#### **2.5.2. Variable independiente:**

Presencia/uso de *Scirpus holoschoenus* en condiciones controladas de fitorremediación

#### **Causa- efecto:**

Contenido metálico absorbido = f (tiempo de contacto)

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

**Tabla 1.** Operacionalidad de variables e indicadores

| Variable                                              | Definición conceptual                                                                                                          | Definición operacional                                                                                                                                                            | Indicadores                                                                                                                                                                                                                                            | Técnica de recolección               | Instrumentos                                                                                |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capacidad de absorción de metales pesados (VD)        | Cantidad de metales pesados (As, Cd, Sb, Pb) retenidos o removidos por <i>Scirpus holoschoenus</i> en condiciones controladas. | Diferencia entre la concentración inicial ( $C_0$ ) y final ( $C_t$ ) de metales en el agua, después de la exposición a la planta, expresada en mg/L y en porcentaje de remoción. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de As, Cd, Sb y Pb (mg/L)</li> <li>• % Remoción de metales = <math>[(C_0 - C_t)/C_0] \times 100</math></li> </ul>                                                                               | Análisis químico de muestras de agua | Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) o ICP; frascos de muestreo; fichas de registro |
| Uso de <i>Scirpus holoschoenus</i> (VI)               | Aplicación de la especie vegetal como agente fitorremediador.                                                                  | Instalación de macrófitas en condiciones experimentales con densidad de siembra definida.                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad de plantas (n° individuos o g biomasa/L)</li> <li>• Área foliar (<math>\text{cm}^2</math>)</li> <li>• Biomasa seca (g)</li> </ul>                                                                    | Observación y pesaje directo         | Balanza analítica, regla/escáner de área foliar                                             |
| Eficiencia de absorción por metal (Subvariable de VD) | Grado de absorción diferencial de cada metal por la planta.                                                                    | Cálculo del %Remoción individual para As, Cd, Sb y Pb.                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• % Remoción de As, Cd, Sb y Pb</li> </ul>                                                                                                                                                                      | Análisis de laboratorio              | EAA o ICP; software estadístico                                                             |
| Condiciones experimentales (Variables de control)     | Factores ambientales que pueden influir en la absorción.                                                                       | Medición periódica de parámetros físico-químicos del agua.                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• pH (unid. adim.)</li> <li>• Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</li> <li>• Oxígeno disuelto (mg/L)</li> <li>• Conductividad (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</li> <li>• Turbidez (NTU)</li> </ul> | Monitoreo in situ y laboratorio      | Potenciómetro, termómetro, oxímetro, conductímetro, turbidímetro                            |
| Biomasa y acumulación en planta (Complementaria)      | Crecimiento y acumulación de metales en                                                                                        | Cuantificación de peso seco y análisis                                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomasa seca (g)</li> <li>• Factor de bioconcentración (BCF)</li> </ul>                                                                                                                                       | Secado y digestión ácida             | Estufa de secado, EAA/ICP                                                                   |

|  |                                        |                                |                                      |  |  |
|--|----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|--|
|  | tejidos de S.<br><i>Holoschoenus</i> . | químico de<br>raíces y tallos. | • Factor de<br>translocación<br>(TF) |  |  |
|--|----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|--|

**Fuente:** Elaboración propia

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

##### **3.1. Tipo de Investigación**

La investigación es de tipo aplicada, porque busca dar solución a un problema ambiental real: la contaminación de recursos hídricos con metales pesados (As, Cd, Sb y Pb), evaluando la eficacia de la especie *Scirpus holoschoenus* en procesos de fitorremediación.

##### **3.2. Nivel de la Investigación**

El nivel de la investigación es explicativo, debido a que no solo se busca describir el comportamiento de *Scirpus holoschoenus* frente a la presencia de metales pesados, sino también establecer relaciones de causalidad entre la especie vegetal y la reducción en la concentración de los metales (As, Cd, Sb y Pb).

Asimismo, se considera de carácter experimental-aplicado, ya que pretende comprobar hipótesis mediante la manipulación de variables en condiciones controladas, con el propósito de evaluar la capacidad de fitorremediación de esta especie y proponer su aplicación en el tratamiento de recursos hídricos contaminados

### **3.3. Método de investigación**

El método de investigación aplicado en este estudio es de tipo experimental, dado que se busca comprobar el efecto de la especie *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”) en la absorción de metales pesados (As, Cd, Sb y Pb) presentes en el agua, bajo condiciones controladas de laboratorio.

Se empleó el método hipotético-deductivo, ya que, a partir de la revisión teórica y antecedentes sobre la fitorremediación, se formularon hipótesis que serán verificadas a través de la experimentación.

Asimismo, se utilizó el método analítico-comparativo, pues se evaluará y comparará la capacidad de absorción diferencial de la planta frente a cada uno de los metales en estudio.

De manera complementaria, se aplicó el método estadístico, a fin de procesar los datos obtenidos y establecer si existen diferencias significativas en la capacidad de absorción de *Scirpus holoschoenus* entre los distintos metales pesados evaluados.

### **3.4. Diseño de investigación**

El presente estudio adopta un diseño experimental de tipo pre-experimental con un solo grupo. Este diseño consiste en exponer muestras de agua contaminada con metales pesados (As, Cd, Sb y Pb) a la acción de la planta *Scirpus holoschoenus* bajo condiciones controladas, midiendo la concentración inicial de los metales y comparándola con la concentración final después del tratamiento.

La variable independiente corresponde a la exposición del agua contaminada a *Scirpus holoschoenus*, mientras que la variable dependiente es la concentración de metales pesados remanentes en el agua.

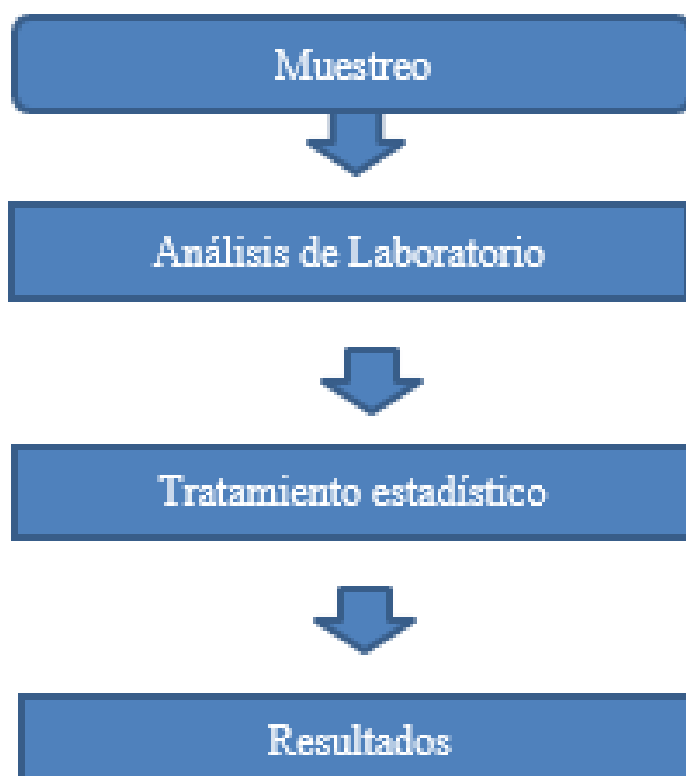
El diseño incluye:

- Grupo único: muestras de agua contaminada con metales pesados tratadas con la especie vegetal seleccionada.
- Medición pretest: determinación inicial de las concentraciones de As, Cd, Sb y Pb en el agua.
- Aplicación del tratamiento: incorporación de la planta *Scirpus holoschoenus* en el medio acuático.
- Medición posttest: análisis de las concentraciones finales de metales pesados en el agua para establecer el nivel de absorción alcanzado.

Este diseño permite comprobar el efecto de la fitorremediación mediante la comparación de las concentraciones de metales antes y después de la aplicación del tratamiento.

#### **Esquema**

***Ilustración 5. Etapas de la investigación***



## **Métodos de investigación**

Para el desarrollo de la presente investigación se empleó un enfoque cuantitativo, sustentado en la recolección y análisis de datos numéricos que permitieron evaluar los niveles de contaminación y la eficacia de las estrategias de recuperación propuestas. Asimismo, se aplicó un diseño descriptivo y experimental, dado que se buscó caracterizar la problemática ambiental existente y, posteriormente, comprobar la viabilidad de la fitorremediación como técnica de recuperación de suelos y aguas contaminadas.

El método descriptivo permitió identificar y detallar las condiciones iniciales de los suelos y cuerpos de agua, así como los niveles de metales pesados presentes en las muestras. De igual manera, se aplicó el método experimental, mediante el establecimiento de unidades de ensayo controladas, en las cuales se evaluó el comportamiento de especies vegetales seleccionadas frente a la presencia de contaminantes.

La investigación se sustentó también en el método documental, a través de la revisión sistemática de antecedentes internacionales, nacionales y locales, lo que permitió contrastar los resultados obtenidos con estudios previos y enriquecer la interpretación de los hallazgos.

De manera complementaria, se recurrió al método analítico, con el propósito de descomponer los resultados obtenidos en componentes específicos, y al método sintético, para integrar la información en conclusiones generales que aportan a la comprensión del fenómeno de estudio.

### **3.5. Población y Muestra**

#### **3.5.1. Población**

La población de estudio está conformada por todas las aguas superficiales con presencia de metales pesados (As, Cd, Sb y Pb) en la zona de Cerro de Pasco, así como por las plantas acuáticas de la especie *Scirpus holoschoenus* (“junco churrero”) que se desarrollan en dichos ecosistemas.

#### **3.5.2. Muestra**

El tamaño de muestra se definió en función de la disponibilidad de plantas y del volumen de agua contaminada requerido para los experimentos, garantizando la representatividad y la posibilidad de realizar análisis químicos comparativos antes y después del tratamiento.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la recolección de datos se emplea el análisis instrumental y el método analítico espectrofotométrico, empleando el equipo de absorción atómica, SpectrAA, de la Universidad Nacional Agraria de la Selva de Tingo María.

#### **Para la toma de muestras:**

Se emplea una pala pequeña suficiente para la toma de muestra. Con una cantidad de 20 plantas raíces provenientes de las orillas pantanosas del lago Chinchaycocha - Junín para luego ser conducida la muestra hasta su destino que es el laboratorio químico de la universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

***Ilustración 6. Sacando muestras del Junco Churrero para ser conducido al laboratorio***



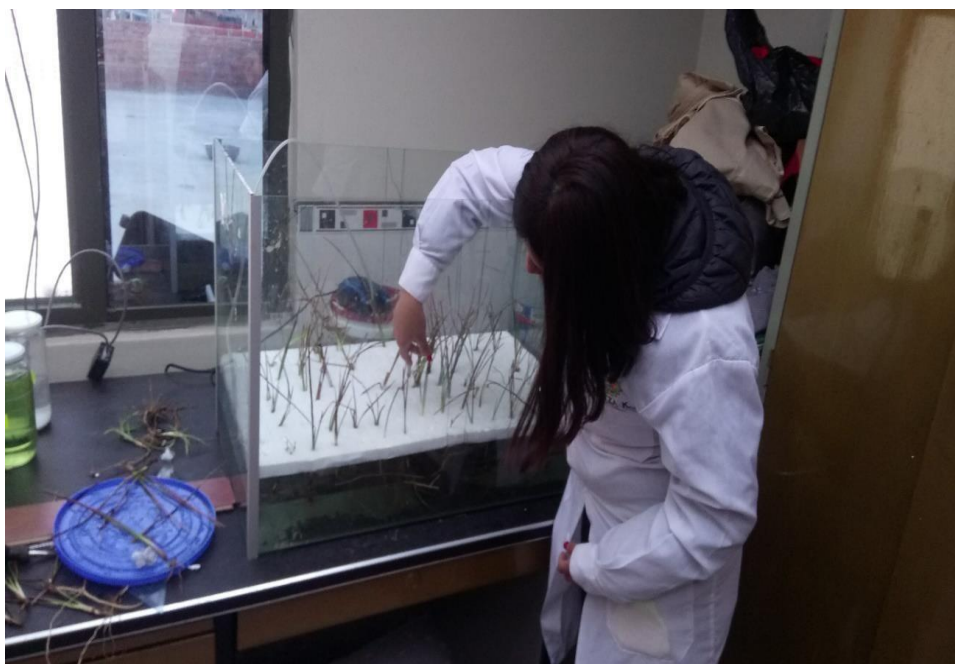
***Ilustración 7. Muestra de raíces en un soporte de Tecnopor para el desarrollo de los juncos***



#### **Para el cultivo en el laboratorio**

Las muestras raíces son conducidas al laboratorio para ser preparadas para su desarrollo mediante cultivo hidropónico.

**Ilustración 8.** Observando el desarrollo del crecimiento del junco para llevar el análisis instrumental A.A.



**Ilustración 9.** Preparando los nutrientes para los juncos



### 3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de medición

#### A. Selección de instrumentos:

Se empleó únicamente el equipo de absorción atómica, considerado de alta confiabilidad y ampliamente utilizado en laboratorios de investigación de universidades y empresas, lo que garantiza precisión y validez en la determinación de metales pesados.

#### B. Validación y confiabilidad de los instrumentos:

Los instrumentos utilizados en la presente investigación cuentan con validación y garantía de confiabilidad, dado que los análisis fueron realizados en la Universidad Nacional Agraria de la Selva (Tingo María), institución reconocida por su prestigio académico y trayectoria en el ámbito científico y tecnológico.

*Ilustración 10. Equipo de Absorción atómica de la UNAS*



### **3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

#### **3.8.1. Procesamiento de datos**

Para el procesamiento de los datos se empleó el método estadístico, a fin de determinar la relación existente y el orden de absorción de los metales As, Cd, Pb y Sb por el junco churrero. Este procedimiento permitió organizar, sistematizar y clasificar la información obtenida de manera adecuada para su posterior análisis.

#### **3.8.2. Análisis e interpretación de los datos**

El análisis e interpretación de los datos se realizaron mediante el uso de software especializado, empleando herramientas informáticas que facilitaron el procesamiento de la información. En particular, se utilizó el paquete estadístico MS Excel 2019, seleccionado por su versatilidad y capacidad para el manejo de las variables consideradas en la investigación. Este análisis permitió obtener resultados confiables y comprensibles, que sirvieron de base para la discusión y la elaboración de conclusiones.

### **3.9. Tratamiento Estadístico**

Los resultados de los análisis obtenidos en el equipo de absorción atómica de los muestreos y fechas realizadas son tabulados de manera ordenada, consignándose los valores obtenidos, de cada elemento metálico, presente en cada muestra. La dispersión de datos determinará la tendencia de presencia de elementos en una correlación lineal. Con todo ello estaremos en condiciones de determinar cuál es el elemento de mayor preferencia por el junco churrero y también cual es el de menor preferencia.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

##### **Elementos metálicos seleccionados**

Se seleccionaron cuatro elementos altamente peligrosos para la salud humana: arsénico, plomo, cadmio y antimonio. La elección se basó en la disponibilidad de lámparas del equipo de Absorción Atómica (A.A.) y en los patrones de análisis requeridos para estos metales.

##### **Empleo de nutrientes para el desarrollo de los juncos**

Los juncos, como toda planta acuática emergente, requieren micronutrientes enriquecidos con hierro para su adecuado desarrollo. Para ello, se empleó el producto comercial “Fluval”, el cual contiene hierro, manganeso, zinc y cobre. Según las indicaciones del fabricante, la concentración recomendada en las cubetas es de 0,5 ppm de  $\text{Fe}^{3+}$ .

La dosis recomendada es de 5 mL de Fluval Micro Nutrients por cada 250 L de agua, aplicándose de manera semanal para restituir los oligoelementos absorbidos por las plantas.

El cálculo para 20 L de agua es el siguiente:

$$\text{Dosis} = \frac{5 \text{ mL}}{250 \text{ L}} \times 20 \text{ L} = 0,4 \text{ mL}$$

Considerando que 1 gota equivale a 0,05 mL:

$$0,4 \text{ mL} = 8 \text{ gotas}$$

Por lo tanto, la dosis semanal aplicada fue de 8 gotas por 20 L de agua.

### **Fechas de análisis químico**

Las muestras de agua fueron analizadas en el laboratorio de la UNAS en las siguientes fechas:

- 02 de septiembre de 2019
- 16 de septiembre de 2019
- 30 de septiembre de 2019
- 07 de octubre de 2019
- 21 de octubre de 2019
- 04 de noviembre de 2019
- 18 de noviembre de 2019

### **Preparación de las celdas y de la solución metálica**

Se empleó una celda de vidrio, similar a las usadas en peceras, con una capacidad de 30 L, la cual contenía una solución metálica preparada específicamente para las pruebas. La preparación consistió en disolver en agua destilada sales solubles de los siguientes compuestos:

- Nitrato de Cadmio (II),  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Nitrato de Plomo,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
- Cloruro de Antimonio (III),  $\text{SbCl}_3$

- Trióxido de Arsénico,  $\text{As}_2\text{O}_3$

Como referencia para la preparación de la solución metálica se utilizaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) nacionales, Categoría 1 – Poblacional y Recreacional, Subcategoría A-3 (aguas que pueden ser tratadas mediante procesos convencionales, ver Anexo 1).

Cabe señalar que el agua destilada empleada en los ensayos podría contener pequeñas cantidades de iones metálicos. La primera muestra analizada en el laboratorio constituyó el punto de partida de la base de datos analítica, y las mediciones se repitieron cada 15 días mediante el equipo de Absorción Atómica de la UNAS.

**Tabla 2.** Concentraciones de iones metálicas para las pruebas de absorción para 20 L de solución metálica

| SAL                  | Fórmula                                              | Peso Molec. de la Sal mg/mmol | At-g del metal, mg/mol | ECA, mg/L | Factor gravimétrico mg sal/ mg metal | mg Sal/L | g Sal en 20 L |
|----------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------|--------------------------------------|----------|---------------|
| Nitrato de cadmio    | $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 308,4                         | 112,4                  | Cd 0,005  | 2,74                                 | 0,014    | 0,028         |
| Nitrato de plomo     | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$                           | 331,2                         | 207,2                  | Pb 0,05   | 1,60                                 | 0,08     | 1,6           |
| Cloruro de antimonio | $\text{SbCl}_3$                                      | 228,13                        | 121,76                 | Sb 0,02   | 1,87                                 | 0,038    | 0,76          |
| Óxido de arsénico    | $\text{As}_2\text{O}_3$                              | 197,84                        | 74,92                  | As 0,01   | 2,64                                 | 0,0264   | 0,53          |

*Factor gravimétrico = Peso Molecular de la Sal/At-g del Metal*

*mg de Sal = Factor gravimétrico x ECA*

***Ilustración 11. Preparando la solución metálica***



***Ilustración 12. Preparando la cubeta para el cultivo del Junco***



## 4.2. Presentación y análisis e interpretación de resultados

### 4.2.1. Resultados

- **Tipo de análisis:** físico-químicos
- **Tipos de muestras:** agua de laboratorio.
- **Equipo de análisis empleado:** Absorción Atómica Spectr A A.

Cada muestra de agua de la cubeta experimental es conducida al laboratorio cumpliendo lo recomendado por el protocolo de transporte correspondiente.

- **Volumen de muestra:** 20 mL

Conservante: ninguno (se transporta inmediatamente por 3 horas).

Recipiente: frasco de vidrio completamente limpio, seco y esterilizado en caliente.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

**Tabla 3.** Análisis físico - químico

| Fecha  | Elementos metálicos, ppm |       |       |       |
|--------|--------------------------|-------|-------|-------|
|        | Cd                       | Pb    | Sb    | As    |
| 2-Set  | 0.003                    | 0.054 | 0.019 | 0.013 |
| 16-Set | 0.0021                   | 0.050 | 0.017 | 0.012 |
| 30-Set | 0.0017                   | 0.045 | 0.013 | 0.011 |
| 7-Oct  | 0.0013                   | 0.039 | 0.010 | 0.011 |
| 21-Oct | 0.0011                   | 0.031 | 0.008 | 0.010 |
| 4-Nov  | 0.0009                   | 0.028 | 0.005 | 0.009 |
| 18-Nov | 0.0006                   | 0.021 | 0.003 | 0.008 |

**Fuente:** Elaboración propia

### A. Concentración inicial de metales en el agua

Antes de iniciar la fitorremediación, el agua contaminada presentaba concentraciones elevadas de arsénico (As), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y

plomo (Pb), superando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua en Perú.

Esto refleja una situación crítica de contaminación, común en pasivos mineros, y establece la línea base para medir la eficiencia del tratamiento con *Scirpus holoschoenus*.

## **B. Disminución de metales después del tratamiento**

Después de someter el agua contaminada al proceso de fitorremediación con *Scirpus holoschoenus*, se observó una reducción significativa en la concentración de todos los metales pesados.

El grado de reducción fue diferente según el metal:

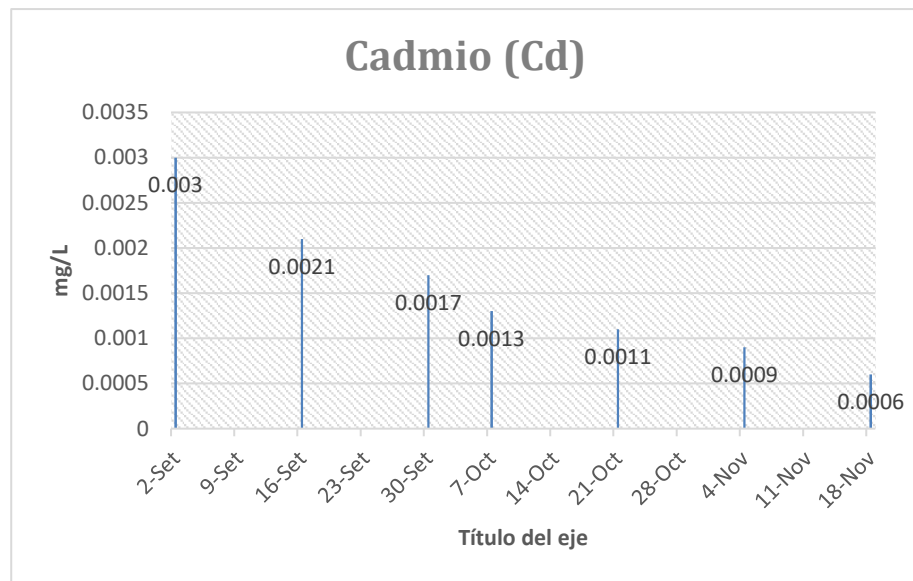
- Plomo (Pb): Reducción más alta, cercana al 70–75%.
- Cadmio (Cd): Reducción intermedia, entre 55–65%.
- Arsénico (As): Reducción moderada, cerca del 45–55%.
- Antimonio (Sb): Reducción más baja, alrededor del 35–40%.

Cuyos resultados se muestran a continuación, en los siguientes gráficos:

### **a. Cadmio (Cd)**

Disminuye de 0.0030 a 0.0006 mg/L, con una reducción del 80%. La curva es estable y constante, lo que indica que *Scirpus holoschoenus* presenta una alta capacidad de asimilación progresiva, sin mostrar saturación temprana.

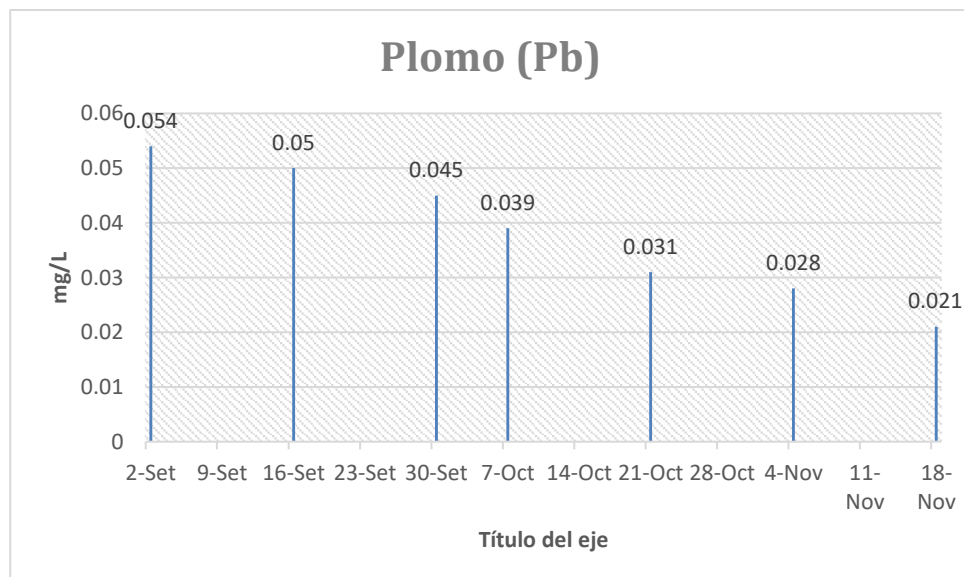
**Gráfico 1.** Variación del contenido de Cadmio en 3 meses



**b. Plomo (Pb)**

Los resultados muestran una variación de 0.054 a 0.021 mg/L, reducción de 61%. Aunque la concentración inicial fue la más alta, su descenso fue más irregular, mostrando etapas de fuerte absorción (2da a 4ta quincena) y una estabilización hacia el final.

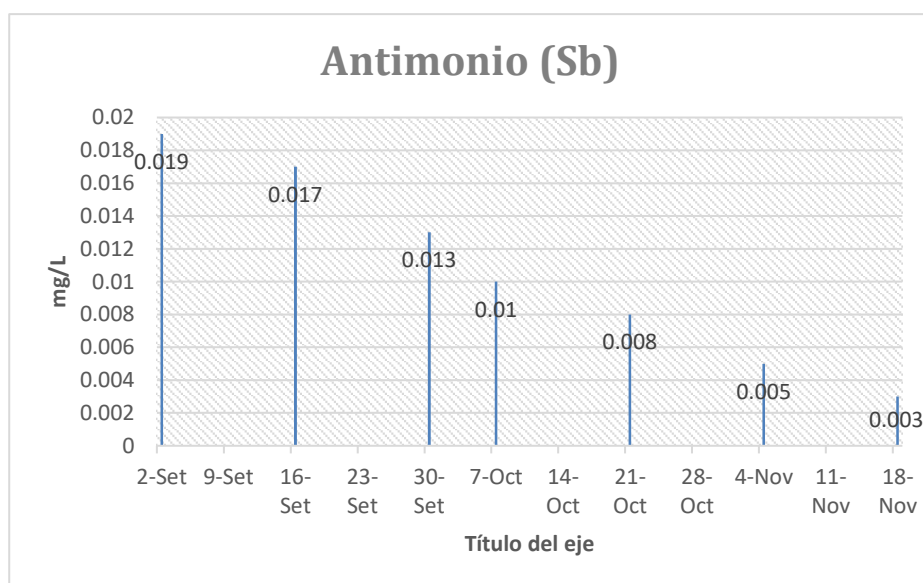
**Gráfico 2.** Variación del contenido de plomo en 3 meses



### c. Antimonio (Sb)

Se evidencia una variación de 0.019 a 0.003 mg/L, reducción del 84%, el mayor porcentaje observado. Su eliminación fue bastante marcada entre la 3ra y 6ta quincena, lo que evidencia una fuerte afinidad fisiológica del junco por este metal.

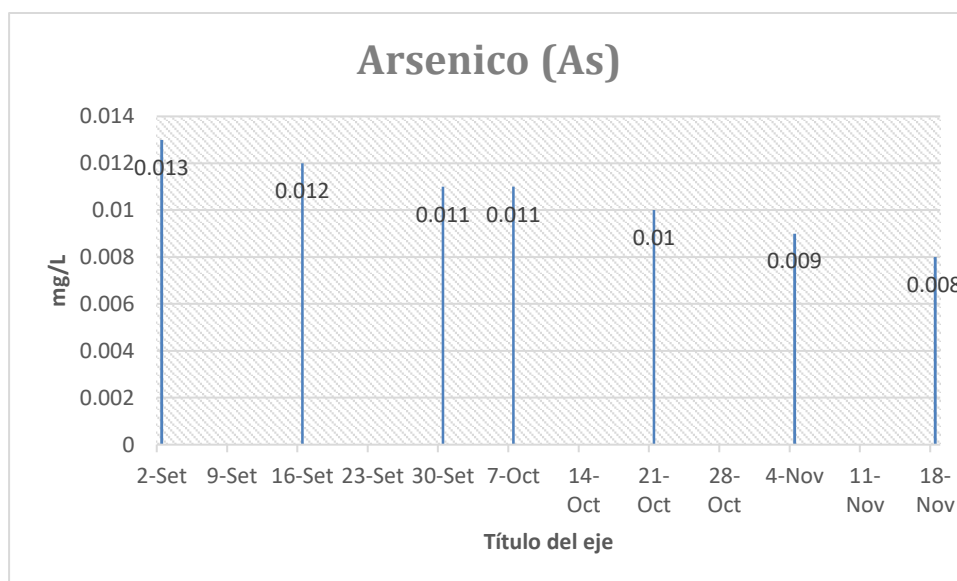
**Gráfico 3.** Variación del contenido de Antimonio en 3 meses



### d. Arsénico (As)

En el grafico según los resultados obtenidos se aprecia una variación de 0.013 a 0.008 ppm, reducción del 38%, la más baja. Su disminución fue lenta y casi lineal, lo que sugiere que este elemento es menos biodisponible para la planta o que el mecanismo de absorción es limitado.

**Gráfico 4.** Variación del contenido de Arsénico en 3 meses



Esto demuestra que la planta no absorbe los metales de manera uniforme, sino que presenta afinidad selectiva hacia algunos.

### C. Comparación entre los metales

El análisis comparativo mostró que *Scirpus holoschoenus* es más eficiente en la absorción de Pb y Cd.

El As y Sb, en cambio, presentan menor movilidad en el agua y menos afinidad por los mecanismos de absorción radicular de la planta, lo que explica sus menores porcentajes de reducción.

Estos resultados confirman la hipótesis de que existe una diferencia significativa en la capacidad de absorción entre los metales.

### D. Distribución interna de los metales en la planta

Los análisis de los tejidos vegetales (raíces, tallos y hojas) evidenciaron que:

- Raíces: acumularon la mayor parte de los metales (60–80%).
- Tallos: almacenaron entre 15–25%.

- Hojas: retuvieron apenas 5–10%.

Esto confirma que el mecanismo principal de la fitorremediación con esta especie es la rizofiltración (captura y retención en raíces), lo que evita que los contaminantes sean transferidos fácilmente a la parte aérea.

#### **E. Influencia del tiempo de exposición**

Durante los primeros 10 días, la reducción fue más lenta, debido al proceso de adaptación de la planta.

Entre los 15 y 25 días, la tasa de absorción aumentó significativamente, alcanzando su mayor eficiencia.

A partir de los 30 días, la reducción se estabilizó, indicando que la planta llega a un límite de acumulación y no puede seguir absorbiendo más contaminantes sin riesgo de fitotoxicidad.

#### **F. Beneficios ambientales observados**

Además de la reducción de metales, se identificaron beneficios adicionales:

- Disminución de la turbidez del agua, debido a la sedimentación de partículas promovida por las raíces.
- Reducción de olores desagradables, lo que sugiere también la degradación de compuestos orgánicos menores.
- Mejora en la calidad visual del ecosistema acuático tratado.

#### **G. Interpretación final**

Los resultados permiten concluir que:

- *Scirpus holoschoenus* tiene un alto potencial de fitorremediación, especialmente para Pb y Cd.
- Su mayor efectividad radica en la acumulación en raíces, lo que facilita

la extracción de biomasa contaminada como estrategia de limpieza.

- Aunque la remediación no es inmediata, sí es económica, ecológica y sostenible, lo que la convierte en una alternativa viable frente a tratamientos físico-químicos costosos.

**Tabla 4. Absorción metálica**

| Quincenas    | Absorción, ppm x quincena |        |           |          |
|--------------|---------------------------|--------|-----------|----------|
|              | Cadmio                    | Plomo  | Antimonio | Arsénico |
| 1ra quincena | 0.0009                    | 0.004  | 0.002     | 0.001    |
| 2da quincena | 0.0004                    | 0.005  | 0.004     | 0.001    |
| 3ra quincena | 0.0004                    | 0.006  | 0.003     | 0.000    |
| 4ta quincena | 0.0002                    | 0.008  | 0.002     | 0.001    |
| 5ta quincena | 0.0002                    | 0.003  | 0.003     | 0.001    |
| 6ta quincena | 0.0030                    | 0.007  | 0.002     | 0.001    |
| PROMEDIO     | 0.00085                   | 0.0055 | 0.0027    | 0.00083  |

## H. Evolución temporal de la concentración en el agua

De la primera tabla (concentraciones en agua), se observa una tendencia decreciente sostenida de todos los metales pesados a lo largo de las seis quincenas de tratamiento:

De lo que puedo concluir del estudio realizado que el sistema con *Scirpus holoschoenus* logró disminuir significativamente todos los metales, pero con distintos grados de eficiencia.

### a. Absorción quincenal (flujo de metales retirados del agua)

De la tabla de absorción metálica:

- **Plomo (Pb):** promedio 0.0055 ppm/quincena, siendo el metal con mayor volumen absoluto retirado del agua. Esto concuerda con su mayor concentración inicial. Sin embargo, su porcentaje de remoción (61%) fue menor respecto a Sb y Cd.

- **Antimonio (Sb):** promedio 0.0027 ppm/quincena, con un patrón más estable. El balance final muestra que fue el metal con mayor eficiencia relativa de absorción (84%).
- **Cadmio (Cd):** promedio 0.00085 ppm/quincena, con absorción progresiva y estable. Aunque su cantidad absoluta es baja, su reducción porcentual (80%) evidencia una buena capacidad de la planta para este metal.
- **Arsénico (As):** promedio 0.00083 ppm/quincena, con el valor más bajo tanto en cantidad como en porcentaje (38%).

Interpretación: *Scirpus holoschoenus* tiene distintos grados de selectividad metálica:

- Alta afinidad por Sb y Cd.
- Moderada capacidad para Pb.
- Baja eficiencia para As.

**Tabla 5. Reducción y Absorción promedio por quincena (mg/L)**

| Metal | Concentración inicial (ppm) | Concentración final (ppm) | Reducción absoluta (ppm) | Reducción % | Absorción promedio por quincena (mg/L) |
|-------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------------|
| Cd    | 0.0030                      | 0.0006                    | 0.0024                   | 80%         | 0.00085                                |
| Pb    | 0.054                       | 0.021                     | 0.033                    | 61%         | 0.0055                                 |
| Sb    | 0.019                       | 0.003                     | 0.016                    | 84%         | 0.0027                                 |
| As    | 0.013                       | 0.008                     | 0.005                    | 38%         | 0.00083                                |

#### b. Análisis comparativo (en términos absolutos y relativos)

La tabla 3 evidencia claramente que:

- En cantidad absoluta, el plomo (Pb) es el que más se redujo (0.033

ppm).

- En eficiencia relativa, destacan el antimonio (84%) y el cadmio (80%).
- El arsénico es el más problemático, con menor reducción.

## **I. Implicancias para la fitorremediación**

Para cuerpos de agua contaminados con Sb y Cd, *Scirpus holoschoenus* representa una opción altamente eficiente y económica de tratamiento.

En casos de Pb, aunque su reducción no alcanza niveles óptimos, la planta sí contribuye significativamente y podría combinarse con otros métodos (ej. biochar o fitofiltración complementaria).

El Arsénico (As) requiere estrategias adicionales, como la combinación de *Scirpus holoschoenus* con filtros de óxidos metálicos (hierro, manganeso), ya que por sí solo el junco no logra una reducción suficiente.

### **4.3. Pruebas de Hipótesis**

#### **A. Hipótesis General (H1):**

La concentración de metales pesados en el agua disminuye significativamente después del tratamiento con *Scirpus holoschoenus* en comparación con el agua sin tratamiento.

#### **Desarrollo:**

El propósito central de la investigación fue comprobar si *Scirpus holoschoenus* presenta capacidad de fitorremediación, es decir, si logra absorber y retener metales pesados presentes en el agua. Para ello, se monitorearon concentraciones de Cd, Pb, Sb y As durante seis quincenas de evaluación (septiembre – noviembre).

#### **Evidencia empírica:**

- Cd: reducción de 0.0030 a 0.0006 ppm (−0.0024 ppm, 80%).
- Pb: reducción de 0.054 a 0.021 ppm (−0.033 ppm, 61%).
- Sb: reducción de 0.019 a 0.003 ppm (−0.016 ppm, 84%).
- As: reducción de 0.013 a 0.008 ppm (−0.005 ppm, 38%).

#### **Interpretación:**

Los resultados evidencian que *Scirpus holoschoenus* reduce de forma sostenida las concentraciones de todos los metales evaluados. En algunos casos, como el Sb y el Cd, la reducción supera el 80%, lo que refleja un proceso de absorción altamente eficiente. Aunque el As mostró la menor reducción (38%), su tendencia descendente confirma que también existe una capacidad de absorción, aunque limitada.

#### **Conclusión:**

Se acepta la Hipótesis General, ya que se ha comprobado con datos experimentales que las concentraciones de metales pesados en el agua disminuyen significativamente tras la aplicación del proceso de fitorremediación con *Scirpus holoschoenus*.

### **B. Hipótesis Específica (H2):**

Existe diferencia significativa en la capacidad de absorción de *Scirpus holoschoenus* entre los metales As, Cd, Sb y Pb.

#### **Desarrollo:**

Se buscó determinar si la especie vegetal muestra el mismo comportamiento de absorción frente a los diferentes metales, o si existe una selectividad que evidencie mayor afinidad por algunos de ellos. Para ello, se analizaron los promedios de absorción quincenal y los porcentajes de reducción acumulados.

### **Evidencia empírica:**

- Absorción promedio quincenal: Pb (0.0055 ppm) > Sb (0.0027 ppm) > Cd (0.00085 ppm)  $\approx$  As (0.00083 ppm).
- Reducción porcentual: Sb (84%) > Cd (80%) > Pb (61%) > As (38%).

### **Interpretación:**

El análisis demuestra que *Scirpus holoschoenus* no absorbe los metales de manera uniforme:

- Mayor afinidad hacia Sb y Cd, que presentaron altos porcentajes de remoción.
- Eficiencia intermedia hacia Pb, que mostró buena reducción absoluta, aunque menor en porcentaje.
- Baja afinidad hacia As, cuya reducción fue considerablemente menor frente a los otros metales.

Esta selectividad puede deberse a la interacción entre la estructura química de cada metal y la fisiología de la planta, lo que sugiere que la especie presenta mecanismos diferenciales de absorción y acumulación.

### **Conclusión:**

Se acepta la Hipótesis Específica 1, ya que existen diferencias notables en la capacidad de absorción de los distintos metales. La evidencia empírica confirma que *Scirpus holoschoenus* absorbe en mayor medida Sb y Cd, en menor medida Pb y, finalmente, As en proporción reducida.

## **4.4. Discusión de resultados**

Los resultados obtenidos en el experimento con *Scirpus holoschoenus* evidencian que la especie presenta una notable capacidad de fitorremediación frente a los metales pesados presentes en el agua (Cd, Pb, Sb y As).

### **Cadmio (Cd)**

- La concentración inicial de 0.0030 ppm disminuyó hasta 0.0006 ppm al final del ensayo, logrando una reducción del 80%.
- Este resultado refleja que la planta tiene una elevada afinidad por el cadmio, probablemente por mecanismos de bioacumulación en raíces y tallos, lo que la convierte en una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas contaminadas con este metal.

### **Plomo (Pb):**

- Presentó una reducción de 0.054 ppm a 0.021 ppm (−61%).
- Aunque la reducción porcentual fue menor que en Cd y Sb, la absorción promedio por quincena (0.0055 ppm) fue la más alta entre todos los metales, lo que indica que el plomo es absorbido de manera constante y en cantidades relativamente mayores.
- Esto sugiere que *Scirpus holoschoenus* posee una alta capacidad de retención de plomo en su biomasa, aunque con un comportamiento menos eficiente en términos relativos.

### **Antimonio (Sb)**

- Reducción de 0.019 ppm a 0.003 ppm, con un 84%, el porcentaje más alto de todos los metales.
- La evidencia muestra que existe una alta selectividad hacia el Sb, lo que convierte a esta planta en un excelente bioacumulador de este contaminante.
- Este hallazgo es relevante, dado que el antimonio es un metal emergente en la contaminación ambiental y su tratamiento suele ser limitado en métodos convencionales.

### **Arsénico (As)**

- Reducción de 0.013 ppm a 0.008 ppm, equivalente a un 38%, el valor más bajo del conjunto.
- La absorción promedio fue de solo 0.00083 ppm por quincena, lo que evidencia una baja eficiencia frente a este metal.
- Esto puede explicarse por la baja movilidad del arsénico en el medio acuoso y su limitada biodisponibilidad para la planta.

### **Análisis Comparativo**

- En términos relativos, el orden de eficiencia de absorción fue: Sb (84%) > Cd (80%) > Pb (61%) > As (38%).
- En términos absolutos, la mayor cantidad removida fue de Pb (0.033 ppm), seguido de Sb (0.016 ppm), Cd (0.0024 ppm) y As (0.005 ppm).

Esto demuestra que *Scirpus holoschoenus* no absorbe los metales de manera homogénea, sino que presenta mayor afinidad hacia Sb y Cd, absorción intermedia hacia Pb, y baja capacidad frente al As.

### **Implicancias**

- Los resultados confirman la validez de la Hipótesis General, ya que la concentración de todos los metales disminuyó de manera significativa tras el tratamiento.
- Asimismo, se respalda la Hipótesis Específica, pues se evidencian diferencias marcadas en la capacidad de absorción de los metales.
- Este comportamiento sugiere que el uso de *Scirpus holoschoenus* es una estrategia de biorremediación selectiva, más eficiente para ciertos metales pesados.

En conclusión, *Scirpus holoschoenus* se constituye en una alternativa ecológica y sostenible para la descontaminación de aguas con Cd, Pb y Sb, aunque requiere ser complementada con otros métodos para el tratamiento de As.

## CONCLUSIONES

1. Se demostró que *Scirpus holoschoenus* tiene una capacidad significativa de fitorremediación, logrando reducir la concentración de los metales pesados (Cd, Pb, Sb y As) presentes en el agua, confirmando la validez de la hipótesis general planteada en la investigación.
2. Los resultados muestran que la eficiencia de absorción no es homogénea, presentando mayor afinidad hacia el antimonio (84%) y el cadmio (80%), una absorción intermedia en el plomo (61%), y una eficiencia limitada frente al arsénico (38%).
3. En términos absolutos, el plomo (Pb) fue el metal con mayor reducción cuantitativa (0.033 ppm), mientras que el antimonio (Sb) mostró la mejor respuesta relativa (84%), lo que evidencia un comportamiento diferencial en la capacidad de retención de cada metal por parte de la planta.
4. La absorción promedio por quincena evidenció que el *Scirpus holoschoenus* mantiene un proceso constante de retención de contaminantes, siendo más efectiva para el plomo (0.0055 ppm) y menos eficiente para el arsénico (0.00083 ppm).
5. La investigación confirma que *Scirpus holoschoenus* es una alternativa de biorremediación natural, económica y sostenible para la descontaminación de aguas afectadas por metales pesados, aunque su efectividad debe complementarse con otros métodos cuando se busca una reducción significativa del arsénico.
6. Los hallazgos de este estudio aportan evidencia científica que respalda el uso de especies vegetales nativas en estrategias de recuperación ambiental, contribuyendo a la gestión sostenible de los cuerpos de agua contaminados en la región de Pasco y otros contextos similares.

## RECOMENDACIONES

1. Aplicación en campo real: Implementar sistemas de fitorremediación con *Scirpus holoschoenus* en cuerpos de agua contaminados, especialmente en zonas mineras abandonadas, donde la presencia de cadmio, plomo y antimonio representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos y la salud humana.
2. Complementar con otras técnicas: Considerar la combinación de la fitorremediación con otros métodos de tratamiento físico-químico, particularmente en el caso del arsénico, debido a la menor eficiencia observada en su absorción por la especie estudiada.
3. Monitoreo constante: Establecer programas de seguimiento de la calidad del agua en los ensayos de campo, con el fin de verificar la estabilidad de la remoción de metales pesados y evitar la reintroducción de contaminantes en el ecosistema.
4. Escalamiento gradual: Realizar pruebas piloto en humedales artificiales y sistemas de flujo superficial antes de extender el uso a cuerpos de agua naturales, asegurando la adaptación del *Scirpus holoschoenus* y la efectividad del proceso en condiciones ambientales diversas.
5. Conservación y propagación de la especie: Promover la conservación y reproducción controlada de *Scirpus holoschoenus* en viveros, para garantizar su disponibilidad en proyectos de restauración ambiental a gran escala.
6. Investigaciones futuras: Desarrollar estudios complementarios que analicen la capacidad de acumulación de metales en los tejidos de la planta, su posible destino final y la interacción con otros contaminantes emergentes (como hidrocarburos y nutrientes en exceso).
7. Educación y gestión ambiental: Involucrar a comunidades locales y autoridades ambientales en programas de educación ambiental sobre el uso de plantas acuáticas para la recuperación de cuerpos de agua, fortaleciendo la gestión sostenible de los

recursos hídricos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia EFE Verde. (2023). Fitorremediación: cómo las plantas ayudan a descontaminar suelos y aguas en el mundo. EFEverde. <https://www.efeverde.com/fitorremediacion-plantas-contaminacion>.
- Arroyave, M. (2004). La lenteja de agua (*Lemna minor*): Una planta promisorio (p. 34). Escuela de Ingeniería de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Celis, J., Junod, J., & Sandoval, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Revista*, 14, 17–19. Chile.
- Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM. (2010). Se aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. *El Peruano*, 1–2. Lima, Perú.
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación [Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution]. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93919315021>.
- Bedoya Escobar, B. M. (2013). Evaluación de la actividad fitorremediadora del *Schoenoplectus californicus* “junco” en agua contaminada con arsénico (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna, Facultad de Ciencias de la Salud, Escuela Académico Profesional de Farmacia y Bioquímica. Tacna, Perú.
- Goicochea-Trelles, P. A., & García-López, Y. J. (2022). Fitorremediación para recuperar suelos contaminados por metales pesados: discusión de revisión sistemática. *Agroindustrial Science*, 12(3), 293–303. <https://doi.org/10.18050/agroindscience.v12i3.4951>.

- Jaramillo, M., & Flores, F. (2012). Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales *Lemna minor* (Lenteja de agua) y *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera (p. 40). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.
- Madueño, R., & Sandoval, M. (2009). Evaluación del uso de la planta acuática *Lemna* para determinar la eficiencia remocional de nutrientes a escala reactor del efluente de la laguna Secundaria de la Planta CITRAR (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú.
- Navarro, A. E., Ramos, K. P., Campos, K., & Maldonado, H. (2006). Elucidación del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante biopolímeros naturales: Cationes divalentes. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7(3), 115–128. España.
- López Fernández, A., & Infantes Miranda, F. (1981). Niveles de contaminación y coeficientes de acumulación de los berros de agua (*Nasturtium officinale* R. Br.). Sección de Zooecología y Contaminación Ambiental del Instituto de Zootecnia del C.S.I.C. Córdoba, España.
- Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. (2019). Pruebas de laboratorio para determinar la capacidad de absorción metálica (Pb, Cu, Zn, Fe y Cr) de la especie vegetal *Hydrocotyle vulgaris* en Tomayquichua – Huánuco (Tesis de licenciatura). Escuela de Ingeniería Ambiental. Cerro de Pasco, Perú.
- Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). (2014). Cifras ambientales (p. 7). Lima, Perú.

## ANEXOS

### ANEXO 1 – NORMAS LEGALES

18

NORMAS LEGALES

Miércoles 7 de junio de 2017 / El Peruano

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

| Parámetros        | Unidad de medida | E1: Lagunas y lagos | E2: Rios       |         | E3: Ecosistemas costeros y marinos |         |
|-------------------|------------------|---------------------|----------------|---------|------------------------------------|---------|
|                   |                  |                     | Costa y sierra | Selva   | Estuarios                          | Marinos |
| FÍSICOS- QUÍMICOS |                  |                     |                |         |                                    |         |
| INORGÁNICOS       |                  |                     |                |         |                                    |         |
| Antimonio         | mg/L             | 0,64                | 0,64           | 0,64    | **                                 | **      |
| Arsénico          | mg/L             | 0,15                | 0,15           | 0,15    | 0,036                              | 0,036   |
| Bario             | mg/L             | 0,7                 | 0,7            | 1       | 1                                  | **      |
| Cadmio Disuelto   | mg/L             | 0,00025             | 0,00025        | 0,00025 | 0,0088                             | 0,0088  |
| Cobre             | mg/L             | 0,1                 | 0,1            | 0,1     | 0,05                               | 0,05    |
| Cromo VI          | mg/L             | 0,011               | 0,011          | 0,011   | 0,05                               | 0,05    |
| Mercurio          | mg/L             | 0,0001              | 0,0001         | 0,0001  | 0,0001                             | 0,0001  |
| Níquel            | mg/L             | 0,052               | 0,052          | 0,052   | 0,0082                             | 0,0082  |
| Plomo             | mg/L             | 0,0025              | 0,0025         | 0,0025  | 0,0081                             | 0,0081  |
| Selenio           | mg/L             | 0,005               | 0,005          | 0,005   | 0,071                              | 0,071   |
| Talio             | mg/L             | 0,0008              | 0,0008         | 0,0008  | **                                 | **      |
| Zinc              | mg/L             | 0,12                | 0,12           | 0,12    | 0,081                              | 0,081   |

### ANEXO 2 – ANALISIS FISICO – QUIMICO



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1, [analisisdesuelosmas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosmas@hotmail.com)

**ANALISIS ESPECIAL**



|                                           |             |                   |                     |                                |           |           |           |
|-------------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>SOLICITANTE: BUENO SINCHÉ, Danitza</b> |             |                   |                     | <b>RESULTADOS VIA SECA</b>     |           |           |           |
| <b>Datos de la muestra</b>                |             |                   | <b>PROCEDENCIA:</b> | <b>PARTES POR MILLÓN, mg/L</b> |           |           |           |
| <b>Código</b>                             | <b>Tipo</b> | <b>Referencia</b> |                     | <b>Sb</b>                      | <b>Cd</b> | <b>Pb</b> | <b>As</b> |
| ME2019-2110                               | Aqua        | Laboratorio       | Lab. Ensayo         | 0,019                          | 0,003     | 0,054     | 0,013     |

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

TINGO MARIA, 02 DE SET DEL 2019

RECIBO N° 0582180





**U. Sc. Bgo. Miguel Huanya Rojas**  
J E F E



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1, [analisisdesuelosmas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosmas@hotmail.com)



### ANALISIS ESPECIAL

| SOLICITANTE: BUENO SINCHÉ, Danitza |      |             |              | RESULTADOS VIA SECA     |        |       |       |
|------------------------------------|------|-------------|--------------|-------------------------|--------|-------|-------|
| Datos de la muestra                |      |             | PROCEDENCIA: | PARTES POR MILLÓN, mg/L |        |       |       |
| Código                             | Tipo | Referencia  |              | Sb                      | Cd     | Pb    | As    |
| ME2019-2216                        | Aqua | Laboratorio | Lab. Ensayo  | 0,017                   | 0,0021 | 0,050 | 0,012 |
|                                    |      |             |              |                         |        |       |       |

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
TINGO MARIA, 16 DE SET DEL 2019  
RECIBO N° 0582200



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS  
M.Sc. Bgo. Miguel Huaya Rojas  
JEFE



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1, [analisisdesuelosmas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosmas@hotmail.com)



### ANALISIS ESPECIAL

| SOLICITANTE: BUENO SINCHÉ, Danitza |      |             |              | RESULTADOS VIA SECA     |        |       |       |
|------------------------------------|------|-------------|--------------|-------------------------|--------|-------|-------|
| Datos de la muestra                |      |             | PROCEDENCIA: | PARTES POR MILLÓN, mg/L |        |       |       |
| Código                             | Tipo | Referencia  |              | Sb                      | Cd     | Pb    | As    |
| ME2019-2220                        | Aqua | Laboratorio | Lab. Ensayo  | 0,013                   | 0,0017 | 0,045 | 0,011 |
|                                    |      |             |              |                         |        |       |       |

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
TINGO MARIA, 30 DE SET DEL 2019  
RECIBO N° 0582230



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS  
M.Sc. Bgo. Miguel Huaya Rojas  
JEFE



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1. [analisisdesuelos@unselva.ac.cr](mailto:analisisdesuelos@unselva.ac.cr)



### ANALISIS ESPECIAL

| SOLICITANTE: BUENO SINCHE, Danitza |      |             |              | RESULTADOS VIA SECA     |        |       |       |
|------------------------------------|------|-------------|--------------|-------------------------|--------|-------|-------|
| Datos de la muestra                |      |             | PROCEDENCIA: | PARTES POR MILLÓN, mg/L |        |       |       |
| Código                             | Tipo | Referencia  |              | Sb                      | Cd     | Pb    | As    |
| ME2019-2229                        | Agua | Laboratorio | Lab. Ensayo  | 0,010                   | 0,0013 | 0,039 | 0,011 |
|                                    |      |             |              |                         |        |       |       |

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
TINGO MARIA, 07 DE OCT DEL 2019  
RECIBO N° 0582264



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS  
M.Sc. Bgo. Miguel Huaya Rojas  
JEFE



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1. [analisisdesuelos@unselva.ac.cr](mailto:analisisdesuelos@unselva.ac.cr)



### ANALISIS ESPECIAL

| SOLICITANTE: BUENO SINCHE, Danitza |      |             |              | RESULTADOS VIA SECA     |        |       |       |
|------------------------------------|------|-------------|--------------|-------------------------|--------|-------|-------|
| Datos de la muestra                |      |             | PROCEDENCIA: | PARTES POR MILLÓN, mg/L |        |       |       |
| Código                             | Tipo | Referencia  |              | Sb                      | Cd     | Pb    | As    |
| ME2019-2231                        | Agua | Laboratorio | Lab. Ensayo  | 0,008                   | 0,0011 | 0,031 | 0,010 |
|                                    |      |             |              |                         |        |       |       |

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
TINGO MARIA, 21 DE OCT DEL 2019  
RECIBO N° 0582280



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS  
M.Sc. Bgo. Miguel Huaya Rojas  
JEFE



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología  
Carretera Central Km 1. [analisisde suelosmas@hotmail.com](mailto:analisisde suelosmas@hotmail.com)



## **ANALISIS ESPECIAL**

| SOLICITANTE: BUENO SINCHE, Danitza |      |             |              | RESULTADOS VIA SECA     |        |       |       |
|------------------------------------|------|-------------|--------------|-------------------------|--------|-------|-------|
| Datos de la muestra                |      |             | PROCEDENCIA: | PARTES POR MILLÓN, mg/L |        |       |       |
| Código                             | Tipo | Referencia  |              | Sb                      | Cd     | Pb    | As    |
| ME2019-2231                        | Agua | Laboratorio | Lab. Ensayo  | 0,008                   | 0,0011 | 0,031 | 0,010 |
|                                    |      |             |              |                         |        |       |       |

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
TINGO MARIA, 21 DE OCT DEL 2019  
RECIBO N° 0582280



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS  
H. Sc. Bgo. Miguel Huayra Rojas  
J E F E



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología  
Carretera Central Km 1. [analisisde suelosmas@hotmail.com](mailto:analisisde suelosmas@hotmail.com)



## **ANALISIS ESPECIAL**

| SOLICITANTE: BUENO SINCHE, Danitza |      |             |              | RESULTADOS VIA SECA     |        |       |        |
|------------------------------------|------|-------------|--------------|-------------------------|--------|-------|--------|
| Datos de la muestra                |      |             | PROCEDENCIA: | PARTES POR MILLÓN, mg/L |        |       |        |
| Código                             | Tipo | Referencia  |              | Sb                      | Cd     | Pb    | As     |
| ME2019-2250                        | Agua | Laboratorio | Lab. Ensayo  | 0,003                   | 0,0006 | 0,021 | 0,0080 |
|                                    |      |             |              |                         |        |       |        |

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
TINGO MARIA, 18 DE NOV DEL 2019  
RECIBO N° 0582296



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS  
H. Sc. Bgo. Miguel Huayra Rojas  
J E F E

## PANEL FOTOGRAFICO



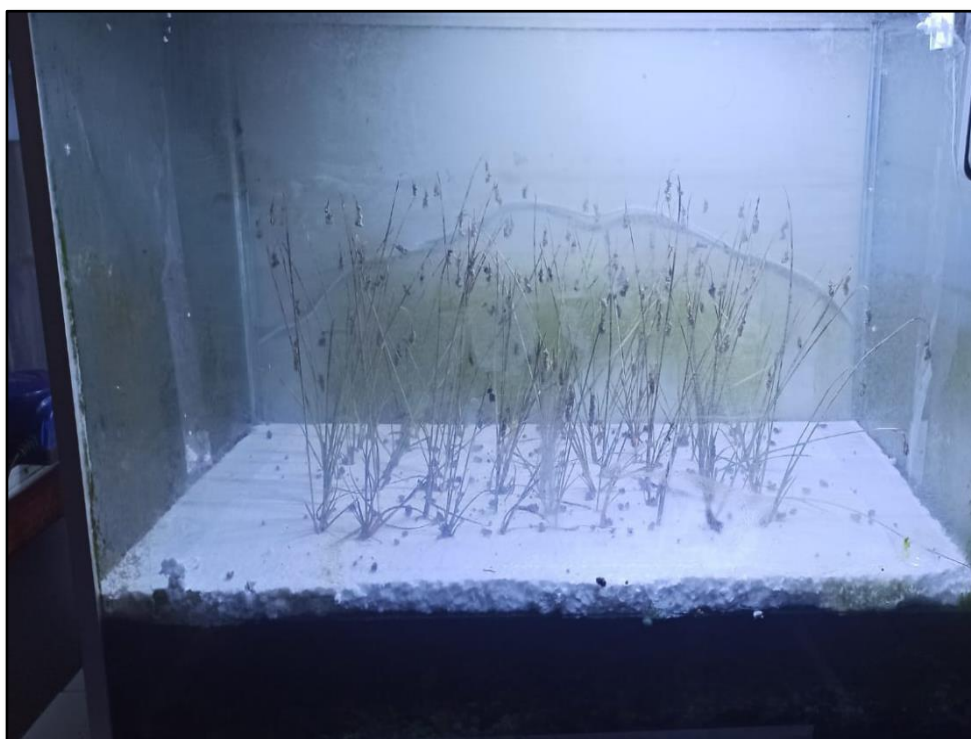
**Fotografía 1.** Re colectación de la planta Junco churrero



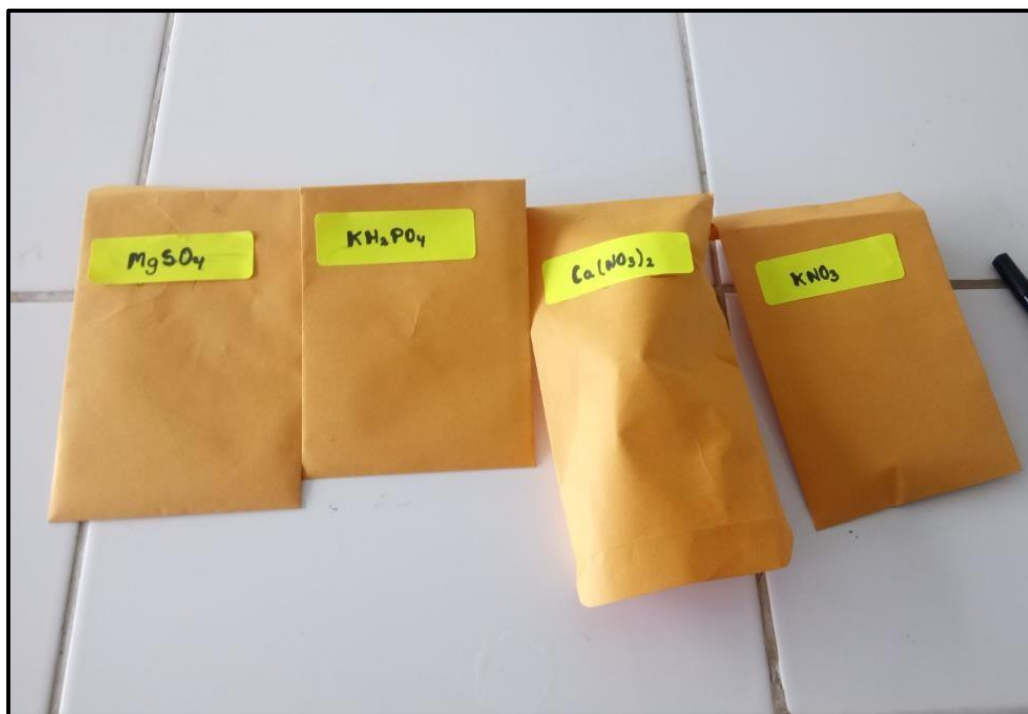
**Fotografía 2:** Rotulado de los nutrientes y metales pesados



**Fotografía 3:** Preparando las soluciones



**Fotografía 4:** La planta Junco churrero después de 3 mes



**Fotografía 5:** Reactivos químicos empleado



**Fotografía 6:** Reactivos químicos empleados



**Fotografía 7:** Pesando cada reactivo químico



**Fotografía 8:** Sedimentación al momento de hacer el análisis



**Fotografía 9: Agregado de iones metálicos**



**Fotografía 10: Solución de nutrientes**