

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“BIORREMEDIACIÓN UTILIZANDO  
*Distichia muscoides* Y *Calamagrostis glacialis*  
DEL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA PROVENIENTE  
DEL NEVADO DE PASTORURI – 2015”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR**

**Bach. ERICA YANINA LUNA SOLANO**

**ASESOR**

**Dr. EDWIN JULIO PALOMINO CADENAS**

**Huaraz, Ancash, Perú**

**Abril, 2018**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“BIORREMEDIACIÓN UTILIZANDO  
*Distichia muscoides* Y *Calamagrostis glacialis*  
DEL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA PROVENIENTE  
DEL NEVADO DE PASTORURI – 2015”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR**

**Bach. ERICA YANINA LUNA SOLANO**

**ASESOR**

**Dr. EDWIN JULIO PALOMINO CADENAS**

**Huaraz, Ancash, Perú**

**Abril, 2018**



## ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el Auditorium de la FCAM-UNASAM, de conformidad a la normatividad vigente conducen el Acto Académico de Sustentación y Defensa de la Tesis **BIORREMEDIACIÓN UTILIZANDO *Distichia muscoides* Y *Calamagrostis glacialis* DEL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA PROVENIENTE DEL NEVADO DE PASTORURI - 2015**, que presenta la Bachiller **ERICA YANINA LUNA SOLANO** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

En seguida, después de haber atendido la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, lo declaramos:

### APROBADO

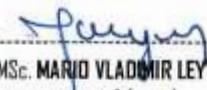
con el calificativo de: QUINCE (15)

En consecuencia, la Bachiller **ERICA YANINA LUNA SOLANO** queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento de su **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario N° 399-2015-UNASAM), el Art. 48° del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 761-2017-UNASAM) y el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 232-2017-UNASAM).

Huaraz, 10 de Abril de 2018

  
MSc. ALFREDO WALTER REYES NOLASCO  
Presidente  
Jurado de Sustentación

  
Ing. ARNULFO SERMA ROMÁN  
Secretario  
Jurado de Sustentación

  
MSc. MARIO VLADIMIR LEYVA COLLAS  
Vocal  
Jurado de Sustentación

  
Dr. EDWIN JULIO PALOMINO CADENAS  
Asesor de Tesis

## **DEDICATORIA**

A mis padres, quienes me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios, ya que ellos siempre han estado presentes para apoyarme moral y psicológicamente.

A mi hijita y esposo, por ser mi motivo para seguir creciendo profesionalmente.

A mis hermanos, por su apoyo moral durante todo este tiempo.

Erica Yanina Luna Solano

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero y, antes que nada, quiero dar gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudios.

A mis profesores, quienes me han enseñado a ser mejor en la vida y a realizarme profesionalmente.

También agradezco a mis padres, porque ellos estuvieron en los días más difíciles de mi vida como estudiante motivándome a seguir adelante y alcanzar mis metas.

Al Dr. Edwin Julio Palomino Cadenas, por su apoyo incondicional, orientación y revisión de la tesis.

A la Dra. Edell Doriza Aliaga Zegarra, por su apoyo y orientación en el proceso de la tesis.

A mis jurados, por su tiempo para la revisión de mi tesis.

## RESUMEN

El retroceso del nevado Pastoruri (Ancash, Perú) viene exponiendo el material rocoso rico en pirita, cuya disolución oxidativa genera drenajes ácidos con altas concentraciones de metales. Ello dificulta el uso de dichas aguas para consumo doméstico y bebida de animales en este circuito turístico. En este sentido, el objetivo de esta investigación fue recuperar la calidad del agua del drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri utilizando plantas nativas fitorremediadoras. Para ello, se instaló un humedal compuesto por *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*, teniendo como sustratos: roca caliza, lodo activado, guano de ganado ovino y arena gruesa. Se evaluó la concentración de metales (Al, Fe, Mn, Ni y Zn) en las especies vegetales y en el drenaje ácido a la entrada y salida del humedal en tres periodos: julio, setiembre y diciembre; y se determinaron los factores de bioacumulación. Los resultados muestran que el humedal implementado mejoró la calidad del agua en cuanto a su contenido de metales pesados, pH y conductividad. Los factores de bioacumulación muestran que *Distichia muscoides* resultó ser hiperacumuladora de Al, Mn, Ni, y acumuladora de Fe y Zn; mientras que *Calamagrostis glacialis* fue hiperacumuladora de Al, Fe, Mn y Ni, y acumuladora de Zn.

**PALABRAS CLAVE:** Drenaje ácido de roca; humedal; *Distichia muscoides*; *Calamagrostis glacialis*.

## ABSTRACT

The retracement of Pastoruri glacier (Ancash, Perú) is exposing pirita-rich rock which dissolution oxidation generates acid drainages with high metal concentration. That makes difficult the use of them to household consumption and animal drinking in this touristic place. Therefore, the aim of this research was to recover water quality of acid drainage rock from Pastoruri glacier using phytoremediation native plants. For this purpose, it was installed a wetland composed of *Distichia muscoides* and *Calamagrostis glacialis* taking as substratum: limestone rock, activated sludge, sheep guano and coarse sand. It was evaluated the metal concentration (Al, Fe, Mn, Ni and Zn) of plants species and acid drainage in the entrance and the exit to wetland in three periods: July, September and December, afterwards bioaccumulation index was calculated. The results show that implemented wetland improved water quality in regards to metal concentration, pH and conductivity. The bioaccumulation index show that *Distichia muscoides* was hyperaccumulator of Al, Mn and Ni, and accumulator of Fe y Zn; whereas *Calamagrostis glacialis* was hyperaccumulator of Al, Fe, Mn and Ni, and accumulator of Zn.

**KEYWORDS:** Rock acid drainage; wetland; *Distichia muscoides*; *Calamagrostis glacialis*.

## ÍNDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE GRÁFICOS	x
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE IMÁGENES	xi
LISTA DE ABREVIATURAS	xii
SIGLAS INSTITUCIONALES	xii
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1.Planteamiento del problema	2
1.2.Formulación del problema	4
1.2.1. Problemas específicos	4
1.3.Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4.Hipótesis	5
1.4.1. Hipótesis específicas	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1.Antecedentes	6
2.2.Marco conceptual	7
2.2.1. Drenaje ácido de roca	7
2.2.2. Metales	9
2.2.2.1. Metales disueltos	9
2.2.2.2. Metales totales	9
	vi

2.2.2.3. Metales pesados	10
a) Aluminio	10
b) Cadmio	10
c) Cobre	11
d) Hierro	12
e) Manganeseo	13
f) Níquel	13
g) Zinc	14
2.2.3. Calidad de agua	15
2.2.3.1. Parámetros fisicoquímicos	16
a) pH	16
b) Conductividad eléctrica	16
c) Sólidos totales	17
d) Sólidos disueltos	17
e) Turbidez	17
f) Caudal	17
2.2.4. Biorremediación	17
2.2.5. Fitorremediación	18
2.2.5.1. Excluyente de metal	18
2.2.5.2. Indicadoras	18
2.2.5.3. Hiperacumuladoras	19
2.2.5.4. Factor de bioacumulación	19
2.2.6. Estrategias de fitorremediación	20
2.2.6.1. Fitoextracción	20
2.2.6.2. Fitoestabilización o fitoinmovilización	20
2.2.7. Humedales artificiales	21
2.2.7.1. Tipos de humedales artificiales	21
a) Humedales de Flujo Libre Superficial (HFL)	21
b) Humedales de Flujo Sub-superficial (HFS)	22
2.2.8. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales	23
2.2.9. Plantas utilizadas en Humedales	23
2.2.9.1. <i>Distichia muscoides</i> .	23
2.2.9.2. <i>Calamagrostis glacialis</i>	24

<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>METODOLOGIA</b>	<b>25</b>
3.1. Tipo de investigación	25
3.2. Diseño de la investigación	25
3.3. Población	26
3.4. Muestra	26
3.5. Área de estudio	26
3.5.1. Geología de Pastoruri	27
3.5.2. Zonas de vida	27
3.6. Procedimiento	28
3.6.1. Actividades preliminares	28
3.6.1.1. Evaluación de parámetros físico-químicos del agua	28
3.6.1.2. Preparación de insumos	28
3.6.2. Instalación del humedal artificial	30
3.6.2.1. Seguimiento de la estabilización del humedal	34
3.6.3. Monitoreo de agua	38
3.6.3.1. Primer monitoreo	39
3.6.3.2. Segundo monitoreo	40
3.6.3.3. Tercer monitoreo	40
3.6.4. Monitoreo de especies vegetales	40
3.6.5. Monitoreo de sedimento	40
3.6.6. Herborización de las plantas	41
3.6.7. Etapa de gabinete.	42
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>43</b>
4.1. Implementación del humedal	43
4.1.1. Crecimiento de <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i>	43
4.1.2. Concentración de metales pesados en <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i>	44
4.2. Reducción del grado de acidez del drenaje ácido de roca	46
4.2.1. Caracterización del drenaje ácido de roca al iniciar la investigación	46
4.2.2. Variación del pH	48
4.2.3. Variación de la conductividad eléctrica	48
4.2.4. Variación del oxígeno disuelto	49
4.3. Reducción de la concentración de metales en el drenaje ácido de roca	50

4.3.1. Concentración de aluminio	50
4.3.2. Concentración de cobre.	51
4.3.3. Concentración de hierro	52
4.3.4. Concentración de manganeso	53
4.3.5. Concentración de níquel	54
4.3.6. Concentración de zinc	54
4.3.7. Concentración de metales en el sedimento del humedal artificial	55
4.4. Factor de bioacumulación en <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i>	56
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>60</b>
5.1.CONCLUSIONES	60
5.2.RECOMENDACIONES	61
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>67</b>
ANEXO 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio	69
ANEXO 2: Concentración de metales en la roca caliza	70
ANEXO 3: Herborización de las plantas	71
ANEXO 4: Informes de ensayo de metales pesados en <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i> en el primer, segundo y tercer monitoreo	76
ANEXO 5: Informe de ensayos de metales pesados en la entrada del canal Pastoruri	80
ANEXO 6: Informes de ensayos de metales pesados en el agua correspondientes al primer, segundo y tercer monitoreo	82
ANEXO 7: Informes de ensayos de metales pesados en el sedimento a la entrada y salida del humedal	86

## LISTA DE TABLAS

CONTENIDO	Pág.
<b>Tabla N° 1:</b> ECA– Categoría 1 A2 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional)	15
<b>Tabla N° 2:</b> Diferencias entre sistemas de flujo en humedales artificiales	22
<b>Tabla N° 3:</b> Ventajas y desventajas del uso de humedales artificiales	23
<b>Tabla N° 4:</b> Zonas de vida del área de estudio	27
<b>Tabla N° 5:</b> Parámetros de evaluación según ECA– Categoría 1 A2 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional)	28
<b>Tabla N° 6:</b> Concentración de metales pesados en el drenaje ácido de roca al iniciar la investigación	47
<b>Tabla N° 7:</b> Característica acumuladora de metales pesados de <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i>	57

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico N° 01:</b> Longitud de <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i>	43
<b>Gráfico N° 02:</b> Concentración de metales en <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i> en el primer monitoreo	44
<b>Gráfico N° 03:</b> Concentración de metales en <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i> en el segundo monitoreo	45
<b>Gráfico N° 04:</b> Concentración de metales en <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i> en el tercer monitoreo	45
<b>Gráfico N° 05:</b> Variación del pH durante el periodo de estudio	48
<b>Gráfico N° 06:</b> Variación de la conductividad eléctrica del agua	49
<b>Gráfico N° 07:</b> Concentración de oxígeno disuelto en la entrada y salida del humedal artificial	50
<b>Gráfico N° 08:</b> Concentración del aluminio en la entrada y salida del humedal artificial	51
<b>Gráfico N° 09:</b> Concentración del cobre en la entrada y salida del humedal artificial	52
<b>Gráfico N° 10:</b> Concentración del hierro en la entrada y salida del humedal artificial	53
<b>Gráfico N° 11:</b> Concentración de manganeso en la entrada y salida del humedal artificial	53
<b>Gráfico N° 12:</b> Concentración del níquel en la entrada y salida del humedal artificial	54
<b>Gráfico N° 13:</b> Concentración de zinc en la entrada y salida del humedal artificial	55
<b>Gráfico N° 14:</b> Concentración de metales en el sedimento del humedal artificial	55

<b>Gráfico N° 15:</b>	Factor de bioacumulación en <i>Distichia muscoides</i> y <i>Calamagrostis glacialis</i>	56
-----------------------	---	----

## LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág.	
<b>Figura N° 1:</b>	Diagrama de flujo del humedal artificial	25
<b>Figura N° 2:</b>	Representación del humedal artificial	26

## LISTA DE IMÁGENES

CONTENIDO	Pág.	
<b>Imagen N° 01:</b>	Evidencia de la elevada acidez del agua. A: Deterioro de una moneda. B: Presencia de precipitados rojizos en los tanques de agua potable. C: Corrosión de tuberías de agua potable	3
<b>Imagen N° 02:</b>	Preparación de material calcáreo. A: Tamizado del material. B: Lavado de grava y arena. C: Tamaño de la grava preparada. D: Carguío de material para su traslado a Pastoruri	29
<b>Imagen N° 03:</b>	Canal de conducción de agua construido por el proyecto “Por las rutas del cambio climático”	30
<b>Imagen N° 04:</b>	Limpieza concluida del canal	31
<b>Imagen N° 05:</b>	Colocado de material calcáreo	31
<b>Imagen N° 06:</b>	Adición de lodo activado portador de nutrientes y bacterias sulfato reductoras	31
<b>Imagen N° 07:</b>	Adición de guano ovino como portador de nutrientes y microorganismos	32
<b>Imagen N° 08:</b>	Adición de la última capa (arena gruesa)	32
<b>Imagen N° 09:</b>	Recolección de plantas. A: <i>Distichia muscoides</i> . B: <i>Calamagrostis glacialis</i>	32
<b>Imagen N° 10:</b>	Lavado de <i>Calamagrostis glacialis</i>	33
<b>Imagen N° 11:</b>	Establecimiento de <i>Distichia muscoides</i>	33
<b>Imagen N° 12:</b>	Trasplante de <i>Calamagrostis glacialis</i>	34
<b>Imagen N° 13:</b>	Crecimiento de <i>Distichia muscoides</i> en el humedal artificial	37
<b>Imagen N° 14:</b>	Crecimiento de <i>Calamagrostis glacialis</i> en el humedal artificial	37
<b>Imagen N° 15:</b>	Precipitación naranja-rojizo	38
<b>Imagen N° 16:</b>	Monitoreo en el humedal artificial	38
<b>Imagen N° 17:</b>	Medición de pH y conductividad eléctrica	39

## LISTA DE ABREVIATURAS

DAR	Drenaje ácido de roca
m	Metros
cm	Centímetros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
pH	Potencial de hidrógeno
CE	Conductividad eléctrica
OD	Oxígeno disuelto
ECA	Estándares de Calidad Ambiental
mg/L	Miligramos por litro
µg/L	Microgramo por litro
mg/Kg	Miligramo por kilogramos
µS/cm	Microsiemen por centímetro
Al	Aluminio
Cd	Cadmio
Cu	Cobre
Fe	Hierro
Mn	Manganeso
Ni	Níquel
Zn	Zinc
HFL	Humedal de Flujo Libre superficial
HFS	Humedal de Flujo Sub superficial
Q	Caudal
FBA	Factor de Bioacumulación

## SIGLAS INSTITUCIONALES

INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales
ANA	Autoridad Nacional del Agua
MINAM	Ministerio del Ambiente
OMS	Organización Mundial de la Salud
UNASAM	Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo
UNT	Universidad Nacional de Trujillo
HUT	Herbario de la Universidad de Trujillo

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales de mayor preocupación en países con cobertura glaciar es la generación de drenajes ácidos de roca producto de la desglaciación. Dado que el Perú posee más del 70% de la superficie glaciar tropical, es más vulnerable a perder su cobertura glaciar de una manera acelerada. De acuerdo con lo manifestado por Marco Zapata, director en ese entonces del Instituto Nacional de Recursos Naturales, “la desglaciación en el Perú va cada día en aumento, y se observa que los glaciares y nevados disminuyen en su espesor y retroceden aceleradamente” (Diario Perú 21, 2007). Asimismo, el retroceso glaciar va exponiendo el material rocoso, que, en ciertos lugares contiene minerales como la pirita, que al oxidarse y disolverse generan drenajes ácidos de roca con elevadas concentraciones de metales que pueden alterar los cuerpos de agua, afectar ecosistemas y resultar perjudicial para su uso agrícola y consumo humano. Por tanto, resulta importante aplicar técnicas de biorremediación para mejorar la calidad del agua de los drenajes ácidos de roca.

Según los registros históricos de la Autoridad Nacional del Agua, el nevado Pastoruri, en el periodo de 1995 al 2016, ha perdido más del 50% de su cobertura glaciar. Este proceso de desglaciación ha dado origen a 7 lagunas glaciares de reciente formación, cuya superficie en el 2005 eran apropiadamente de 2 hectáreas, y que para el 2016 superaban las 7 hectáreas (La República, 2016). De acuerdo con el estudio de Santofimia *et al.*, (2017), la desglaciación de este nevado ha dejado expuesto el material rocoso compuesto por lutitas y areniscas, ricas en pirita, que bajo las condiciones atmosféricas generan drenajes ácidos de roca con elevados contenidos de metales, por lo que algunas de las lagunas de Pastoruri presentan elevadas concentraciones de metales pesados y pH cercanos a 3. De este modo, la desglaciación no solo está dejando, a nuestra región, sin un destino turístico, sino que también está dejando una

gran cantidad de roca expuesta a la meteorización y consecuentemente se están formando los denominados drenajes ácidos de roca (DAR) que se descargan en la subcuenca de Pachacoto.

La biorremediación es una práctica que está tomando importancia a nivel mundial a fin de recuperar los ecosistemas degradados por las actividades del hombre o contaminados de manera natural. En los últimos años se han desarrollado tecnologías que permiten remediar la contaminación del ambiente a través del uso de plantas y microorganismos relacionados. Entre estas tecnologías, se encuentran los humedales, en donde la comunidad vegetal y microbiana actúan sinérgicamente y permiten mejorar la calidad de las aguas contaminadas, por ejemplo, con metales pesados (Schrauf y Smith, 2005). Los procesos que intervienen en el secuestro y estabilización de metales, son la bioacumulación, biotransformación y bioprecipitación (Cord-Ruwisch, 1985; Palomino, 2007).

En este sentido, en el presente trabajo se usó la técnica de biorremediación mediante la instalación de un humedal artificial conteniendo *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* para mejorar la calidad del agua impactada con drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri.

### **1.1. Planteamiento del problema**

El Nevado Pastoruri es uno de los circuitos turísticos de mayor importancia en la región Ancash. Este turístico comprende una zona de parqueo, una vía de acceso hacia el Nevado y un mirador. En la zona de parqueo, los pobladores de la Comunidad Campesina de Cátac brindan servicios de alimentación y acémilas a los turistas. Para estas actividades, los pobladores vienen usando el agua impactada con drenaje ácido de roca de proveniente del nevado Pastoruri. Por lo que resulta necesario mejorar la calidad de dichas aguas antes de su consumo.

En la década de 1990, los campesinos usaban directamente el agua procedente de los deshielos; sin embargo, desde hace 5 años se han visto obligados a dejar de usar esa agua por estar fuertemente acidificada y cargada de sedimentos rojizos. En dicha zona, en el 2013 se ejecutó el proyecto “La Ruta del Cambio Climático”, con el cual se construyó una línea de conducción de agua desde la Laguna Pastoruri N° 2 hacia las tiendas de la zona de parqueo. La acidez de dichas aguas produjo la corrosión de cañerías y la acumulación de sedimentos anaranjados en tanques y reservorios (Figura 1). Por ello, urge la necesidad de

implementar un sistema de biorremediación que permita mejorar la calidad del agua para su posterior uso en actividades agrícolas y domésticas.

**A**



**B**



**C**



**Imagen N° 01:** Evidencia de la elevada acidez del agua. A: Deterioro de una moneda. B: Presencia de precipitados rojizos en los tanques de agua potable. C: Corrosión de tuberías de agua potable.

## 1.2. Formulación del problema

Frente a los problemas descritos es necesario buscar alternativas sostenibles de biorremediación. Dado que en la zona de Pastoruri crecen especies vegetales con capacidad fitorremediadora, esta investigación planteó utilizar *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* para remediar el agua dulce impactada con drenaje ácido de roca (DAR), y, así, mejorar su calidad antes de su uso en actividades agrícolas y domésticas en este circuito turístico. En este sentido, se formuló la siguiente interrogante:

¿Será posible biorremediar el drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri empleando *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*?

### 1.2.1. Problemas específicos

- a. ¿Se podrá implementar un humedal artificial utilizando *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*?
- b. ¿Será posible reducir la acidez del drenaje ácido de roca hasta el nivel establecido en el Estándar de Calidad Ambiental para Agua?
- c. ¿Cuál es la cantidad de metales pesados que remueve el humedal artificial del drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri?
- d. ¿Cuál es el factor de bioacumulación de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*?

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Biorremediar el agua proveniente del nevado Pastoruri impactada con drenaje ácido de roca utilizando *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- a. Implementar un humedal artificial utilizando *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*.

- b. Reducir el grado de acidez del agua impactada con drenaje ácido de roca.
- c. Reducir la concentración de metales pesados del agua impactada con drenaje ácido de roca.
- d. Determinar el factor de bioacumulación de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*.

#### **1.4. Hipótesis**

Sí es posible biorremediar el drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri empleando *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*.

##### **1.4.1. Hipótesis específicas**

- a. Sí se puede implementar un humedal artificial utilizando *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* para biorremediar el drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri.
- b. Sí se puede reducir el grado de acidez del drenaje ácido de roca hasta el nivel establecido en el Estándar de Calidad Ambiental para Agua.
- c. La cantidad de metales pesados que se remueve del drenaje ácido de roca es mayor al 15%.
- d. El factor de bioacumulación de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* es mayor a 1, y, por tanto, son especies acumuladoras de metales pesados.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

La biorremediación es una estrategia de recuperación de aguas contaminadas por metales pesados. La comunidad vegetal y microbiana presente en los humedales muestran un gran potencial de adaptación a condiciones adversas, como, por ejemplo, la contaminación por metales pesados (Schrauf y Smith, 2005) . Esto contribuye a que el ecosistema del humedal pueda revertir tales condiciones a las de uno más estable mediante el secuestro y estabilización de metales, formación de sustrato para la proliferación de la comunidad microbiana biorremediadora y recuperación significativa del escenario ambiental (Palomino, 2007).

Actualmente, los humedales artificiales son utilizados como sistemas depuradores en diversos países como Dinamarca, Alemania, Reino Unido, Francia, España, Austria, Suiza, Bélgica, Luxemburgo, Holanda y Suecia. Entre los diferentes sistemas tenemos el Free Water System (FWS) y Subsurface Flow System (SFS) (González, 2009).

Los componentes de los humedales, como plantas, bacterias y sustrato orgánico, actúan sinérgicamente sobre los drenajes ácidos, recuperando el pH e inmovilizando los metales pesados a través de procesos conocidos como bioacumulación, quimiosorción, biomineralización, biotransformación y bioprecipitación (Cord-Ruwisch, 1985).

Según López, Aduvire, y Baretino (2002), las plantas y macrofitas colectados en suelos y zonas ribereñas de ríos y arroyos afectados por metales pesados

permiten seleccionar aquellas especies con potencial bioindicador, de acuerdo a su presencia o ausencia, o fitorremediador, de acuerdo a su capacidad para estabilizar metales en la rizósfera, o para acumularlos en sus tejidos. La determinación de estas propiedades a través del análisis químico será una aproximación importante a humedales artificiales o wetlands, destinados al tratamiento de aguas para la posterior aplicación de estas especies en sistemas de ácidos y metales pesados provenientes de procesos naturales de lixiviación e intemperización de formaciones geológicas ricas en minerales, o de relaves o depósitos de minerales provenientes de una intensa minería pasada o actual.

Investigadores de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo realizaron trabajos relacionados con la implementación de humedales para mejorar la calidad del agua de drenajes ácidos de roca y mina dentro de la región Ancash, encontrando que los humedales lograban incrementar el pH de 3.5 hasta 6.8 (Aliaga, 2003).

De acuerdo con Santofimia *et al.*, (2017), el retroceso glaciar del nevado Pastoruri va exponiendo el material rocoso compuesto por lutitas y areniscas a las condiciones atmosféricas. Consecuencia de ello, ocurre la disolución oxidativa de dichas rocas ricas en piritita, generándose los drenajes ácidos de roca.

En la investigación realizada por Ñañez (2016), denominada “Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Ancash, Perú)”, se describe que en la zona de Pastoruri se encuentran especies hiperacumuladoras para la mayoría de metales en relación a su concentración en el suelo, entre ellas, *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*; por tanto, plantea que estas especies podrían ser utilizadas en procesos de fitorremediación de drenajes ácidos de roca.

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1. Drenaje ácido de roca**

El término, generalmente, hace alusión al drenaje ácido de mina DAM; no obstante, el drenaje ácido no ocurre únicamente en las minas, por lo que el término "drenaje ácido de roca" o DAR también es usado comúnmente. El fenómeno de drenaje ácido proveniente de minerales sulfurosos es un proceso que ocurre en forma natural. Hace cientos de años, se descubrieron

muchos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojizo-anaranjado, lo cual indicaba la presencia de minerales sulfurosos.

Cualquiera sea el término (DAM o DAR), el drenaje ácido se refiere a la generación de ácido originada por la oxidación de los minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y agua, lo cual da por resultado la producción de acidez, sulfatos y la disolución de metales, principalmente hierro, manganeso y aluminio. Debido a la alta cantidad de hierro oxidado, el drenaje ácido es a menudo rojizo (Kuyucak, 2010).

No todos los minerales sulfurosos son igualmente reactivos, ni la acidez se produce en igual proporción. Además, no todos los minerales sulfurosos o rocas con contenido de sulfuro son potencialmente generadores de ácido. La tendencia de una muestra particular de roca a generar acidez es una función del balance entre los minerales (sulfurosos) productores potenciales de ácido y los minerales (alcalinos) consumidores potenciales de ácido (Kuyucak, 2010).

El desarrollo del DAR depende del tiempo e involucra procesos de oxidación tanto química como biológica (con bacterias tales como *Thiobacillus ferrooxidans*), y fenómenos físico-químicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento. Por su parte, Kuyucak (2010) considera que la oxidación de la pirita libera el hierro del sulfuro y se mantiene como ferroso a pH ácido; y luego se sigue oxidando el hierro ferroso a pH neutro produciendo hierro férrico que precipita en la solución como hidróxido férrico.

La alta acidez del DAR es causada a menudo por la oxidación de la pirita, la forma cristalina del sulfuro del hierro ( $\text{FeS}_2$ ). Como resultado de esa oxidación, se genera el ácido sulfúrico dando condiciones ácidas a los efluentes. El drenaje ácido presenta un problema severo, porque los agentes prioritarios de contaminación, tales como As, Cd, Pb, Hg, Cu y Zn, pueden estar presentes en altas concentraciones, generando un riesgo para los ecosistemas colindantes (Kuyucak, 2010).

Los drenajes ácidos de roca se caracterizan por:

- Valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5.
- Alcalinidad decreciente y acidez creciente.

- Concentraciones elevadas de sulfato.
- Concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales).
- Concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales.

Con respecto al drenaje ácido de mina en el Perú, la preocupación fundamental sería los niveles elevados de acidez, sulfato, niveles de hierro y cobre y la lixiviación de otros metales asociados con el mineral sulfurado. La preocupación ambiental con respecto al DAR, generalmente, es el impacto adverso de los contaminantes, particularmente los metales disueltos, en la vida acuática del medio receptor y en la calidad del agua para beber (Ministerio de Energía y Minas, 1997).

## **2.2.2. Metales**

Según la American Public Health Association (APHA, 1992), los metales son elementos químicos buenos conductores de la electricidad, maleables, dúctiles, flexibles, que poseen brillo, etc. Todas estas propiedades se las confiere el enlace metálico que poseen; los metales se conocen como minerales que son necesarios para los seres vivos, pero algunos llegan a ser tóxicos si rebasan ciertas concentraciones. La presencia de metales en el agua puede ser beneficiosa, tóxica o simplemente molesta, en muchos casos el potencial beneficio o riesgo depende de la concentración.

### **2.2.2.1. Metales disueltos**

Técnicamente son los componentes metálicos en una muestra de agua tal cual, es decir, sin acidular que pasan a través de un filtro de membrana de 0,45  $\mu\text{m}$  (APHA, 1992)

### **2.2.2.2. Metales totales**

Es la concentración de metales determinada en una muestra sin filtrar, luego de una digestión intensa, o la suma de las concentraciones de metales en las fracciones disuelta y suspendida (APHA, 1992).

### 2.2.2.3. Metales pesados

Químicamente son considerados metales pesados aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a  $5 \text{ g/cm}^3$  cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 40 incluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos. Ambientalmente abarca elementos de transición (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) al igual que metaloides (As y Sb), por tanto, no son todos metales (APHA, 1992).

#### a) Aluminio

Es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, no se lo encuentra libre, sino en casi todas las rocas, sobre todo en las ígneas, que contienen aluminio en forma de minerales de aluminio silicato (Rodier *et al.*, 2011). Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales, hidróxidos de aluminio o ambos los cuales forman las bauxitas que sirven de materia prima fundamental en la producción de aluminio (Jiménez, 2001)..

Estos compuestos son arrastrados por el agua como sal soluble, coloide o como compuestos insolubles en cantidades abundantes provocando una ligera opalescencia y un sabor sensiblemente metálico. Al aluminio se lo relacionó con el alzhéimer, pero aún no existe evidencia definitiva de toxicidad, el valor guía de la OMS establecido en 1995 con fines estéticos es de  $0,2 \text{ mg/L}$  (Jiménez, 2001).

El Ministerio del Ambiente - Perú (MINAM, 2015) ha establecido el Estándar de Calidad para Aguas de Categoría 1 – A2, siendo para el aluminio de  $5.0 \text{ mg/L}$  para aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.

#### b) Cadmio

En la naturaleza el cadmio está asociado al zinc y en las aguas superficiales su concentración no sobrepasa de algunos

microgramos por litro debido a la poca solubilidad del carbonato e hidróxido al pH habitual del agua, pero si el pH es ácido, estos compuestos se solubilizan (Rodier *et al.*, 2011).

Asimismo, se encuentra como mineral combinado con otros elementos tales como oxígeno (óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio) o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio), por tal motivo todos los suelos y rocas, incluso el carbón y abonos minerales, contienen una cantidad de este metal. Este elemento no se corroe fácilmente y tiene muchos usos tales como baterías, pigmentos, revestimiento de metales y plásticos (Ospina y Zapata, 2012).

Según Nava y Méndez (2011), la población está expuesta al cadmio principalmente por dos vías: la oral a través del agua e ingesta de alimentos contaminados con cadmio (hojas de vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras animales y pescado); la segunda vía es a través de la inhalación de partículas de cadmio durante las actividades industriales en personas laboralmente expuestas. Asimismo, otro modo de exposición a este elemento es la inhalación del humo de cigarro por fumadores activos y pasivos, lo cual es altamente peligroso ya que el cadmio se absorbe fácilmente por los pulmones (Nava y Méndez, 2011).

Ingerir alimentos o tomar agua con niveles muy altos de cadmio produce irritación grave del estómago causando vómitos y diarrea, además la exposición prolongada a niveles más bajos en el aire, los alimentos o el agua produce acumulación de este metal en los riñones y posiblemente enfermedad renal. Otro efecto de la exposición prolongada consiste en daño pulmonar y fragilidad de los huesos, también se atribuyen problemas del hígado y la piel (Ospina y Zapata, 2012). El ECA establecido para aguas de categoría 1 – A2 es 0,005 mg/L para aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (MINAM, 2015).

### **c) Cobre**

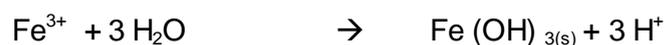
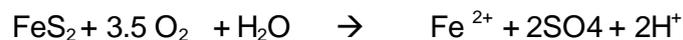
Según Jiménez (2001), el cobre es un metal rojizo, la concentración de cobre en el agua para beber es por lo general

baja, dado a que aún persiste la incertidumbre sobre la toxicidad del cobre para los seres humanos; el valor guía establecido por la OMS en 1995 se considera provisional e igual a 2 mg/L. La ingesta alimentaria representa por lo común de 1 a 3 mg diarios. Asimismo, en algunas personas cuando la concentración en el agua es superior a 3 mg/L aparece una irritación gástrica aguda y la ingestión prolongada puede provocar cirrosis hepática. El ECA establecido para aguas de categoría 1 – A2 es de 2 mg/L para aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (MINAM, 2015).

#### **d) Hierro**

Es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre se encuentra en corrientes naturales de agua en concentraciones que varían de 0.5 a 50 mg/L. El incremento de su concentración se debe al pH; en aguas ácidas su concentración es variable y se encuentra como sulfato y más abundante como óxido. No presenta problemas graves de toxicología pero en concentraciones superiores a 0.3 mg/L le imparte un color amarillento y a partir de 1 mg/L le da un sabor amargo astringente, tiñe los textiles y las cañerías y reservorios con precipitados que se conocen como herrumbre de color pardo rojizo (Jiménez, 2001). Bajo condiciones oxidantes y alcalinas se favorece la oxidación del ión ferroso al ión férrico, ocasionando la precipitación del hierro, ya que los compuestos férricos son insolubles en agua (Fuentes, 2013).

Las principales reacciones en la formación del DAR son:



El hierro no tiene consecuencias adversas para la salud en concentraciones bajas, pero cuando las concentraciones alcanzan niveles de 300-600 mg por cada kilogramo de peso

corporal, estamos frente a una intoxicación aguda, y esto puede causar depresión, respiración agitada, convulsiones, fallas respiratorias, problemas cardíacos y coma (Galvin, 1996). El ECA establecido para aguas de categoría 1 – A2 es 1.0 mg/L para aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (MINAM, 2015).

#### **e) Manganeseo**

El Manganeseo es un compuesto muy común que puede ser encontrado formando diversos compuestos en la tierra (Rodier *et al.*, 2011). El manganeseo es uno de los tres elementos trazas esenciales para la supervivencia de los humanos, pero cuando está presente en elevadas concentraciones es tóxico, y causa problemas de salud. Los efectos del manganeseo mayormente ocurren en el tracto respiratorio y el cerebro. Los síntomas por envenenamiento con manganeseo son alucinaciones, olvidos y daños en los nervios. El manganeseo puede causar Parkinson, embolia de los pulmones y bronquitis, perturbaciones en hígado, decremento de la presión sanguínea, fallos en el desarrollo de fetos de animales y daños cerebrales (Lenntech BV, 1998). El ECA establecido para aguas de categoría 1 – A2 es 0,4 mg/L para aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (MINAM, 2015).

#### **f) Níquel**

El níquel es un elemento bastante abundante, constituye cerca de 0.008% de la corteza terrestre y 0.01% de las rocas ígneas y se piensa que existen grandes cantidades en el núcleo terrestre. Como mineral importante se tiene: Sulfuros de níquel, pentlandita y pirrotita  $(Ni, Fe)_x S_y$ ; el mineral garnierita,  $(Ni, Mg)SiO_3 \cdot nH_2O$ . El níquel se presenta en pequeñas cantidades en plantas y animales. Está presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, el petróleo y en la mayor parte del carbón (Lenntech BV, 1998).

El níquel, además de los compuestos simples o sales, forma una variedad de compuestos de coordinación o complejos, que son verdes o azules a causa de la hidratación o de la unión de otros ligandos al metal. El ion níquel presente en soluciones acuosas de compuestos simples es a su vez un complejo, el  $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ . La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea. Altas concentraciones de níquel en suelos arenosos pueden claramente dañar a las plantas y altas concentraciones de níquel en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas (Lenntech BV, 1998).

Los microorganismos pueden también sufrir una disminución del crecimiento debido a la presencia de níquel, pero usualmente desarrollan resistencia al níquel. El níquel para los animales es un elemento esencial en pequeñas cantidades. Pero puede ser también peligroso cuando se excede la máxima cantidad tolerable. Esto puede causar varios tipos de cánceres en diferentes lugares del cuerpo (Lenntech BV, 1998). El ECA establecido para aguas de categoría 1 – A2 no presenta valor para aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (MINAM, 2015).

### **g) Zinc**

El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005- 0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la blenda, marmatita o esfalerita de zinc,  $\text{ZnS}$ . Es un elemento esencial para el desarrollo de vegetales, animales y para la salud humana, la deficiencia de zinc en la dieta humana deteriora el crecimiento y la madurez y produce también anemia (Lenntech BV, 1998).

El zinc está presente en la mayor parte de los alimentos, especialmente en los que son ricos en proteínas; sin embargo, la industria minera y del acero vierten sus aguas residuales con grandes cantidades de zinc a los ríos y cursos de agua contaminándola y haciéndola no apta para el consumo humano y para las actividades agrícolas, los peces que viven en aguas contaminadas acumulan zinc biomagnificándose en la cadena alimenticia (Lenntech BV, 1998). El ECA establecido para aguas de categoría 1 – A2 es 5 mg/L para aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (MINAM, 2015).

### 2.2.3. Calidad de agua

La calidad del agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares. En el caso del agua potable, estas normas se establecen para asegurar un suministro de agua limpia y saludable para el consumo humano, y, de este modo, proteger la salud de las personas. Estas normas se basan normalmente en unos niveles de toxicidad científicamente aceptables tanto para los humanos como para los organismos acuáticos (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2010). Para el Perú, los ECA establecidos se presentan en la Tabla N° 1:

**Tabla N° 1:** ECA– Categoría 1 A2 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional)

Parámetro	Unidad	Valor
<b>Físicos-químicos:</b>		
pH	valor pH	5.5 – 9.0
Conductividad Eléctrica	µS/cm	1600
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	≥ 5
Temperatura	°C	Δ 3
<b>Químicas:</b>		
Metales pesados:	mg/L	
Al		5
Cd		0.005
Cu		2
Fe		1
Mn		0.4
Ni		0.07
Zn		5

Fuente: Ministerio del Ambiente (2015)

### 2.2.3.1. Parámetros fisicoquímicos

#### a) pH

Este parámetro mide la actividad de los iones hidrógenos, a mayor concentración de iones hidrógeno el pH será más bajo, pues se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno (Brown *et al.*, 1998; Chang y Bourneville, 2007).

$$\text{pH} = \log 1/[\text{H}^+] = - \log [\text{H}^+]$$

Un pH bajo indica alto grado de acidez. Asimismo, García (2002) asegura que el pH es una propiedad fundamental e importante que afecta a muchas reacciones químicas y biológicas; asimismo, menciona que a valores extremos de pH pueden originar la muerte de peces, drásticas alteraciones en la flora y fauna; además investigaciones científicas que estudian esta relación encuentran que a medida que disminuye el pH acuático, los metales pasan a formas iónicas más fácilmente absorbibles por los peces y otros organismos. El principal sistema regulador del pH en aguas naturales es el sistema carbonato (dióxido de carbono, ión bicarbonato y ácido carbónico). El Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ECA) para aguas de categoría 1 – A2 es de 5.5 a 9 unidades de pH (MINAM, 2015).

#### b) Conductividad eléctrica

Es la capacidad que tienen las aguas de conducir la corriente eléctrica, y depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia, así como de la temperatura de medición. El Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ECA) para aguas de categoría 1 – A2 es de 1600 uS/cm (MINAM, 2015).

### **c) Sólidos totales**

Es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de la muestra tal como está, a la temperatura de 103 a 105°C. Los sólidos totales incluyen los sólidos totales suspendidos y los sólidos totales disueltos.

### **d) Sólidos disueltos**

Se refiere a los sólidos disueltos en el agua y secados a 180 °C, se realiza con el fin de destruir la materia orgánica, carbonatos y en general para deshidratar a la mayoría de sales y para clasificar a las aguas minerales en base a su contenido mineral.

### **e) Turbidez**

Se debe a las partículas sólidas en suspensión y coloides, como consecuencia de reacciones (Rodier *et al.*, 2011).

### **f) Caudal**

Se refiere a la cantidad de agua que corre en una unidad de tiempo.

## **2.2.4. Biorremediación**

La biorremediación es un método de tratamiento biológico de contaminantes ambientales en el que se requiere de organismos vivos como plantas y microorganismos, (principalmente bacterias y hongos) que destruyen y/o transforman contaminantes peligrosos (Hashim, Mukhopadhyay, Sahu, y Sengupta, 2011). Los procesos de biorremediación para el tratamiento de la contaminación por metales ofrecen una alta especificidad mediante mecanismos de bioadsorción, bioacumulación, biotransformación o biolixiviación a formas no tóxicas del metal, además de

ser más económicos y seguros que las tecnologías convencionales (Fang *et al.*, 2007).

### **2.2.5. Fitorremediación**

Es una técnica de biorremediación en la cual se utiliza plantas asociadas a microorganismos con el fin de reducir las concentraciones o efectos tóxicos de contaminantes en el ambiente. Estas pueden ser usadas para remover metales pesados o contaminantes orgánicos. La fitorremediación se considera un método eficiente y amigable con el ambiente ya que sólo utiliza el proceso de fotosíntesis para su funcionamiento y no causa efectos secundarios en las propiedades del suelo y agua. Las plantas utilizadas para tratar ambientes contaminados con metales pesados se denominan metalófitas, que son aquellas plantas que se han adaptado y crecen en suelos ricos en metales pesados. Estas plantas se encuentran principalmente en suelos con afloramiento de minerales, llamados metalíferos, las cuales, al estar expuestas a grandes concentraciones de diferentes metales, han desarrollado una gran tolerancia bajo condiciones ambientales locales. Asimismo, muchas metalófitas se han desarrollado en hábitats degradados por actividades industriales, como es el caso de los depósitos mineros, que se componen de diferentes metales peligrosos. Las metalófitas están divididas en tres categorías, excluidores de metales, indicadores y hiperacumuladores de metales (Ali *et al.*, 2013).

#### **2.2.5.1. Excluyente de metal**

Los excluidores de metal son aquellos que acumulan metales pesados dentro de sus raíces, pero restringen su transporte y su entrada a partes aéreas de la planta. Tales plantas tienen un bajo potencial para la extracción de metales pero pueden ser eficientes para fines de fitoestabilización (Ali *et al.*, 2013).

#### **2.2.5.2. Indicadoras**

Los indicadores acumulan metales pesados en su parte aérea, como el nombre indica, estas plantas generalmente

reflejan la concentración de metales pesados en el sustrato (Ali *et al.*, 2013).

### 2.2.5.3. Hiperacumuladoras

Las plantas hiperacumuladoras son un caso especial o extremo de plantas acumuladoras y son las que pueden acumular niveles de metales pesados en sus partes aéreas, mayores a los que existen en el suelo o plantas acumuladoras que habitan cerca de ella. Para el establecimiento del estatus hiperacumulador, los tejidos de las partes aéreas, debería ser considerado como solo follaje de la planta. La frase "Crecimiento en su habitat natural" implica que los hiperacumuladores deben lograr la hiperacumulación del metal mientras continúan con un nivel de salud suficiente para mantener la auto sostenibilidad de su población. La mayoría de los autores que han estudiado este tipo de plantas, consideran y citan el criterio para la hiperacumulación de metales propuesto por Brooks y Braker (1989), según el cual los hiperacumuladores son especies de plantas, las cuales acumulan mayor de 100mg/Kg de peso seco en Cd, 10000 mg/Kg en peso seco en Ni, Cu y Pb o mayor que 10000 mg/Kg de peso seco en Zn y Mn en sus brotes cuando crecen en suelos ricos en metales (Ali *et al.*, 2013).

### 2.2.5.4. Factor de bioacumulación

Según Zayed *et al.* (1998) citado por Jara *et al.* (2017, p. 589) el factor de bioconcentración (FBC) de metales pesados resulta de la división entre el contenido del metal en los tejidos (raíces y parte aérea) de la especie vegetal y la concentración del metal en el agua o sedimento. El FBC es calculado para cada metal empleando esta ecuación:

$$FBC = \frac{\text{Concentración}_{\text{tejido cosechado}}}{\text{Concentración}_{\text{agua-sedimento}}}$$

Donde,  $C_{\text{tejido cosechado}}$  es el contenido total de los metales pesados en los tejidos de las raíces, tallo y las hojas por planta para cada elemento; y  $C_{\text{agua}}$ , es la concentración de los metales pesados analizado en el agua o en el sedimento para cada elemento (Jara *et al.*, 2017). Asimismo, según Baker (1981) si dicho factor es menor a 1 se considera que la planta es excluyente, si se encuentra entre 1 y 10 como acumuladora y si es mayor a 10 como hiperacumuladora.

## **2.2.6. Estrategias de fitorremediación**

### **2.2.6.1. Fitoextracción**

Es la absorción de contaminantes del suelo o agua por la raíz de las plantas y su translocación y acumulación. La translocación a los brotes es un proceso bioquímico crucial y es deseable para un fitorremediación efectiva debido a que la cosecha de raíces no es posible (Bhargava *et al.*, 2012).

### **2.2.6.2. Fitoestabilización o fitoinmovilización**

Es el uso de ciertas plantas para la estabilización de contaminantes en suelos contaminados. Esta técnica es usada para reducir la movilización y biodisponibilidad de contaminantes en el ambiente, así prevenir su migración a aguas subterráneas o su entrada a la cadena alimenticia. Las plantas pueden inmovilizar metales pesados a través de la absorción por raíces, precipitación, complejación o reducción de la valencia metálica en la rizósfera. La fitoestabilización limita la acumulación de metales pesados en la biota y minimiza la entrada de lixiviados a aguas subterráneas, Sin embargo, la fitoestabilización no es una solución permanente, debido que los metales pesados permanecen en el suelo, solo su movimiento es limitado. En realidad, este es una estrategia de manejo para estabilizar potenciales contaminantes tóxicos (Diez, 2008).

## **2.2.7. Humedales artificiales**

Son sistemas pasivos de depuración y consisten en réplicas de sistemas naturales, para lo cual se diseñan y construyen estructuras para contener plantas de humedales, en los cuales se controlan ciertos factores, parámetros y condiciones para potenciar su capacidad de recuperación de la calidad del agua. Son tecnologías que implican bajo costo de construcción, operación y mantenimiento, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, industriales, comerciales, de servicio agrícola, pecuario, y en general de cualquier otro uso, que haya degradado en su calidad original (Waston, 1989).

El propósito de los humedales artificiales es permitir que ocurra la reacción química y biológica natural en el sistema de tratamiento. Las plantas proporcionan un área superficial para microbios y transportan el oxígeno produciendo una zona de oxidación en la rizósfera donde adicionalmente existen poblaciones microbianas. Este complejo de vegetación y microbios tiene una alta eficiencia en modificar nutrientes, metales y otros compuesto (Escudero, 2011).

### **2.2.7.1. Tipos de humedales artificiales**

Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas, estos son el Humedal de Flujo Libre Superficial (HFL) y el Humedal de Flujo Sub superficial (HFS); en ambos casos se aplica el agua de manera permanente y el tratamiento se produce cuando el agua atraviesa los mismos.

#### **a) Humedales de Flujo Libre Superficial (HFL)**

Los humedales con flujo libre son estanques o canales en los que la superficie del agua se encuentra expuesta a la atmósfera y las plantas emergentes están enraizadas sobre una capa de suelo generalmente impermeabilizado, para evitar la infiltración al manto freático (Escudero, 2011). Generalmente, las aguas aplicadas a estos sistemas reciben un tratamiento primario para aumentar la eficiencia de los humedales, y la depuración de las mismas se logra al circular

el agua a través de los tallos y raíces de las plantas y la acción bacteriana (Waston, 1989).

## b) Humedales de Flujo Sub-Superficial (HFS)

Los humedales de Flujo sub superficial son estanques o canales con el fondo generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava en el que se siembra las plantas emergentes y donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de grava (Escudero, 2011).

Asimismo, Escudero (2011) menciona que este tipo de humedal puede ser construido con Flujo Horizontal Sub-superficial, en el que el medio poroso se mantiene saturado por el agua, o con flujo vertical, en el que el medio poroso no se encuentra saturado, debido a que el agua se aplica usualmente sobre la superficie del lecho a intervalos de tiempo, lo que permite que el agua percole a través del medio, de forma similar a lo que sucede en un filtro de arena intermitente. La Tabla Nº 2, presenta las diferencias entre los sistemas de flujo en los humedales.

**Tabla Nº 2:** Diferencias entre sistemas de flujo en humedales artificiales

	<b>Flujo superficial</b>	<b>Flujo subsuperficial</b>
<b>Tratamiento</b>	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. biodiscos, fangos activados, etc)	Para tratar flujos primarios (aguas pre tratadas, ej. Tanques IMHOFF, pozos sépticos).
<b>Operación</b>	Opera con baja carga orgánica	Altas tasas de carga orgánica.
<b>Olor</b>	Puede ser controlado	No existe
<b>Insectos</b>	Control es caro	No existe
<b>Protección térmica</b>	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi constante
<b>Área</b>	Requieren superficies de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
<b>Costo</b>	Menor costo en relación al subsuperficial	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%

<b>Valor ecosistema</b>	Mayor valor como ecosistemas para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
<b>Usos generales</b>	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes.
<b>Operación</b>	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamiento terciario y mejoramiento de calidad agua)	Puede usarse como tratamiento secundario.

Fuente: Fuente: Delgadillo *et al.* (2010)

## 2.2.8. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales

Para conocer las ventajas y las desventajas que tiene la aplicación de humedales artificiales en el tratamiento de aguas, la Tabla N° 3 presenta un cuadro comparativo de las ventajas y desventajas de este tipo de humedal.

**Tabla N° 3:** Ventajas y desventajas del uso de humedales artificiales

TIPO DE TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Humedales artificiales	Remueve altos porcentajes de sólidos y bacterias	Todavía se encuentran en estado experimental
	Representa bajo costo de obras civiles	Requiere mantenimiento periódico de exceso de material vegetal
	Representa bajo costo de mantenimiento	Sólo son aplicados donde exista la vegetación nativa

Fuente: Delgadillo *et al.* (2010)

En términos de costos, los humedales artificiales superficiales requieren menor inversión en relación a los de flujo sub superficial, ya que en los primeros no se incurren en los gastos mayores: la impermeabilización, la provisión y colocación del sustrato de grava.

## 2.2.9. Plantas utilizadas en Humedales

### 2.2.9.1. *Distichia muscoides*

Pertenece a las plantas en cojín; su forma es el resultado de un crecimiento vegetativo que se ramifica reiterativamente en forma dicotómica; tienden a ser compactas y voluminosas y conforman masas densas y muy extensas que acumulan gran cantidad de materia orgánica y humedad en el interior del cojín;

es posible que tengan una mayor capacidad para captar la energía solar y acumular calor. Su forma esférica es ideal para retener los nutrientes que se acumulan en su interior y que son producto de su propia descomposición, lo cual genera temperaturas superiores a las del medio exterior y les proporciona una estructura muy resistente a la acción del viento (Tovar, 1993).

#### **2.2.9.2. *Calamagrostis glacialis***

Planta perenne de 10 – 20 cm de largo por 2 – 2.5 cm de ancho, densa espiciforme, algo flexuosa. Espiguilla 7- 8 mm, lema de 5.3 – 6.3 mm de largo, escabrosa de ápice bidentado, con arista casi tan larga como la lema, colla con escasos pelos cortos, raíces largas y su hábitat es en campos abiertos de territorios altoandinos superiores, rocosos entre 4500 -5000 msnm (Tovar, 1993).

# CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA

### 3.1. Tipo de investigación

Investigación descriptiva.

### 3.2. Diseño de la investigación

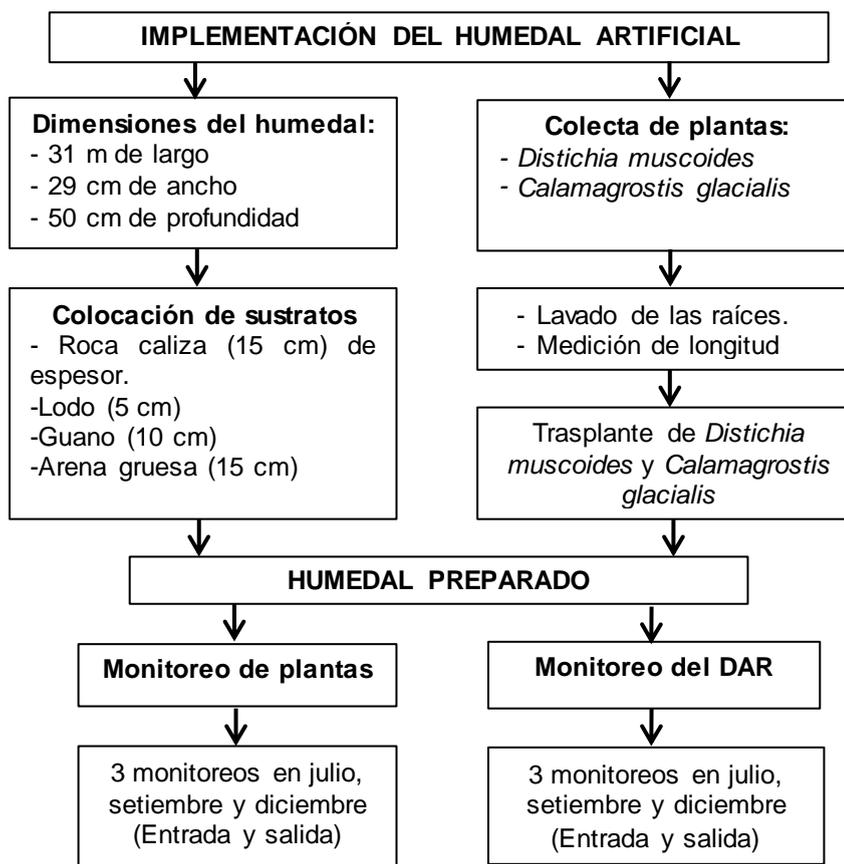
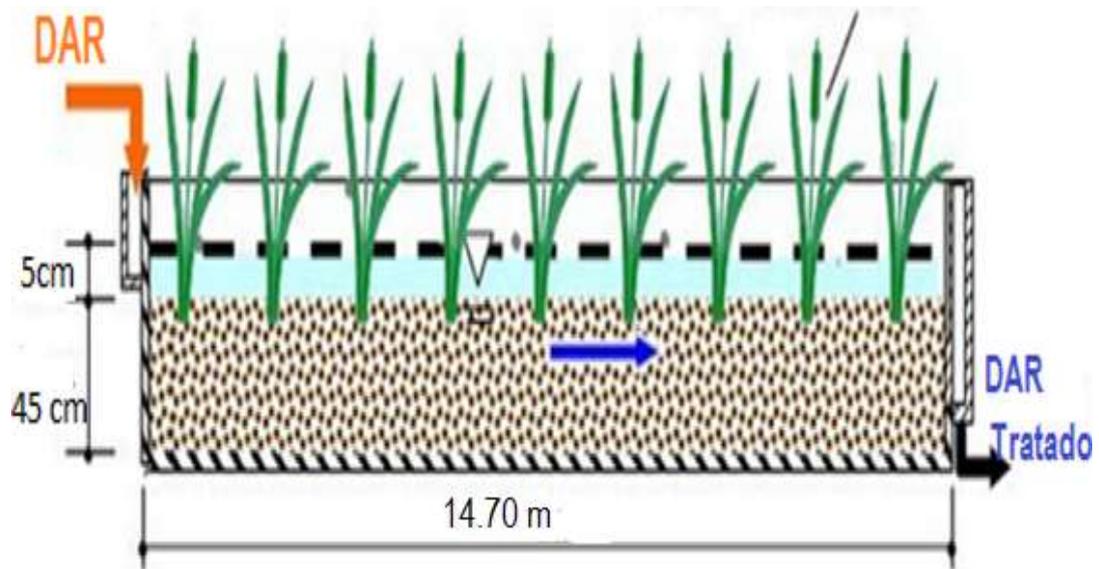


Figura N° 1: Diagrama de flujo del humedal artificial



**Figura N° 2:** Representación del humedal artificial

### 3.3. Población

Drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri.

### 3.4. Muestra

Se trabajó con las siguientes muestras:

- Agua a la entrada y salida del sistema del humedal artificial. Se tomó 1 L en cada monitoreo.
- *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* extraídos del humedal artificial. Se colectó 1 ejemplar en cada monitoreo.
- Sedimento extraído del humedal artificial. Se extrajo 1 kg.

### 3.5. Área de estudio

El deshielo del nevado Pastoruri (Recuay, Ancash) ha dado origen a 7 lagunas de reciente formación. Entre ellas se encuentra la Laguna N° 2, cuyas aguas son conducidas hacia la zona de Parqueo del Circuito Turístico de Pastoruri para su uso doméstico. La conducción de las aguas se realiza a través de un canal, cuyo tramo inicial de 31 metros se encuentra revestido con cemento, y luego mediante tuberías. En este sentido, el humedal artificial fue implementado en el canal revestido, teniendo como coordenadas WGS84 UTM 260712.51 N y 8903816.31 E Zona 18S. En el Anexo se presenta el mapa de ubicación correspondiente.

Es importante aclarar que la infraestructura para la conducción de agua desde la laguna hasta la zona de Parqueo en fue construida por el Proyecto de la Ruta del Cambio Climático en el 2013, que también incluía un sistema de remediación mediante humedales. Sin embargo, dicho sistema fue inadecuadamente implementado, que lo conllevó a su colmatación y abandono.

### 3.5.1. Geología de Pastoruri

La geología de la zona de estudio corresponde a la Era Cenozoica, del Sistema Cuaternario y de la serie Holoceno, con unidades de depósitos morrénicos, fluvio-glaciares. Presenta un relieve accidentado y agreste con flancos empinados y superficies rocosas. En la cabecera de la cuenca de Pastoruri se encuentra la formación Chicama, la cual tiene estratificaciones esencialmente de lutitas gris oscuras a negras y pizarras negras piritosas, con intercalaciones delgadas de areniscas (Cobbing *et al.*, 1996; Durand *et al.*, 2009)

En un estudio realizado por Santofimia *et al.* (2017), se caracterizó la composición química y mineralógica de muestras de roca de la zona de Pastoruri, encontrándose que el principal componente en todas las muestras fue la Pirita, con altas concentraciones de Fe (en forma de  $Fe_2O_3$ ) y S. Dichas muestras tuvieron altas concentraciones de elementos traza como el Mn, Co, Ni, Cu y Zn, los cuales pueden indicar la presencia de otros sulfuros o trazas de estos metales en la pirita. Las muestras estudiadas en la investigación referida fueron identificadas como lutitas negras, esquisto, material carbonoso y areniscas blancas con altas concentraciones de pirita.

### 3.5.2. Zonas de vida

En la Tabla N°4 se presentan las zonas de vida presentes en el área de estudio de acuerdo con el Mapa Ecológico del Perú, elaborado por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN, 1976).

**Tabla N° 4:** Zonas de vida del área de estudio

Zona de vida	Precipitación (mm)		Temperatura (C°)		Altitud (msnm)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Nival Tropical	500	1000	0	15	4500	5000
Tundra muy húmeda Andino Tropical	250	500	3	6	4300	5000

**Fuente:** Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (1976).

En estas zonas de vida crecen especies vegetales como la *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* que están adaptadas a condiciones de bajas temperaturas.

### 3.6. Procedimiento

#### 3.6.1. Actividades preliminares

##### 3.6.1.1. Evaluación de parámetros físico-químicos del drenaje ácido de roca

Se realizó un análisis de parámetros fisicoquímicos, con el fin de conocer las características iniciales de los drenajes ácidos de roca. Para tal fin, se solicitó los servicios del laboratorio de la PUCP, en los que se realizaron los análisis tomando en cuenta métodos normalizados (Tabla N° 5).

**Tabla N° 5:** Parámetros de evaluación según ECA– Categoría 1 A2 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional)

Parámetro	Método	Límite de detección
<b>Físicos-químicos:</b>		
Ph	EPA 150.1	0.1
Conductividad Eléctrica	EPA 120-1	0.1
Oxígeno Disuelto (OD)	APHA 4500-OG	-
Temperatura	APHA 2550B	0.1
<b>Químicas:</b>		
Metales pesados:	APHA 3500	0.1
Al	ICP-MS	
Cd		
Cu	EPA-600/R- 94-	
Fe	111(alternativo)	
Mn		
Ni		
Zn		

Fuente: Decreto Supremo N° 004 – 2017– MINAM (Págs. 13 – 14)

##### 3.6.1.2. Preparación de insumos

**Grava y arena:** Este material fue adquirido de la calera Casanger S.R.L. (Carhuaz, Áncash). Para obtener estos

materiales, se chancaron 500 kg de piedra caliza, que luego fueron tamizados, obteniéndose partículas de diámetro de 0.5 cm y 1.18 mm para la grava y arena gruesa, respectivamente. Posteriormente, estos materiales fueron lavados con agua potable. En la Imagen N° 3 se muestran los procedimientos del material calcáreo.

Asimismo, se analizó el contenido de Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni y Zn en este insumo, a fin de evaluar el posible aporte de estos metales a partir del mismo. Los análisis fueron realizados en el laboratorio del Instituto de Corrosión y Protección de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), a través de la determinación de metales por el método ICP-OES, basado en EPA 200.7/94.

**Estiércol de ganado ovino:** Este material fue adquirido de establos de la Comunidad Campesina de Cátac (Recuay, Áncash).



**Imagen N° 2:** Preparación de roca caliza. **A:** Tamizado del material. **B:** Lavado de grava y arena. **C:** Tamaño de la grava preparada. **D:** Carguío de material para su traslado a Pastoruri.

### 3.6.2. Instalación del humedal artificial

Como actividad inicial se realizó la limpieza del canal retirando piedras y plantas empleando lampas, picos y palas. También se limpiaron las paredes y la base del canal para eliminar sedimentos. Posteriormente, se cerró la compuerta de entrada de agua al canal, luego se trazaron líneas de nivel que marcaban alturas de 15, 20, 30 y 45 cm desde la base.

Como actividad secundaria, se relleno el canal con piedra caliza como primera capa desde la base hasta una altura de 15 cm, sobre la cual se colocó una capa de lodo de 5 cm, sobre esta se colocó una capa de guano de 10 cm y, por último, una capa de arena gruesa de 15 cm de espesor.

Finalmente, se colocaron los ejemplares de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* con una distancia de 10 cm entre plantas, en un área total de 4.263 m<sup>2</sup> (14.7 m x 0.29 m). Dicho espacio fue distribuido de la siguiente manera: En los primeros 3.2 m del humedal se plantó *Distichia muscoides*; en los siguientes 4.3 m, *Calamagrostis glacialis*; en los siguientes 3 m, *Distichia muscoides*; y en los últimos 4.2 m, *Calamagrostis glacialis*. Las actividades descritas se presentan en la secuencia de figuras del 4 al 13.



**Imagen N° 3:** Canal de conducción de agua construido por el proyecto “Por las rutas del cambio climático”



**Imagen Nº 4:** Limpieza concluida del canal



**Imagen Nº 5:** Colocado de material calcáreo



**Imagen Nº 6:** Adición de lodo activado portador de nutrientes y bacterias sulfato reductoras



**Imagen N° 7:** Adición de guano ovino como portador de nutrientes y microorganismos



**Imagen N° 8:** Adición de la última capa (arena gruesa)

**A**



**B**



**Imagen N° 9:** Recolección de plantas. **A:** *Distichia muscoides*. **B:** *Calamagrostis glacialis*



**Imagen Nº 10:** Lavado de *Calamagrostis glacialis*



**Imagen Nº 11:** Establecimiento de *Distichia muscoides*



**Imagen N° 12:** Trasplante de *Calamagrostis glacialis*

### 3.6.2.1. Seguimiento de la estabilización del humedal

Después del trasplante de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*, se realizó un control de adaptación durante 7 días seguidos, luego los controles fueron una vez por semana durante 3 meses (Entre abril y junio del 2015). Durante las inspecciones de adaptación de las plantas también se consideró los siguientes indicadores:

- **Caudal de la salida de la Laguna Pastoruri N° 2:** Esta medición se realizó con la finalidad de conocer que este caudal se mantiene constante a lo largo del año y así asegurar el flujo permanente de agua por el humedal artificial. Por ello, se realizaron mediciones el 28 de julio del 2015 (inicio de estiaje), el 27 de setiembre de 2015 (época de estiaje) y el 8 de diciembre del 2015 (época de lluvia). Se utilizó el Correntómetro Global Water 800-876-1172, modelo FP111, Serie #1302000240. Los caudales determinados fueron:
  - Q Julio = 13,94 L/s
  - Q Setiembre = 12,2 L/s
  - Q Diciembre = 14,76 L/s
  
- **Caudal del canal:** Se reguló la entrada de agua al canal a fin de evitar que las plantas sean cubiertas en su totalidad por el exceso

de agua. Para ello, se empleó el método del flotador a fin de tener un caudal constante.

- **Método del flotador:** Este método es el más sencillo, pero solo permite en forma aproximada el caudal. Se debe estimar la velocidad del agua y el área del canal. El cálculo del caudal estimado se determinó según Sánchez (2010) mediante la siguiente expresión matemática:

$$Q = A \times V$$

Donde:

A = Es el área del canal

V = Velocidad del flujo de agua

Hallando el área:

$$A = B \times H$$

Dónde:

B= Ancho del canal = 0.29 m

H= Profundidad del canal = 0.40 m

$$A = (0.29 \text{ m})(0.40 \text{ m}) = 0.116 \text{ m}^2$$

Hallando la velocidad:

$$V = L / T$$

Dónde:

L= Longitud del tramo = 0.90 m

T= Tiempo promedio del recorrido del flotador = 11.3 s

$$V = (0.90 \text{ m}) / (11.3 \text{ s}) = 0.0796 \text{ m/s}$$

**Entonces:**

Hallamos el caudal del canal:

$$Q = (0.116 \text{ m}^2) (0.0796 \text{ m/s})$$

$$Q = 0.0092 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Tiempo de retención hidráulica:**

$$TRH = V_c / Q$$

Donde:

V<sub>c</sub> = Volumen del canal ocupado

Q = Caudal del agua en el canal

**Hallando Vc.**

$$Vc = L \times a \times b$$

Dónde:

L = Longitud = 3.2 m

a = Altura o profundidad del canal ocupado = 0.40 m

b = Base o ancho del canal = 0.29 m

$$Vc = 3.2\text{m} \times 0.40\text{m} \times 0.29\text{m} = 0.371 \text{ m}^3$$

**Entonces.**

$$\text{TRH} = 0.371\text{m}^3 / 0.0092 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{TRH} = 40.33 \text{ s}$$

**Cálculo del tiempo de retención hidráulico de la *Distichia muscoides*:**

$$\text{TRH (Dm)} = 0.371 \text{ m}^3 / 0.0092\text{m}^3/\text{s}$$

$$\text{TRH (Dm)} = 40.33 \text{ s}$$

**Cálculo del tiempo de retención hidráulico del *Calamagrostis glacialis*:**

Longitud del canal sembrado con *Calamagrostis glacialis* = 4.3 m

$$Vc = 4.3 \text{ m} \times 0.29 \text{ m} \times 0.40 \text{ m} = 0.4989 \text{ m}^3$$

$$\text{TRH (Cg)} = 0.499\text{m}^3 / 0.0092 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{TRH (Cg)} = 54.24 \text{ s}$$

Tiempo de retención hidráulico total = 94.57 s

$$\text{TRH (T)} = 3.27 \text{ minutos.}$$

- **Altura de la planta:** Se tomaron medidas de la altura de *Calamagrostis glacialis* y *Distichia muscoides* al inicio y al final de la investigación.



**Imagen N° 13:** Crecimiento de *Distichia muscoides* en el humedal artificial.



**Imagen N° 14:** Crecimiento de *Calamagrostis glacialis* en el humedal artificial

- **Formación de precipitado:** Se observó la formación de precipitados de color naranja, la misma que fue aumentando con el transcurrir del tiempo.



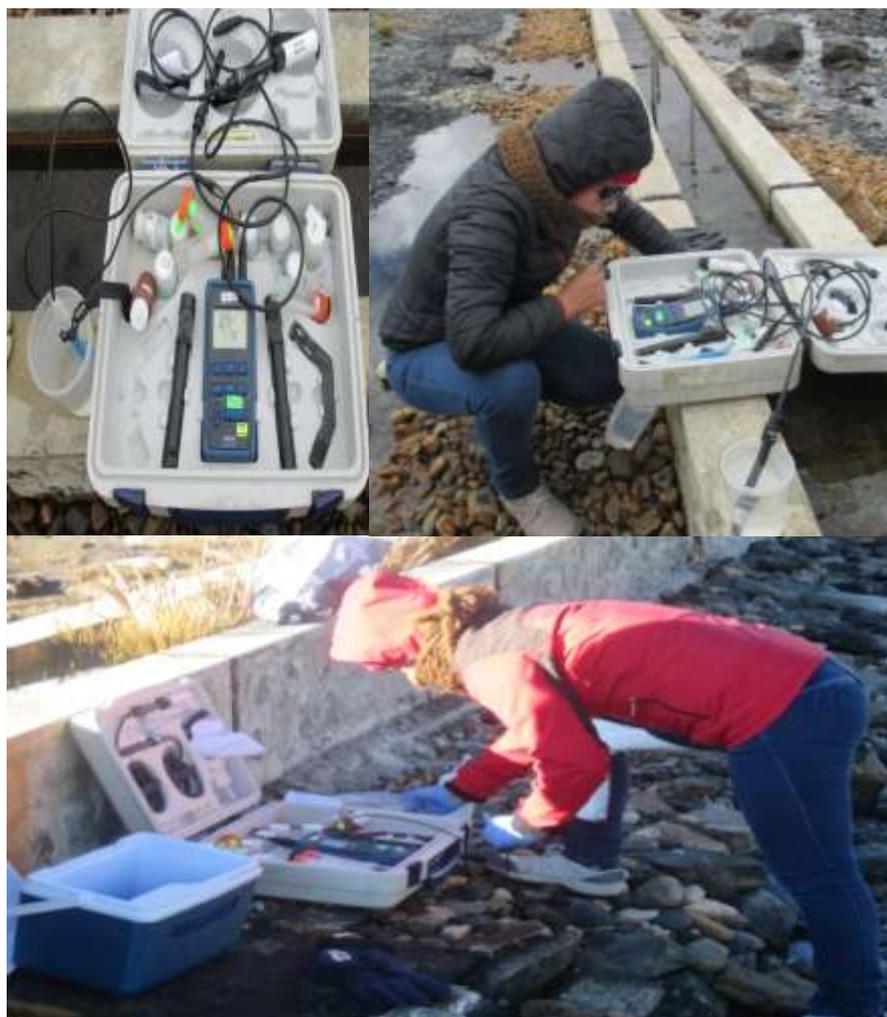
**Imagen N° 15:** Precipitación naranja-rojizo

### **3.6.3. Monitoreo de agua**

En las imágenes 18 y 19 se muestran actividades propias del monitoreo de agua.



**Imagen N° 16:** Monitoreo en el humedal artificial



**Imagen N° 17:** Medición de pH y conductividad eléctrica

### **3.6.3.1. Primer monitoreo**

El primer monitoreo de agua se llevó a cabo el 28 de julio del 2015, el cual se realizó de acuerdo a los métodos APHA, AWWA y WPCF 3010-B (para colecta y conservación de muestras), 3010-C (sobre precauciones generales) y 3030-B (sobre filtración preliminar) (APHA, 1992). Para ello, se colectó 1 litro de agua, se etiquetó y guardó en refrigeración. Posteriormente, las muestras de agua fueron filtradas con una membrana de 0.45  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro. Seguidamente, se añadió  $\text{HNO}_3$  concentrado para acidificar las muestras hasta un pH menor o igual a 2. Luego de ello, las muestras fueron enviadas al laboratorio del Instituto de Corrosión y Protección de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) para la determinación de metales pesados disueltos por el método ICP-AES,

basado en EPA 200.7/94. Asimismo, se midieron los valores de pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura del agua.

Los códigos fueron:

M1-AE (primer monitoreo- Agua de entrada)

M1-AS (primer monitoreo – Agua de salida)

### **3.6.3.2. Segundo monitoreo**

El segundo monitoreo se realizó el 27 de setiembre del 2015 siguiendo la misma metodología descrita para el primer monitoreo. La determinación de metales pesados se realizó en el Laboratorio de Calidad Ambiental – UNASAM. Los códigos de identificación fueron:  
Los códigos empleados fueron:

M2-AE (segundo monitoreo – Agua de entrada)

M2-AS (Segundo monitoreo – Agua de salida)

### **3.6.3.3. Tercer monitoreo**

El tercer monitoreo se realizó el 8 de diciembre del 2015 siguiendo la misma metodología descrita para el primer monitoreo. La determinación de metales pesados se realizó en el Laboratorio de Calidad Ambiental – UNASAM. Los códigos de identificación fueron:  
Los códigos empleados fueron:

M3-AE (segundo monitoreo – Agua de entrada)

M3-AS (Segundo monitoreo – Agua de salida)

### **3.6.4. Monitoreo de especies vegetales**

En la misma fecha en la que se realizaban los monitoreos de agua también se recolectaron ejemplares de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* para su análisis en cuanto a su contenido en metales pesados (Al, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn y Zn).

### **3.6.5. Monitoreo de sedimento**

Se colectaron dos muestras de sedimento para determinar la concentración de metales pesados que se depositaron en el humedal artificial. Las muestras fueron preservadas en recipientes lavados con ácido nítrico de acuerdo al “Procedimiento para el muestreo de aguas y sedimentos para determinación de metales” del Instituto de Hidrología y Meteorología de Colombia. La determinación de metales pesados se realizó en el Laboratorio de Calidad Ambiental – UNASAM. Los códigos de identificación fueron:

SE (Sedimento de entrada)

SS (Sedimento de salida)

### **3.6.6. Herborización de las plantas**

Para la herborización se siguió el procedimiento del Herbario de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT) – HUT (Anexo N° 01-1).

#### **- Colecta de ejemplares de plantas para su identificación**

Se tomaron tres ejemplares de cada planta, previamente lavadas, para su identificación. Luego las plantas se pusieron a secar en unos bastidores con periódicos. Los ejemplares fueron etiquetados con los siguientes datos: Código de muestra, ubicación, altitud, fecha y hora de la recolección.

#### **- Identificación**

Las plantas fueron identificadas por el biólogo José Mostacero León, Director de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Trujillo. Se corroboró la información del tipo de familia, género y especie de cada planta en el Herbario de la Universidad de Trujillo – HUT. El código de identificación de *Distichia muscoides* fue 58056 y para *Calamagrostis glacialis* fue 58058 (AnexoN°01-2).

#### **- Montaje de las plantas y su etiquetado.**

Se seleccionó un ejemplar de cada una de las plantas previamente secadas, se colocó sobre una cartulina blanca y sujetó con cola sintética

para mantenerlas firmes. Luego se colocó su respectiva etiqueta y se colocó naftalina en las muestras para su conservación (Anexo N° 01-3).

### **3.6.7. Etapa de gabinete**

Se revisaron los resultados de los reportes de análisis de Laboratorio, se sistematizó la información contrastando con el estándar de calidad para agua y finalmente se determinó el Factor de Bioacumulación según Jara-Peña (2017).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. Implementación del humedal

Las especies vegetales empleadas en el humedal lograron establecerse en un periodo de 9 meses, evidencia de ello fue el incremento en su tamaño (raíz y parte aérea) y en la acumulación de metales (Al, Fe, Mn, Ni y Zn) dentro de sus tejidos.

##### 4.1.1. Crecimiento de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*

El Gráfico N° 01 muestra que *Calamagrostis glacialis* presentó un crecimiento de 3.5 y 3.4 cm en la raíz y tallo, respectivamente. Mientras que, *Distichia muscoides* presentó un crecimiento de 3.3 y 2.8 cm en la raíz y parte aérea, respectivamente.

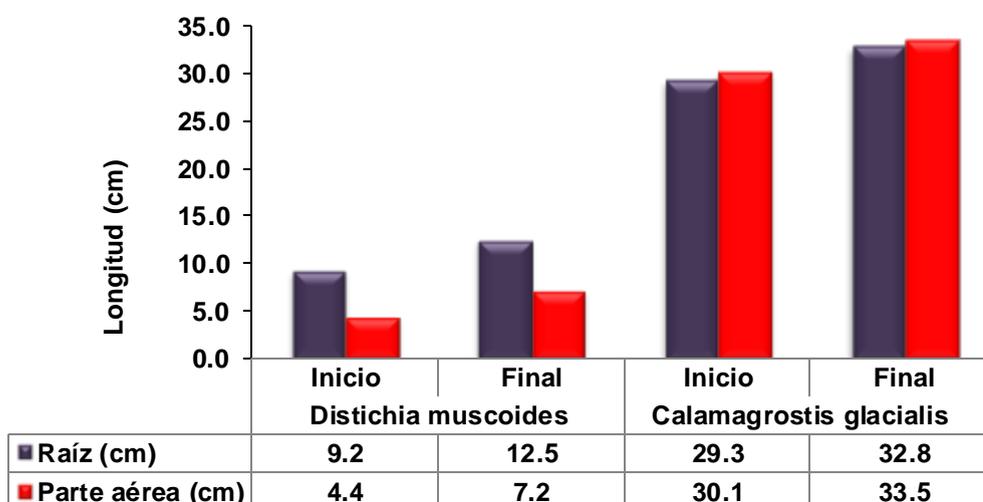
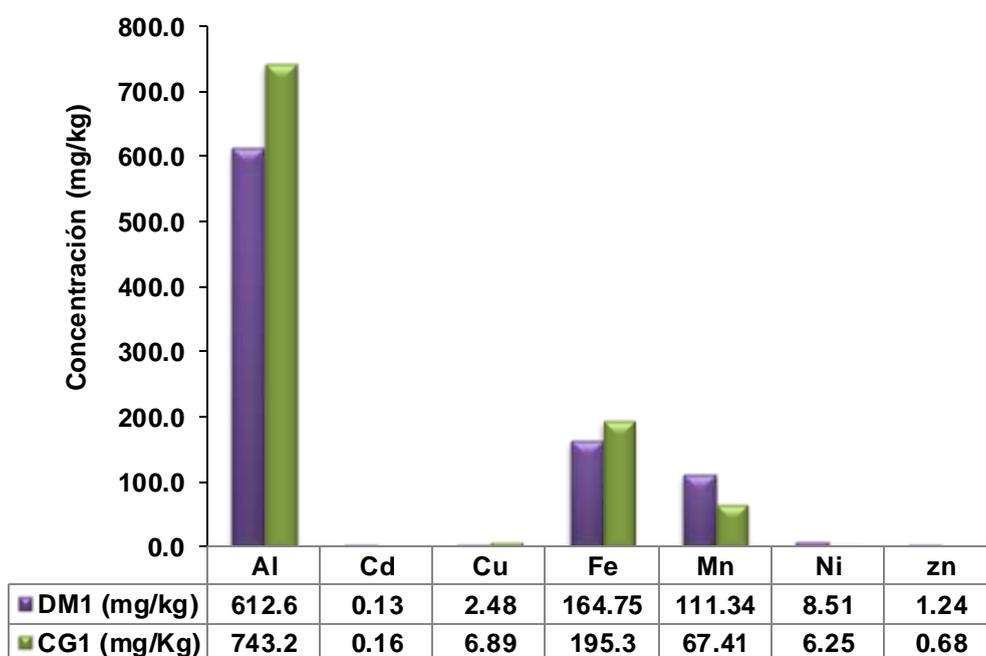


Gráfico N° 01: Longitud de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*

#### 4.1.2. Concentración de metales pesados en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*

Los gráficos 02, 03 y 04 presentan las concentraciones de metales pesados en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* en el primer, segundo y tercer monitoreo, respectivamente. También se observa que ambas especies presentan un mayor contenido de aluminio, seguido del hierro y manganeso. Asimismo, se aprecia que *Distichia muscoides* bioacumula en mayor proporción el Mn, Ni y Zn; en tanto que *Calamagrostis glacialis* Al, Cd, Fe y Cu. Dicha bioacumulación también se incrementa conforme estas especies continúan creciendo.



**Gráfico Nº 02:** Concentración de metales en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* en el primer monitoreo

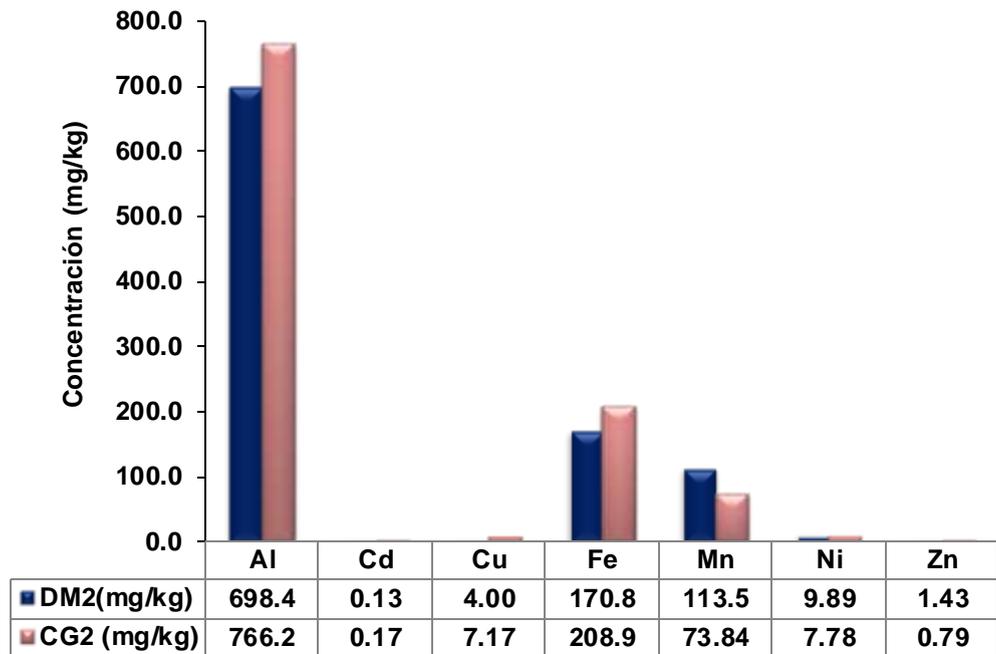


Gráfico Nº 03: Concentración de metales en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* en el segundo monitoreo

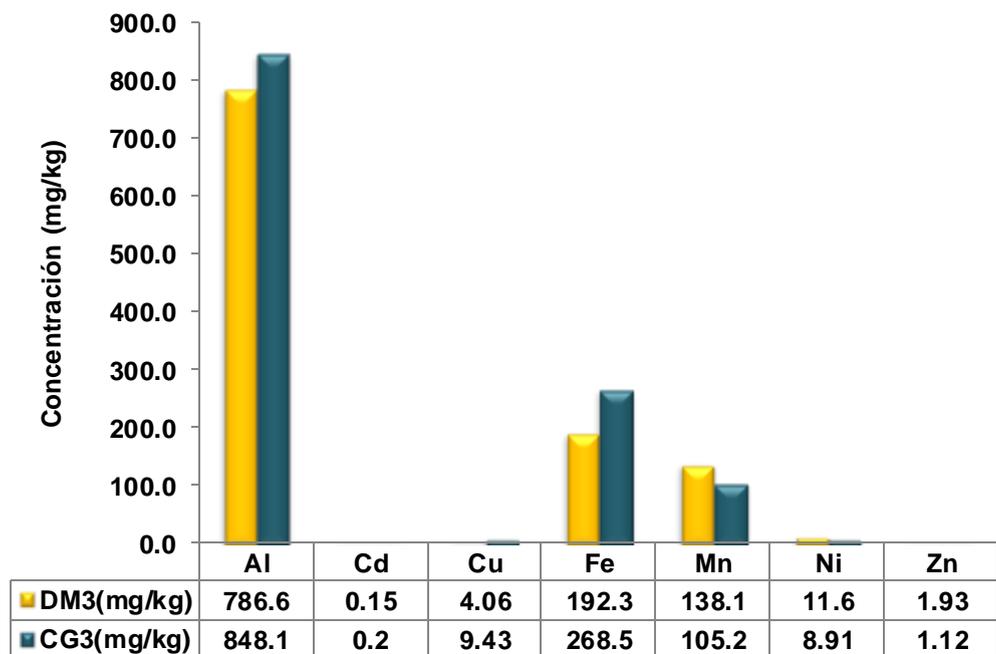


Gráfico Nº 04: Concentración de metales en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* en el tercer monitoreo

Las concentraciones de metales en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* en el último monitoreo son menores a los reportados por Nández (2016). Esta investigadora, realizó la colecta de dichas especies presentes en los suelos metalíferos de la zona de Pastoruri y evaluó la

concentración de metales en las mismas. Mientras que, en el presente estudio, dichas especies estuvieron expuestas a un drenaje ácido de roca de flujo permanente dentro de un humedal artificial.

Para el caso de *Distichia muscoides*, las concentraciones de aluminio, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc encontradas en este estudio fueron de: 786.600, 0.150, 4.060, 192.300, 138.100, 11.600 y 1.930 mg/kg, respectivamente. Valores que son menores a los reportados por Náñez (2016) para aluminio, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc con 1321.769, 4.118, 14.273, 27862.127, 1796.910, 28.568, 200.574 mg/kg respectivamente,

En el caso de *Calamagrostis glacialis*, las concentraciones de aluminio, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc fueron de 848.100, 0.200, 9.430, 268.500, 105.200, 8.910 y 1.120 mg/kg, respectivamente. Valores que son menores a los reportados por Náñez (2016) para aluminio, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc con 2983.016, 42.631, 41.224, 20767.031, 914.939, 32.216 y 95.613 mg/kg respectivamente.

Por lo descrito, *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* podrían seguir creciendo y continuar bioacumulando dichos metales. Por tanto, el tiempo de vida del humedal implementado podría ser más prolongado.

## **4.2. Reducción del grado de acidez del drenaje ácido de roca**

### **4.2.1. Caracterización del drenaje ácido de roca al iniciar la investigación**

La Tabla N° 6 muestra que el drenaje ácido de roca presenta una mayor concentración de sílice, seguida del hierro, calcio, aluminio, entre otros. Estos resultados se relacionan con el reporte de Santofimia *et al.*, (2017), quien indica que el material rocoso circundante a la Laguna Pastoruri N° 2 está compuesto mayormente por óxidos de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro ( $\text{FeS}_2$ ). Por tanto, dicho material rocoso sería el principal aportante de estos metales pesados a la Laguna Pastoruri N° 2.

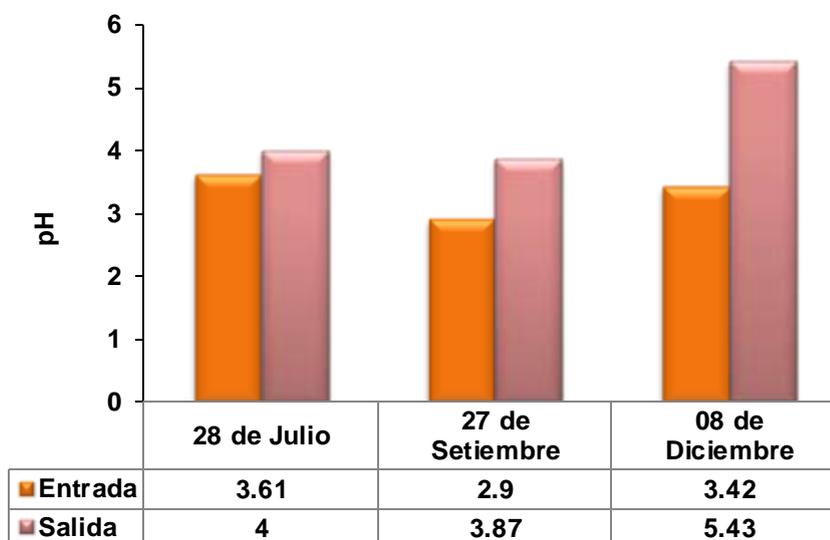
**Tabla N° 6:** Concentración de metales pesados en el drenaje ácido de roca al iniciar la investigación

<b>Metal</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>
Sílice	27.890
Hierro	15.106
Calcio	9.580
Aluminio	8.360
Magnesio	5.980
Manganeso	2.391
Potasio	1.260
Sodio	0.200
Zinc	0.189
Estroncio	0.137
Níquel	0.124
Cobalto	0.071
Litio	0.033
Boro	0.024
Bario	0.018
Cobre	0.012
Plomo	0.006
Fosforo	0.004
Titanio	0.003
Berilio	0.0029
Cadmio	0.0014
Cromo	0.0005
Plata	<0.0005
Selenio	<0.0030
Talio	<0.0030
Cerio	<0.0020
Molibdeno	<0.0020
Arsénico	<0.0010
Mercurio	<0.0010
Antimonio	<0.0010
Estaño	<0.0010
Vanadio	<0.0004

Según los resultados obtenidos por el estudio de González-toril *et al.* (2015), quien también realizó la caracterización fisicoquímica de las lagunas de Pastoruri, encontrando un pH de 3, una conductividad eléctrica entre 626 y 992  $\mu\text{S/cm}$  y altas concentraciones de Fe (44 mg/L), Al (4.3 mg/L), Mn (3.09 mg/L), Zn (0.26 mg/L) y Ni (140  $\mu\text{g/L}$ ). Resultados que son similares a los encontrados en este estudio con valores de pH de 3.17, y 770  $\mu\text{S/cm}$ . De acuerdo con González-toril *et al.* (2015), la alta concentración de hierro se debe a la oxidación disolutiva de pirita que se encuentra en la zona; asimismo, el alto contenido de aluminio se debe a la alteración de arcilla presente en las rocas.

#### 4.2.2. Variación del pH

El Gráfico N° 05 muestra la variación del pH del drenaje ácido de roca durante el periodo de estudio. Se observa que el humedal artificial logra incrementar el pH en un periodo de 9 meses. Sin embargo, el valor alcanzado aún se encuentra por debajo del estándar de calidad para agua (de 6.5 a 8.5).



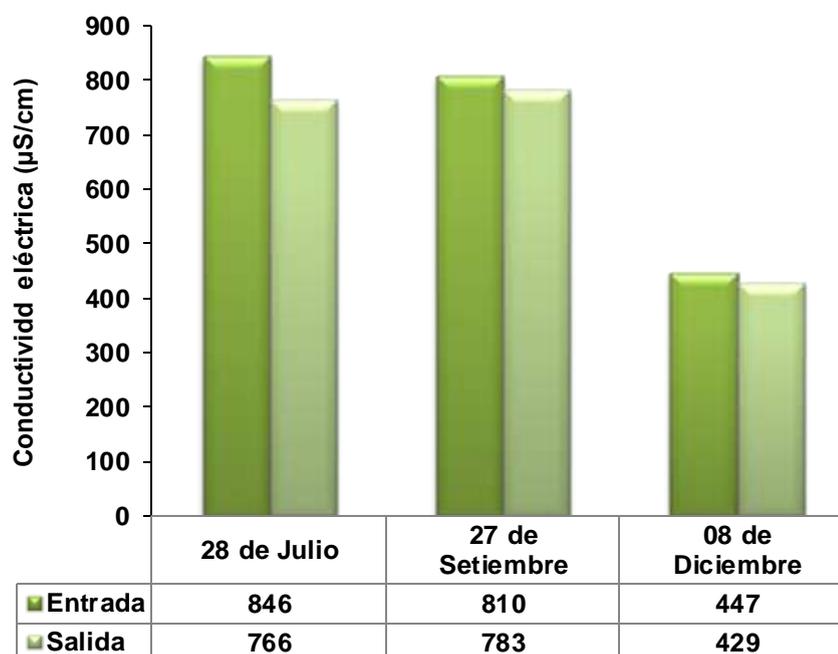
**Gráfico N° 05:** Variación del pH durante el periodo de estudio

Si bien es cierto la roca caliza empleada en el humedal se colocó con el fin de neutralizar la acidez del drenaje de roca y así subir pH de agua, el proceso de precipitación de metales (Fe y Al) en forma de hidróxido, es una reacción que libera iones hidrógeno, por consiguiente provoca la disminución del pH del agua (Aduvire, 2006), lo que puede explicar porque el humedal no logró aumentar el pH agua a niveles más aceptables. Es así que, en el primer monitoreo se tiene que el pH logra incrementarse en 0.39 unidades, en el segundo 0.97 y en el tercer monitoreo 2.01. Esto indica que a medida que el humedal artificial se va estabilizando, su capacidad de incrementar el pH del drenaje va mejorando.

#### 4.2.3. Variación de la conductividad eléctrica

El Gráfico N° 06 muestra la variación de la conductividad eléctrica del drenaje ácido de roca durante el periodo de estudio. Se observa que el humedal artificial logra disminuir la conductividad eléctrica en un periodo de 9 meses. Los valores de conductividad eléctrica estuvieron dentro del

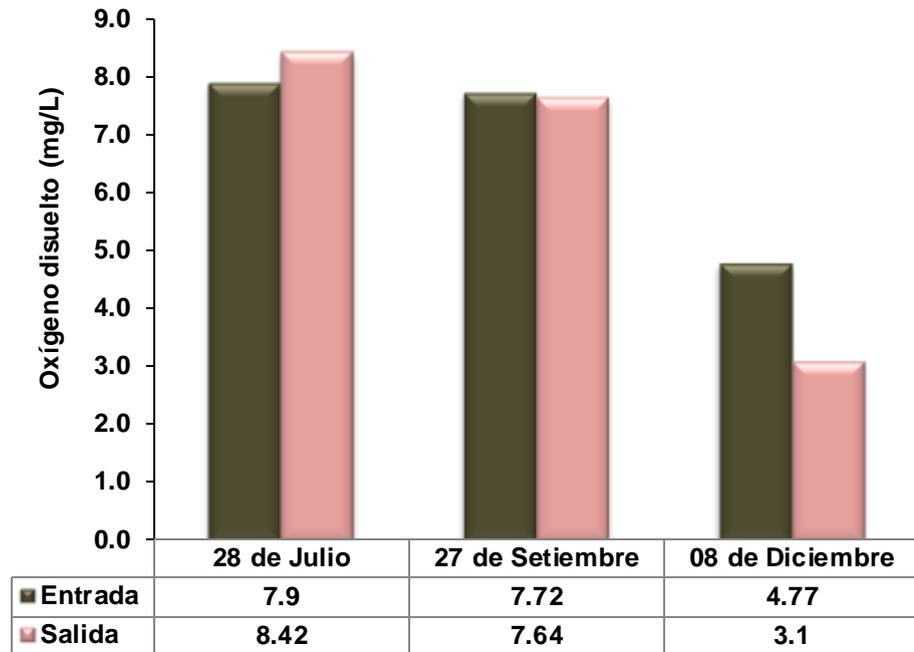
estándar de calidad para agua (1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), indicando que el agua contiene una baja concentración de iones metálicos.



**Gráfico N° 06:** Variación de la conductividad eléctrica del agua

#### 4.2.4. Variación del oxígeno disuelto

El Gráfico N° 07 muestra la variación de la concentración del oxígeno disuelto en el drenaje ácido de roca durante el periodo de estudio. Se observa que dicha concentración tanto en el primer como segundo monitoreo estuvo dentro del estándar de calidad para agua ( $>5 \text{ mg}/\text{L}$ ), mientras que para el tercer monitoreo disminuye por debajo del estándar. Esto indica que a medida que el humedal artificial se va estabilizando y la actividad microbiana aumenta, se va consumiendo mayor cantidad de oxígeno disuelto para procesos de degradación de la materia orgánica y la precipitación de hierro y aluminio.

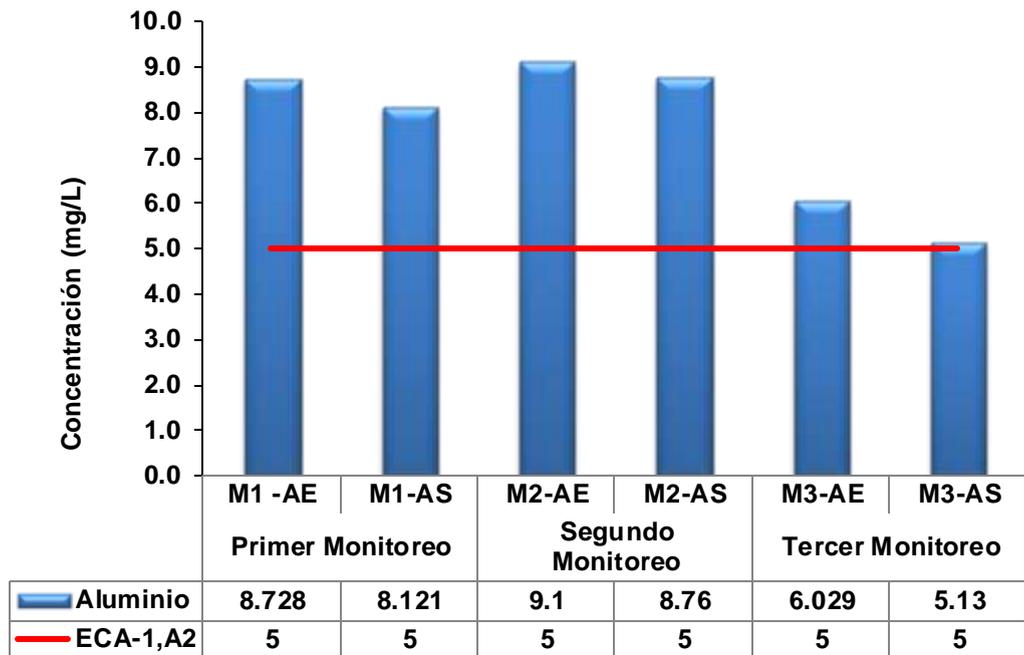


**Gráfico N° 07:** Concentración de oxígeno disuelto en la entrada y salida del humedal artificial

### 4.3.Reducción de la concentración de metales en el drenaje ácido de roca

#### 4.3.1. Concentración de aluminio

Gráfico N° 08 muestra la capacidad del humedal artificial para la remoción del aluminio. El primer monitoreo revela una remoción del 6.95%, para el segundo monitoreo la remoción es 3.74% y para el tercer monitoreo es del 14.9%. Esto indica que a medida que el humedal artificial se va estabilizando, va logrando una mayor eficiencia en la remoción de aluminio. Sin embargo, en el periodo de estudio empleado, la concentración de este metal aún excede el estándar de calidad para agua (5 mg/L).

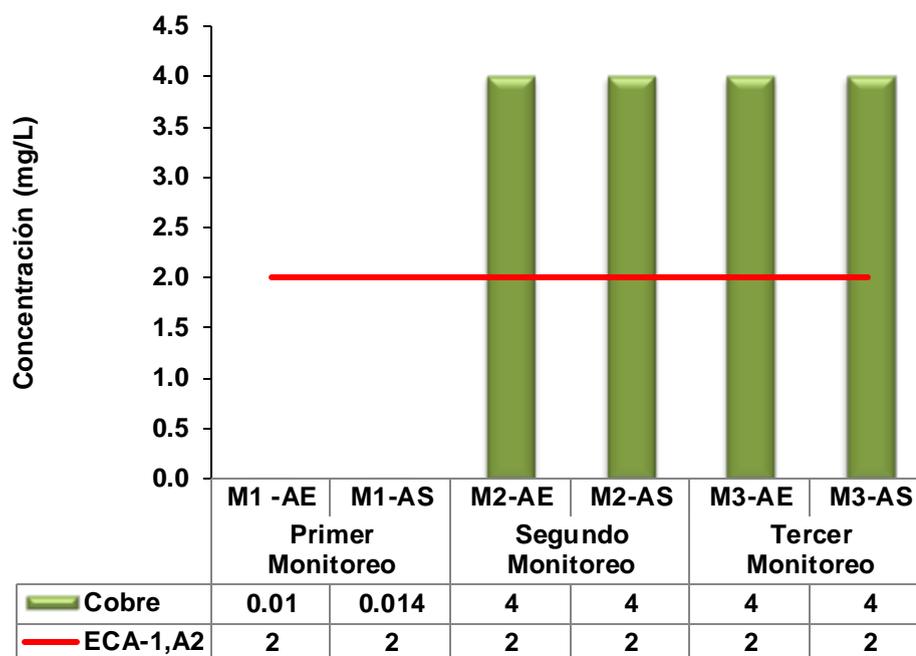


**Gráfico N° 08:** Concentración del aluminio en la entrada y salida del humedal artificial

La disminución de la remoción de aluminio en el segundo monitoreo podría deberse a la disminución del pH del drenaje ácido de roca que ingresa al humedal. Al disminuir el pH se habría dado una mayor solubilización de este metal incrementando su concentración. Por tanto, ante un incremento de la concentración de metales la eficiencia del humedal para removerlos disminuye.

#### 4.3.2. Concentración de cobre

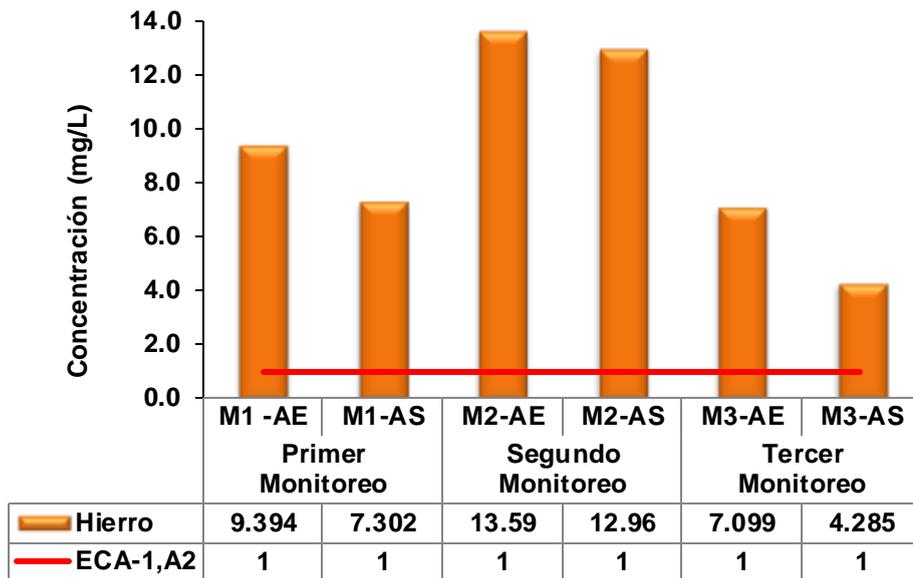
El Gráfico N° 09 muestra la concentración del cobre en la entrada y salida del humedal artificial. Es importante aclarar que la evaluación de la concentración de metales en las muestras de agua del primer monitoreo, se realizó en el Laboratorio de Corrosión y Protección de la PUCP empleando la metodología del ICP. Mientras que los análisis del segundo y tercer monitoreo se realizaron en el Laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM empleando espectrofotométricos que tuvo como limitante el límite de detección del equipo (4 mg/L). Consecuentemente, la concentración del cobre en el primer monitoreo se encuentra por debajo del estándar de calidad de agua (2 mg/L). Mientras que, la concentración del mismo metal para el segundo y tercer monitoreo se encuentra por debajo de 4 mg/L.



**Gráfico N° 09:** Concentración del cobre en la entrada y salida del humedal artificial

#### 4.3.3. Concentración de hierro

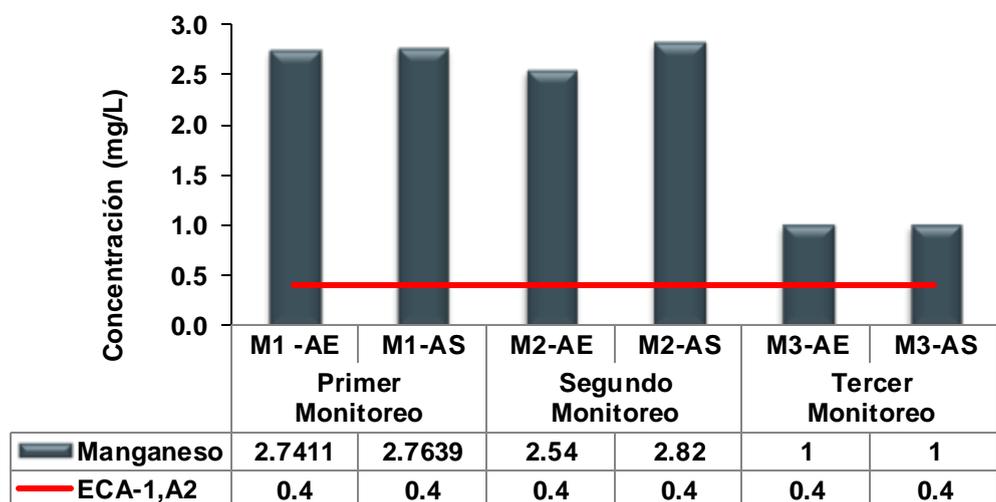
El Gráfico N° 10 muestra la capacidad del humedal artificial para la remoción del hierro. El primer monitoreo revela una remoción del 22.27%, para el segundo monitoreo la remoción es 4.65% y para el tercer monitoreo es del 39.64%. Esto indica que a medida que el humedal artificial se va estabilizando, va logrando una mayor eficiencia en la remoción del cobre. Sin embargo, en el periodo de estudio empleado, la concentración de este metal aún se mantiene sobre el estándar de calidad para agua (1 mg/L). La disminución de la remoción del hierro en el segundo monitoreo podría deberse a la disminución del pH del drenaje ácido de roca que ingresa al humedal. Al disminuir el pH se habría dado una mayor solubilización de este metal incrementando su concentración.



**Gráfico N° 10:** Concentración del hierro en la entrada y salida del humedal artificial

#### 4.3.4. Concentración de manganeso

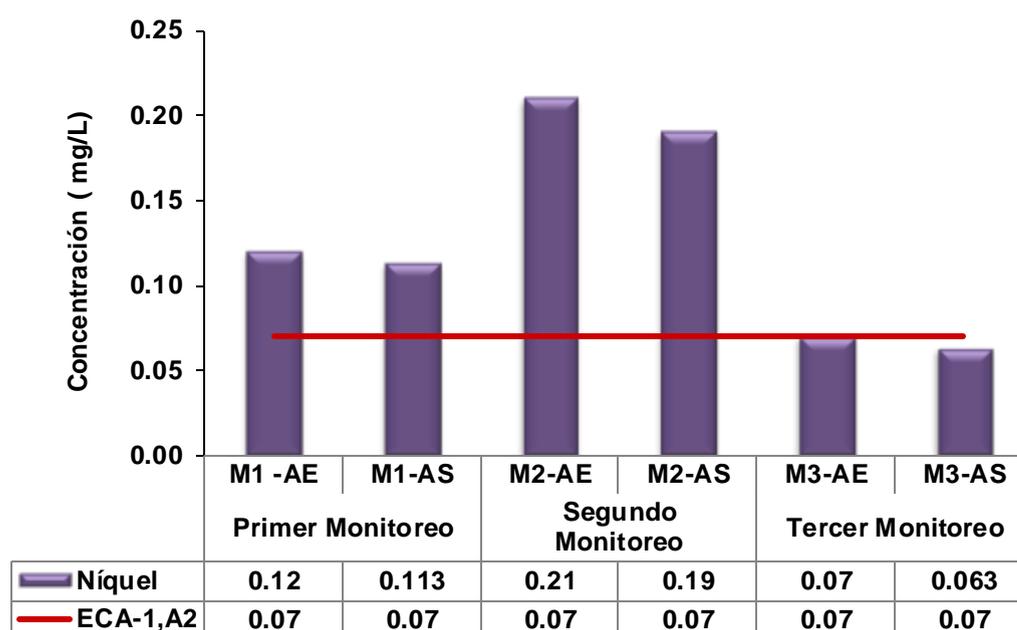
El Gráfico N° 11 muestra la variación de la concentración del manganeso en la entrada y salida del humedal artificial. El primer y segundo monitoreo revelan un ligero incremento en la concentración de manganeso, mientras que en el tercero la concentración se mantiene. En todos los casos, la concentración de este metal aún se mantiene sobre el estándar de calidad para agua (0.4 mg/L).



**Gráfico N° 11:** Concentración de manganeso en la entrada y salida del humedal artificial

#### 4.3.5. Concentración de níquel

El Gráfico N° 12 muestra la capacidad del humedal artificial para la remoción del níquel. El primer monitoreo revela una remoción del 5.83%, para el segundo monitoreo la remoción es 9.52% y para el tercer monitoreo es del 10%. Esto indica que a medida que el humedal artificial se va estabilizando, va logrando una mayor eficiencia en la remoción del níquel. Sin embargo, en los primeros monitoreos la concentración de este metal aún se mantiene sobre el estándar de calidad para agua, mientras que para el tercer monitoreo la concentración disminuye por debajo del estándar.

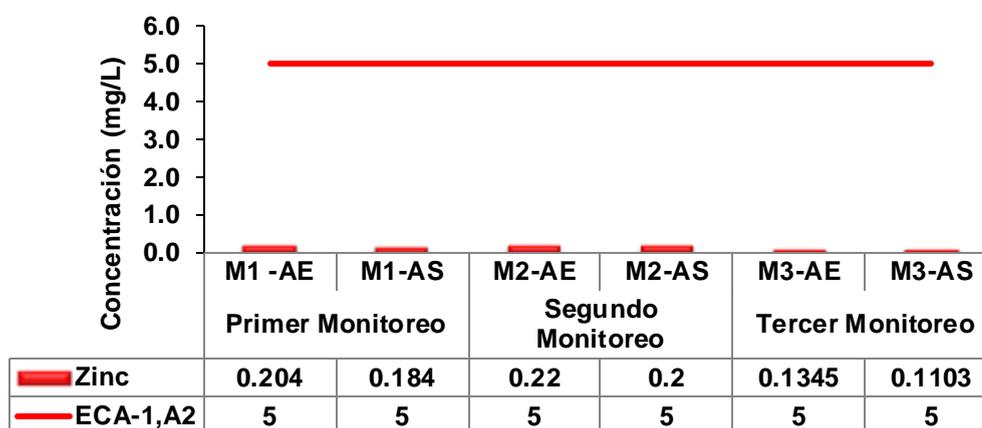


**Gráfico N° 12:** Concentración del níquel en la entrada y salida del humedal artificial

#### 4.3.6. Concentración de zinc

El Gráfico N° 13 muestra la capacidad del humedal artificial para la remoción del níquel. El primer monitoreo revela una remoción del 9.80%, para el segundo monitoreo la remoción es 9.09% y para el tercer monitoreo es del 17.99%. Esto indica que a medida que el humedal artificial se va estabilizando, va logrando una mayor eficiencia en la remoción del zinc. En todos los casos, la concentración de este metal se encuentra por debajo del estándar de calidad de agua (5 mg/L). La disminución de la remoción del zinc en el segundo monitoreo podría deberse a la disminución del pH del drenaje ácido de roca que ingresa al humedal. Al disminuir el pH se habría

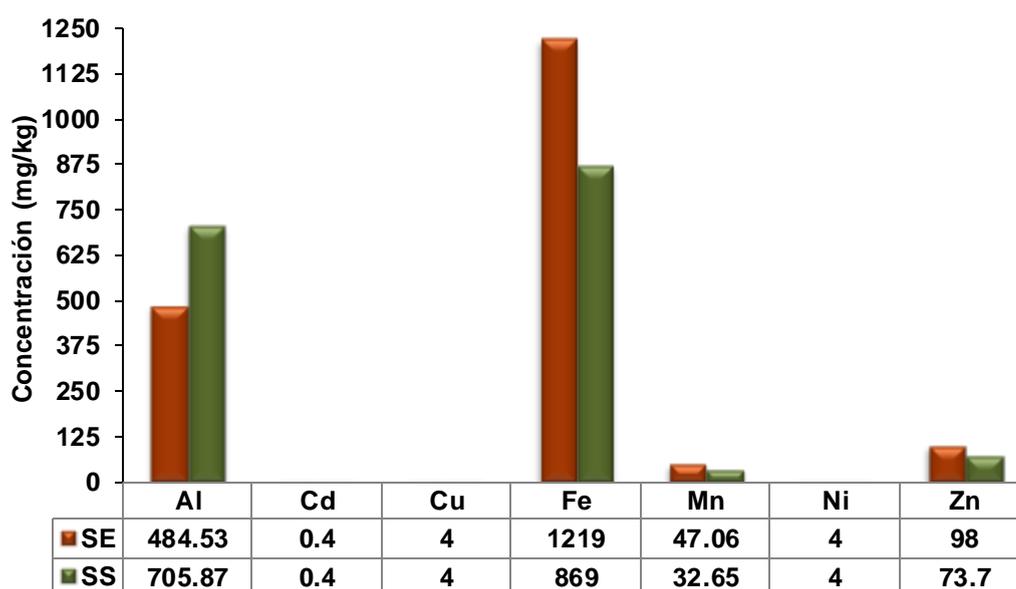
dado una mayor solubilización de este metal incrementando su concentración.



**Gráfico N° 13:** Concentración de zinc en la entrada y salida del humedal artificial

#### 4.3.7. Concentración de metales en el sedimento del humedal artificial

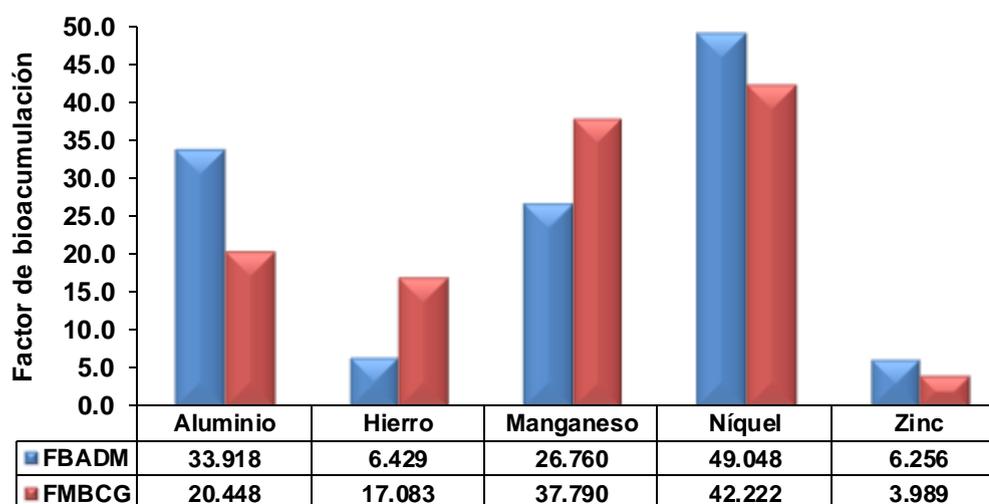
El Gráfico N° 14 muestra la concentración del aluminio, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc. El metal con mayor concentración es el hierro, esto guarda coherencia con la formación de precipitados de color naranja observados en el humedal. Para el caso del cobre, su concentración estuvo por debajo del límite de detección del equipo.



**Gráfico N° 14:** Concentración de metales en el sedimento del humedal artificial

#### 4.4. Factor de bioacumulación en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*

En el Gráfico N° 15 se presentan los factores de bioacumulación para las especies de plantas empleadas. *Distichia muscoides* presenta un mayor factor de bioacumulación para aluminio, níquel y zinc en comparación con *Calamagrostis glacialis*, y esta última, presenta un mayor factor de bioacumulación para hierro y manganeso a comparación de la primera.



**Gráfico N° 15:** Factor de bioacumulación en *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*

**Nota:** Factor de bioacumulación en *Distichia muscoides* (FBADM) y Factor de bioacumulación en *Calamagrostis glacialis* (FBACG)

Según Pandey (2012), el factor de bioacumulación es un índice de importancia para la evaluación de una especie vegetal para su uso en la fitorremediación de metales pesados. Asimismo, permite determinar la capacidad de absorción de los metales (Jara *et al.*, 2017). De este modo, la bioconcentración puede ser un indicador si la planta es apta para los procesos de fitoextracción (Jara-peña, 2017). En este sentido, la Tabla N° 7 presenta la clasificación de *Calamagrostis glacialis* y *Distichia muscoides* de acuerdo a su capacidad de acumular metales.

**Tabla N° 7: Característica acumuladora de metales pesados de *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis***

<b>Metal</b>	<b><i>Distichia muscoides</i></b>	<b><i>Calamagrostis glacialis</i></b>
Aluminio	Hiperacumuladora	Hiperacumuladora
Hierro	Acumuladora	Hiperacumuladora
Manganeso	Hiperacumuladora	Hiperacumuladora
Níquel	Hiperacumuladora	Hiperacumuladora
Zinc	Acumuladora	Acumuladora

De acuerdo a lo descrito por Baker (1981), si el factor de bioconcentración es mayor a 1 y menor a 10, se considera la planta como acumuladora, y si es mayor a 10 como hiperacumuladora. En este sentido, en el presente estudio se encontró que *Calamagrostis glacialis* resultó ser acumuladora de zinc e hiperacumuladora para aluminio, hierro, manganeso y níquel. Mientras que *Distichia muscoides* resultó ser acumuladora de hierro y zinc e hiperacumuladora de aluminio, manganeso y zinc.

Por su parte, Náñez (2016) también reportó a *Calamagrostis glacialis* y *Distichia muscoides* como especies con capacidades de acumulación de metales pesados presentes en la zona de Pastoruri. Asimismo, reportó factores de bioacumulación de metales (Al, Fe, Mn, Ni y, Zn), siendo menores a lo encontrado en este estudio.

Para el caso del aluminio en *Calamagrostis glacialis*, Náñez (2016) la reportó como una especie indicadora con un factor de bioconcentración promedio de 0.551 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 20.448, siendo clasificada como una especie hiperacumuladora de aluminio.

Para el caso del hierro en *Calamagrostis glacialis*, Náñez (2016) la reportó como una especie indicadora con un factor de bioconcentración de 0.553 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 17.083, siendo clasificada como una especie hiperacumuladora de hierro.

Para el caso del manganeso en *Calamagrostis glacialis*, Náñez (2016) la reportó como una especie hiperacumuladora con un factor de bioconcentración promedio de 1.305 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 37.790, siendo también considerada como una especie hiperacumuladora de manganeso.

Para el caso del níquel en *Calamagrostis glacialis*, Náñez (2016) la reportó como una especie hiperacumuladora con un factor de bioconcentración promedio de 1.535 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 42.222, siendo también considerada como una especie hiperacumuladora de manganeso.

Para el caso del zinc en *Calamagrostis glacialis*, Náñez (2016) la reportó como una especie hiperacumuladora con un factor de bioconcentración promedio de 1.979 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 3.989, siendo también considerada como una especie hiperacumuladora de zinc

Para el caso del aluminio en *Distichia muscoides*, Náñez (2016) la reportó como una especie indicadora con un factor de bioconcentración promedio de 0.628 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 33.918, siendo clasificada como una especie hiperacumuladora de aluminio.

Para el caso del hierro en *Distichia muscoides*, Náñez (2016) la reportó como una especie indicadora con un factor de bioconcentración de 1.773 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 6.429, siendo clasificada como una especie acumuladora de hierro.

Para el caso del manganeso en *Distichia muscoides*, Náñez (2016) la reportó como una especie hiperacumuladora con un factor de bioconcentración promedio de 3.275 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 26.760, siendo también considerada como una especie hiperacumuladora de manganeso.

Para el caso del níquel en *Distichia muscoides*, Náñez (2016) la reportó como una especie hiperacumuladora con un factor de bioconcentración promedio de 3.454 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 49.048, siendo también considerada como una especie hiperacumuladora de manganeso.

Para el caso del zinc en *Distichia muscoides*, Náñez (2016) la reportó como una especie hiperacumuladora con un factor de bioconcentración promedio de 6.283 para dicho metal. En este estudio, dicho factor fue de 6.256, siendo también considerada como una especie acumuladora de zinc.

La diferencia en los resultados obtenidos en este estudio en contraste con el reporte de Náñez (2016), se debería a que esta autora determinó los factores de bioconcentración de *Calamagrostis glaciaria* y *Distichia muscoides* a partir de la colecta de estas especies en dos periodos (estiaje y lluvioso) desde el hábitat de las

mismas. Mientras que, en el presente estudio, dichas especies estuvieron expuestas a un drenaje ácido de roca de flujo permanente dentro de un humedal artificial. Dado que el factor de bioconcentración encontrado en este estudio fue mayor a lo reportado por Náñez (2016), revela que *Calamagrostis glaciaria* y *Distichia muscoides* tienen la capacidad de adaptarse a un nuevo ecosistema, incluso con concentraciones superiores de Al, Fe, Mn, Ni y Zn, y acumular dichos metales de su estructura vegetal. De este modo, permiten disminuir la concentración de metales presentes en el drenaje ácido de roca y mejorar la calidad del agua del mismo.

Por lo tanto, teniendo en consideración lo indicado por Whitfield y Zeeb (2010), *Calamagrostis glaciaria* y *Distichia muscoides* resultan ser especies de utilidad para procesos de fitoextracción de metales. Asimismo, dado que los factores de bioacumulación encontrados para dichas especies son mayores a 1, y teniendo en cuenta lo manifestado por Jara *et al.* (2017), el objetivo de este tipo de remediación para remover metales presentes en un drenaje ácido de roca se da por cumplido. Sin embargo, dado que las concentraciones de metales aún exceden el estándar de calidad para agua, se requieren de mayores estudios para mejorar la eficiencia del humedal artificial en la remoción de metales a niveles aceptables.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- Se implementó un humedal artificial con *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*, especies que lograron establecerse en un periodo de 9 meses, lo cual se evidenció en el incremento en su tamaño (raíz y parte aérea) y en la acumulación de metales (Al, Fe, Mn, Ni y Zn) dentro de sus tejidos. Asimismo, el humedal redujo la concentración de estos metales presentes en el drenaje ácido de roca proveniente del nevado Pastoruri; sin embargo, dicha concentración aún excede el estándar de calidad para agua Categoría 1 -A2, aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
- El humedal implementado redujo el grado de acidez del drenaje ácido de roca, incrementando el pH en 0.39, 0.97 y 2.01 unidades en el primer, segundo y tercer monitoreo respectivamente, teniendo un pH final de 5.43, valor que aún se encuentra por debajo del Estándar de Calidad para Agua Categoría 1 – A2.
- El humedal implementado tuvo la capacidad de reducir la concentración de metales del drenaje ácido, evidenciándose un incremento de los porcentajes de remoción, que para el primer monitoreo fueron de 6.95, 22.27, 5.83 y 9.80%, y para el tercer monitoreo fueron de 14.9, 39.64, 10 y 17.99% para aluminio, hierro, níquel y zinc, respectivamente; indicando que a medida que el humedal se va estabilizando, va logrando una mayor eficiencia en la remoción de dichos metales.
- El factor de bioacumulación encontrado para *Distichia muscoides* indica que esta especie fue capaz de acumular hierro y zinc e hiperacumular aluminio, manganeso

y níquel; mientras que, *Calamagrostis glacialis* fue capaz de acumular zinc e hiperacumular aluminio, hierro, manganeso y níquel.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Ampliar la dimensión del humedal artificial en cuanto a su longitud a fin de incrementar la acumulación de metales pesados en las especies vegetales utilizadas.
- Continuar con la evaluación de la bioacumulación de metales en las especies vegetales, teniendo en cuenta los tiempos de retención y la densidad de plantas.
- Complementar el tratamiento del drenaje ácido de roca con humedales con otro tratamiento como el encalado, a fin de incrementar el pH hasta niveles aceptables, para poder utilizar el agua en los puestos de expendio de alimentos de la zona de parqueo del circuito turístico de Pastoruri.
- El Gobierno Regional de Ancash conjuntamente con los gobiernos locales y el Parque Nacional Huascarán deben impulsar investigaciones relacionadas con la implementación de humedales empleando especies vegetales nativas como *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis* para recuperar la calidad de las aguas en las cuencas impactadas con drenajes ácidos de roca y mina.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina: Generación y tratamiento. *Instituto Geológico Y Minero de España*, 51. Recuperado de [http://info.igme.es/SIDIMAGENES/113000/258/113258\\_0000001.PDF](http://info.igme.es/SIDIMAGENES/113000/258/113258_0000001.PDF)
- Ali, H., Khan, E., y Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Aliaga, E. (2003). Biorremediación del agua de relave minero de la planta concentradora Santa Rosa de la UNASAM-Jangas, por tratamiento con quitina de crustáceos. *Aporte Santiaguino*, 2, 85.
- American Public Health Association (APHA). (1992). *Metodos Normalizados para el analisis de aguas Potables y Residuales*. Madrid-España: Editorial Díaz de Santos, S.A.
- Baker, M. A. (1981). Accumulators and excluders strategies in response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643–654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>
- Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M., y Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.002>
- Brooks, R. ., y Braker, A. J. . (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. *Their Distribution, Ecology and Phytochemistry. Biorecovery*, 1, 81–126.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., y Garcia, H. J. E. (1998). *Química: la ciencia central*. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=sIGIPwAACAAJ>
- Chang, R., y College, W. (2003). *Química*. (I. E. S.A., Ed.) (Séptima). Colombia: McGraw-Hill. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=ck8MkgAACAAJ>
- Cobbing, J., Sanchez, A., Martinez, W., y Zárata, H. (1996). Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquian y Yanahuanca. Hojas: 20-h, 20-i, 20-j, 21-i, 21-j. *Instituto Geológico Minero Y Metalúrgico*, 76, *Boletín/A*, 76.

- Cord-Ruwisch, R. (1985). A quick method for the determination of dissolved and precipitated sulfides in cultures of sulfate-reducing bacteria. *Journal of Microbiological Methods*, 4, 33–36. [https://doi.org/10.1016/0167-7012\(85\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0167-7012(85)90005-3)
- Delgadillo, O., Camacho, A., Mauricio, A., y Pérez, L. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales, 115. Recuperado de [http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales)
- Diario Perú 21. (2007, April 9). Nevado Pastoruri podría desaparecer en diez años. *Nevado Pastoruri*, pp. 1–12. Recuperado de <http://archivo.peru21.pe/noticia/60234/nevado-pastoruri-podria-desaparecer-diez-anos>
- Diez, L. J. (2008). *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. Universidad de Santiago de Compostela. Recuperado de [https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026\\_content.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026_content.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Durand, D., La torre, F., Villón, C., y Pasapera, J. (2009). Geomorfología de la microcuenca Pastoruri-Cordillera Blanca. *Geografía-Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 13, 59–77.
- Escudero, C. G. (2011). *Tratamiento de los efluentes domésticos mediante humedales artificiales para el riego de áreas verdes en el distrito de San Juan de Marcona. Lima- Callao*. Universidad Nacional del Callao. Recuperado de [https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes\\_Finales\\_Investigacion/IF\\_JULIO\\_2012/IF\\_ESCUDERO](https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/IF_JULIO_2012/IF_ESCUDERO)
- Fang, D., Jin, C. J., y Zhou, L. X. (2007). Removal of Cr from tannery sludge by indigenous sulfur-oxidizing bacteria. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 42(13), 2065–2069. <https://doi.org/10.1080/10934520701631670>
- Fuentes, A. A. (2013). *Estudio experimental de la oxidación del hierro en aguas*

*subterráneas a través de aireación*. Universidad del Bío Bío. Recuperado de [http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1359/1/Fuentes\\_Alarcon\\_Hernan\\_Antonio.pdf](http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1359/1/Fuentes_Alarcon_Hernan_Antonio.pdf)

Galvin, M. R. (1996). *Química, microbiología y control analítico de aguas: Una introducción al tema*. Bogotá: Universidad de Córdoba.

García, J. P. (2002). *Estado actual de la contaminación por metales pesados y pesticidas organoclorados en el Parque Natural de Monfragüe*. Universidad de Extremadura. Recuperado de <file:///C:/Users/User/Downloads/Dialnet-EstadoActualDeLaContaminacionPorMetalesPesadosYPes-317.pdf>

González, P. G. (2009). *Biorremediación y tratamiento de efluentes*. El Cid Editor | apuntes. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=JG6nAQAACAAJ>

González-Toril, E., Santofimia, E., Blanco, Y., López-Pamo, E., Gómez, M. J., Bobadilla, M., ... Aguilera, Á. (2015). Pyrosequencing-based assessment of the microbial community structure of Pastoruri Glacier area (Huascarán National Park, Perú), a natural extreme acidic environment. *Environmental Microbiology*, 70, 936. <https://doi.org/10.1007/s00248-015-0634-3>

Hashim, M. A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. N., y Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2355–2388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.009>

Jara, P. E., Gómez, C. J., Montoya, T. H., Sánchez, T., Tapia, L., Cano, N., y Dextre, A. (2017). Acumulación de metales pesados en *Calamagrostis rígida* (Kunth) Trin . ex Steud. (Poaceae) y *Myriophyllum quitense* Kunth (Haloragaceae ) evaluadas en cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa*, 24(2), 583–598. <https://doi.org/http://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24210>

Jiménez, C. B. (2001). *La contaminación ambiental en México: Causa, efectos y tecnología apropiada*. (Limusa, Ed.). México.

Kuyucak, N. (2010). *Tratamiento de efluentes mineros*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

La República. (2016, August 15). En los últimos 12 meses, el glaciar del Pastoruri retrocedió más de 31 metros. *Sociedad*, pp. 18–19. Recuperado de <http://larepublica.pe/sociedad/964077-en-los-ultimos-12-meses-el-glaciar-del->

pastoruri-retrocedio-mas-de-31-metros-video

Lenntech BV. (1998). Propiedades químicas del Níquel- Efectos del Níquel sobre la salud - Efectos ambientales del Níquel. Retrieved December 5, 2017, from <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ni.htm>

López Pamo, E., Aduvire, O., y Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico Y Minero*, 113(1), 3–21.

Ministerio de Energía y Minas. (1997). Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2010). *Informe de Calidad de Agua del proyecto Instalación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario en la nueva ciudad de Olmos, distrito de Olmos, provincia de Lambayeque-Región Lambayeque*.

Ministerio del Ambiente. (2015). Decreto Supremo N°015-2015 Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación. *El Peruano*, (19 de diciembre), 569076–569082.

Náñez, A. D. A. (2016). *Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Áncash, Perú)*. Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Nava, R. C., y Méndez, A. M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién*, 16, 140–147. Recuperado de <http://www.medigraphic.com/pdfs/arcneu/ane-2011/ane113f.pdf>

Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. (1995). *Mapa ecológico del Perú- Guía explicativa*. Lima-Peru: Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales.

Ospina, C. C., y Zapata, M. M. (2012). *Validación de la Metodología de Detección de los Metales en Agua Tratada por Absorción Atómica*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Recuperado de <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/5430858O83.pdf>

- Palomino, C. E. J. (2007). *Sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina o roca en Ancash – Perú*. Universidad Nacional de Trujillo. Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/5359/Tesis Doctorado - Edwin Palomino Cadenas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pandey, V. C. (2012). Ecotoxicology and Environmental Safety Phytoremediation of heavy metals from fly ash pond by *Azolla caroliniana*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 82, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.002>
- Rodier, J., Legube, B., y Merlet, N. (2011). *Análisis de las Aguas*. (Omega, Ed.) (9 Edición). Barcelona.
- Santofimia, E., López-Pamo, E., Palomino, E. J., González-Toril, E., y Aguilera, Á. (2017). Acid rock drainage in Nevado Pastoruri glacier area (Huascarán National Park, Perú): hydrochemical and mineralogical characterization and associated environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 25243–25259. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0093-0>
- Schrauf, T., y Smith, M. (2005). Humedales de tratamiento de drenaje de Mina. *Revista Minera*, 1–4. Recuperado de [http://ramsar.conanp.gob.mx/la\\_conanp\\_y\\_los\\_humedales.php](http://ramsar.conanp.gob.mx/la_conanp_y_los_humedales.php)
- Tovar, O. (1993). Las Gramineas (Poaceae) del Perú. *Ruizia*, 13, 58–237.
- Waston, J. (1989). *Performance expectations and loading rates for constructed wetlands*. Chelsea Michigan: Lewis Publishers.

# **ANEXOS**

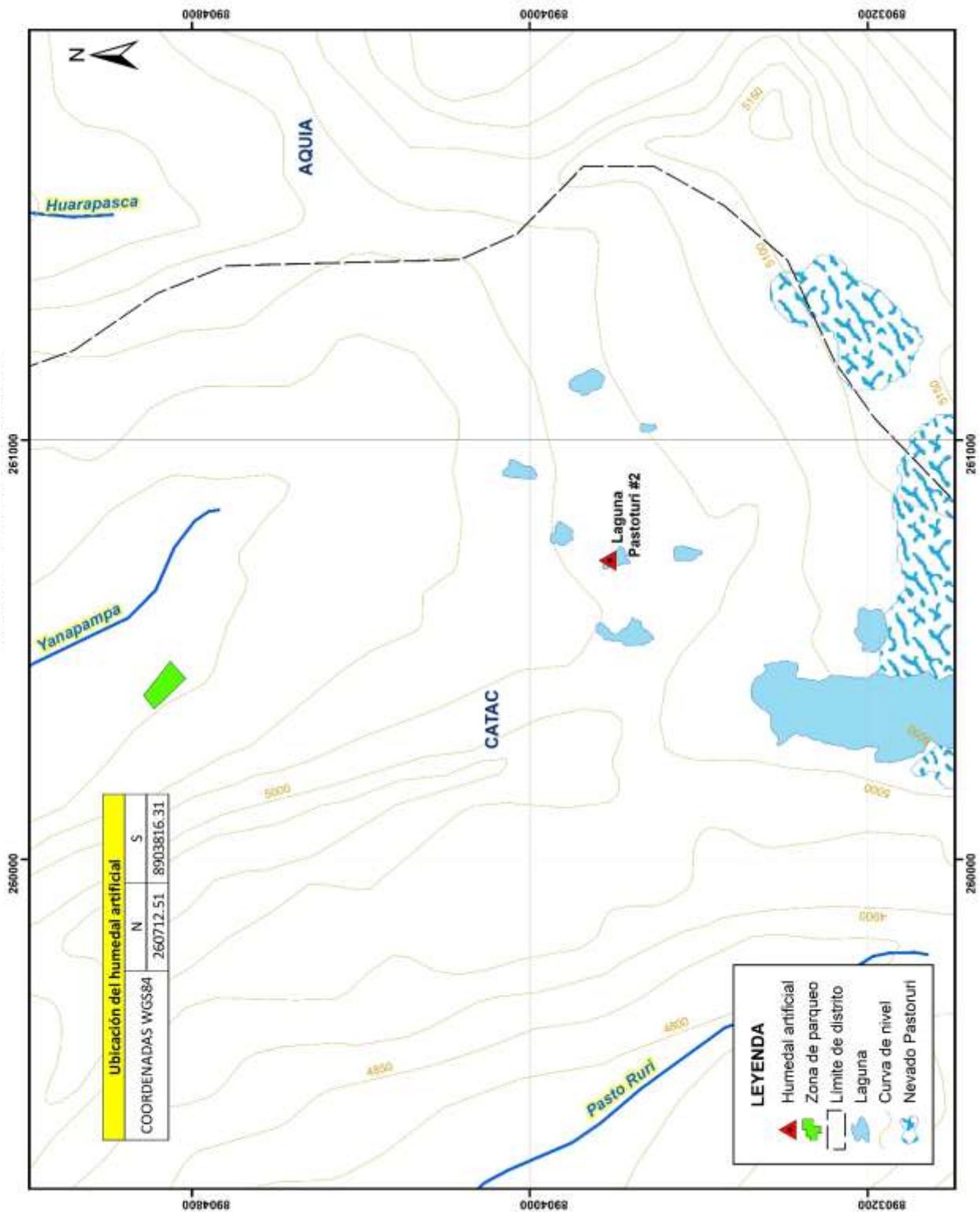
**ANEXO N° 1**  
**MAPA DE UBICACIÓN**



Ubicación departamental



Ubicación provincial



## ANEXO N° 2

### CONCENTRACIÓN DE METALES EN LA ROCA CALIZA

La Tabla A presenta la concentración de metales en la roca caliza empleada para la construcción del humedal artificial.

**Tabla A:** Concentración de metales pesados en la roca caliza

<b>Metal</b>	<b>Concentración (mg/kg)</b>
Hierro	7045.0
Aluminio	1699.9
Manganeso	301.0
Cobre	165.6
Arsénico	< 0.6
Zinc	< 0.2
Cadmio	< 0.1
Cobre	< 0.1
Níquel	< 0.1

**ANEXO N° 3**  
**HERBORIZACIÓN DE LAS PLANTAS**

## Anexo 3-1: Procedimiento para la herborización - HUT



### Herbarium Truxillense (HUT)

Universidad Nacional de Trujillo  
Facultad de Ciencias Biológicas

Jr. San Martín 392, Trujillo – Perú  
E-mail: herbariumtruxillensehut@yahoo.com



#### CÓDIGO O NÚMERO DE INGRESO A LA COLECCIÓN GENERAL

- Sin excepción, todo investigador, tesista de pre o post grado, etc. deben depositar en un Herbario el (los) espécimen (es) o muestra (s) vegetal (es) motivo de su investigación científica. *La finalidad es sustentar su validez y tener rigor científico. La muestra botánica presentada para determinación taxonómica debe ser estrictamente parte del material a ejecutar la investigación.*
- Una vez determinada la planta, la persona interesada debe acercarse al herbario con el material vegetal correctamente montado y etiquetado (consultar con el personal del herbario o asesor en el caso de ser tesista). *La determinación taxonómica de la planta y su ingreso al herbario se efectuará antes de la ejecución de la investigación. Las muestras deben tener buena presentación. No se aceptarán muestras herborizadas extemporáneamente o después de haber sido ejecutada y sustentada la investigación.*
- ¿Cómo se debe presentar el material botánico?: La planta debidamente prensada y secada, será montada en un cartón de 320 g., 43 x 28 cm (pegar con silicona o cola sintética, asegurar con hilo en el caso de frutos grandes o tallos gruesos y cinta engomada de papel, favor no utilizar otro tipo de cinta). Luego colocar la etiqueta con los datos correspondiente en la parte inferior derecha. El material montado y etiquetado debe colocarse dentro de una "camiseta" o cubierta (papel bordoblando de 80 g., 45 x 30 cm cada lado). Adicionar cuatro (04) bolitas de naftalina al material vegetal montado para su conservación y evitar el daño por insectos.
- Inmediatamente presentado al herbario el material como se ha indicado. Se efectuará el sellado y asignación de un número, colocado en la parte superior derecha. El número asignado al nuevo material es el número correlativo de ingreso a la colección general y se denomina *Código*.

\*Cualquier consulta realizarla al personal del herbario HUT.

La Dirección

### Anexo 3.2: Identificación de las plantas .

**Nombre Científico:** *Distichia muscoides*

**Nombre Vulgar:** tsampa estrella

**Hábito:** Hierba cespitosa

**Hábitat:** Bofedal

**Altitud:** 4954 m.s.n.m

**Det.Por:** HUT

**Código por HUT:** 58056



**Nombre Científico:** *Calamagrostis glacialis*

**Nombre Vulgar:** Ocsha

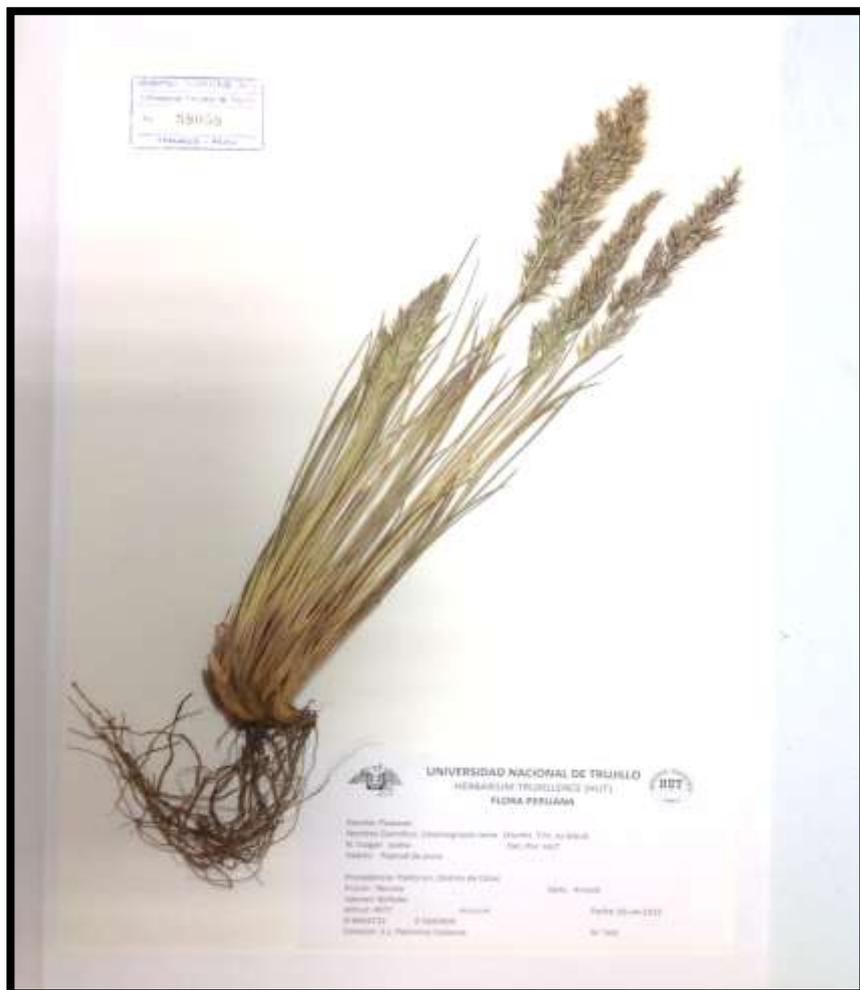
**Hábito:** Pajonal de puna

**Hábitat:** Bofedal

**Altitud:** 4977 m.s.n.m

**Det.Por:** HUT

**Código por HUT:** 58058



Anexo 3.3: Montaje de las plantas y su etiquetado.



## **ANEXO N° 4**

**INFORMES DE ENSAYO DE METALES PESADOS  
EN *Distichia muscoides* y *Calamagrostis glacialis*  
EN EL PRIMER, SEGUNDO Y TERCER  
MONITOREO**



### INFORME DE ENSAYO OT150199

**CLIENTE** Razón Social : ERICA LUNA SOLANO  
 Dirección : Huaraz  
 Atención : Erica Yanina Luna Solano  
  
**MUESTRA** Producto declarado : Distichia M. - Calamagrosti G  
 Matiz : Vegetal  
 Procedencia : Nevado de Pastoruri  
 Ref./Condición : Cadena de Custodia OC150199  
  
**MUESTREO** Responsable : Muestra proporcionada por el cliente  
 Referencia : No indica

**LABORATORIO** Fecha de recepción : 01 Julio 2015  
 Fecha de análisis : 01 - 21 de Julio 2015  
 Colección N° : OC150406

COD.	PARAMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	METODO	LIMITE DE DETECCION	MUESTRA		
					Código de cliente	DM1	CG1
					Fecha de muestra	30/06/2015	30/06/2015
					Horas muestra	10:30	10:30
					Código de Laboratorio	OT150199	OT150200
MT	METALES TOTALES						
MT01	Aluminio total	mg/kg Al	Ortoarsurof S. (**)	0.020	612.800	743.200	
MT07	Cadmio total	mg/kg Cd	Densité de cadon (**)	0.002	0.130	0.160	
MT11	Cobre total	mg/kg Cu	Cuprona (**)	4.00	< 4.00	8.89	
MT16	Hierro total	mg/kg Fe	Triazina (**)	0.005	194.750	196.300	
MT19	Manganeso total	mg/kg Mn	Formaldexina (**)	0.25	111.34	67.41	
MT22	Niquel total	mg/kg Ni	Dimetilgloxina (**)	0.02	8.51	6.25	
MT32	Zinc total	mg/kg Zn	O-PAN (**)	0.05	1.24	0.68	

(\*) Los métodos indicados No han sido acreditados por el INACAL - DA

(\*) Datos proporcionados por el cliente



Quint. Mario Leyva Collas  
 Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
 FCAM - UNASAM  
 COP N° 604

Huaraz, 21 de Julio de 2015

Está prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental. Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dicientes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.



### INFORME DE ENSAYO OT150255

**CLIENTE** Razón Social : ERICA LUNA SOLANO  
 Dirección : Huaraz  
 Atención : Erica Yanina Luna Solano  
  
**MUESTRA** Producto declarado : Diciticia M. - Calamagrosti G  
 Matz : Vegetal  
 Procedencia : Nevado de Pastoruri  
 Ref./Condición : Cadena de Custodia CC150255  
  
**MUESTREO** Responsable : Muestra proporcionada por el cliente  
 Referencia : No indica  
  
**LABORATORIO** Fecha de recepción : 30/Septiembre/2015  
 Fecha de análisis : 30 - 20 de Octubre/2015  
 Colectación N° : CO150481

COD.	PARAMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	METODO	LIMITE DE DETECCION	MUESTRA		
					Código del cliente	DM2	CG2
					Fecha de muestra	29/09/2015	29/09/2015
					Horas muestra	9:50	10:00
					Código del Laboratorio	OT150255	OT150256
<b>MT</b>	<b>METALES TOTALES</b>						
MT01	Aluminio total	mg/Kg Al	Clorurostanzil S (*)	0.020	698.430	796.200	
MT07	Cadmio total	mg/Kg Cd	Derivato de cadion (*)	0.002	0.130	0.170	
MT11	Cobre total	mg/Kg Cu	Capilona (*)	4.00	< 4.00	7.17	
MT16	Hierro total	mg/Kg Fe	Trisozna (*)	0.005	170.800	208.900	
MT19	Manganeso total	mg/Kg Mn	Formaldoxina (*)	0.25	113.50	73.84	
MT22	Niquel total	mg/Kg Ni	Dimetilglicoxina (*)	0.02	9.89	7.78	
MT32	Zinc total	mg/Kg Zn	Cl-PAN (*)	0.05	1.43	0.79	

(\*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL - DA

† Datos proporcionados por el cliente



Queda: Mario Leyva Colles  
 Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
 FCAM - UNASAM  
 COP N° 804

Huaraz, 30 de Septiembre de 2015

Está prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental. Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dirimentes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.



### INFORME DE ENSAYO OT150289

**CLIENTE** Razón Social : ERICA LUNA SOLANO  
 Dirección : Huaraz  
 Atención : Erica Yanina Luna Solano

**MUESTRA** Producto declarado : Diéctia M. - Calamagrosti G  
 Matriz : Vegetal  
 Procedencia : Nevado de Pastoruri  
 Ref./Condición : Cadena de Custodias CC150289

**MUESTREO** Responsable : Muestra proporcionada por el cliente  
 Referencia : No indica

**LABORATORIO** Fecha de recepción : 09/Diciembre/2015  
 Fecha de análisis : 08 - 28 de Octubre/2015  
 Colización N° : CO150472

COD.	PARAMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	METODO	LIMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA		
					Código del cliente	DMS	OG3
					Fecha de muestra *	08/12/2015	08/12/2015
					Hora muestra *	10:20	10:35
					Código de Laboratorio	OT150289	OT150290
<b>MT</b>	<b>METALES TOTALES</b>						
MT01	Aluminio total	mg/Kg Al	Cromoazurol S (*)	0.020	788.600	845.100	
MT07	Cadmio total	mg/Kg Cd	Derivé de cadion (*)	0.002	0.150	0.200	
MT11	Cobre total	mg/Kg Cu	Carbazono (*)	4.00	4.06	9.43	
MT16	Hierro total	mg/Kg Fe	Triazina (*)	0.005	192.300	268.500	
MT19	Manganeso total	mg/Kg Mn	Formaldexina (*)	0.25	138.10	105.20	
MT22	Niquel total	mg/Kg Ni	Dimetilgloxina (*)	0.02	11.60	8.91	
MT32	Zinc total	mg/Kg Zn	Cl-PAN (*)	0.05	1.93	1.12	

(\*) Los métodos indicados No han sido acreditados por el INACAL - DA

\* Datos proporcionados por el cliente



Quím. Mario Leyva Colles  
 Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
 FCAM UNASAM  
 CGP N° 004

Huaraz, 28 de Diciembre de 2015

Está prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental. Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dirmntes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.

## **ANEXO N° 5**

### **INFORME DE ENSAYOS DE METALES PESADOS EN LA ENTRADA DEL CANAL PASTORURI**



## INFORME DE ENSAYO AG140535

<b>CLIENTE</b>	Razón Social : ERICA LUNA SOLANO Dirección : Huaraz
<b>MUESTRA</b>	Producto declarado : Agua de Canal Matriz : Aguas Naturales - Agua Superficial Procedencia : Agua de entrada de Canal - Pastoral Ref./Condición : Cadena de Custodia CC140514
<b>MUESTREO</b>	Responsable : Muestra proporcionada por el cliente Referencia : No indica
<b>LABORATORIO</b>	Fecha de recepción : 09/Octubre/2014 Fecha de análisis : 09/Octubre - 16/Octubre/2014 Cotización N° : 00140527

CÓD.	PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA	
					Código de cliente	EC01
					Fecha de muestra	08/10/2014
					hora muestra	16:00
					Código de Laboratorio	AG140719
<b>MT</b>	<b>METALES TOTALES</b>					
	Plata total	mg/L		0.0025	< 0.0025	
	Aluminio total	mg/L		0.01	8.36	
	Aniónico total	mg/L		0.001	< 0.001	
	Boro total	mg/L		0.002	0.024	
	Bario total	mg/L		0.002	0.018	
	Berilio total	mg/L		0.002	0.0029	
	Calcio total	mg/L		0.02	9.98	
	Cadmio total	mg/L		0.0004	0.0014	
	Cerio total	mg/L		0.002	< 0.002	
	Cobalto total	mg/L		0.0003	0.0712	
	Cromo total	mg/L		0.0025	0.0025	
	Cobre total	mg/L		0.0004	0.0117	
	Hierro total	mg/L		0.002	15.106	
	Mercurio total	mg/L		0.001	< 0.001	
	Potasio total	mg/L	EPA Method 200.7, Rev 4.4. EMMC Version.	0.04	1.26	
	Litio total	mg/L	Determination of Trace Elements in Water and Wates by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry. 1904 ( * )	0.003	0.033	
<b>MT34</b>	Magnesio total	mg/L		0.02	6.98	
	Manganeso total	mg/L		0.0004	2.3907	
	Molibdeno total	mg/L		0.002	< 0.002	
	Sodio total	mg/L		0.02	0.20	
	Níquel total	mg/L		0.0025	0.1238	
	Fósforo total	mg/L		0.003	0.004	
	Plomo total	mg/L		0.0004	0.0058	
	Antimonio total	mg/L		0.001	< 0.001	
	Selenio total	mg/L		0.003	< 0.003	
	Silice total	mg/L		0.02	27.89	
	Estafío total	mg/L		0.001	< 0.001	
	Estroncio total	mg/L		0.001	0.137	
	Tiempo total	mg/L		0.0003	0.0030	
	Taio total	mg/L		0.003	< 0.003	
	Vanadio total	mg/L		0.0004	< 0.0004	
	Zinc total	mg/L		0.002	0.189	

(\* ) Los métodos indicados No han sido acreditados por el INDECOP-SNA.  
Datos proporcionados por el cliente

Huaraz, 16 de Octubre del 2014



Quint. Mario Leyva Collas  
Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
FCAM - UNASAM  
CQP N° 604

Está prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental.  
Los resultados son válidos solo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dicientes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.

## **ANEXO N° 6**

**INFORMES DE ENSAYOS DE METALES PESADOS  
EN EL AGUA CORRESPONDIENTES AL PRIMER,  
SEGUNDO Y TERCER MONITOREO**



## INFORME DE ENSAYO ICP/INF- 129/2015

REGISTRO N° LE-027

RESULTADOS DE ENSAYOS

ANÁLISIS DE SOLUCIONES ACUOSAS				
Códigos de Muestra	Código Cliente	M1-AE	M1-AM	M1-AS
	Código PUCP 2015AQ	0621	0622	0623
Parámetros	Unidades	Resultados		
Aluminio	mg/L	9,386	8,728	8,121
Antimonio	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Arsénico	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Bario	mg/L	0,0229	0,0399	0,0308
Berilio	mg/L	0,0028	0,0025	0,0024
Boro	mg/L	<0,007	0,018	<0,007
Cadmio (*)	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio	mg/L	9,97	39,39	34,80
Cobalto	mg/L	0,077	0,071	0,069
Cobre (*)	mg/L	0,009	0,010	0,014
Cromo (*)	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.
Estaño	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Estroncio	mg/L	0,155	0,216	0,183
Hierro	mg/L	9,902	9,394	7,302
Magnesio	mg/L	8,676	9,989	9,206
Manganeso	mg/L	2,6782	2,7411	2,7639
Mercurio	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Molibdeno	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001
Níquel (*)	mg/L	0,126	0,120	0,113
Plata	mg/L	< 0,0008	< 0,0008	0,0098
Plomo (*)	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.
Talio	mg/L	< 0,019	< 0,019	< 0,019
Vanadio	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001
Zinc	mg/L	0,192	0,204	0,184

Este laboratorio de ensayo se encuentra acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación de INDECOPI (\*)

Los resultados obtenidos son aplicables únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s).

ACREDITADOS POR INDECOPI (*)	NO ACREDITADOS Los métodos indicados no han sido acreditados por el INDECOPI-SNA
------------------------------	---



2 de



## INFORME DE ENSAYO AG150249

**CLIENTE** Razón Social : ERICA LUNA SOLANO  
 Dirección : Huaraz  
 Atención : Erica Yanina Luna Solano

**MUESTRA** Producto declarado : Agua Superficial  
 Matriz : Agua Natural - Agua Superficial  
 Procedencia : Agua de la Entrega - Salida del humedal  
 Ref./Condición : Cadena de Custodia CC150249

**MUESTREO** Responsable : Muestra proporcionada por el cliente  
 Referencia : No indica

**LABORATORIO** Fecha de recepción : 27/Septiembre/2015  
 Fecha de análisis : 27 - 06 de Octubre/2015  
 Colización N° : CO150320

COD.	PARAMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA		
					Código del cliente	M2-AE	M2-AS
					Fecha de muestreo	27/09/2015	27/09/2015
					Hora muestreo	9:40	9:45
					Código del Laboratorio	AG150296	AG150297
<b>MT</b>	<b>METALES TOTALES</b>						
MT01	Aluminio total	mg/l Al	Cromoazuril S (*)	0.020		9.100	8.760
MT07	Cadmio total	mg/l Cd	Derivé de cadion (*)	0.002		< 0.002	< 0.002
MT11	Cobre total	mg/l Cu	Cuprizona (*)	4.00		< 4.00	< 4.00
MT16	Hierro total	mg/l Fe	Trisizina (*)	0.005		13.590	12.960
MT19	Manganeso total	mg/l Mn	Formaldehído (*)	0.25		2.54	2.82
MT22	Níquel total	mg/l Ni	Dimetilgloxina (*)	0.02		0.21	0.19
MT32	Zinc total	mg/l Zn	CI-PAN (*)	0.05		0.22	0.20

(\*) Los métodos indicados No han sido acreditados por el INACAL - DA.

† Datos proporcionados por el cliente



Quito: Mario Leyva Collas  
 Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
 FCAM - UNASAM  
 COP N° 804

Huaraz, 06 de Octubre de 2015

Esté prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental. Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dicientes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.



### INFORME DE ENSAYO AG150512

**CLIENTE** Razón Social : ERICA LUNA SOLANO  
 Dirección : Huaraz  
 Atención : Érica Yanina Luna Solano

**MUESTRA** Producto declarado : Agua Superficial  
 Matriz : Agua Natural - Agua Superficial  
 Procedencia : Agua de la Entrega - Salida del humedal  
 Ref./Condición : Cadena de Custodia CC150512

**MUESTREO** Responsable : Muestra proporcionada por el cliente  
 Referencia : No indica

**LABORATORIO** Fecha de recepción : 08/Diciembre/2015  
 Fecha de análisis : 08 - 17 de Diciembre/2015  
 Certificación N° : CO150421

COD.	PARAMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA		
					Código del cliente	M3-AF	M5-A5
					Fecha de muestra	08/12/2015	08/12/2015
					Volumen muestra	10.25	10.45
					Código de Laboratorio	AG150523	AG150524
<b>MT</b>	<b>METALES TOTALES</b>						
MT01	Aluminio total	mg/l Al	Cromosuzano S (**)	0.020		6.029	5.130
MT07	Cadmio total	mg/l Cd	Derivé de cadion (**)	0.002		< 0.002	< 0.002
MT11	Cobre total	mg/l Cu	Cupritona (**)	4.00		< 4.00	< 4.00
MT16	Hierro total	mg/l Fe	Triazina (**)	0.005		7.096	4.285
MT19	Manganeso total	mg/l Mn	Formaldexina (**)	0.25		1.00	1.00
MT22	Níquel total	mg/l Ni	Dimetilglicoxina (**)	0.02		0.070	0.063
MT32	Zinc total	mg/l Zn	CI-PAN (**)	0.05		0.1345	0.1103

(\*) Los métodos indicados No han sido acreditados por el INACAL - DA

<sup>1</sup> Datos proporcionados por el cliente



*Olivero Mario Leyva Colles*  
 Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
 FCAM - UNASAM  
 CQP N° 604

Huaraz, 17 de Diciembre de 2015

Está prohibida la reproducción de este informe salvo autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental. Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dicientes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perechibilidad.

## **ANEXO N° 7**

### **INFORMES DE ENSAYOS DE METALES PESADOS EN EL SEDIMENTO A LA ENTRADA Y SALIDA DEL HUMEDAL**



### INFORME DE ENSAYO CS160018

**CLIENTE** Razón Social : ERICA LUNA SOLANO  
 Dirección : Huaraz  
 Atención : Erica Luna Solano  
**MUESTRA** Producto declarado : Sedimento  
 Matriz : Sedimento  
 Procedencia : Nevado Pastorury  
 Ref./Condición : Cadena de Custodia CC160018  
**MUESTREO** Responsable : Muestra proporcionada por el cliente  
 Referencia : No indica  
**LABORATORIO** Fecha de recepción : 17/Mayo/2016  
 Fecha de análisis : 17 de Mayo - 06 de Junio/2016  
 Cotización N° : CO160405

CÓD.	PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA	
					Código del cliente	Entrada 1
					Fecha de muestra 1	13/03/2016
					Hora de muestra 1	08:45
					Código del Laboratorio	CS160018
MS	METALES EN SUELOS					
MS01	Aluminio total	mg/Kg Al	Cromazurol S (*)	4.00		484.53
MS08	Cadmio total	mg/Kg Cd	Derivé de cadion (*)	0.40		< 0.40
MS11	Cobre total	mg/Kg Cu	Cuprióna (*)	4.00		< 4.00
MS16	Hierro total	mg/Kg Fe	Triazina (*)	1.00		1219.00
MS19	Manganeso total	mg/Kg Mn	Formaldexina (*)	2.00		47.06
MS22	Níquel total	mg/Kg Ni	Dmetilgloxina (*)	4.00		< 4.00
MS32	Zinc total	mg/Kg Zn	Cl-PAN (*)	10.00		98.00

(\*) Los métodos indicados No han sido acreditados por el INACAL - DA

<sup>1</sup> Datos proporcionados por el cliente

Huaraz, 06 de Junio de 2016



Quím. Mario Leyva Collas  
 Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
 FCAM - UNASAM  
 COP N° 604

Está prohibida la reproducción de este informe sin la autorización del Laboratorio de Calidad Ambiental.  
 Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas en el mismo. Las contramuestras o muestras dicientes se conservarán de acuerdo a su tiempo de perecibilidad.

### INFORME DE ENSAYO CS160019

**CLIENTE** Razón Social : ERICA LUNA SOLANO  
 Dirección : Huaraz  
 Atención : Erica Luna Solano  
**MUESTRA** Producto declarado : Sedimento  
 Matriz : Sedimento  
 Procedencia : Nevado Pastorury  
 Ref./Condición : Cadena de Custodia CC160018  
**MUESTREO** Responsable : Muestra proporcionada por el cliente  
 Referencia : No indica  
**LABORATORIO** Fecha de recepción : 17/Mayo/2016  
 Fecha de análisis : 17 de Mayo - 06 de Junio/2016  
 Cotización N° : CO150405

CÓD.	PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	MUESTRA	
					Código del cliente	Salida 2
					Fecha de muestreo	13/03/2016
					Hora muestreo	08:50
					Código del Laboratorio	CS160019
MS	METALES EN SUELOS					
MS01	Aluminio total	mg/Kg Al	Cromosaural S (*)	4.00		705.87
MS08	Cadmio total	mg/Kg Cd	Derive de cation (*)	0.40		0.40
MS11	Cobre total	mg/Kg Cu	Cuprizona (*)	4.00		< 4.00
MS16	Hierro total	mg/Kg Fe	Triazina (*)	1.00		869.00
MS19	Manganeso total	mg/Kg Mn	Formaldoxina (*)	2.00		32.85
MS22	Niquel total	mg/Kg Ni	Dimetilgloxina (*)	4.00		< 4.00
MS32	Zinc total	mg/Kg Zn	CI-PAN (*)	10.00		73.7

(\*) Los métodos indicados No han sido acreditados por el INACAL - DA

† Datos proporcionados por el cliente



Quim. Mario Leyva Collas  
 Jefe del Laboratorio de Calidad Ambiental  
 FCAM - UNASAM  
 COP N° 604

Huaraz, 06 de Junio de 2016