



**FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO**

FITORREMEDIACIÓN CON MACRÓFITAS EN LA REMOCIÓN DE METALES  
PESADOS EN AGUAS RESIDUALES, A NIVEL DE LABORATORIO, 2021

**Línea de investigación:**

**Biodiversidad, Ecología y Conservación**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autora:**

Cuba Huamani, Jeritza Hellen

**Asesor:**

Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio

ORCID: ORCID: 0000-0003-1485-5854

**Jurado:**

Rojas León, Gladys

Reyna Mandujano, Samuel Carlos

Valdivia Orihuela, Braulio Armando

**Lima - Perú**

**2022**

**Referencia:**

Cuba, H (2022). *Fitorremediación con micrófitas en la remoción de metales pesados en aguas residuales, a nivel de laboratorio, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/6123>



**Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)**

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA AMBIENTAL Y ECOTURISMO

**FITORREMEDIACIÓN CON MACRÓFITAS EN LA REMOCIÓN  
DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES, A NIVEL DE  
LABORATORIO, 2021**

Línea de Investigación:  
Biodiversidad, ecología y conservación

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor(a)  
Cuba Huamani, Jeritza Hellen

Asesor(a)  
Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio  
(ORCID: 0000-0003-1485-5854)

Jurado  
Rojas León, Gladys  
Reyna Mandujano, Samuel Carlos  
Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima – Perú  
2022

### **Dedicatoria**

Dedico esta tesis a mis abuelos Antonio y Juan Ramon que me acompañan desde el cielo ellos son mi mayor ejemplo, a mis abuelas Ana y Alicia Juana por su dedicación y cariño.

A mi madre Ruth Julissa por todo su sacrificio, esfuerzo y amor.

A mi esposo Mariano Adolfo por su apoyo incondicional y su comprensión.

## **Agradecimiento**

Mi agradecimiento con Dios por bendecir mi camino, darme salud en estos tiempos difíciles y por cuidar de mí día a día.

A mis abuelos Antonio, Juan Ramon, Ana y Alicia, por haberme cuidado y entregado su amor, por todo su esfuerzo y dedicación conmigo, sus canas son sinónimos de sabiduría, gracias por todos sus consejos y su apoyo.

A mis padres Jaime, Ruth Julissa y Elías, por su apoyo, dedicación y enseñanzas en mi formación personal y profesional.

A mi esposo Mariano Adolfo, por acompañarme en todos los momentos difíciles, por sus palabras de aliento día a día, su apoyo incondicional y paciencia.

A mis suegros Charles y Ninoska, por el apoyo que me brindaron durante toda la ejecución de la tesis.

A mi asesor el Dr. Sernaque, por ser mi guía en todo este proceso y por compartir su experiencia y conocimientos.

A mi familia, mis tías, tíos, primos que compartieron muchos momentos de mi vida donde me enseñaron sobre la unión, la dedicación y el esfuerzo.

## ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Descripción y formulación del problema.....	12
1.1.1. Descripción del problema.....	12
1.1.2. Formulación del problema.....	14
1.2. Antecedentes.....	14
1.2.1. Nacionales.....	14
1.2.2. Internacionales.....	17
1.3. Objetivos.....	20
1.3.1. Objetivo General.....	20
1.3.2. Objetivos Específicos.....	20
1.4. Justificación.....	20
1.5. Hipótesis.....	21
1.5.1. Hipótesis General.....	21
1.5.2. Hipótesis Específicas.....	21
II. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	22
2.1.1. Fitorremediación.....	22
2.1.2. Wetlands o Humedales.....	24
2.1.2.1. Humedales construidos o artificiales.....	27
2.1.3. Plantas Macrófitas.....	32
2.1.3.1. Pistia Stratiotes.....	35
2.1.3.2. Eichhornia Crassipes.....	37
2.1.3.3. Azolla Filiculoides.....	39
2.1.3.4. Tratamiento de aguas residuales con plantas macrófitas.....	40
2.1.3.5. Metales pesados.....	41
III. MÉTODO.....	42
3.1. Tipo de investigación.....	42
3.2. Ámbito temporal y espacial.....	42
3.3. Variables.....	43
3.4. Población y muestra.....	47

3.4.1. Población.....	47
3.4.2. Muestra .....	47
3.5. Instrumentos .....	47
3.6. Procedimientos .....	49
3.7. Análisis de datos.....	54
IV. RESULTADOS.....	55
4.1. Análisis de laboratorio .....	55
4.2. Análisis de los cambios morfológicos.....	57
4.3. Análisis Estadístico .....	72
V. DISCUSIÓN .....	84
VI. CONCLUSIONES .....	86
VII. RECOMENDACIONES.....	87
VIII. REFERENCIAS.....	88
IX. Anexos Anexo A: Formato .....	93
Anexo B: Certificado de identificación botánica .....	94
Anexo C: Panel Fotográfico.....	97

## Índice de Tablas

Tabla 1 Métodos de Fitorremediación .....	23
Tabla 2 Características de la <i>Pistia Stratiotes</i> .....	35
Tabla 3 Características de la <i>Eichhornia Crassipes</i> .....	37
Tabla 4 Características de la <i>Azolla Filiculoides</i> .....	39
Tabla 5 Variable independiente y dependiente.....	43
Tabla 6 Operacionalización de variables .....	44
Tabla 7 Instrumentos y equipos .....	47
Tabla 8 Materiales.....	48
Tabla 9 Otros Materiales y equipos .....	48
Tabla 10 Análisis de metales pesados en el tejido vegetal al final del tratamiento en las muestras M-1, M-2 y M-3.....	55
Tabla 11 Análisis de concentración de arsénico en las muestras de agua residual AR-1, AR-2, AR-3 y AR-4.....	56
Tabla 12 Análisis de concentración de cadmio en las muestras de agua residual AR-1, AR-2, AR-3 y AR-4.....	57
Tabla 13 Resultados de las mediciones de las características morfológicas de la <i>Pistia Stratiotes</i> .....	58
Tabla 14 Resultados de las mediciones de las características morfológicas del <i>Eichhornia Crassipes</i> .....	61
Tabla 15 Monitoreo a las características morfológicas de la especie <i>Pistias Stratiotes</i> .....	64
Tabla 16 Monitoreo a las características morfológicas de la especie <i>Eichhornia Crassipes</i> .....	67
Tabla 17 Monitoreo a las características morfológicas de la especie <i>Azolla Filiculoides</i> .....	69
Tabla 18 Distribución estadística de los resultados del tratamiento con arsénico .....	72
Tabla 19 Análisis de normalidad para análisis de arsénico .....	73
Tabla 20 Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-2 (para arsénico) .....	74
Tabla 21 Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-3 (para arsénico) .....	75
Tabla 22 Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-4 (para arsénico) .....	76
Tabla 23 Distribución estadística de los resultados del tratamiento con cadmio .....	77
Tabla 24 Análisis de normalidad para análisis de cadmio .....	78



Tabla 25 Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-2 (para cadmio).....	79
Tabla 26 Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-3 (para cadmio).....	80
Tabla 27 Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-4 (para cadmio).....	81
Tabla 28 Contrastación de hipótesis de investigación .....	82

## Índice de Figuras

Figura 1 Componentes de un humedal construido o artificial .....	28
Figura 2 Humedal artificial de flujo superficial.....	29
Figura 3 Humedal de flujo superficial con macrófitas flotantes.....	30
Figura 4 Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas .....	30
Figura 5 Humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical .....	32
Figura 6 Tipos de macrófitas .....	34
Figura 7 Pistia Stratiotes .....	35
Figura 8 Órganos de la Pistia Stratiotes.....	36
Figura 9 Eichhornia Crassipes .....	37
Figura 10 Órganos de la Eichhornia Crassipes .....	38
Figura 11 Azolla Filiculoides.....	40
Figura 12 Mapa de Ubicación del lugar.....	42
Figura 13 Sulfato de cadmio y arseniato de sodio .....	50
Figura 14 Preparación de las soluciones patrones .....	51
Figura 15 Monitoreo de las características morfológicas de cada macrófitas .....	52
Figura 16 Muestras finales de tejido vegetal .....	52
Figura 17 Procedimiento de la investigación.....	53
Figura 18 Eficiencia de remoción de arsénico en aguas contaminadas sintéticas aplicando tratamiento con tres macrófitas específicas .....	77
Figura 19 Eficiencia de remoción de cadmio en aguas contaminadas sintéticas aplicando tratamiento con tres macrófitas específicas .....	82
Figura 20 Aclimatación de la especie Eichhornia Crassipes .....	97
Figura 21 Aclimatación de la especie Pistia Stratiotes .....	97
Figura 22 Aclimatación de la Azolla Filiculoides .....	98
Figura 23 Cambio morfológico de la especie Eichhornia Crassipes después de la exposición a los metales pesados .....	98
Figura 24 Cambio morfológico de la especie Pistia Stratiotes después de la exposición a los metales pesados.....	99
Figura 25 Cambio morfológico de la especie Azolla Filiculoides después de la exposición a los metales pesados.....	99

## Resumen

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar la influencia de fitorremediación de plantas macrófitas en la remoción de metales pesados a nivel de laboratorio, para lo cual se utilizó tres especies de macrófitas: *Pistia Stratiotes*, *Eichhornia Crassipes* y la *Azolla Filiculoides*, la muestra de agua residual fue simulada con concentraciones de 5 mg/l de arsénico y 0.2 mg/l de cadmio bajo condiciones de laboratorio. Se elaboró 1 reservorio donde se colocó el agua residual y tres sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial, el primer sistema con la especie *Pistia Stratiotes* (M-1), el segundo sistema con la especie *Eichhornia Crassipes* (M-2) y el tercer sistema con la especie *Azolla Filiculoides* (M-3), se analizó los cambios morfológicos de cada individuo por especie durante todo el periodo de evaluación de 9 días. Además, se analizó la concentración de metales pesados en el tejido vegetal y el agua residual al final del tratamiento. Como resultado, se identificó a la *Pistia Stratiotes* como la macrófita más eficiente puesto que se obtuvo un porcentaje de remoción de 94% y 89.5% en la remoción de metales pesados como cadmio y arsénico respectivamente, la especie *Eichhornia Crassipes* obtuvo un porcentaje de remoción de 84.7% para arsénico y 90% para cadmio, y por último la especie *Azolla Filiculoides* obtuvo un porcentaje de remoción de 92.7 % para cadmio y 74 % para arsénico.

*Palabras Claves:* agua residual, metales pesados, plantas macrófitas.

### Abstract

The main objective of this research is to evaluate the influence of phytoremediation of macrophytes on the removal of heavy metals at laboratory level, which three species of macrophytes were used: *Pistia Stratiotes*, *Eichhornia Crassipes* and *Azolla Filiculoides*, the wastewater sample was simulated with concentrations of 5 mg/l of arsenic and 0.2 mg/l of cadmium under laboratory conditions. One reservoir was prepared where the wastewater was placed and three subsurface flow artificial wetland systems, the first system with the species *Pistia Stratiotes* (M-1), the second system with the species *Eichhornia Crassipes* (M-2) and the third system with the species *Azolla Filiculoides* (M-3), the morphological changes of each individual per species were analyzed during the whole evaluation period of 9 days. In addition, the concentration of heavy metals in plant tissue and wastewater at the end of treatment was analyzed. As a result, the *Pistia Stratiotes* was identified as the most efficient macrophyte since it obtained a removal percentage of 94% and 89.5% in the removal of heavy metals such as cadmium and arsenic, respectively, the species *Eichhornia Crassipes* obtained a removal percentage of 84.7% for arsenic and 90% for cadmium, and finally the species *Azolla Filiculoides* obtained a removal percentage of 92.7% for cadmium and 74% for arsenic.

*Keywords:* wastewater, heavy metals, macrophyte plants.

## I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la influencia de fitorremediación de plantas macrófitas en la remoción de metales pesados a nivel de laboratorio, 2021, para lo cual se plantea la utilización de humedales construidos y la exposición de estas tres especies de macrófitas bajo condiciones de laboratorio.

En el Capítulo I, se describe el problema principal ¿Cómo influye la fitorremediación con macrófitas en la remoción de metales, a nivel de laboratorio? Del cual partiremos para determinar los objetivos e hipótesis, los cuales serán demostrados a través de la medición de variables.

En el Capítulo II se detalla el marco teórico, el cual ayudará a entender el proceso y evolución del trabajo de investigación definiendo términos básicos como fitorremediación, metales pesados, y las características de las macrófitas flotantes utilizados.

En el Capítulo III se desarrolla la metodología de investigación de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, y diseño experimental pues es desarrollada con la intervención del investigador y con datos recogidos medidos a través del tiempo planteando y probando la hipótesis para establecer la asociación entre factores. Además, se detalla desde la obtención de macrófitas flotantes hasta la etapa de experimentación.

En el Capítulo IV se detalla los resultados obtenidos de la eficiencia de remoción de arsénico y cadmio de las especies *Pistia Stratiotes*, *Eichhornia Crassipes* y *Azolla Filiculoides*. Además de los cambios morfológicos que presentaron durante el periodo de ensayo.

En el Capítulo V se discute los resultados de la presente investigación en relación con los resultados de otras investigaciones.

En el Capítulo VI y Capítulo VII se presenta las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

Finalmente, en Capítulo IX se anexa el formato utilizado en la recolección de información, certificados de identificación botánica y galería fotográfica.

## **1.1. Descripción y formulación del problema**

### ***1.1.1. Descripción del problema***

Alrededor del mundo, gran cantidad de las aguas residuales se vierten al medioambiente sin pasar por un tratamiento. Como resultado, en muchos países del mundo el agua residual se descarga en ríos y lagos, y estos acaban en los océanos. No obstante, el reúso y tratamiento de las aguas residuales pueden ser una solución rentable para este problema y sostenible frente a la escasez del agua (FAO, 2017).

A nivel mundial, los cuerpos de agua como ríos, lagos y otros son contaminados por actividades industriales, por los procesos naturales o actividades antropogénicas. En los países en vía de desarrollo, gran parte de los desechos industriales son vertidos al agua sin algún tratamiento, contaminando así al agua, mientras que en los países industrializados se genera grandes cantidades de desechos peligrosos que impactan los ecosistemas y deterioran el agua, el aire y el suelo (Arango, 2013).

En promedio, el 70% de las aguas residuales son tratadas en los países desarrollados. A su vez esto disminuye a 38% en los países de ingresos moderados y a un 28% en los países subdesarrollados. En los países en vía de desarrollo solo el 8% recibe al menos un tratamiento. Estas cifras revelan que en el mundo más del 80% no reciben tratamiento alguno (UNESCO, 2017).

En el Perú se produce 2 217 946 m<sup>3</sup>/día aproximadamente de aguas residuales que se vierten a las redes de alcantarillado de las EPS, el 32% de estas aguas residuales llega a recibir al menos un tratamiento. Mientras que en Lima se genera 1 202 286 m<sup>3</sup>/día aproximadamente de aguas residuales, el 20,5% de estas aguas toma tratamiento. (OEFA, 2014)

La descarga de las aguas residuales sin tratamiento y tratadas inadecuadamente contaminan los cuerpos de agua natural volviéndolos en focos de infección para la población, para la flora y la fauna. (OEFA, 2016)

Por lo cual, la calidad de las aguas marino-costeras, ríos y el mar contiguo se ven afectados por los diferentes contaminantes que se encuentran presentes en las aguas residuales provenientes del crecimiento urbano, industria pesquera y acuicultura que, comúnmente son vertidas sin un tratamiento adecuado, en el peor de los casos, sin ser tratadas. Ante tal situación hídrica a nivel nacional, se ha comprobado que la disponibilidad hídrica está condicionada a su calidad; es decir, si los cuerpos receptores de agua contienen altas concentraciones de contaminantes, será muy discutible su funcionalidad como fuente de recursos hídricos, así como la contaminación de las aguas marinas que afecta de forma directa al medio acuático y a la salud pública. (Iturregui y Paucar, 2020)

Las operaciones como la minimización de consumo, el reúso y la recirculación son estrategias para el manejo del agua. A pesar de ello, los efluentes deben pasar por tratamientos. Estos deben ser adecuados al objetivo, poseer una alta eficiencia, ser de bajos costos y poseer ventajas ambientales. Por lo cual, es importante promover el desarrollo de investigaciones para implementar y desarrollar tecnologías innovadoras para los tratamientos de aguas residuales, desde el punto de vista económico, técnico y ambiental, con las tecnologías tradicionales y modernos que puedan ser aplicados al contexto de cada país. (Arango, 2013)

### **1.1.2. Formulación del problema**

#### **Problema principal**

¿Cómo influye la fitorremediación con macrófitas en la remoción de metales, a nivel de laboratorio?

#### **Problemas secundarios**

- ¿Cómo influye la fitorremediación con *Pistia Stratiotes* en la remoción de metales, a nivel de laboratorio?
- ¿Cómo influye la fitorremediación con *Eichhornia Crassipes* en la remoción de metales, a nivel de laboratorio?
- ¿Cómo influye la fitorremediación con *Azolla Filiculoides* en la remoción de metales, a nivel de laboratorio?

## **1.2. Antecedentes**

### **1.2.1. Nacionales**

Gómez (2013), en su investigación “Determinación de la tolerancia a plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) de *Pistia Stratiotes* “Huama”, *Eichhornia Crassipes* “Putu putu” y *Lemna Minor* “Lentejita”, se determinó la tolerancia fitotóxica a los metales Cadmio, mercurio y Plomo de las especies *Eichhornia Crassipes*, *Pistia Stratiotes* y *Lemna Minor*, donde se evaluó a diferentes concentraciones los efectos de los mencionados metales en el crecimiento, la capacidad de acumulación y la tolerancia en condiciones de invernadero, para los tratamientos de la *Lemna Minor* se utilizó bandeja 30x30 centímetros, para la *Pistia Stratiotes* y la *Eichhornia Crassipes* se empleó baldes de 15 litros, se evaluaron cada 48 horas por 8 días los efectos fitotóxicos. Como resultado, la tolerancia de la especie *Lemna Minor* fue de 1 mg/l para mercurio, 0.064 mg/l para Cadmio y 0.008 mg/l para Plomo; para el caso de *Pistia Stratiotes* fue



0.512 mg/l para Cd, 0.256 mg/l para Pb y 0.008 mg/l a Hg; y *Eichhornia Crassipes* la tolerancia fue de 0.512 mg/l a Plomo, 0.008 mg/l a mercurio y 0.128 mg/l a Cd. Finalmente se concluye que la especie *Lemna Minor* reportó 1 mg/l siendo esta la mayor concentración de retención al Mg, la *Pistia Stratiotes* obtuvo 0.512 mg/l siendo la mayor concentración de retención al Cd y por último la especie *Eichhornia Crassipes* tuvo mayor presencia de Pb con 0.512 mg/l.

Pozo (2016), en su investigación “Eficiencia de las plantas *Eichhornia Crassipes* y *Pistia Stratiotes* para la remoción de cadmio de las aguas del río Surco, 2016”, se determinó qué planta es más eficiente para la remoción de cadmio de las aguas recolectadas, para lo cual se realizó en recipientes al aire libre, la investigación duro 20 días, cada especie recibió un tratamiento diferente y se midieron antes y después del tratamiento las concentraciones de Cadmio, utilizando la técnica de espectrometría de emisión con plasma inducido para analizar la presencia de otros metales diferentes al Cadmio y la técnica de espectrometría de absorción atómica para cuantificar la cantidad de cadmio absorbido en cada tratamiento. Como resultado, la especie *Eichhornia Crassipes* obtuvo un mejor progreso en comparación a la especie *Pistia Stratiotes*, logrando mejorar las características fisicoquímicas iniciales del agua. Finalmente se concluye que en la remoción de cadmio la especie *Pistia Stratiotes* obtuvo una eficiencia de 67% y la *Eichhornia Crassipes* tuvo 68% de eficiencia.

Sandoval (2019), en su investigación “Eficiencia del jacinto de agua *Eichhornia Crassipes* y lenteja de agua *Lemna Minor l.* en la remoción de cadmio en aguas residuales”, se evaluó la eficiencia de la *Lemna Minor l.* y la *Eichhornia Crassipes* en la remoción de cadmio en aguas residuales industriales, la investigación duro 11 días bajo condiciones de laboratorio con agua residual simulada, utilizando sistemas de humedales, los parámetros evaluados fueron el metal cadmio y parámetros fisicoquímicos como CE, pH, temperatura y los cambios

morfológicos de cada especie. Como resultado, se encontró que la especie *Eichhornia Crassipes* obtuvo valores en promedio de 6.9 para pH, 400.1 para CE y 19.3 para T°, mientras que para *Lemna Minor L.* fue de 7.5 para pH, 368.3 para CE y 19.2 para T°, por último entre sus características morfológicas se evidencio el color verde brillante a verde oscuro y marrón en el caso de *Eichhornia Crassipes* y verde amarillento en *Lemna Minor L.* Finalmente se concluyó que la especie *Eichhornia Crassipes* obtuvo un alto grado de eficiencia diferenciándose de *Lemna Minor l.* en 47%., es decir la *Eichhornia Crassipes* consiguió remover en gran porcentaje con eficiencia de 83.57% mientras que la *Lemna Minor L.* fue 39.35%.

Choque (2010), en su investigación “Cuantificación de la remoción de Pb y Cd mediante la lenteja de agua *Lemna Minor* y *Azolla Filiculoides* de las aguas de la bahía interior de Puno”, se utilizó plantas acuáticas como *Lemna Minor* y *Azolla Filiculoides* en la remoción de metales pesados en la bahía interior – Puno y se cuantificó, mediante depósitos de polietileno con capacidad de 1 litro donde se vertieron 10 gramos de cada especie, la investigación duro 30 días. Como resultado para las especies agua *Lemna Minor L.* y *Azolla Filiculoides* se obtuvo los siguientes datos: en 30 días el porcentaje de remoción de cadmio y plomo fue de 62.56% y 65.55% respectivamente, mientras que para 5 días fue de 2.38% y 0.48% respectivamente. Se concluyó que la *Lemna Minor L.* fue la especie que presenta mayor remoción para los metales de cadmio y plomo que la especie *Azolla Filiculoides*.

Rojas y Suyon (2020), en su investigación titulada “Eficiencia de fitorremediación con jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*) para disminuir concentraciones de arsénico en aguas del centro poblado Cruz del Medano - Morrope – 2019”, se evaluó la eficiencia de fitorremediación del *Eichhornia Crassipes* para la disminución de concentraciones de As en aguas del centro poblado Cruz del Médano, se recolectó 0.015 m<sup>3</sup> de agua del pozo y las especies, mediante un

recipiente de plástico de PET de 30 litros por el período inicial de 7 días y por último 7 días más, donde se midió el parámetros de arsénico antes, durante y después de adicionar la especie. Como resultado, para la *Eichhornia Crassipes* se obtuvieron los siguientes datos: inicialmente 26.0 °C de T°, 0.047 mg/l para As y 7.25 para pH, en la primera semana: 21.4 °C de T°, 0.031 mg/l para As y 7.19 para pH, en la última semana los resultados fueron 23.6 °C de T°, 0.019 mg/l para As y 7.10 para pH. Por último, se concluyó que la *Eichhornia Crassipes* tuvo mayor eficiencia de remoción al final del tratamiento en la remoción del arsénico y se mantuvo los valores de pH y temperatura.

### **1.2.2. Internacionales**

Syah et al. (2015), en su artículo titulado “Eliminación de plomo y cobre del agua contaminada mediante el sistema EAPR y absorción por lechuga de agua (*Pistia Stratiotes L.*)”. Se evaluó la posible eliminación y absorción de la concentración de plomo y cobre mediante fitorremediación hidropónica usando un proceso electro asistido con la *Pistia Stratiotes L.*, se utilizó un sistema fitorremediación electro (EAPR) e hidropónico para una eliminación rápida del plomo y cobre en agua contaminada durante 7 días, la *Pistia Stratiotes L.* se trasplantaron y se aclimataron por 3 días. La concentración de Pb y Cu se determinó con un espectrofotómetro de adsorción atómica de llama. Como resultado, se mostró que la acumulación de plomo y cobre fue alta en las raíces de la *Pistia Stratiotes L.*, el electro migración de los iones Pb y Cu en el sistema EAPR se dio en los 2 primeros días. Finalmente se concluyó que la absorción del metal fue mayor con el sistema EAPR que comparación con el sistema de fitorremediación en un 93% de plomo respecto a la concentración inicial y en un 99% la concentración de cobre.

Cueva (2016), en su investigación “Evaluación del potencial fitorremediador de dos especies *Limnobium laevigatum R.* y *Pistia Stratiotes L.* para el tratamiento de lixiviados

producidos en el relleno sanitario del cantón Centinela del Cónдор, provincia Zamora Chinchipe”. Se evaluó el potencial de fitorremediación de las especies *Pistia Stratiotes L.* y *Limnobium laevigatum R.* en el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario Centinela del Cónдор, mediante instrumentos metodológicos como la observación, encuestas, análisis de laboratorio y también se aplicó el método estadístico Chi-cuadrado y fue comparado con el reporte de resultados de lixiviados por parte del GAD cantonal de Centinela del Cónдор. Como resultado destaca el SST con un 97.63%, DBO con un 98.32% y DQO con un 97.62% de remoción de contaminante. Finalmente se concluyó que las especies *Limnobium laevigatum* y *Pistia Stratiotes* presentaron un rango de eficiencia que varían entre el 96.67% al 99.65% en el cincuenta por ciento del total de los parámetros evaluados, además que no hubo mucha diferencia entre los resultados del tratamiento de lixiviados respecto a las dos macrófitas.

Kumar (2019), en su artículo titulado “Remediación de metales pesados/metaloides de aguas residuales utilizando macrófitos flotantes libres de un humedal natural”. Se evaluó el potencial de fitorremediación de estas tres plantas acuáticas (*Eichhornia Crassipes*, *Pistia Stratiotes* y *Spirodela Polyrhiza*) que crecen en un humedal Ramsar. Se cultivó cada planta en tanques experimentales y se analizó los siguientes metales Fe, Cu, Cd, Cr, y Zn, Ni y As (metaloides) cada 4 días, durante el periodo de 15 días. Como resultado los valores que se obtuvieron oscilaron entre  $83 \pm 4,4\%$  para Fe,  $66 \pm 1,4\%$  para Cr,  $63 \pm 42,4\%$  para Cu,  $76 \pm 3,4\%$  para Cd, 79% para Zn,  $67 \pm 2,4\%$  para Ni y el máximo entre los tres,  $63 \pm 4,2\%$  para Cu. La *Pistia Stratiotes* mostró una eliminación del  $49 \pm 1,4\%$  de As, en cambio la *Spirodela Polyrhiza* presentó una eliminación de As del  $37 \pm 1,4\%$ . Finalmente se concluyó que la *Eichhornia Crassipes* es el más eficiente seguido de *Pistia Stratiotes* y *Spirodela Polyrhiza*, las tres especies revelaron una eliminación  $> 79\%$  de diferentes metales.

Suárez y Vásquez (2020), en su investigación titulada “Evaluación de dos macrófitos en el tratamiento de aguas residuales domésticas de la Parroquia González Suárez, cantón Otavalo”, se evaluó la eficiencia de la *Pistia Stratiotes* y *Typha Latifolia* en la planta de tratamiento de la Parroquia González Suarez, se realizó mediante la caracterización de la *Typha Latifolia* y la *Pistia Stratiotes* y funcionalidad dentro de los humedales y análisis de la relación de los dos macrófitos y los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida de agua de la PTAR. Como resultados, se registró la tasa de crecimiento promedio para las especies *T. latifolia* y *Pistia Stratiotes* alcanzando una altura máxima de 1,90 cm y 0,23 cm respectivamente. En el humedal construido estudiado con la especie *Typha Latifolia* se obtuvo una alta eficiencia de remoción en algunos contaminantes como turbiedad de 87%; DQO de 92% y NO<sub>3</sub> de 58%, OD de 18%, pH de 6 a 7, SDT de 241mg/l y conductividad medianamente alta, mientras que la *Pistia Stratiotes* la eficiencia de remoción para turbiedad fue de 74%, DQO 88%, NO<sub>3</sub> de 64%, OD en 36%, pH de 6 a 7, SDT de 240 mg/l y conductividad medianamente alta. Finalmente se concluyó que entre *Pistia Stratiotes* y *Typha Latifolia*, la *Typha Latifolia* aporta mayor cantidad de oxígeno al sistema removiendo un 92% de DQO, mientras que la *Pistia Stratiotes* es idónea al momento de remover compuestos nitrogenados logrando hasta un 64% de remoción, la *Typha Latifolia* mostró mejores resultados.

Nahar y Hoque (2021), en su investigación titulada “Fitorremediación para mejorar el ecosistema eutrófico por la macrófita acuática flotante, lechuga de agua (*Pistia Stratiotes L.*) a escala de laboratorio”. Se evaluó el potencial de fitorremediación de la *Pistia Stratiotes* en ecosistema acuático, se recolecto muestras de agua de cuatro lagos, se enjuagaron con agua del grifo y se trasplanto y se expuso a la luz solar durante 3 a 5 días, en un ambiente controlado en un laboratorio por el periodo de 7 días y se midieron los parámetros físicos y químicos antes y

después del final del tratamiento. Como resultado, se obtuvo los siguientes datos para el antes y después del tratamiento: 6.5 y 7.41 pH, 0.88 mg/l y 11.5 mg/l OD, 410  $\mu$ S/cm y 332  $\mu$ S/cm EC, 204 mg/l y 161 mg/l TDS, 64 NTU y 17.22 NTU Turbidez. Finalmente se concluyó de todas las muestras el porcentaje de reducción fue de 21%, 2%, 36% y 14% EC, 1%, 21%, 36% y 14% TDS, 83%, 73%, 61% y 34% Turbidez, mientras que aumentó en todos los cultivos el pH a 14%, 6%, 33% y 28% y para el OD 3102%, 1207%, 733% y 282%, hallazgos que la macrófita acuática tiene un potencial significativo para mejorar los parámetros de calidad del agua al eliminar los contaminantes de los cuerpos de agua de los lagos eutróficos.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

- Evaluar la influencia de fitorremediación con macrófitas en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Analizar la influencia de la fitorremediación con *Pistia Stratiotes* en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio.
- Analizar la influencia de la fitorremediación con *Eichhornia Crassipes* en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio.
- Analizar la influencia de la fitorremediación con *Azolla Filiculoides* en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio.

### **1.4. Justificación**

La fitorremediación es un tratamiento donde se aprovecha los procesos biológicos de las plantas macrófitas y de los microorganismos mediante la adsorción, absorción, degradación, reacciones redox, acumulación, etc., para tratamiento de aguas residuales. (Cai, 2013)

La presente investigación se justifica como práctica porque la investigación brindará una solución aplicada y social porque la información servirá para autoridades regionales, municipales, investigadores, empresas privadas, nacionales y la población para la ejecución de tratamientos de bajo costo y rentable para aguas residuales en cuanto a su operación y el mantenimiento, no se requiere de energía, es una alternativa ecológica y sostenible, es decir, amigable con el ambiente y eficiente para disminuir la carga de los contaminantes de las aguas residuales, a niveles bajos para poder cumplir con las exigencias de la normatividad ambiental.

Justificación teórica, porque se darán nuevos aportes que servirán como base para nuevas investigaciones sobre la fitorremediación con la especie *Pistia Stratiotes*, *Eichhornia Crassipes* y la *Azolla Filiculoides*, en esta última especie ampliando los conocimientos en la eficiencia de remoción de metales pesados de los humedales artificiales.

## **1.5. Hipótesis**

### ***1.5.1. Hipótesis General***

- La fitorremediación con macrófitas influye significativamente en la remoción de aguas residuales, a nivel de laboratorio, 2021.

### ***1.5.2. Hipótesis Específicas***

- La fitorremediación con *Pistia Stratiotes* influye en 75% en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio, 2021.
- La fitorremediación con *Eichhornia Crassipes* influye en 75% en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio, 2021.
- La fitorremediación con *Azolla Filiculoides* influye en 60% en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio, 2021.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

#### 2.1.1. *Fitorremediación*

El término fitorremediación puede definirse como una tecnología que se basa en la capacidad de las plantas in situ para restaurar o limpiar fuentes de agua contaminadas, como aguas, suelos, e incluso aire por medio de procesos bioquímicos. La cual está estructurada por dos palabras, fito (ta), que significa planta o vegetal en griego, y remediare que es remediar en latín, fitorremediación significa remediar un daño por medio de plantas o vegetales. (Núñez et al., 2004)

Las plantas se pueden utilizar para extraer, volatizar, inmovilizar o degradar los contaminantes. (Delgadillo et al., 2011)

**2.1.1.1. Métodos de Fitorremediación.** De acuerdo con la función que tienen las plantas durante el proceso de fitorremediación por los mecanismos de contención o eliminación, existen diferentes métodos de fitorremediación de los cuales se pueden mencionar los siguientes:

**Fitoestimulación:** se utiliza la capacidad de ciertas plantas, en las raíces de las plantas para estimular el aumento de microorganismos que tienen la capacidad de degradar contaminantes. (Núñez et al., 2004)

**Fitoextracción o Fitoacumulación:** se utiliza plantas llamadas metalofitas o acumuladoras de metales (Núñez et al., 2004), también se usan algas para remover contaminantes del agua o suelo, los contaminantes son absorbidos mediante raíces y son acumulados en los tallos u hojas. Cuando la planta se ha desarrollado completamente se procede a cortarlo para su posterior incineración. (Delgadillo et al., 2011)



Fitovolatilización: se utiliza algunas plantas que son capaces de volatilizar a la atmósfera ciertos contaminantes que pueden estar presentes agua, aire o sedimentos. Estos son absorbidos por la raíz y se liberan por medio de la transpiración. (Volke et al., 2005)

Fitoestabilización: se utiliza ciertas plantas que tienen densas raíces, para absorber e inmovilizar los contaminantes ya sea del suelo o agua y los retienen en su interior, a través de este mecanismo se estabiliza el suelo o agua reduciendo la movilidad biodisponibilidad y/o toxicidad de los contaminantes. (Volke et al., 2005)

Fitodegradación o fitotransformación: se utiliza plantas para degradar o transformar las sustancias tóxicas, en menos. A través de reacciones enzimáticas y microorganismos en la zona de la rizosfera, es decir, en las raíces de las plantas, estos contaminantes son parcial o completamente degradados. (Núñez et al., 2004)

Rizofiltración o Fitofiltración: se utilizan las raíces de las plantas, cuando la planta está desarrollada se introducen en el agua contaminada, donde se absorben los contaminantes por medio de las raíces o microorganismos hacia la superficie de estos. (Nedelkoska y Doran, 2000); (Eapen et al, 2003); (Cherian y Oliveira, 2005).

En la siguiente tabla 1 se describen los métodos de fitorremediación, los mecanismos y los tipos de contaminantes.

**Tabla 1**

*Métodos de Fitorremediación*

<b>Métodos</b>	<b>Mecanismo</b>	<b>Contaminantes</b>
Fitoestimulación	Estimular el crecimiento de microorganismos que tengan la capacidad de degradar contaminantes.	Orgánicos

<b>Métodos</b>	<b>Mecanismo</b>	<b>Contaminantes</b>
Fitoextracción o Fitoacumulación	Extraer contaminantes para transportarlo y concentrarlo en su biomasa.	Inorgánicos
Fitovolatilización	Acumular los contaminantes durante el periodo de crecimiento y los liberan a la atmosfera con la transpiración.	Inorgánicos u orgánicos
Fitoestabilización o Fitoinmovilización	Acumular entre las raíces de las plantas para reducir su movilidad estabilizando el suelo.	Inorgánicos u orgánicos
Fitodegradación o Fitotransformación	Utilizar las plantas y microorganismos que captura, almacena y degradan total o parcialmente compuestos orgánicos.	Orgánicos
Rizofiltración	Utilizar las raíces para absorber y concentrar contaminantes y degradar compuestos orgánicos.	Orgánicos

Nota: Adaptado de Arias et al. (2010, pp. 13).

### **2.1.2. Wetlands o Humedales**

Por su amplio desarrollo ecosistémico y los procesos que se devuelven en el mismo; los humedales cubren grandes extensiones geográficas y presentan amplias condiciones hidrológicas que lo sustentan, que se pueden encontrar en diferentes sistemas acuáticos del mundo. (Mitsch y Gosselink, 2000)

Por la complejidad de definir que son los humedales muchas instituciones y autores han dado su concepto, como Keddy (2000) afirma que, los humedales son “aquellos ecosistemas que se forman por inundaciones de agua provenientes del suelo, que están dominados por procesos anaeróbicos que fuerzan a los grupos de organismos, especialmente plantas arraigadas, adaptadas a tolerar inundaciones”.

Según la Ramsar (2016) afirma que, los humedales son grandes extensiones de pantanos o superficies de aguas, que pueden ser artificiales o naturales, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, saladas, incluidas las extensiones de aguas marinas donde la marea baja no supera los 6 metros.

Por eso, los humedales alrededor del mundo son considerados como ecosistemas más productivos del planeta y tienen una gran biodiversidad (Sun et al., 2017), proporcionando una amplia variedad de servicios ecosistémicos como el tratamiento del agua, producción agrícola, alimentos, entre otros (Wondie, 2018); también ayuda amortiguar la escorrentía, regula el agua, funciona como fuente de agua y nutrientes que son utilizados en la productividad biológica. (Schuyt, 2005)

Los procesos físicos, químicos, biológicos y microbiológicos que ocurren en los humedales desarrollan mecanismos de depuración o descontaminación del agua que abarca las reacciones redox de degradación, la adsorción, transformación y retención de contaminantes, filtración, descomposición por agentes microbianos, adsorción y absorción de nutrientes, acumulación de residuos. (Shi et al., 2018)

Hay dos tipos de humedales artificiales que se han desarrollado para el tratamiento de aguas residuales, de flujo superficial (superficie de agua libre) y de flujo subterráneo (flujo subterráneo) (Quintero, 2014). Todos ellos se explicarán a continuación.

En el 2018, el Informe Ramsar enumeró más de 2.300 sitios Ramsar en todo el mundo que abarcan áreas de 12,1 millones de kilómetros cuadrados. Cada uno de ellos cumple con al menos uno de los nueve criterios relacionados con los tipos de humedales, el apoyo de los peces,

aves acuáticas y otras especies de importancia internacional, y las comunidades ecológicas según la Convención de Ramsar sobre los Humedales (2018).

Los sitios Ramsar pueden cubrir entre el 13% y 18% de área de los humedales terrestres y costeros en todo el mundo. La mayoría se localizan en Asia con un 31,8%, seguidamente de América del Norte con un 27%, América Latina y el Caribe con un 15,8%. (Davidson y Finlayson, 2018).

Los humedales en Lima se encuentran a largo de la costa desértica del Perú, son corredores biológicos. La mayor parte de estos ambientes conviven con las poblaciones humanas, quienes utilizan los recursos que los humedales les proporcionan. (León et al., 1997)

Existen diferentes tipos de humedales naturales, estos pueden clasificarse en cinco categorías según la Secretaría de la Convención de Ramsar (2016):

- Marinos: humedales costeros, incluidas rocas, pastizales, mares, arrecifes de coral y lagunas costeras.
- Estuarios: incluye deltas, marismas de marea y bajos intermareales de lodo, y manglares.
- Lacustres: humedales asociados a lagos.
- Ribereños: humedales que bordean arroyos y ríos.
- Palustres (pantanosos): pantanos, ciénagas y marismas.

**2.1.2.1. Humedales contruidos o artificiales.** Los humedales contruidos o artificiales están diseñados para imitar los sistemas de tratamiento de aguas residuales naturales. Está compuesto por plantas, sustratos, suelo, microorganismos y agua, donde se desarrollan procesos complejos donde intervienen mecanismos biológicos, físicos y químicos para la eliminación de los contaminantes, mejorando la calidad del agua. (Saeed y Sun, 2012).

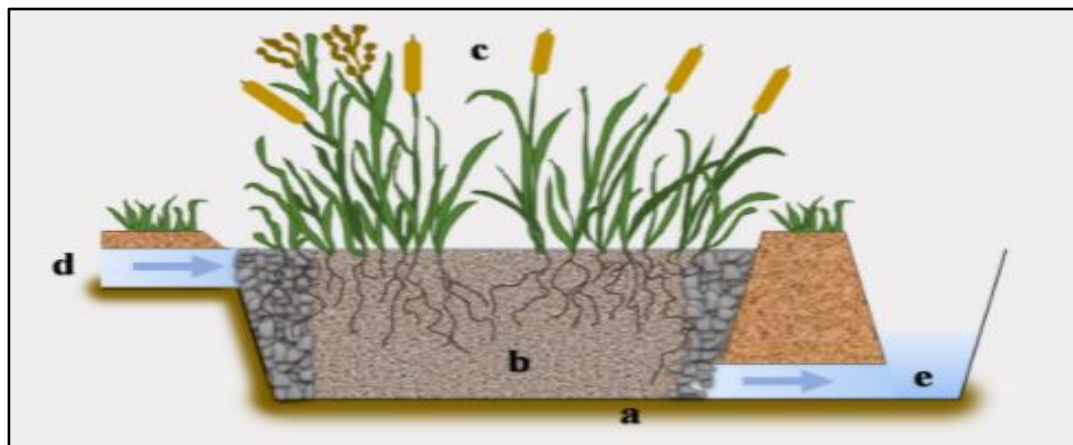
Cabe señalar que estos humedales artificiales se utilizan a menudo como tratamiento secundario o terciario, porque los microorganismos que interfieren con estos sistemas desempeñan un papel clave en la degradación de compuestos contaminantes, estos contaminantes provenientes de fuentes de contaminación (Mayes et al., 2009; Faulwetter et al., 2009) y se caracteriza por bajos costos de inversión, operación y mantenimiento, el bajo nivel de lodos y bajo consumo de energía (Cárdenas, 2012), siendo amistosos con el ambiente. (Vymazal y Kröpfelová, 2008)

Los humedales contruidos o artificiales están conformados por:

- a) Una capa impermeable para la infiltración y contaminación del suelo.
- b) El sustrato que proporciona soporte a la vegetación y microorganismos.
- c) La vegetación.
- d) El agua residual, Figura 1, (Fallis, 2013).

## Figura 1

### *Componentes de un humedal construido o artificial*



*Nota:* Componentes de un humedal artificial: a) capa impermeable, b) sustrato o lecho, c) vegetación (macrófitas). d) influente (agua residual), e) efluente (agua tratada). Adaptado de Fallis, (2013).

Entre los materiales más utilizados para lechos se encuentran: suelo, arena, grava, rocas y materia orgánica como el compost (Kadam et al., 2018). Las principales funciones de estos son dar soporte a las plantas y microorganismos; donde se realiza los procesos de degradación de contaminantes, así como, la acumulación de la materia orgánica constituye una fuente de carbono para los procesos biológicos y químicos. (Edwards, 2000)

La vegetación de los humedales artificiales se puede clasificar de acuerdo con el tipo de macrófitos que se utilice para su funcionamiento, como emergentes, arraigadas, sumergidas o flotantes. (USEPA, 1988)

Por otra parte, estos pueden ser: flujos superficiales cuando el agua está en contacto con la atmósfera, o flujos subsuperficiales si el agua fluye a través de la capa granular sin subir a la superficie. (Kadlec y Wallace, 2009)

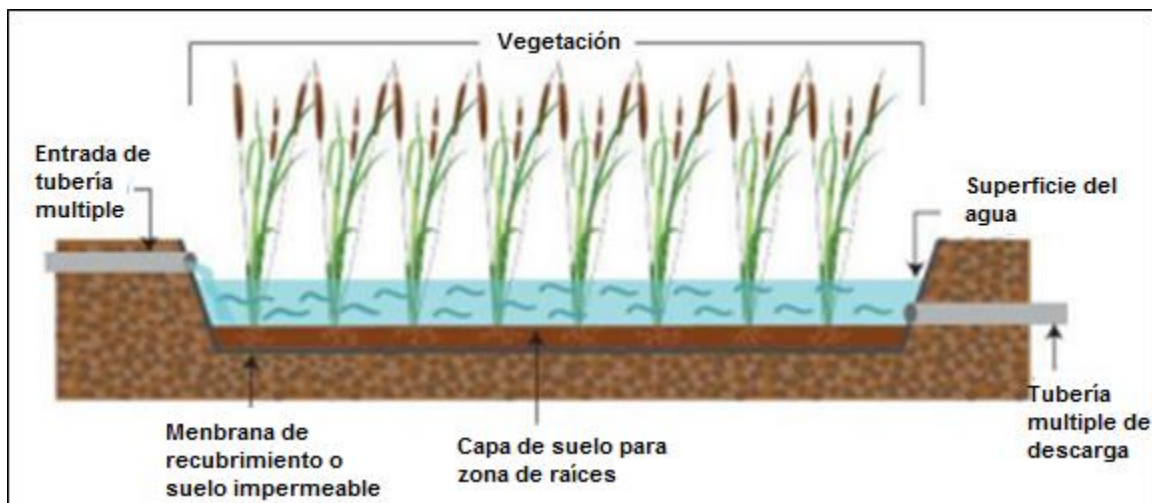
Dependiendo de la dirección del flujo de agua, los humedales de flujo subsuperficial pueden ser horizontales, en los que el agua fluye a través del humedal, paralelo a la superficie del sustrato, o de flujo vertical, en los que el agua fluye hacia arriba y hacia abajo, perpendicular a la superficie del sustrato (Hernández, 2016)

**A. Humedal artificial de flujo superficial.** Está conformado por canales cuya superficie de agua está expuesta a la atmósfera, cuyo fondo está formado por suelo o manto relativamente impermeable, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0,1 y 0,6 metros. (Ñique, 2004)

El tratamiento se produce a través de los tallos y raíces de la vegetación.

## Figura 2

### *Humedal artificial de flujo superficial*



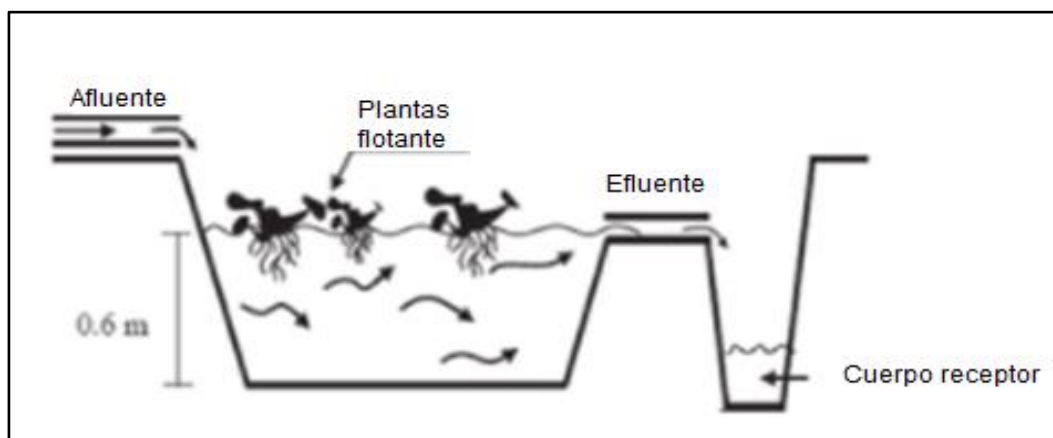
*Nota:* Adaptado de *Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*, USEPA, 1988, p. 92.

Este sistema se puede dividir, de acuerdo con el tipo de macrófitas (CIEMA, 2005), en:

Sistemas con macrófitas flotantes: consiste en grandes lagos a bajos niveles de agua y llenos de microorganismos que flotan libremente. Sus raíces sumergidas crecen bien en profundidad se puede observar en la Figura 3.

### Figura 3

*Humedal de flujo superficial con macrófitas flotantes*



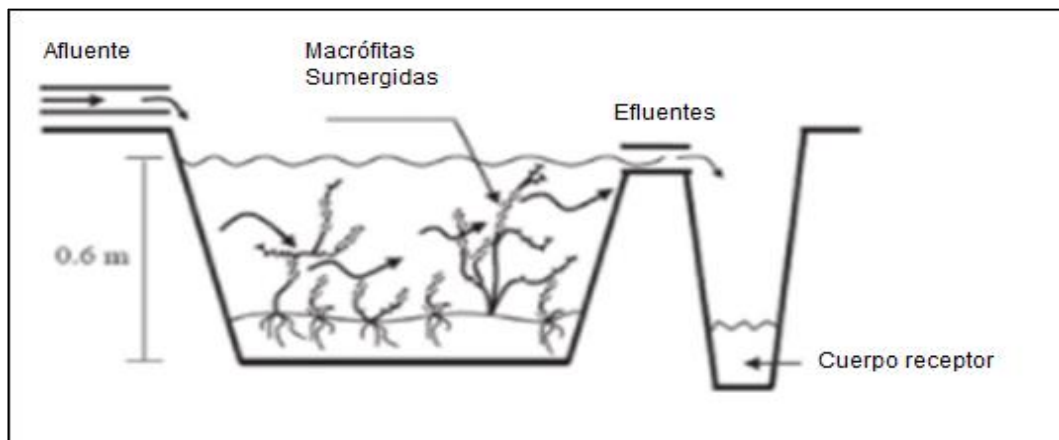
*Nota.* Adaptado de *Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas*, por CIEMA, 2005.

Sistemas con macrófitas sumergidas: consiste en lagos con bajo nivel de agua y con plantas completamente sumergidas. Pues estas crecen solo en aguas que contengan oxígeno disuelto, no se aplicarían en aguas residuales que tengan un alto contenido de materia orgánica porque la descomposición microbiana estimula condiciones anóxicas (Figura 4).

### Figura 4

*Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas*





*Nota.* Adaptado de *Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas*, por CIEMA, 2005.

**B. Humedal artificial de flujo subsuperficial.** Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes que consiste en un biofiltro relleno con un medio poroso (por ejemplo, grava, piedra volcánica), en el que se cultivan plantas macrófitas en la superficie del lecho filtrante y se filtran las aguas residuales. El pretratamiento pasa por un filtro horizontal o vertical, en estos sistemas el nivel del agua permanece debajo de la superficie del medio granular. (CIEMA, 2005)

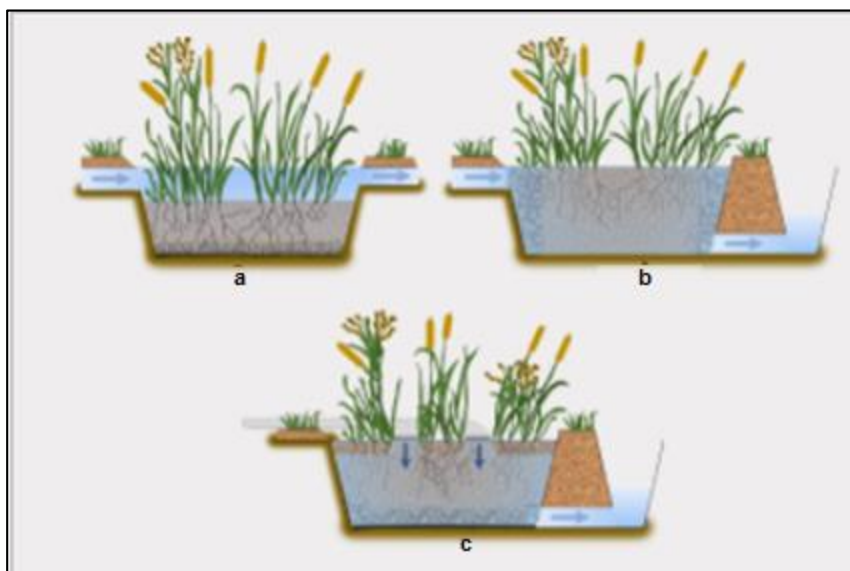
Estos humedales se clasifican como humedales artificiales de flujo vertical y humedales artificiales de flujo horizontal, dependiendo de cómo las aguas residuales pretratadas pasan a través del lecho filtrante. (Arias et al., 2010)

**B.1. Humedales de flujo horizontal.** En este tipo de humedales las aguas residuales fluyen gradualmente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, por un recorrido horizontal a través del lecho filtrante hasta llegar a la superficie donde se recolecta el efluente. (Arias et al., 2010) Ver Figura 5.

**B.2. Humedal artificial de flujo vertical.** Aquí, el agua pretratada se distribuye de manera uniforme e intermitente sobre la superficie la capa de filtro y luego filtra hacia la zona de recolección. (Arias et al., 2010) Ver Figura 5.

### Figura 5

*Humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical*



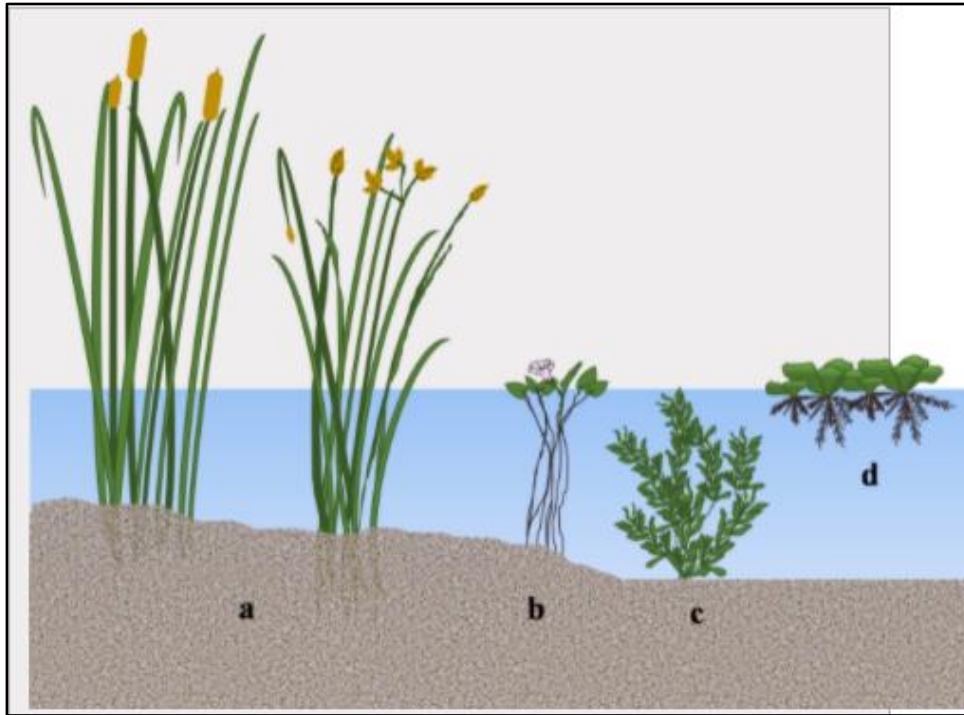
*Nota:* En la figura se visualiza los tipos de humedales construidos: a) CW de flujo superficial, b) CW flujo horizontal subsuperficial, c) CW flujo vertical. Adaptado de *A handbook of constructed wetlands*, por Edwards, 2000.

#### **2.1.3. Plantas Macrófitas**

Las plantas macrófitas son aquellas plantas acuáticas que se caracterizan por la asimilación de nutrientes, concentración y remoción de metales, haciendo de estas plantas especiales, muchas de ellas han sido empleadas en la detectar y remover de sustancias en los efluentes industriales y domésticos. (Martelo y Lara, 2012)

Pueden clasificarse de diferentes formas por su morfología y fisiología. Una de estas es según la forma de su fijación en el suelo (Plantas macrófitas, 2017):

- Plantas macrófitas flotantes, principalmente son angiospermas, los órganos reproductores son aéreos o flotantes y sus raíces debajo del agua. (Carvajal, 2018)
- Plantas macrófitas emergentes: viven en suelos anegados de forma temporal o permanente, son generalmente plantas perennes con órganos reproductores aéreos (CRICT, 2007).
- Plantas macrófitas sumergidas, la mayoría son tipo helechos, musgos, entre otros. Se encuentran en toda la zona que recibe luz solar y no viven (las angiospermas vasculares) más de los 10 metros de profundidad. Sus órganos reproductores suelen ser flotantes, sumergidos o aéreos. (Carvajal, 2018)
- Plantas macrófitas arraigadas, tienen sus hojas flotando en la superficie del agua, en cambio sus raíces están fijas en los sedimentos (Núñez et al., 2004).

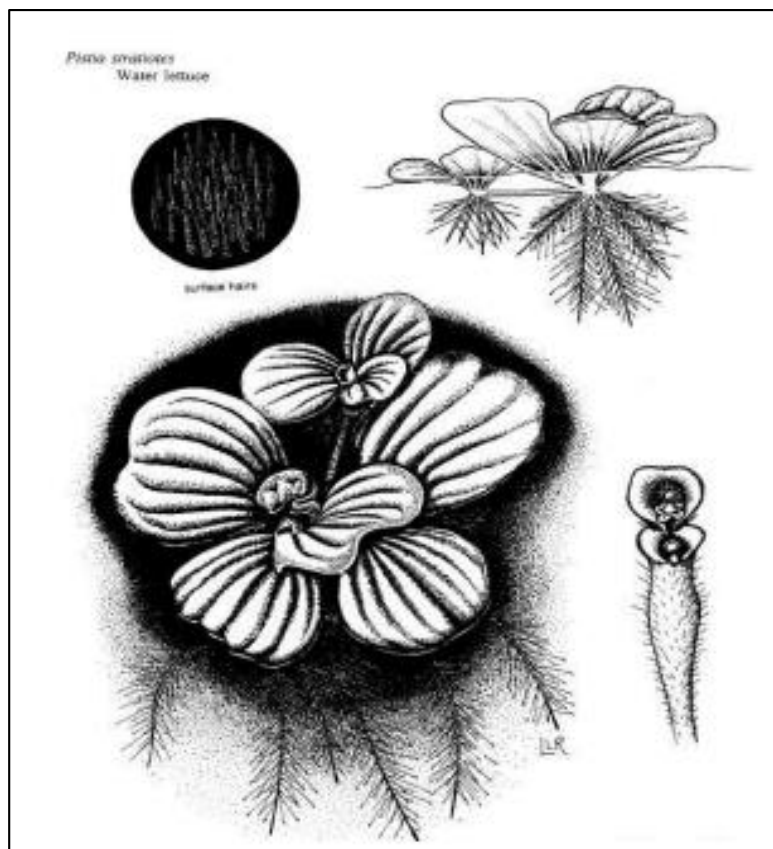
**Figura 6***Tipos de macrófitas*

*Nota:* Las plantas macrófitas pueden ser a) emergentes, b) arraigadas flotantes, c) sumergidas y d) flotantes. Adaptado de *Constructed Wetlands And Microbial Fuel Cells As Individual And Combined Systems For Wastewater Treatment: A Review*, Montengr et al., 2019.

**2.1.3.1. *Pistia Stratiotes*.** La *Pistia Stratiotes* es una planta perenne monocotiledónea con hojas gruesas, suaves que forman una roseta, aterciopelado, flotan en la superficie del agua y las raíces están sumergidas debajo del agua (Figura 7).

**Figura 7**

*Pistia Stratiotes*



*Nota:* Adaptado de University of florida, Gainesville, 1990.

**Tabla 2**

*Características de la Pistia Stratiotes*

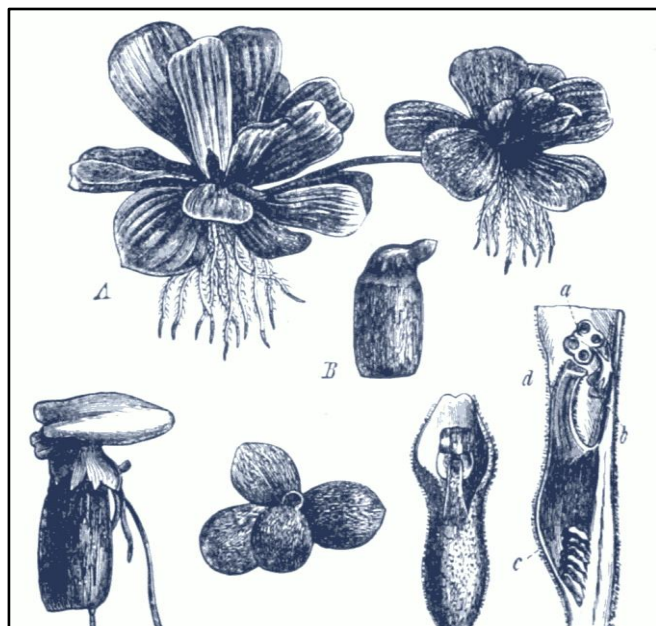
<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
<b>Tipo</b>	Macrófita flotante.
<b>Visualización</b>	Una parte de la macrófita es aérea y la otra parte debajo del agua.

Características	Descripción
<b>Clasificación taxonómica</b>	Reino : Plantae
	División : Magnoliophyta
	Clase : Liliopsida
	Orden : Alismatales
	Familia : Araceae
	Género : Pistia L.
	Especie : P. stratiotes
	Nombre Común: lechuga de agua o repollo de agua (Romero, 1965)
<b>Órganos de la planta</b>	Según Romero (1965), señala que <i>Pistia Stratiotes</i> L.: Es una planta flotante, de tallo corto, que tiene muchas raíces. Las hojas de color verde grisáceo, arrosetadas, con superficie vellosa cubierta de pelos finos, con tejido esponjoso, obovadas, reticuladas, con el ápice redondeado y en veces levemente escotado, suelen alcanzar de longitud 15 cm y de ancho 6 cm. Los frutos son globosos, suelen medir 1 cm de diámetro, son de color verde; contienen muchas semillas blancas, rugosas y elipsoides (Figura 8).

*Nota:* Adaptado de Carbajal et al., 2018.

## Figura 8

### Órganos de la *Pistia Stratiotes*



*Nota:* Adaptado de Gilg, Ernst; Schumann, Karl, 1900,

[https://es.wikipedia.org/wiki/Pistia\\_stratiotes#/media/Archivo:Pistia\\_stratioites\\_GS280.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Pistia_stratiotes#/media/Archivo:Pistia_stratioites_GS280.png)

**2.1.3.2. Eichhornia Crassipes.** La *Eichhornia Crassipes* es una especie acuática, tiene forma ovoidea, elíptica que llega a medir de 2 a 15 cm de longitud y de 2 a 10 cm de anchura, además posee un potente sistema radicular, varios entrenudos cortos los cuales producen una hoja y una raíz. (Verdejo et al., 2006) Ver Figura 9.

### Figura 9

*Eichhornia Crassipes*



*Nota:* Adaptado de Leslie J. Mehrhoff, University of Connecticut, Bugwood.org, Creative Commons License, licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 License, <https://www.weedimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=5448253#>

### Tabla 3

*Características de la Eichhornia Crassipes*

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
<b>Tipo</b>	Macrófita flotante.
<b>Visualización</b>	Una parte de la macrófita es aérea y la otra parte debajo del agua.

Características	Descripción
<b>Clasificación taxonómica</b>	Reino : Plantae
	División : Magnoliophyta
	Clase : Liliopsida
	Orden : Commelinales
	Familia : Pontederiaceae
	Género : Eichhornia
	Especie : Eichhornia Crassipes
	Nombre Común : Flor de bora, lirio acuático o jacinto de agua, entre otros. (Solms, 1883)
<b>Órganos de la planta</b>	Según Solms, (s.f.) señala que <i>Eichhornia Crassipes</i> : de tallo horizontal (rizoma) alargado conecta a diferentes individuos, las hojas formando una roseta basal, con pecíolos globosos y cortos, de flores grandes de color lila, variando de azul a morado, el fruto es una capsula elíptica y de semillas numerosas, las raíces son fibrosas y comúnmente coloreadas. (Figura 10).

*Nota:* Adaptado de Carbajal et al., 2018.

### Figura 10

*Órganos de la Eichhornia Crassipes*



*Nota:* Adaptado de Wilfredo Robles, Mississippi State University, Bugwood.org Creative Commons License <https://www.ipmimages.org/browse/detail.cfm?imgnum=2132054>



**2.1.3.3. Azolla Filiculoides.** El género *Azolla* corresponde a diminutos helechos acuáticos, que flotan libremente en la superficie del agua, es decir plantas pequeñas, con numerosas raíces cortas y de color negro, suelen medir de 2 a 6 cm de longitud, hojas que varían de color rojo y verde dependiendo de la exposición al sol. Procedente de Centroamérica y mérica del Norte. (Cabezas, 2011) Ver Figura 11.

**Tabla 4**

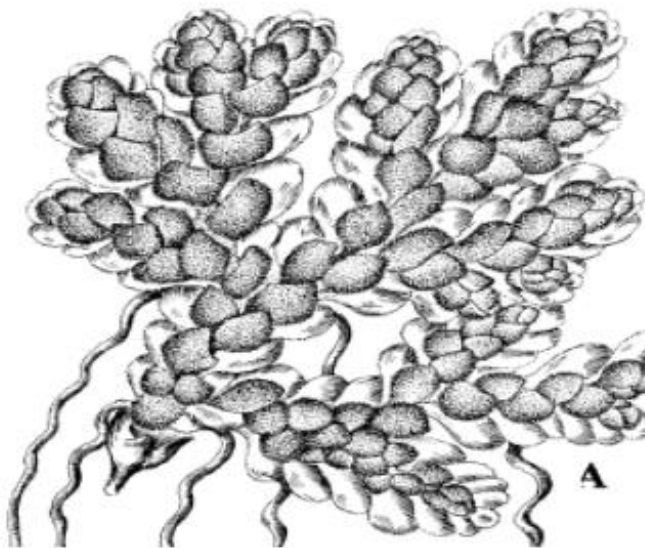
*Características de la Azolla Filiculoides*

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>
<b>Tipo</b>	Macrófita flotante.
<b>Visualización</b>	Una parte de la macrófita es aérea y la otra parte debajo del agua.
<b>Clasificación taxonómica</b>	Reino : Plantae División : Pteridophyta Clase : Pteridopsida Orden : Salviniales Familia : Azollaceae Género : <i>Azolla</i> Especie : <i>Azolla Filiculoides</i> . Nombre Común : Helecho de agua (INVASORAS, s.f.)
<b>Órganos de la planta</b>	Según Romero (1965), señala que Es una planta cuyas raíces cuelgan debajo en el agua. Cada hoja es bilobulada, el lóbulo inferior es incoloro y el lóbulo superior contiene clorofila verde. (Ly, s/f). EL lóbulo clorofílico contiene cavidades con el alga <i>Anabaena</i> (Cabezas, 2011).

*Nota:* Adaptado de Carbajal et al., 2018

**Figura 11**

*Azolla Filiculoides*



*Nota:* Adaptado de *Licofitas y helechos de Mendoza: lycopodiidae, equisetidae, ophioglossidae y polypodiidae*, Arana y Bianco, 2011.

**2.1.3.4. Tratamiento de aguas residuales con plantas macrófitas.** La actividad humana está asociado a generar aguas residuales por los cuales estas aguas deben ser sometidas a algún tratamiento para garantizar la continuidad del ciclo del consumo del recurso del agua. (Martelo y Lara, 2012)

Estas plantas han demostrado ser eficientes en la remoción de metales pesados como cromo, mercurio, cadmio, plomo, zinc, cobre y arsénico de los diferentes métodos de fitorremediación como la fitoestimulación, fitoextracción, fitoestabilización, fivolatilización, fitodegradación y rizofiltración. Actualmente se ha evidenciado que han acumulado sustancias radioactivas en sus raíces. (Hidalgo et al., 2005)

Las macrófitas flotantes sus raíces no toleran en un sustrato manteniendo estas raíces flotando en la superficie del agua. Esta característica favorece a estas plantas en el uso para el tratamiento de aguas residuales. (Fernández, 2001)

Entre los hiperacumuladores efectivos en la eliminación de metales pesados mediante fitorremediación se encuentra el helecho acuático *Azolla Filiculoides*, se acompaña de un microbioma vegetal potencialmente sustentador durante la exposición a metales pesados. (Banach y Kuźniar, 2020)

**2.1.3.5. Metales pesados.** Los metales pesados se caracterizan por tener el efecto bioacumulativo y cuando se supera las concentraciones recomendadas han causado daños en el sistema nervioso periférico y central, esquelético, hematopoyético y renal, algunos de estos han presentado efectos cancerígenos. Para poder definir la gravedad de estos daños dependerá tanto del tiempo como del grado de exposición a estos elementos. (Segura et al., 2003)

El agua puede ser contaminada por metales de manera natural o a través de diferentes procesos de captación, tratamiento, almacenamiento y distribución, afectando su calidad en el punto final de consumo. (Segura et al., 2003)

**A. Cadmio.** Es un metal tóxico que se libera al medio por fuentes antropogénicas como quema de combustible fósil, cemento, minería, etc. y fuentes naturales como incendio forestal, actividades volcánicas, transporte de partículas por el viento. (Mero et al., 2019)

**B. Arsénico.** Se encuentra presente de forma natural en el suelo, aire y agua. También puede ser librado al ambiente por medio de procesos mineros, industriales, agrícolas y fundición de metales. El estado orgánico del arsénico resulta ser más toxico (World Health Organization, 2018).

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada porque se busca dar solución a problemas (Sampieri et al., 2014).

El enfoque es cuantitativo porque se emplea la recolección de datos numéricos donde se prueban hipótesis, luego se realizará análisis estadístico para probar teorías (Sampieri et al., 2014).

Diseño es experimental puro con intervención porque se manipula la variable independiente para evaluar el comportamiento sobre otras variables, y se realiza en un ambiente donde se tiene el control de la situación, siendo para esta investigación a nivel de laboratorio. (Campbell y Stanley, 2005)

#### 3.2. Ámbito temporal y espacial

Para alcanzar los objetivos de la presente investigación se ha considerado desarrollar por el periodo de 9 días, comprendidos en los meses de enero y febrero del año 2022 en el distrito de Ate, centro poblado de Santa Clara.

#### Figura 12

*Mapa de Ubicación del lugar*



*Nota.* En la presente figura se puede observar el distrito Ate y la ubicación del centro poblado de Santa Clara. Adaptado de la Plataforma Nacional de Datos Georreferenciados Geo Perú.

<https://visor.geoperu.gob.pe/>

### 3.3. Variables

**Tabla 5**

*Variable independiente y dependiente*

<b>Tipo</b>	<b>Variables</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Independientes</b>	- Fitorremediación	- Concentración del metal arsénico en el tejido vegetal.
		- Concentración del metal cadmio en el tejido vegetal.
		- Tamaño de la planta.
		- Tamaño de las hojas.
		- Tamaño de las raíces.
		- Color de las raíces.
		- Color de las hojas.
		- Área ocupada.
<b>Dependientes</b>	- Remoción de metales pesados	- Concentración del metal.
		- Concentración final del metal arsénico.
		- Concentración final del metal cadmio.

*Nota:* Se puede observar todos los indicadores para cada variable, independiente y dependiente.

Se presenta la Tabla 6 donde se detalla la operacionalización de las variables de la presente investigación.

**Tabla 6**

*Operacionalización de variables*

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala	
<b>INDEPENDIENTE</b>	Fitorremediación	<p>La fitorremediación se basa en el uso de plantas para remover contaminantes del ambiente (Suthersan, 2002). Como tipo entre otros a la rizofiltración, que utiliza las plantas para eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz (Dushenkov et al., 1995). Cuando el sistema radicular está bien desarrollado, las plantas se introducen en el agua contaminada con metales, en donde las raíces los absorben y acumulan. (Delgadillo-López, 2011)</p>	<p>Las plantas <i>Pistia Stratiotes</i>, <i>Eichhornia Crassipes</i> y <i>Azolla Filiculoides</i> se aclimatarán por una semana, luego serán trasplantadas; estas se cultivarán por 9 días en un humedal artificial, se analizarán el tejido vegetal de cada especie para determinar qué especie tiene la mayor capacidad de concentración de los metales pesados (arsénico y cadmio). También se monitoreará, las siguientes características morfológicas: tamaño de las plantas, tamaño de las raíces, tamaño de las hojas, el área que ocupa, color de las raíces y color de las hojas de las especies, esta intervención se realizará</p>	<i>Pistia Stratiotes</i>	Concentración final de As en el tejido vegetal	mg/kg
					Concentración final de Cd en el tejido vegetal	mg/kg
					Tamaño de las plantas	Cm
					Tamaño de las raíces	Cm
					Tamaño de las hojas	Cm
					Color de las raíces	-
				Color de las hojas	-	
				Área que ocupa	Cm <sup>2</sup>	
				<i>Eichhornia Crassipes</i>	Concentración final de As en hojas	mg/kg
					Concentración final de Cd en el tejido vegetal	mg/kg
					Tamaño de la planta	Cm

<b>Variables</b>	<b>Definición Conceptual</b>	<b>Definición Operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala</b>
		diario durante el tiempo de cultivo.		Tamaño de las raíces	Cm
				Tamaño de las hojas	Cm
				Color de las raíces	-
				Color de las hojas	-
				Área que ocupa	Cm <sup>2</sup>
				Concentración final de As en el tejido vegetal.	mg/kg
				Concentración final de Cd en el tejido vegetal.	mg/kg
				Tamaño de la planta	Cm
			<i>Azolla Filiculoides</i>	Tamaño de las raíces	Cm
				Tamaño de las hojas	Cm
				Color de las raíces	-
				Color de las hojas	-

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
<b>DEPENDIENTE:</b> Remoción de metales pesados	Es el acto de remover o disminuir la concentración inicial de metales pesados en un medio. La remoción de metales pesados puede ser influenciada por alguna especie la cual utiliza el método de absorción, acumulación del contaminante a través de la misma. (Prieto, 2009)	Se utilizará muestras de agua residual simulada al inicio y final de la investigación, donde se analizará las concentraciones de metales pesados (arsénico y cadmio) en el agua residual.	Parámetros inorgánicos	Área que ocupa	Cm <sup>2</sup>
				Concentración de As final	mg/l
				Concentración de Cd final	mg/l

*Nota:* En la presente tabla se visualiza las variables, sus definiciones conceptuales y operacionales con sus respectivas dimensiones, indicadores y escalas.



### 3.4. Población y muestra

#### 3.4.1. Población

Para la presente investigación la población son las plantas macrófitas flotantes que ha sido detallada en el capítulo del marco teórico.

#### 3.4.2. Muestra

La muestra de la presente investigación son 9 macrófitas de la especie *Pistia Stratiotes*, 6 macrófitas de la especie *Eichhornia Crassipes* y 1 kg. macrófitas de la especie *Azolla Filiculoides*.

### 3.5. Instrumentos

Se detallará los instrumentos, equipos y materiales utilizados en la investigación en los siguientes Tablas 7, 8 y 9:

#### Instrumentos y Equipos

**Tabla 7**

*Instrumentos y equipos*

N°	Instrumentos /Equipos	Cantidad	Unidad
1	Balanza analítica	1	Unid.
2	Calculadora científica	1	Unid.
3	Laptop (HP, corei5)	1	Unid.
4	Cámara digital (Nikon) para tomas fotográficas	1	Unid.

*Nota:* En esta tabla se menciona las cantidades de los instrumentos y equipos a utilizar.

#### Materiales

**Tabla 8***Materiales*

N°	Materiales	Cantidad	Unidad
1	Guantes descartables	1	Caja
2	Mascarilla	1	Caja
3	Frascos con tapa rosca	4	Unid.
5	Bolsas Ziploc	10	Unid
6	Etiquetas	7	Unid.
7	Lapiceros	1	Unid.
8	Plumón indeleble	1	Unid.
9	<i>Pistia Stratiotes</i>	9	Unid
10	<i>Eichhornia Crassipes</i>	6	Unid.
11	<i>Azolla Filiculoides</i>	1	kilo
12	Caja de plástico de tamaño 35 L	4	Unid.
13	Contratuerca de plástico hexagonal ½"	8	Unid.
14	Tuerca de plástico hexagonal ½"	8	Unid.
15	Niple escamado galvanizado ½"	3	Unid.
16	Manguera de 1 metro	3	Unid.
17	Llave de paso plástico ½"	6	Unid.

*Nota:* En la presente tabla se menciona las cantidades de los materiales a utilizar.

**Tabla 9***Otros Materiales y equipos*

<b>Otros Materiales</b>			
N°	Materiales	Cantidad	Unidad

<b>Otros Materiales</b>			
<b>N°</b>	<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
1	Libreta de campo	1	Unid.
2	Impresora EPSON serie L365	1	Unid.
Software			
3	Microsoft Word versión 2013		
4	Microsoft Excel versión 2013		

*Nota:* Se la tabla se menciona las cantidades de otros materiales y softwares a utilizar.

### **3.6. Procedimientos**

#### **3.6.1. Etapa de Gabinete**

**3.6.1.1. Recopilación de información.** Se recopiló información de artículos científicos, tesis e investigaciones de las especies *Pistia Stratiotes*, *Eichhornia Crassipes* y *Azolla Filiculoides* durante el período de 4 semanas.

#### **3.6.2. Etapa de Campo**

**3.6.2.1. Obtención de las macrófitas.** Se recogieron las plantas *Pistia Stratiotes* y *Azolla Filiculoides*, las cuales fueron adquiridas en un vivero privado en la ciudad de Lima mientras que la *Eichhornia Crassipes* se adquirieron en el mercado de flores de Piedra Liza. Luego en una primera etapa se lavaron las tres especies macrófitas con agua de grifo para su estabilización y eliminación de restos adheridos, por último, se aclimataron por una semana.

**3.6.2.2. Identificación de muestras botánicas.** Para la identificación de la muestra botánica se procedió a llevar muestra de cada especie a un biólogo especialista en la evaluación e identificación de muestras botánicas, por ello la muestra debió contener tallo con

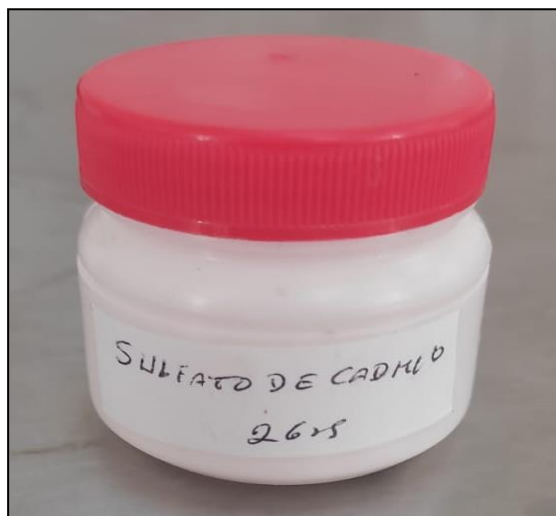
hojas, flores y/o frutos (de ser necesario). Además, deberá tener los órganos subterráneos (raíces, bulbos, tubérculos y/o rizomas).

Los certificados de la identificación taxonómica de las muestras botánicas se encuentran en los anexos.

**3.6.2.3. Simulación de agua residual.** Se realizará la simulación del agua residual en laboratorio a partir de soluciones patrones, para lo cual se utilizará sulfato de cadmio y arseniato de sodio, con concentración de 1.855 gramos de cadmio y 4.164 gramos de arsénico respectivamente y se enrasó a 1000 mililitros de agua destilada, luego de esta mezcla se utilizó 8 ml y 200 ml de cada solución patrón para mezclar con 39 litros de agua de grifo aproximadamente, para obtener 40 litros de agua de grifo con 0.2 mg/l de cadmio y 5 mg/l de arsénico respectivamente.

### Figura 13

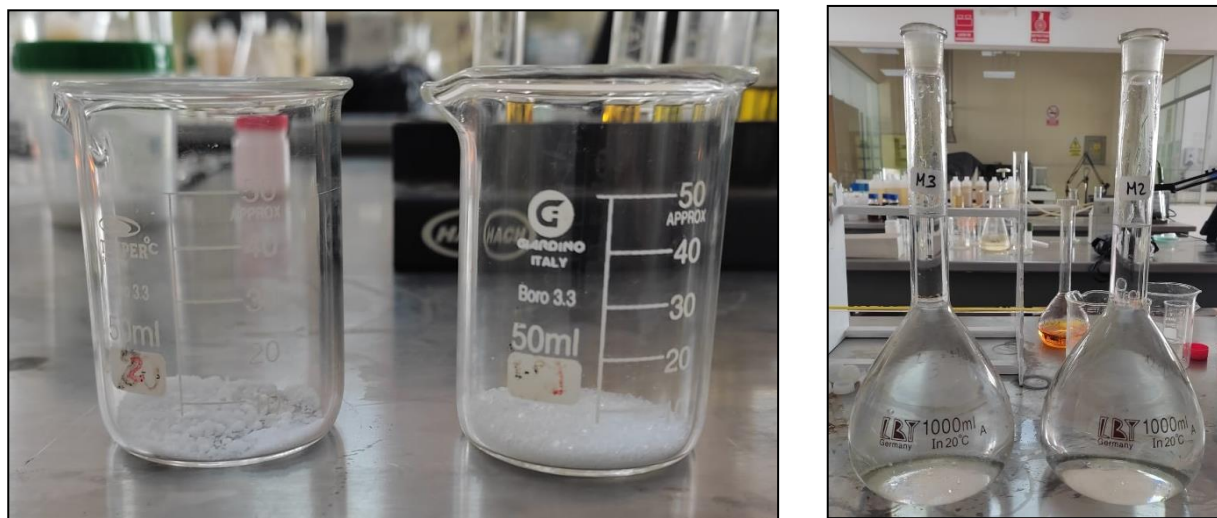
*Sulfato de cadmio y arseniato de sodio*



La fórmula para calcular una dilución se realizó con la siguiente fórmula:  $C_1V_1 = C_2V_2$ , donde C1 y C2 representan las concentraciones de las soluciones iniciales y finales respectivamente y V1 y V2 representan sus volúmenes.

### Figura 14

*Preparación de las soluciones patrones*



### 3.6.3. Etapa Experimental

**3.6.3.1. Exposición de las macrófitas al agua residual.** Primero, se procederá a colocar el agua residual simulada en cada sistema, luego se colocará cada individuo de cada especie, en el primer sistema estará la especie *Pistia Stratiotes*, que tendrá la codificación de M-1, en el segundo sistema estará la especie *Eichhornia Crassipes* con codificación M-2 y en el tercer sistema estará la especie *Azolla Filiculoides* con código M-3.

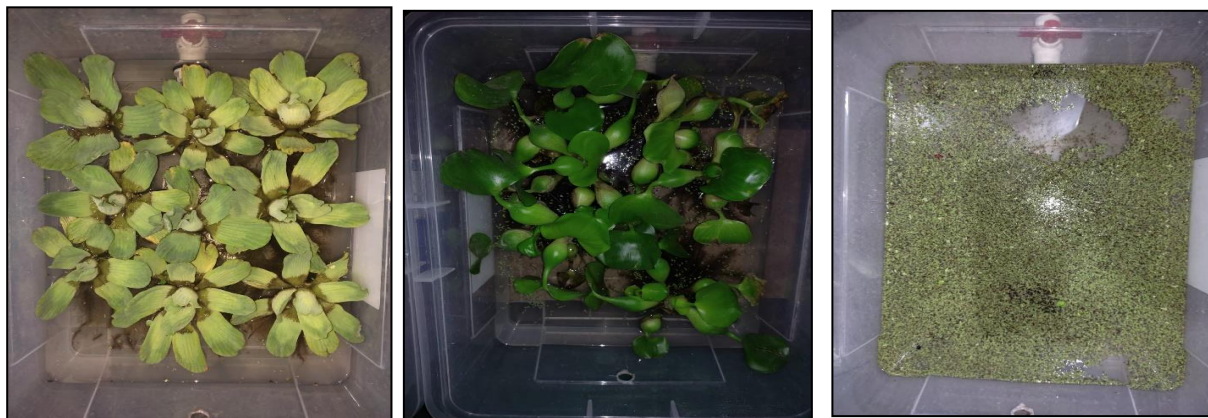
**3.6.3.2. Monitoreo de las características morfológicas.** Se midió las características morfológicas como hoja, raíz y tallo estos datos se registraron diariamente por cada individuo de cada especie de macrófita. La longitud de la raíz, de las hojas, longitud promedio alcanzada de la planta, tamaño del área ocupada por la planta se medirá en cm y se

registró el valor incremental en el formato N 1- Fichas de registro de datos de campo - botánico.

Además, se describirá los cambios en el color de hojas y raíces.

### Figura 15

*Monitoreo de las características morfológicas de cada macrófitas*



#### 3.6.4. Etapa de Laboratorio

**3.6.4.1. Análisis de metales pesados en el tejido vegetal.** Al finalizar la etapa de evaluación, se llevó 250 gramos de cada muestra de cada especie en bolsas ziploc para el análisis de metales pesados en el tejido vegetal, el cual se realizó en el laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.C – SAG.

### Figura 16



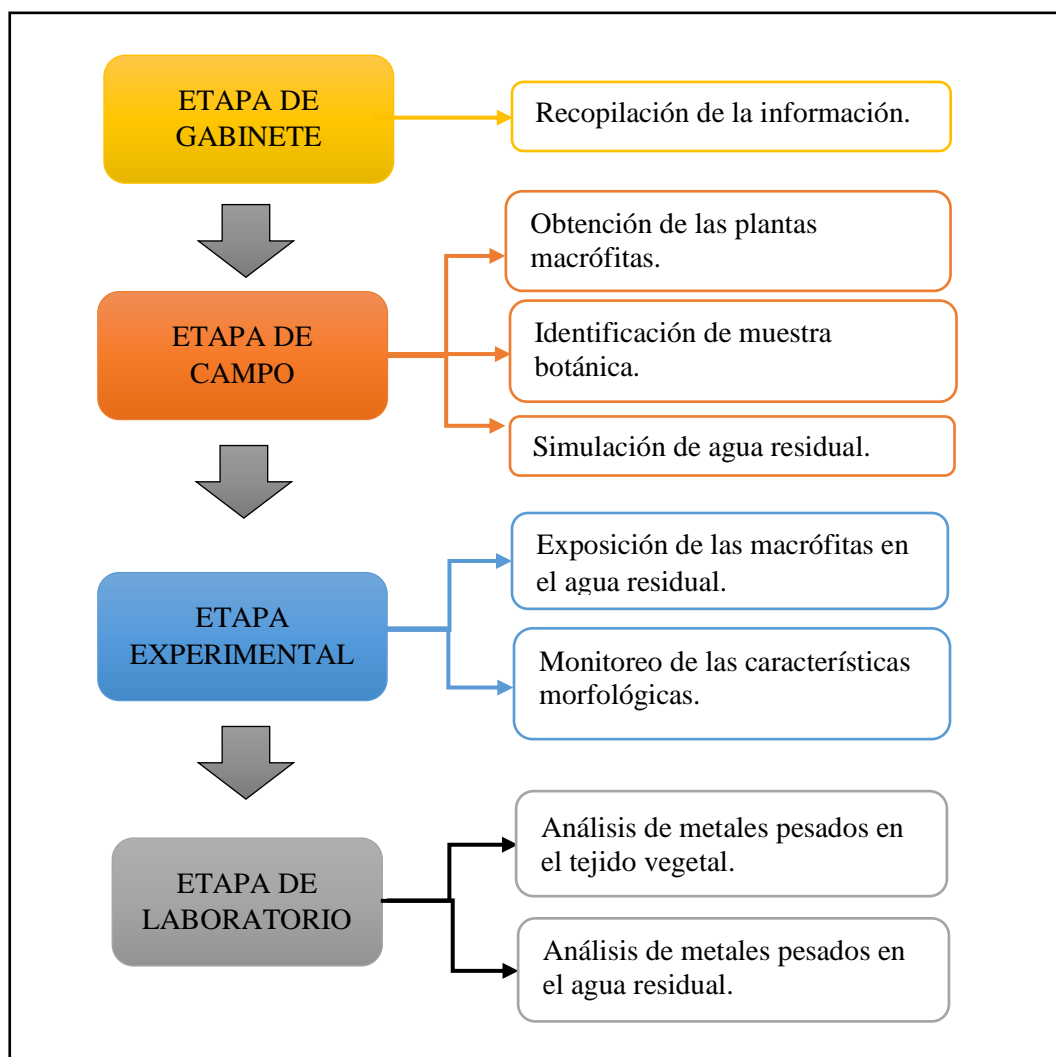
*Muestras finales de tejido vegetal*

**3.6.4.2. Análisis de metales pesados en el agua.** Los metales pesados como el cadmio y arsénico fueron analizados por el laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.C – SAG, laboratorio acreditado por INACAL mediante el método de extracción con espectrofotómetro de emisión atómica (AAS).

En la figura 17 se muestra el procedimiento de la presente investigación desde la etapa de gabinete hasta la etapa de laboratorio.

**Figura 17**

*Procedimiento de la investigación*



### **3.7. Análisis de datos**

Para el procesamiento, interpretación y análisis de la información, se recabaron de los informes de ensayo entregados por el laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.C – SAG., se utilizaron las hojas de cálculo del programa de Microsoft Excel 2013 para la elaboración de gráficos, tablas, etc. Para el análisis estadístico se utilizó la prueba de T de Student y para la prueba de la normalidad la prueba de Shapiro-Wilk.

Además, la edición, recopilación y procesamiento de la información teórica se realizó en el programa de Microsoft Word 2013.



## IV. RESULTADOS

### 4.1. Análisis de laboratorio

Se puede observar en la Tabla 10, que la especie *Azolla Filiculoides* ha tenido una mayor capacidad de acumulación, siendo 23.33 mg/kg para el arsénico que es el doble que la capacidad de fitorremediación que la *Pistia Stratiotes*, esta especie que no ha sido estudiada hasta el momento para metal arsénico se ha evidenciado la capacidad de acumulación para metales pesados.

**Tabla 10**

*Análisis de metales pesados en el tejido vegetal al final del tratamiento en las muestras M-1, M-2 y M-3.*

<i>Especie</i>	<i>Código de Muestreo</i>	<i>Resultados</i>	
		<i>Cadmio mg/kg</i>	<i>Arsénico mg/kg</i>
<i>Pistia Stratiotes</i>	M-1	3.21	12.33
<i>Eichhornia Crassipes</i>	M-2	3.10	3.42
<i>Azolla Filiculoides</i>	M-3	286.24	23.22

En la Tabla 11 se observa los resultados del análisis de la concentración inicial de en el agua residual, siendo esta concentración inicial de 5.3906 mg/l y el análisis de concentración al final del tratamiento en las muestras AR-2, AR-3 y AR-4, siendo el valor más alto el sistema de *Azolla Filiculoides* AR-3 con 1.3931 mg/l y el valor más bajo de arsénico el sistema de *Eichhornia Crassipes* AR-2 con 0.5631 mg/l. Se comparó los resultados obtenidos con los

límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S. 010-2010-MINAM, encontrándose estos resultados por encima del LMP.

**Tabla 11**

*Análisis de concentración de arsénico en las muestras de agua residual AR-1, AR-2, AR-3 y AR-4.*

Código de Muestreo	Unidad	Límite de detección	Resultados			D.S. 010-2010-MINAM Arsénico mg/l
			Concentración inicial de Arsénico mg/l	Concentración final de Arsénico mg/l	% de eficiencia	
AR-1	mg/L	0.0017	5.3906	-	-	0.1
AR-2	mg/L	0.0017	5.3906	0.5631	89.5 %	0.1
AR-3	mg/L	0.0017	5.3906	0.8239	84.7 %	0.1
AR-4	mg/L	0.0017	5.3906	1.3931	74 %	0.1

Se observa en la Tabla 12 los resultados del análisis a las muestras de agua residual al inicio y final del tratamiento, la muestra AR-1 es la muestra de agua residual inicial con una concentración de 0.2637 mg/l de cadmio y los resultados del tratamiento final en las muestras AR-2, AR-3 y AR-4, siendo el valor más alto el AR-3 sistema donde estuvo la *Eichhornia Crassipes* con 0.0260 mg/l y el valor más bajo de cadmio la muestra AR-2 del sistema *Pistia Stratiotes* con 0.0152 mg/l, teniendo la mejor eficiencia en remoción de este metal con el valor de 94.2%. Se comparó los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas D.S. 010-2010-MINAM, encontrándose estos resultados por debajo del LMP.

**Tabla 12**

*Análisis de concentración de cadmio en las muestras de agua residual AR-1, AR-2, AR-3 y AR-4.*

<i>Código de Muestreo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite de detección</i>	<i>Resultados</i>		<i>% de eficiencia</i>	<i>D.S. 010-2010-MINAM Cadmio mg/l</i>
			<i>Concentración inicial de cadmio mg/l</i>	<i>Concentración final de cadmio mg/l</i>		
AR-1	mg/L	0.0003	0.2637	-	-	0.05
AR-2	mg/L	0.0003	0.2637	0.0152	94 %	0.05
AR-3	mg/L	0.0003	0.2637	0.0260	90 %	0.05
AR-4	mg/L	0.0003	0.2637	0.0191	92.7 %	0.05

#### **4.2. Análisis de los cambios morfológicos**

En la Tabla 13 se presentan los valores obtenidos de las mediciones diarias a la especie *Pistia Stratiotes*, donde se monitoreo las características morfológicas como a la raíz, largo de la planta, ancho de la hoja, largo de la hoja y área que ocupa a 9 individuos de esta especie de macrófita.

**Tabla 13***Resultados de las mediciones de las características morfológicas de la Pistia Stratiotes*

<b>Pistia 1</b>										
<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>cm</i>	9.6	11	8.4	9	7	7.4	7.4	2.5	2.5
<i>Planta</i>	<i>cm</i>	19.4	21.2	19.5	18	17	16.5	16	8.5	8.5
<i>Largo de hoja</i>	<i>cm</i>	9	9.7	9.4	8.7	7.9	7.8	4.6	6.2	6.1
<i>Ancho de hoja</i>	<i>cm</i>	4.1	4.4	4.1	3.8	3.8	3.8	3.1	2.8	2.8
<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	277.16	350	247	219.04	182	217.46	152.52	123.2	106.7
<b>Pistia 2</b>										
<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>cm</i>	15.5	23	6.7	9.7	4	3.6	3.5	3.4	3.4
<i>Planta</i>	<i>cm</i>	24	32	17.4	17.8	14	13.6	13.2	13	9.4
<i>Largo de hoja</i>	<i>cm</i>	7.1	8	7.7	7.2	6.7	6.2	7.7	7.4	5.8
<i>Ancho de hoja</i>	<i>cm</i>	2.7	3	2.6	2.6	2.4	2.5	2.4	2.8	2.4
<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	289.98	328.1	217.6	222	160.65	159.5	113.85	221.97	148.24
<b>Pistia 3</b>										
<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>Cm</i>	11.8	15.8	12.6	13.4	11.5	10.2	6.2	4.5	4.5
<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	23.1	24.3	23	23	19.6	18.2	16.4	12	12.2
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	8.8	9	8.9	7.8	7.7	7.6	7.3	7.3	6.2
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	3.8	4.4	3.6	3.5	3.5	3.4	3.1	3.1	3.1
<i>Área</i>	<i>Cm<sup>2</sup></i>	178.75	440	346.8	260.1	153.68	192.96	205.4	361.2	270
<b>Pistia 4</b>										
<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>Cm</i>	12.5	13.3	11	10.9	10	9.9	8.6	6.9	3.7

<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	22.5	22.7	19	19	18.2	17.2	15.5	15.5	13.9
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	7.3	7.8	7.8	7.6	7.5	6.2	6.4	6.4	6.3
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	2.8	3.6	2.3	2.3	3	3	2.9	2.8	2.8
<i>Área</i>	<i>Cm<sup>2</sup></i>	249.28	299.25	337.92	263.5	141.12	176.8	194.18	145.2	179.36

**Pistia 5**

<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>Cm</i>	3.3	4	5.1	5.8	5.8	5.9	6.3	5.3	3.7
<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	12.3	12	13.5	13	11	11.5	11.5	12.5	13.5
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	7.2	7.5	7.2	7.4	6.4	6.1	6.7	4.7	5.5
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	3.9	4.3	3.8	3	3.5	3.1	2.9	2.5	2.5
<i>Área</i>	<i>Cm<sup>2</sup></i>	247.32	268.32	248	187.68	154	120.4	86.62	48.96	52.08

**Pistia 6**

<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>Cm</i>	10.5	10.6	10.7	10.7	10.4	10.2	5.8	2.6	2.8
<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	20.9	20.7	20.4	18	19.8	17	11.4	9.6	9.2
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	8.8	9	8.3	8.8	8.1	7.1	6.7	6.2	6
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	2.7	2.7	3.5	3.3	3.3	3.2	3	3	2.3
<i>Área</i>	<i>Cm<sup>2</sup></i>	186.48	475.2	402.6	288.8	225.28	263.67	233.09	187.2	146.3

**Pistia 7**

<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>Cm</i>	12.1	11.5	11.8	8.3	8.4	7.2	7.3	7	4.7
<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	20.8	20.4	20.4	14.7	14.8	14.1	13.7	18.4	11.6
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	8.5	9	7.2	8.3	6.5	6.9	7.3	5.7	6.3
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	3.1	3.3	2.4	3.1	2.9	2.5	2.2	3.5	2.6
<i>Área</i>	<i>Cm<sup>2</sup></i>	198.86	360	241.74	181.89	114	134.4	141.75	134.55	138.6

**Pistia 8**

<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>

<i>Raíz</i>	<i>Cm</i>	13.8	16	12.3	9.9	8.2	7.6	5.5	4.3	3.9
<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	23.2	26.8	21.8	21.5	15.4	14.8	14.3	13.5	10.8
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	8.2	7.8	7.3	7.3	7	6.6	6.6	6.4	6.4
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	2.6	2.8	2.9	2.9	2.9	2.7	2.7	2.3	2.3
<i>Área</i>	<i>Cm<sup>2</sup></i>	217.59	473	243.35	254.1	195	205.9	174.2	146.4	187.68

**Pistia 9**

<b>Medición</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultados</b>								
		<b><i>Día 1</i></b>	<b><i>Día 2</i></b>	<b><i>Día 3</i></b>	<b><i>Día 4</i></b>	<b><i>Día 5</i></b>	<b><i>Día 6</i></b>	<b><i>Día 7</i></b>	<b><i>Día 8</i></b>	<b><i>Día 9</i></b>
<i>Raíz</i>	<i>Cm</i>	12.5	13.2	7.3	8.6	4.2	4.2	3.8	2.7	2.7
<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	22.2	22.5	16.8	17	11.4	10.8	10.2	9.8	9.2
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	6.8	7.7	7.6	7.5	5.9	6.7	6.7	6.6	6
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	3.1	5.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.7	2.3	3.3
<i>Área</i>	<i>Cm<sup>2</sup></i>	174.84	336	232	161.25	141	132	146.37	202.8	170.4

En la Tabla 14 se presentan los valores obtenidos de las mediciones diarias a la especie *Eichhornia Crassipes*, donde se monitoreo las características morfológicas como a la raíz, tallo, largo de la planta, ancho de la hoja, largo de la hoja y área que ocupa a 6 individuos de esta especie de macrófita.

**Tabla 14**

*Resultados de las mediciones de las características morfológicas del Eichhornia Crassipes*

<b>Jacinto 1</b>										
<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>cm</i>	12	11.5	9.8	9.8	9.5	9	8	7.9	7.3
<i>Planta</i>	<i>cm</i>	28	28	28	19	18	18	17.4	17	17
<i>Ancho de hoja</i>	<i>cm</i>	5	6	6.9	7.1	6.6	5.1	4.3	4.3	4
<i>Largo de hoja</i>	<i>cm</i>	7	9	9.2	9.1	9	7	7.2	7.2	7.3
<i>Tallo</i>	<i>cm</i>	9	11	10	9.5	9	9.8	8	8	8
<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	442	451.6	540.3	668.8	504	462	419	387	329.68
<b>Jacinto 2</b>										
<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>cm</i>	13	12	12	11	13.5	11.3	11.3	11	11
<i>Planta</i>	<i>cm</i>	28	29.5	24	25.4	24.3	22.3	20	20	19
<i>Ancho de hoja</i>	<i>cm</i>	6	5.8	6	6.5	5.8	5.8	5.7	5.7	5.7
<i>Largo de hoja</i>	<i>cm</i>	8	8.9	8.9	7.7	7.4	8.7	8.7	8.7	8.7
<i>Tallo</i>	<i>cm</i>	10	11.5	11.5	8	8	8	8.2	8.2	8.2
<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	525	578	470.06	456	451.7	420	411.2	394.2	390
<b>Jacinto 3</b>										
<i>Medición</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>								
		<i>Día 1</i>	<i>Día 2</i>	<i>Día 3</i>	<i>Día 4</i>	<i>Día 5</i>	<i>Día 6</i>	<i>Día 7</i>	<i>Día 8</i>	<i>Día 9</i>
<i>Raíz</i>	<i>cm</i>	12.5	11.3	11.3	11.1	10.8	10.7	10.5	10.5	10
<i>Planta</i>	<i>cm</i>	26	26.5	22.5	21.2	22	21.4	21.4	21	21

Ancho de hoja	cm	6	6.5	5.5	5.2	4.4	4.8	4.5	4	4
Largo de hoja	cm	9	10	9.2	7	5.2	7.3	7.3	7	6.9
Tallo	cm	8	14.9	11	10	9.5	9.5	9.5	9	9
Área	cm <sup>2</sup>	565	571	540	517.5	504	501.3	500	495.4	488

**Jacinto 4**

Medición	Unidad	Resultados								
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Raíz	cm	15	13.8	14.2	11.5	12	12	11.7	11.3	11
Planta	Cm	24	24.3	23.3	24.1	21.4	21.4	21	20.9	20.5
Ancho de hoja	Cm	9	9	9.1	8.6	8.4	8	7.4	7.4	7
Largo de hoja	Cm	5	5.8	5.8	5.8	5.6	5.3	5.1	5	5
Tallo	Cm	8	8.7	9	7.7	7	6	5.9	5.7	5.7
Área	cm <sup>2</sup>	437	528	598	551	544	541	528.4	465.5	415.8

**Jacinto 5**

Medición	Unidad	Resultados								
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Raíz	Cm	12	12.7	12.5	12	12	10.5	10.3	10.3	10
Planta	Cm	19.8	21.1	24	25	20.8	20.5	20	20.1	20
Ancho de hoja	Cm	10	9.5	9.5	8.2	8.5	8.1	8.1	7.8	7.7
Largo de hoja	Cm	6	6.5	5.8	5.5	5.1	5.1	5	5	4.9
Tallo	Cm	10	10.1	10.5	10.5	10.5	10.3	10.2	10	10
Área	cm <sup>2</sup>	405	620	668.8	672	540	493	471	465.5	420

**Jacinto 6**

Medición	Unidad	Resultados								
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Raíz	Cm	13	11.8	14.4	16	16	17	16.2	12.2	12



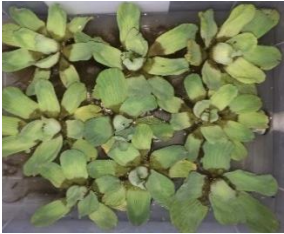







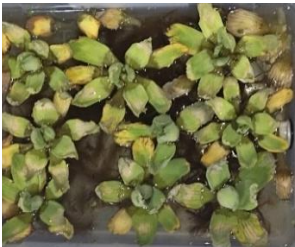



<i>Planta</i>	<i>Cm</i>	24.3	26.8	25.2	26.8	23.4	24.5	21.7	21.7	21.7
<i>Ancho de hoja</i>	<i>Cm</i>	8	8.8	8.3	8.1	7.6	7.5	7	7.3	7.2
<i>Largo de hoja</i>	<i>Cm</i>	5	6.4	5.4	5.6	5.3	5.3	5.4	5	5
<i>Tallo</i>	<i>Cm</i>	10	11	9	9	9	10	8	8.5	9.4
<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	368	480	511.1	517.5	496	468	420	418.3	407



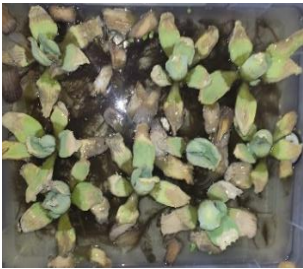



En la Tabla 15, se presentan los resultados obtenidos del monitoreo diario a la especie *Pistia Stratiotes* donde se describe las características morfológicas como el color de las hojas, color de las raíces y observaciones que se dieron durante el monitoreo. Además, se presentan el monitoreo a las muestras patrones de cada especie.

**Tabla 15**

*Monitoreo a las características morfológicas de la especie Pistia Stratiotes*

<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Pistia Stratiotes</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Muestra Patrón</i>
<i>Día 1</i>	Se observa hojas gruesas de color verde en todos los individuos, algunas hojas de ellas son verdes amarillentos, con frondosas raíces de color marrón.		Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón en una de ellas.	
<i>Día 2</i>	Hojas del interior de la planta color verde, hojas externas largas verdes. Raíces de color marrón.		Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón en una de ellas.	
<i>Día 3</i>	Hojas del interior de la planta color verde, hojas externas largas verdes con bordes amarillos. Raíces de color marrón.		Se observa el crecimiento de las Hojas color verdosas, con raíces frondosas.	

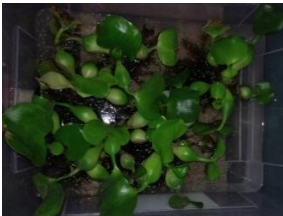





<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Pistia Stratiotes</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Muestra Patrón</i>
<i>Día</i> 4	<p>Hojas del interior de la planta color verde, hojas externas largas verdes con bordes amarillos.</p> <p>Algunas hojas amarillas y marrones se han desprendido, así como algunas raíces.</p> <p>Raíces de color marrón.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón conectada a otra más pequeñas. Crecimiento de las raíces, manteniendo su color marrón.</p>	
<i>Día</i> 5	<p>Hojas del interior de la planta color verde, hojas externas largas verdes amarillentas con bordes ligeramente marrones.</p> <p>Algunas hojas amarillas y marrones se han desprendido, así como algunas raíces.</p> <p>Raíces de color marrón.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón conectada a otra más pequeñas. Crecimiento de las raíces, manteniendo su color marrón.</p>	
<i>Día</i> 6	<p>Hojas del interior de la planta color verde, hojas externas largas verdes amarillentas con bordes marrones.</p> <p>Algunas hojas amarillas y marrones se han desprendido, así como algunas raíces.</p> <p>Raíces de color marrón.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón conectada a otra más pequeñas. Crecimiento de las raíces, manteniendo su color marrón.</p>	

<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Pistia Stratiotes</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Muestra Patrón</i>
<i>Día</i> 7	<p>Hojas del interior de la planta color verde, hojas externas largas amarillas con bordes marrones. Algunas hojas marrones se han desprendido, así como algunas raíces. Color de raíces marrones oscuro.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón conectada a otra más pequeñas. Crecimiento de las raíces, manteniendo su color marrón.</p>	
<i>Día</i> 8	<p>Hojas del interior de la planta color verde, hojas externas largas amarillas con bordes marrones. Algunas hojas marrones se han desprendido, así como algunas raíces. Color de raíces marrones oscuro.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón conectada a otra más pequeñas. Crecimiento de las raíces, manteniendo su color marrón.</p>	
<i>Día</i> 9	<p>Hojas del interior de la planta color ligeramente verde, hojas largas externas color amarillo, con bordes marrones, hojas sumergidas debajo del agua. Algunas hojas marrones se han desprendido de la planta, así como algunas raíces también. Raíces de color marrón oscuro.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas y la presencia de un estolón conectada a otra más pequeñas. Crecimiento de las raíces, manteniendo su color marrón.</p>	









En la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos del monitoreo diario a la especie *Eichhornia Crassipes* donde se describe las características morfológicas como el color de las hojas, color de las raíces y observaciones que se dieron durante el monitoreo. Además, se presentan el monitoreo a las muestras patrones de cada especie.





**Tabla 16**

*Monitoreo a las características morfológicas de la especie Eichhornia Crassipes*

<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Eichhornia Crassipes</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Patrón</i>
<i>Día</i> 1	Hojas color verdosas, raíces frondosas, raíces de color marrón.		Hojas color verdosas, con raíces frondosas. Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua estan oscuras.	
<i>Día</i> 2	Hojas color verdosas, raíces frondosas, raíces de color marrón. Algunas hojas que estuvieron en contacto directo con el agua presentan coloración amarillenta.		Hojas color verdosas, con raíces frondosas. Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua estan oscuras.	
<i>Día</i> 3	Hojas color verdosas, raíces frondosas, raíces de color marrón oscuro. Algunas hojas que estuvieron en contacto directo con el agua presentan coloración amarillenta. Se observa también disminución en el tamaño de las hojas.		Hojas color verdosas, con raíces frondosas. Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua estan oscuras.	



<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Eichhornia Crassipes</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Patrón</i>
<i>Día</i> 4	<p>Hojas color verdosas, raíces frondosas, raíces de color marrón.</p> <p>Algunas hojas y tallos que estuvieron en contacto directo con el agua presentan coloración amarillenta.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas.</p> <p>Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua están oscuras.</p> <p>Crecimiento del tamaño de las raíces y algunas hojas.</p>	
<i>Día</i> 5	<p>Hojas color verdosas, raíces frondosas, raíces de color marrón.</p> <p>Algunas hojas que estuvieron en contacto directo con el agua presentan coloración amarillenta.</p> <p>Desprendimiento de algunas raíces.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas.</p> <p>Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua están oscuras.</p> <p>Crecimiento del tamaño de la planta, las raíces y algunas hojas.</p>	
<i>Día</i> 6	<p>Hojas color verde amarillento, raíces frondosas, raíces de color marrón.</p> <p>Algunas hojas que estuvieron en contacto directo con el agua presentan coloración amarillenta.</p> <p>Desprendimiento de algunas raíces.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas.</p> <p>Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua están oscuras.</p> <p>Crecimiento del tamaño de la planta, las raíces y algunas hojas.</p>	
<i>Día</i> 7	<p>Hojas color verdosas, raíces frondosas y de color marrón.</p> <p>Algunas hojas que estuvieron en contacto directo con el agua presentan coloración amarillenta.</p> <p>Desprendimiento de algunas raíces.</p>		<p>Hojas color verdosas, con raíces frondosas.</p> <p>Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua están oscuras.</p> <p>Crecimiento del tamaño de la planta, las raíces y algunas hojas.</p>	


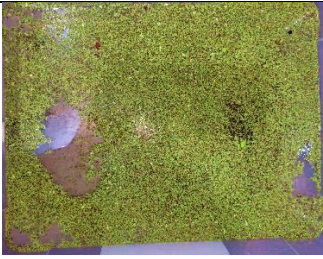

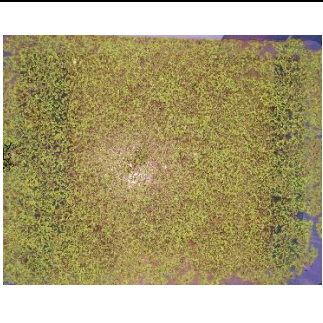

<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Eichhornia Crassipes</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Patrón</i>
<i>Día</i> 8	<p>Hojas altas de color verdosas, raíces frondosas, raíces de color marrón oscuro.</p> <p>Hojas y tallos que estuvieron en contacto directo con el agua presentan coloración amarillenta y gris. Desprendimiento de algunas raíces.</p>		<p>Hojas color verdosas, algunos tallos amarillos, con raíces frondosas.</p> <p>Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua están oscuras.</p> <p>Crecimiento del tamaño de la planta, las raíces y algunas hojas.</p>	
<i>Día</i> 9	<p>El 50% de cada individuo presenta hojas y tallos marrones/ gris.</p> <p>Algunas hojas que no estuvieron en contacto directo con el agua mantienen un color verde amarillento. Raíces de color marrón oscuro.</p> <p>Desprendimiento de algunas raíces.</p>		<p>Hojas verdes, tallo amarillento, con raíces frondosas.</p> <p>Algunas hojas que se encuentran debajo del nivel del agua están oscuras.</p> <p>Crecimiento del tamaño de la planta, las raíces y algunas hojas.</p>	

En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos del monitoreo diario a la especie *Azolla Filiculoides* donde se describe las características morfológicas como el color de las hojas, color de las raíces y observaciones que se dieron durante el monitoreo. Además, se presentan el monitoreo a las muestras patrones de cada especie.





**Tabla 17**


*Monitoreo a las características morfológicas de la especie Azolla Filiculoides*

<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Azolla Filiculoides</i>
------------	----------------------	----------------------------

<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Azolla Filiculoides</i>
<i>Día 1-7</i>	Se observa la muestra patrón del helecho de agua con hojas totalmente verdes, con raíces muy delgadas y cortas, se multiplican a la semana, hubo crecimiento de la especie y raíces un poco más largas, en algunas se agruparon las raíces.	
<i>Día 1</i>	Helecho de agua con hojas totalmente verdes, con raíces muy delgadas y cortas, en un pequeño lado hubo agrupamiento de estas raíces.	
<i>Día 2</i>	Helecho de agua con hojas totalmente verdes, con raíces muy delgadas y cortas, en un pequeño lado hubo agrupamiento de estas raíces.	
<i>Día 3</i>	Se extendió el helecho de agua abarcando toda la superficie del sistema, hojas verdes amarillentas. Algunas raíces siguen agrupadas.	
<i>Día 4</i>	El helecho de agua abarcando toda la superficie del sistema, hojas verdes oscuras y otras amarillentas. Se observa también raíces delgadas que se han desprendido de la planta.	



<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Azolla Filiculoides</i>
<i>Día 5</i>	El helecho de agua disminuye el área que ocupa, hojas amarillas y otras verdes muy oscuras. Raíces delgadas desprendidas.	
<i>Día 6</i>	El helecho de agua disminuye el área que ocupa, hojas amarillas y otras verdes muy oscuras. Raíces delgadas desprendidas.	
<i>Día 7</i>	El helecho de agua ha disminuido más el área que ocupa, aproximadamente el 40% de la <i>Azolla</i> se desprendió de sus raíces y está sumergido bajo el nivel del agua. Raíces delgadas desprendidas. Hojas oscuras marrones desprendidas, sumergidas debajo del nivel del agua.	
<i>Día 8</i>	El helecho de agua ha disminuido más el área que ocupa, aproximadamente el 50% de la <i>Azolla</i> se desprendió de sus raíces y está sumergido bajo el nivel del agua. Se observa hojas marrones oscuras. Raíces delgadas desprendidas.	

<i>Día</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Azolla Filiculoides</i>
<i>Día 9</i>	El helecho de agua ha disminuido más el área que ocupa, aproximadamente el 70% de la <i>Azolla</i> se desprendió de sus raíces y está sumergido bajo el nivel del agua. Se observa hojas marrones oscuras. Raíces delgadas desprendidas.	

### 4.3. Análisis Estadístico

Para analizar estadísticamente los datos se proyectó las concentraciones tanto iniciales como después del tratamiento con cada especie con cada metal especificado para evaluar su significancia estadística de lo cual se tiene:

- ✓ Aplicación de tratamiento con contaminación de Arsénico:

Para ello se aplicó el tratamiento por nueve días con las especies *Eichhornia Crassipes*, *Azolla Filiculoides* y *Pistia Stratiotes* aplicado en 9 días de tratamiento se obtuvo el siguiente resultado, el cual se detalla en la tabla 18.

**Tabla 18**

*Distribución estadística de los resultados del tratamiento con arsénico*

<b>Días de Tratamiento</b>	<b>AR-1</b>	<b>AR-2</b>	<b>AR-3</b>	<b>AR-4</b>
1	5.3906	0.5932	0.8312	1.4522
2	5.3906	0.5922	0.8239	1.3931
3	5.4231	0.5811	0.8736	1.4515
4	5.4323	0.5836	0.8239	1.3931
5	5.3906	0.5631	0.8822	1.4536
6	5.4578	0.5631	0.8613	1.3931
7	5.3906	0.5631	0.8239	1.3931

Días de Tratamiento	AR-1	AR-2	AR-3	AR-4
8	5.4569	0.5923	0.9233	1.4123
9	5.4577	0.5856	0.8724	1.3931

Donde se tiene:

AR-1: Tratamiento Inicial de arsénico

AR-2: Tratamiento de arsénico con *Eichhornia Crassipes*

AR-3: Tratamiento de arsénico con *Azolla Filiculoides*

AR-4: Tratamiento de arsénico con *Pistia Stratiotes*

✓ Análisis de Normalidad

Para poder realizar el análisis de prueba hipótesis correspondiente primero se realizará un análisis de normalidad para comprobar si la muestra se distribuye de manera normal o no por lo cual se realiza la misma, obteniendo los siguientes resultados, el cual se detalla en la tabla 19.

**Tabla 19**

*Análisis de normalidad para análisis de arsénico*

Variables de Análisis	Shapiro-Wilk	gl	Sig.
AR-2 Tratamiento de arsénico con <i>Eichhornia Crassipes</i>	0.823	9	0.227
AR-3 Tratamiento de arsénico con <i>Azolla Filiculoides</i>	0.912	9	0.330
AR-4 Tratamiento de arsénico con <i>Pistia Stratiotes</i>	0.696	9	0.111
AR-1 Concentración Inicial de arsénico	0.750	9	0.224

*Nota.* La prueba de Normalidad Shapiro-Wilk se realiza cuando la muestra que se analiza es menor de 40 individuos, elaborado en SPSS versión 26

Se plantean las siguientes hipótesis de decisión:

H0: Los datos proviene de una distribución normal

HA: Los datos no proviene de una distribución normal

Analizando los datos se observa que el valor sig. es mayor que la significancia de la investigación (sig. = 0.05) por lo tanto se acepta la hipótesis nula en los tratamientos aplicados por lo que se deduce que los datos provienen de una distribución normal.

Luego de este proceso se procederá a aplicar la prueba hipótesis T de Student de variables relacionadas en las siguientes combinaciones

✓ AR-1 vs AR-2

Relacionando las variables en un valor inicial de concentración de arsénico y el valor final después de aplicar el tratamiento *Eichhornia Crassipes*, el cual se detalla en la tabla 20.

**Tabla 20**

*Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-2 (para arsénico)*

Relación	Diferencias emparejadas				t	gl	Sig. (bilateral)	
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior				Superior
AR-1 vs AR-2	4.83556	0.03005	0.01002	4.81246	4.85865	482.811	8	0.000

*Nota.* Elaborado en SPSS, versión 26.

Se plantean las siguientes hipótesis

H0 : El tratamiento para remover arsénico de agua contaminada sintética con *Eichhornia Crassipes* no es significativo.

HA : El tratamiento para remover arsénico de agua contaminada sintética con *Eichhornia Crassipes* es significativo.

De los resultados obtenidos se observa que la sig. es menor que la sig. de la investigación (sig.= 0.05) por lo que se concluye que el tratamiento para remover arsénico de agua contaminada sintética con *Eichhornia Crassipes* es significativo, esto se comprueba debido que las concentraciones de arsénico disminuyeron en promedio de 5.4156 mg/l de arsénico a 0.58 mg/l de arsénico después de aplicar el tratamiento con *Eichhornia Crassipes*.

✓ AR-1 vs AR-3

Relacionando las variables en un valor inicial de concentración de arsénico y el valor final después de aplicar el tratamiento *Azolla Filiculoides*, el cual se detalla en la tabla 21.

**Tabla 21**

*Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-3 (para arsénico)*

Relación	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
AR-1 vs AR-3	4.54888	0.028916	0.009639	4.526662	4.571115	471.948	8	0.000

Nota. Elaborado en SPSS, versión 26.

De los resultados obtenidos se observa que la sig. es menor que la sig. de la investigación (sig.= 0.05) por lo que se concluye que el tratamiento para remover arsénico de agua contaminada sintética con *Azolla Filiculoides* es significativo, esto se comprueba debido que las concentraciones de arsénico disminuyeron en promedio de 5.4156 mg/l de arsénico a 0.8667 mg/l de arsénico después de aplicar el tratamiento con *Azolla Filiculoides*.

## ✓ AR-1 vs AR-4

Relacionando las variables en un valor inicial de concentración de arsénico y el valor final después de aplicar el tratamiento *Pistia Stratiotes*, el cual se detalla en la tabla 22.

**Tabla 22**

*Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-4 (para arsénico)*

Relación	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
AR-1 vs AR-4	4.00333	0.050000	0.016667	3.964900	4.041767	240.20 0	8	0.000

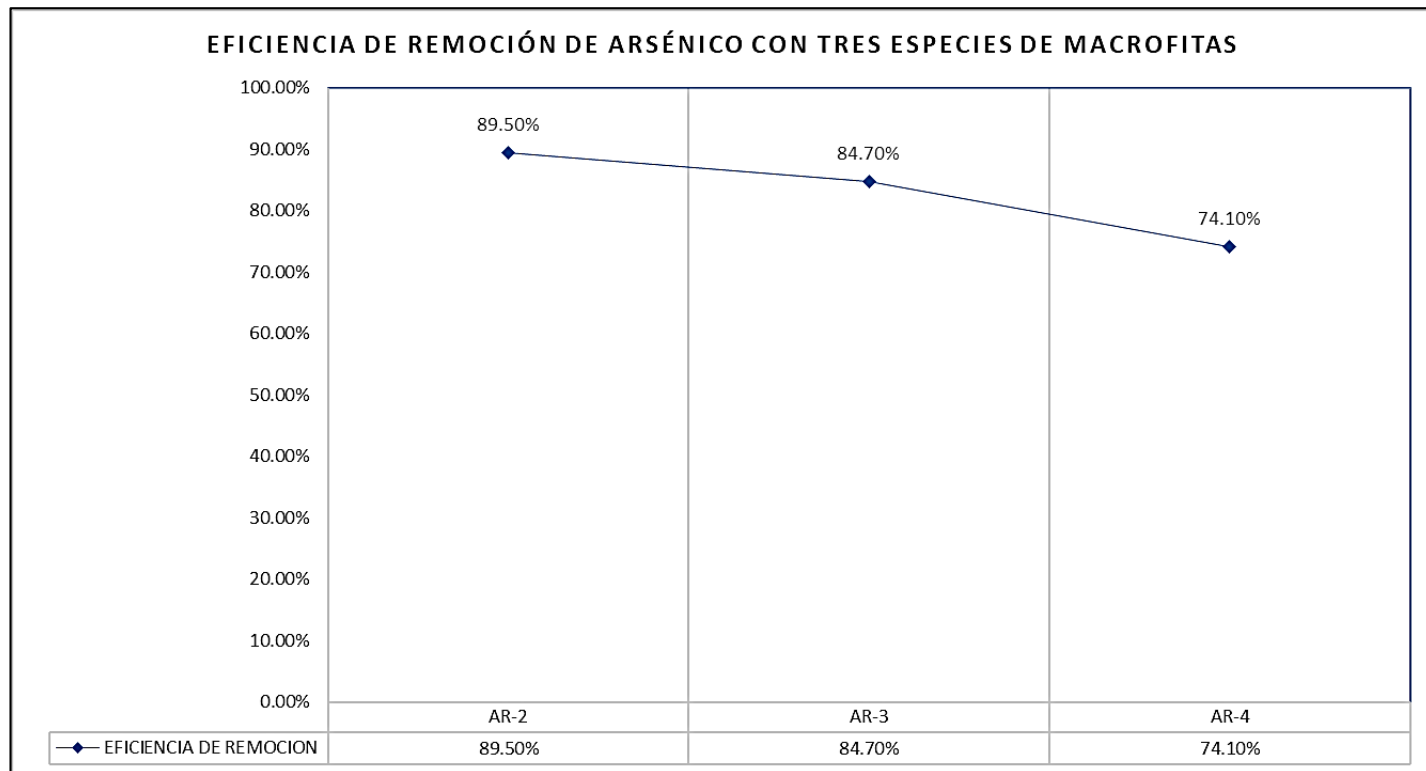
Nota. Elaborado en SPSS, versión 26.

De los resultados obtenidos se observa que la sig. es menor que la sig. de la investigación (sig.= 0.05) por lo que se concluye que el tratamiento para remover arsénico de agua contaminada sintética con *Pistia Stratiotes* es significativo, esto se comprueba debido que las concentraciones de arsénico disminuyeron en promedio de 5.4156 mg/l de arsénico a 1.4122 mg/l de arsénico después de aplicar el tratamiento con *Pistia Stratiotes*.

Por lo que se plantea fundamentalmente la eficiencia de remoción del tratamiento aplicado a aguas contaminadas con arsénico aplicando tratamientos con tres macrófitas base del cual se tiene la figura 18.

**Figura 18**

*Eficiencia de remoción de arsénico en aguas contaminadas sintéticas aplicando tratamiento con tres macrófitas específicas*



*Nota.* Se observa que el tratamiento AR-2 (tratamiento con *Eichhornia Crassipes*) es el más eficiente observando eficiencias mayores a 50% fundamentando la prueba estadística y comprobando su significancia.

✓ Aplicación de tratamiento con contaminación de cadmio

Para ello se aplicó el tratamiento por nueve días con las especies *Eichhornia Crassipes*, *Azolla Filiculoides* y *Pistia Stratiotes* aplicado en 9 días de tratamiento se obtuvo el siguiente resultado, el cual se detalla en la tabla 23.

**Tabla 23**

*Distribución estadística de los resultados del tratamiento con cadmio*

Días de Tratamiento	AR-1	AR-2	AR-3	AR-4
1	0.2637	0.01780	0.0257	0.0191

Días de Tratamiento	AR-1	AR-2	AR-3	AR-4
2	0.3000	0.01632	0.0260	0.0190
3	0.2700	0.01520	0.0266	0.0200
4	0.2637	0.02000	0.0260	0.0186
5	0.3000	0.01853	0.0221	0.0191
6	0.2900	0.02365	0.0237	0.0176
7	0.3500	0.01520	0.0260	0.0191
8	0.2637	0.02000	0.0163	0.0185
9	0.3300	0.01520	0.0300	0.0191

Nota. Elaboración propia

Donde se tiene:

AR-1: Tratamiento Inicial de Cadmio

AR-2: Tratamiento de Cadmio con *Pistia Stratiotes*

AR-3: Tratamiento de Cadmio con *Eichhornia Crassipes*

AR-4: Tratamiento de Cadmio con *Azolla Filiculoides*

✓ Análisis de Normalidad

Para poder realizar el análisis de prueba hipótesis correspondiente primero se realizará un análisis de normalidad para comprobar si la muestra se distribuye de manera normal o no por lo cual se realiza la misma, obteniendo los siguientes resultados el cual se detalla en la tabla 24.

**Tabla 24**

*Análisis de normalidad para análisis de cadmio*

Variables de Análisis	Shapiro-Wilk	Gl	Sig.
AR-2 Tratamiento de cadmio con <i>Pistia Stratiotes</i>	0.889	9	0.193
AR-3 Tratamiento de cadmio con <i>Eichhornia Crassipes</i>	0.864	9	0.105
AR-4 Tratamiento de cadmio con <i>Azolla Filiculoides</i>	0.888	9	0.190



<b>Variables de Análisis</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>	<b>Gl</b>	<b>Sig.</b>
AR-1 Concentración Inicial de Cadmio	0.867	9	0.113

*Nota.* La prueba de Normalidad Shapiro-Wilk se realiza cuando la muestra que se analiza es menor de 40 individuos, elaborado en SPSS versión 26

Se plantean las siguientes hipótesis de decisión:

H<sub>0</sub>: Los datos proviene de una distribución normal

H<sub>A</sub>: Los datos no proviene de una distribución normal

Analizando los datos se observa que el valor sig. es mayor que la significancia de la investigación (sig. = 0.05) por lo tanto se acepta la hipótesis nula en los tratamientos aplicados por lo que se deduce que los datos provienen de una distribución normal.

Luego de este proceso se procederá a aplicar la prueba hipótesis T de Student de variables relacionadas en las siguientes combinaciones

✓ AR-1 vs AR-2

Relacionando las variables en un valor inicial de concentración de cadmio y el valor final después de aplicar el tratamiento *Pistia Stratiotes*, el cual se detalla en la tabla 25.

**Tabla 25**

*Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-2 (para cadmio)*

Relación	Diferencias emparejadas					t	Gl	Sig. (bilateral )
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
AR-1 vs AR-2	0.274	0.0327	0.0109	0.24920	0.29950	25.158	8	0.000

*Nota.* Elaborado en SPSS, Versión 26.

Se plantean las siguientes hipótesis

$H_0$  : El tratamiento para remover cadmio de agua contaminada sintética con *Pistia Stratiotes* no es significativo.

$H_A$  : El tratamiento para remover cadmio de agua contaminada sintética con *Pistia Stratiotes* es significativo.

De los resultados obtenidos se observa que la sig. es menor que la sig. de la investigación (sig.= 0.05) por lo que se concluye que el tratamiento para remover cadmio de agua contaminada sintética con *Pistia Stratiotes* es significativo, esto se comprueba debido que las concentraciones de cadmio disminuyeron en promedio de 0.292344 mg/l de cadmio a 0.017990 mg/l de cadmio después de aplicar el tratamiento con *Pistia Stratiotes*.

✓ AR-1 vs AR-3

Relacionando las variables en un valor inicial de concentración de cadmio y el valor final después de aplicar el tratamiento *Eichhornia Crassipes*, se obtiene el siguiente resultado, el cual se detalla en la tabla 26.

**Tabla 26**

*Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-3 (para cadmio)*

Relación	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
AR-1 vs AR-3	0.267	0.029	0.009	0.244	0.290	26.871	8	0.000

Nota. Elaborado en SPSS, versión 26.

De los resultados obtenidos se observa que la sig. es menor que la sig. de la investigación (sig.= 0.05) por lo que se concluye que el tratamiento para remover cadmio de agua contaminada sintética con *Eichhornia Crassipes* significativo, esto se comprueba debido que las concentraciones de cadmio disminuyeron en promedio de 0.292344 mg/l de cadmio a 0.024712 mg/l de cadmio después de aplicar el tratamiento con *Eichhornia Crassipes*.

✓ AR-1 vs AR-4

Relacionando las variables en un valor inicial de concentración de cadmio y el valor final después de aplicar el tratamiento *Azolla Filiculoides* se obtiene el siguiente resultado, el cual se detalla en la tabla 27.

**Tabla 27**

*Prueba hipótesis de T de student AR-1 vs AR-4(para cadmio)*

Relación	Diferencias emparejadas					T	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
AR-1 vs AR-4	0.273	0.031	0.010	0.249	0.297	26.271	8	0.000

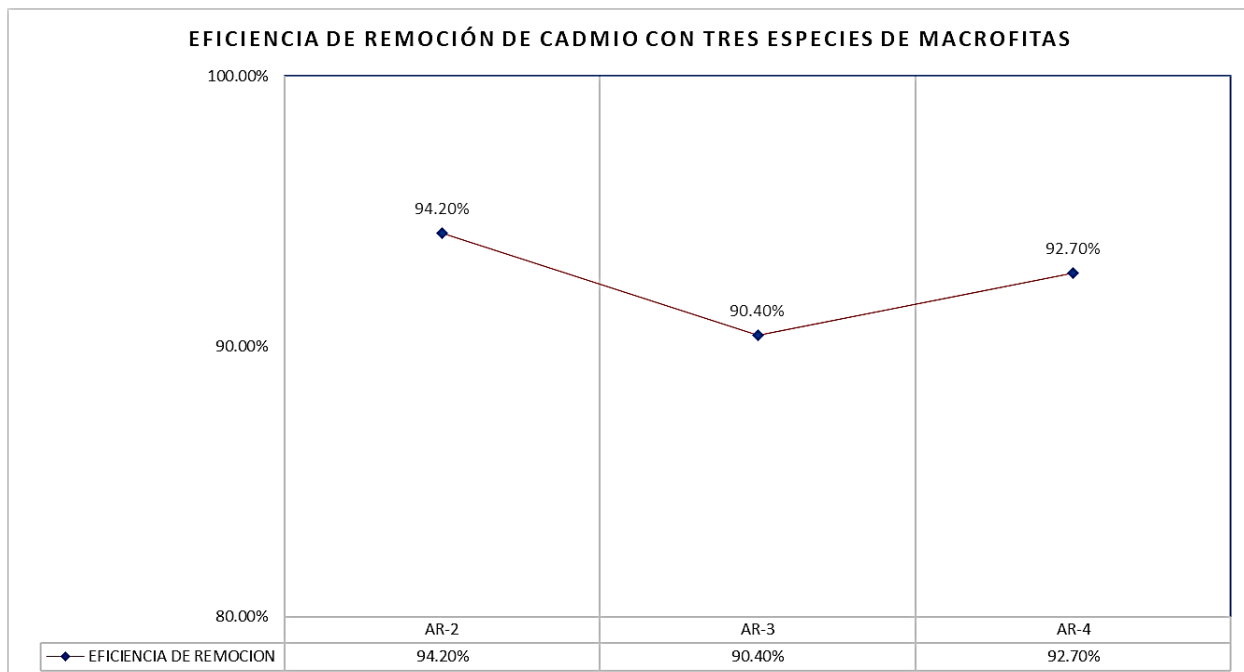
Nota. Elaborado en SPSS.versión 26

De los resultados obtenidos se observa que la sig. es menor que la sig. de la investigación (sig.= 0.05) por lo que se concluye que el tratamiento para remover cadmio de agua contaminada sintética con *Azolla Filiculoides* es significativo, esto se comprueba debido que las concentraciones de cadmio disminuyeron en promedio de 0.292344 mg/l de cadmio a 0.018890 mg/l de Cadmio después de aplicar el tratamiento con *Azolla Filiculoides*.

Por lo que se plantea fundamentalmente la eficiencia de remoción del tratamiento aplicado a aguas contaminadas con cadmio aplicando tratamientos con tres macrófitas, el cual se detalla en la figura 19.

**Figura 19**

*Eficiencia de remoción de cadmio en aguas contaminadas sintéticas aplicando tratamiento con tres macrófitas específicas*



*Nota.* Se observa que el tratamiento AR-2 (tratamiento con *Pistia Stratiotes*) es el más eficiente observando eficiencias mayores a 50% fundamentando la prueba estadística y comprobando su significancia. Elaboración propia.

En la siguiente tabla 28 se detalla la hipótesis general y las hipótesis específicas, las cuales han sido contrastadas como verdaderas mediante el análisis estadístico, por lo cual se argumenta cada una de ellas.

**Tabla 28***Contrastación de hipótesis de investigación*

<b><i>HIPOTESIS GENERAL</i></b>	<b><i>ARGUMENTACION</i></b>	<b><i>CONTRASTACION</i></b>
La fitorremediación con macrófitas influye significativamente en la remoción de aguas residuales, a nivel de laboratorio.	Se puede argumentar según la prueba estadística que las diferentes combinaciones en dos metales específicos según la prueba hipótesis T de student es significativa con un sig. en todas las pruebas realizadas menor a 0.05 por lo cual se valida la afirmación postulada.	Verdadera
<b><i>HIPOTESIS ESPECIFICAS</i></b>	<b><i>ARGUMENTACION</i></b>	<b><i>CONTRASTACION</i></b>
La fitorremediación con <i>Pistia Stratiotes</i> influye en 75% en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio.	Se puede argumentar que presenta índices de eficiencia de remoción mayores a 75% por lo que esta afirmación es validada	Verdadera
La fitorremediación con <i>Eichhornia Crassipes</i> influye en 75% en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio.	Se puede argumentar que presenta índices de eficiencia de remoción mayores a 75% por lo que esta afirmación es validada	Verdadera
La fitorremediación con <i>Azolla Filiculoides</i> influye en 60% en la remoción de metales pesados, a nivel de laboratorio.	Se puede argumentar que presenta índices de eficiencia de remoción mayores a 75% por lo que esta afirmación es validada	Verdadera

## V. DISCUSIÓN

Acorde con los resultados de la presente investigación, la concentración inicial de cadmio en el agua residual fue de 0.2637 mg/l, se expusieron las tres especies durante los 9 días y al finalizar se realizó los análisis correspondientes al agua residual de cada sistema se obtuvo el valor de 0.0152 mg/l en el sistema donde se empleó la *Pistia Stratiotes*, 0.0260 mg/l en el sistema *Eichhornia Crassipes* y 0.0191 mg/l en el sistema de la *Azolla Filiculoides*. Las plantas macrófitas han demostrado ser eficientes en la remoción de metales pesados como cromo, mercurio, cadmio, plomo, zinc, cobre y arsénico (Hidalgo et al., 2005).

Los resultados de la investigación indican que la especie *Pistia Stratiotes* obtuvo un 94% de eficiencia en la remoción de cadmio en un tiempo de tratamiento de 9 días, similar a lo que menciona Gómez (2013) en su investigación la especie *Pistia Stratiotes* ha demostrado ser más eficiente en la remoción del cadmio en el agua residual y a los efectos fitotóxicos en tiempos de retención de 8 días, debiéndose a su capacidad de adaptación en este tipo de medios. A diferencia de Pozo (2016) señala que la especie *Eichhornia Crassipes* tiene una mejor eficiencia en la remoción del cadmio con un 68% diferenciándose en 47% con respecto a la *Pistia Stratiotes*.

Cabe resaltar que, la *Azolla* tiene mejor eficiencia en la remoción del metal cadmio presente en el agua residual con 92.7% durante los 9 días de tratamiento, a diferencia de Choque (2010) que señala en cuya investigación la *Azolla Filiculoides* obtuvo 0.48% de eficiencia en la remoción de cadmio para 5 días, debiéndose a las diferentes concentraciones iniciales con lo que se empezó cada investigación.

Por otro lado, Rojas y Suyon (2020) en su investigación titulada Eficiencia de fitorremediación con jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*) para disminuir concentraciones de arsénico en aguas del centro poblado Cruz del Medano - Morrope – 2019, inicialmente expuso a

la *Eichhornia Crassipes* por 7 días obteniendo 34% de remoción, luego de otros 7 días más obtuvo el 60% de remoción, evidenciando que tuvo mayor eficiencia en la remoción de arsénico al cabo de 14 días, mientras que los resultados de la investigación indican que la *Eichhornia Crassipes* presenta un 84.7% de remoción de arsénico durante 9 días.

Por otro lado, los cambios morfológicos observados en la *Eichhornia Crassipes* presentan cambio de coloración en las hojas color verdosas a hojas amarillas/ marrones y desprendimiento de algunas raíces al 5to días, mientras que otras raíces fueron creciendo en este medio y hubo un cambio de color marrón claro a marrón intenso, similar a lo que señala Gómez (2013) se evidenció a las 24 horas los efectos fitotóxicos, siendo el más notorio el desprendiendo de raíz, esto debiéndose a que la raíz tiene contacto directo con el medio contaminado.

De acuerdo con los análisis de concentración de metales pesados (cadmio y arsénico) realizado al tejido vegetal de cada muestra, se obtuvieron los siguientes resultados: 3.21 mg/kg, 3.10 mg/kg y 286.24 mg/kg para cadmio y 12.33 mg/kg, 3.42 mg/kg y 23.22 mg/kg para arsénico respectivamente, lo que confirma Banach et al. (2020) que la *Azolla Filiculoides* es una macrófita hiperacumuladora.

## VI. CONCLUSIONES

- La especie *Pistia Stratiotes* influyó significativamente en la remoción de metales pesados, pues fue eficiente en la remoción de los metales cadmio y el arsénico en aguas residuales, donde se obtuvo un 94% de eficiencia en la remoción de cadmio y un 89.5% de eficiencia en la remoción de arsénico, cabe resaltar que es una planta que se adapta rápidamente a este tipo de medios.
- La especie *Eichhornia Crassipes* influyó significativamente en la remoción del metal arsénico con una eficiencia de remoción del 84.7% mientras que en la remoción del metal cadmio obtuvo una eficiencia del 90%.
- La especie *Azolla Filiculoides* influyó significativamente en la remoción del metal arsénico con un 74%. Sin embargo, ha demostrado que es más eficiente que la especie *Eichhornia Crassipes* en la remoción del metal cadmio, con una eficiencia de remoción de 92.7%.
- Las tres especies de macrófitas *Pistia Stratiotes*, *Eichhornia Crassipes* y la *Azolla Filiculoides* han influido significativamente en la disminución de la concentración de metales pesados en el agua residual, con una eficiencia mayor al 70% en la remoción del metal arsénico y una eficiencia mayor al 90% en la remoción del metal cadmio.



## VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la utilización de las especies *Pistia Stratiotes*, *Eichhornia Crassipes* y la *Azolla* en pretratamientos de aguas residuales para la remoción de metales pesados como cadmio y arsénico por su alta eficiencia. Se desarrollan mejor en ambientes donde reciben energía solar directa.
- Se recomienda realizar ensayos a concentraciones diferentes como 0.2 mg/l, 0.5 mg/l, 2 mg/l con otros metales pesados como plomo, mercurio y cianuro para analizar la capacidad de eficiencia de la especie *Azolla Filiculoides*. También, realizar estos ensayos con los parámetros microbiológicos en aguas residuales.
- Se recomienda realizar ensayos con la *Azolla Filiculoides* con duraciones de tratamientos más largos como 30 días, 45 días a más, ya que se evidenció su eficiencia en periodos cortos.

## VIII. REFERENCIAS

- Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua [CIDTA]. (s.f.). *Aguas residuales*. <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/residuales.pdf>
- Arango, A. (2013). *Crisis mundial del agua. Producción + Limpia*, 8(2), 7-8. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-04552013000200001&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552013000200001&lng=en&tlng=es).
- Arias Martínez, S. A., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J. P., y y Hernández Ángel, M. L. (2010). *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. *Informador Tecnico*, 74.
- Banach, A., y Kuźniar, A. G. (2020). *Azolla filiculoides L. as a source of metal-tolerant microorganisms*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232699>
- Cai, T. y. (2013). *Recuperación de nutrientes de corrientes de aguas residuales por microalgas: estado y perspectivas*. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. páginas 360-369). DOI: 10.1016 / j.rser.2012.11.030
- Campbell, D., y Stanley, J. (2005). *Diseños experimentales y cuasiexperimentales en la investigación social*. Buenos Aires: Amorrortu.
- Canovas, F. (1993). *Principios Básicos de la Hidroponía. Aspectos comunes y Diferenciales delos cultivos con y sin suelo*. Curso Superior de Especialización, Instituto de EstudiosAlmerienses.
- Carbajal, A., Zapattini, C., y Quintero, C. (2018). *Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de aguas residuales en el municipio de Mizque, Bolivia*. *Diseño y Tecnología para el desarrollo*, 105.
- Carvajal, A. (2018). *Humedales Artificiales, una alternativa para ladepuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia*. <http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/download/3744/3830>
- Centro Regional de investigaciones científicas y tecnológicas. (2007). *Macrófitas*. Gobierno de Mendoza: [www.cricyt.edu.ar](http://www.cricyt.edu.ar)
- Davidson, N., y Finlayson, C. (2018). *Extent, regional distribution and changes in area of different classes of*.
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, R., y Acevedo, O. (2011). *Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. Tropical and subtropical agroecosystems*. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-04622011000200002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002)
- Edwards, C. (2000). *A handbook of constructed wetlands*. Obtenido de *Wetlands*: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.169.7471&rep=rep1&type=pdf>

- Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. (s.f.).  
<http://www.conabio.gob.mx/malezasdemEichhornia%20crassipesexico/pontederiaceae/eichhornia-crassipes/fichas/ficha.htm#3.%20Identificaci%C3%B3n%20y%20descripci%C3%B3n>
- EPA. (1993). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment*. A technology assessment. United States Environmental Protection Agency: [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(93\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0925-8574(93)90009-5)
- Fallis, A. (2013). *Manual De Tecnologías No Convencionales Para La Depuración De Aguas Residuales*. Journal of Chemical Information and Modeling.: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- FAO. (22 de marzo de 2017). *Las aguas residuales, una oportunidad desaprovechada*. <http://www.fao.org/news/story/es/item/853653/icode/>
- Faulwetter, J. L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M., Brisson, J., . . . Stein, O. (june de 2009). Microbial Processes Influencing Performance of Treatment Wetlands: A Review. *Ecological Engineering*, 35, 987–1004. Ecological Engineering: DOI:10.1016/j.ecoleng.2008.12.030
- Fernández, J. (2001). *Filtro autoflotante de macrofitas para la depuración de aguas residuales*. 171-180, 2001. 224, 225, 230, 232.
- Hernández, M. (2016). *Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México*. Internacional de Desarrollo Regional Sustentable , 1-12.
- Hidalgo, J., Montano, J., y Estrada, M. (2005). *Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. Theoria. 14:17-25, 2005. 224, 227, 236, 237.
- Humedales, C. d. (2018). *Global Wetland Outlook: State of the world's wetlands and their services to people*. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.: [https://researchoutput.csu.edu.au/ws/portalfiles/portal/29203717/29203696\\_Published\\_report.pdf](https://researchoutput.csu.edu.au/ws/portalfiles/portal/29203717/29203696_Published_report.pdf)
- INVASORAS, L. M. (s.f.). *Datos básicos de la Azolla spp.* [http://www.lifemedwetrivers.eu/sites/default/files/documentos/02\\_azolla\\_spp.pdf](http://www.lifemedwetrivers.eu/sites/default/files/documentos/02_azolla_spp.pdf)
- Kadam, S., Chandanshive, V., Rane, N., Patil, S., Gholave, A., Khandare, R., y Govindwar, S. (2018). *Phytobeds with Fimbristylis dichotoma and Ammannia baccifera for treatment of real textile effluent: An in situ treatment, anatomical studies and toxicity evaluation*. Environmental Research: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.09.009>
- Kadlec, R., y Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands*. Boca Raton, Florida.: 2 ed. CRC Press.
- León, B., y Young, K. (1996). *Aquatic plants of Perú: diversity, distribution and conservation*. Biodiversity and Conservation.

- León, B.; Young, K.; Cano, A. (1997). *Fitogeografía y Conservación de la Costa Central del Perú. Estudios Sobre Diversidad y Ecología de plantas*. En Memorias del II Congreso Ecuatoriano de Botánica realizado en la Pontificia Universidad católica de Ecuador, Quito (págs. 129-142.).
- Martelo, J., y Lara, J. (2012). *Floating macrophytes on the wastewater treatment: a state of the art review*. Ingeniería y Ciencia.
- Mayes, W., Batty, L., Younger, P., Jarvis, A., Kőivc, M., Vohlac, C., y Mander, U. (2009). *Wetland treatment at extremes of pH: A review*. Science of The Total Environment: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.045>
- Mero, M., Pernía, B., Ramirez, N., Bravo, K., Ramirez, L., Larreta, E., y Egas, F. (2019). *Concentration Of Cadmium In Water, Sediments, Eichhornia Crassipes And Pomacea Canaliculata In The Guayas (Ecuador) River And Tributaries*. Revista internacional de contaminación ambiental.
- Metcalf, E. (1985). *Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Barcelona: Labor, S.A.
- Montengro-Rosero, K., Fernández, L., Villamar-Ayala, C., y Espinoza-Montero, P. (2019). *CONSTRUCTED WETLANDS AND MICROBIAL FUEL CELLS AS INDIVIDUAL AND COMBINED SYSTEMS FOR WASTEWATER TREATMENT: A REVIEW*. <https://doi.org/10.26807/ia.v7i2.100>
- Naciones, W. P. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. UNESCO.
- Núñez, R. A., Meas, Y., Olgún, E., y Ortega, R. (2004). *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. 69-82. [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/CORE\\_2013/Actividad\\_7.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/CORE_2013/Actividad_7.pdf)
- Núñez, R., Y, M., Ortega, R., y Olgún, E. (2004). *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. Biotecnología y biología molecular*. Revista Ciencia, 69-82.
- Ñique, M. (2004). *Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Perú*. Obtenido de Sociedad Peruana de: [http://www.geocities.com/sociedadpga/publicaciones/anoInro1/humedales\\_tratamiento\\_aguas.htm](http://www.geocities.com/sociedadpga/publicaciones/anoInro1/humedales_tratamiento_aguas.htm)
- ORGANISMO DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN [OEFA]. (abril de 2014). [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827)
- ORGANISMO DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN [OEFA] (2016). <http://www.oefa.gob.pe/wp-content/uploads/2016/10/1.-Fiscalizaci%C3%B3n-ambiental-vinculada-a-las-aguas-residuales.pdf>
- Orozco, C., Pérez, A., Gonzáles, M. N., Rodríguez, F., y Alfayate, J. (2005). *Contaminación Ambiental. Una visión desde la química*. Thomson Editoriales Spain Paraninfo, S.A.

- Pardo, T. (2019,02,01). *Lo que arrojó el informe más detallado sobre humedales en el mundo*. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/el-estado-actual-de-los-humedales-en-el-mundo-y-sitios-ramsar-277732>
- Paucar, F., y e Iturregui, P. (2020). *Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú*. South Sustainability, 10.21142/SS-0101-2020-004.
- Plantas macrófitas. (2017). <https://www.floresyplantas.net/plantas-macrofitas/>
- Quintero, J. (2014). *Pilot Assessment Flow Wetlands and Type Horizontal Surface ilot Assessment Flow Wetlands and Type Horizontal Surface*. Ingenium, 85-112.
- Ramsar, S. d. (2016). *Introducción a la convención de los humedales*. Suiza: Editorial interno (5 ed.).
- Romero, J. (1999). *Calidad del agua*. México D.F.: Alfaomega.
- Romero, J. (1999). *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. México: Alfaomega.
- Saba, B., Khan, M., Christy, A., y Veno, B. (2018). *Microbial phyto-power systems – A sustainable integration of phytoremediation and microbial fuel cells*. Bioelectrochemistry,,: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.12.005>
- Saeed, T., M., y Sun, G. (2018). *A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media*. J. Environ Manage, 112, 429–448.
- Samboni, N., Carvajal, Y., y Escobar, J. (2007). *A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators*. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttextpid=S0120-56092007000300019](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttextpid=S0120-56092007000300019)
- Sampieri, R.; Fernandez, C.; Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Sánchez del C. F. y Escalante, R. (1998). *Un sistema de producción de plantas. Hidroponía principios y métodos de cultivo*. Universidad Autónoma Chapingo. 3 Edición.Chapingo, México.
- Schuyt, K. (2005). *Economic consequences of wetland degradation for local populations in Africa*. Ecological Economics, 53(2), 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.08.003>
- Segura-Muñoz, S., Beltramini, T., Takayanagui, A., Hering, S., y Cupo, P. (2003). *Metales pesados en agua de bebederos de presión*. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttextpid=S0004-06222003000100009](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttextpid=S0004-06222003000100009)

- Shi, Y., Yang, X., Ning, X., y Yang, Q. (2018). *Research progress of microbial fuel cell and constructed wetland coupling system*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (pág. 199).
- SINIA. (2017). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM .- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. Ministerio del Ambiente. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>
- Solms. (1883). *Eichhornia crassipes*. <https://plants.jstor.org/compilation/Eichhornia.crassipes>
- Sun, C., Zhen, L., y Giashuddin Miah, M. (2017). *Comparison of the ecosystem services provided by China's Poyang Lake wetland and Bangladesh's Tanguar Haor wetland*. Ecosystem Services, 26, 411–421.
- USEPA. (1988). *Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. <https://doi.org/EPA/625/1-88/022>
- Verdejo, E., Palmerín, J., Aibar, J., Cirujeda, A., Taberner, A., y Zaragoza, C. (2006). *El lirio de Agua Eichhornia crassipes*. Plantas Invasoras. Ministerio de Agricultura.
- Wondie, A. (2018). *Ecological conditions and ecosystem services of wetlands in the Lake Tana Area, Ethiopia*. En *Ecohydrology y Hydrobiology* (págs. 18(2), 231–244).
- World Health Organization, W. (2018). *Arsénico*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic#:~:text=El%20ars%C3%A9nico%20est%C3%A1%20presente%20de,alimentos%20y%20regar%20cultivos%20alimentarios>.



## Anexo B: Certificado de identificación botánica

### CERTIFICADO DE IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA

El que suscribe, JAZIEL MARTÍN BLANCO OBREGÓN, Biólogo Identificado con DNI 40031045, con número de colegiatura en el Colegio de Biólogos del Perú 6915, certifica que:

A solicitud de la Srta. Jeritza Hellen Cuba Huamani, identificada con DNI 70600217, se ha procedido a identificar una muestra botánica correspondiente con:

<u>NOMBRE COMÚN</u>	<u>NOMBRE CIENTÍFICO</u>
• Lechuguilla de agua (muestra entera)	<i>Pistia stratiotes</i> (Araceae)

Se expide el presente certificado a solicitud de la Srta. Jeritza Hellen Cuba Huamani, para los fines que estime conveniente.

Lima, 02 de febrero de 2022.



Jaziel Martín Blanco Obregón  
BIÓLOGO  
C.B.P. 6915



**CERTIFICADO DE IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA**

El que suscribe, JAZIEL MARTÍN BLANCO OBREGÓN, Biólogo, Identificado con DNI 40031045, con número de colegiatura en el Colegio de Biólogos del Perú 6915, certifica que:

A solicitud de la Srta. Jeritza Hellen Cuba Huamani, identificada con DNI 70600217, se ha procedido a identificar una muestra botánica correspondiente con:

NOMBRE COMÚN

NOMBRE CIENTÍFICO

Jacinto de agua (muestra entera)

*Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae)

Se expide el presente certificado a solicitud de la Srta. Jeritza Hellen Cuba Huamani, para los fines que estime conveniente.

Lima, 02 de febrero de 2022.



Jaziel Martín Blanco Obregón  
BIÓLOGO  
C.B.P. 6915

### CERTIFICADO DE IDENTIFICACIÓN BOTÁNICA

El que suscribe, JAZIEL MARTÍN BLANCO OBREGÓN, Biólogo Identificado con DNI 40031045, con número de colegiatura en el Colegio de Biólogos del Perú 6915, certifica que:

A solicitud de la Srta. Jeritza Hellen Cuba Huamani, identificada con DNI 70600217, se ha procedido a identificar una muestra botánica correspondiente con:

<u>NOMBRE COMÚN</u>	<u>NOMBRE CIENTÍFICO</u>
• Helecho de agua (muestra entera)	<i>Azolla filiculoides</i> (Azollaceae)

Se expide el presente certificado a solicitud de la Srta. Jeritza Hellen Cuba Huamani, para los fines que estime conveniente.

Lima, 02 de febrero de 2022.



Jaziel Martín Blanco Obregón  
BIÓLOGO  
C.B.P. 6915

## Anexo C: Panel Fotográfico

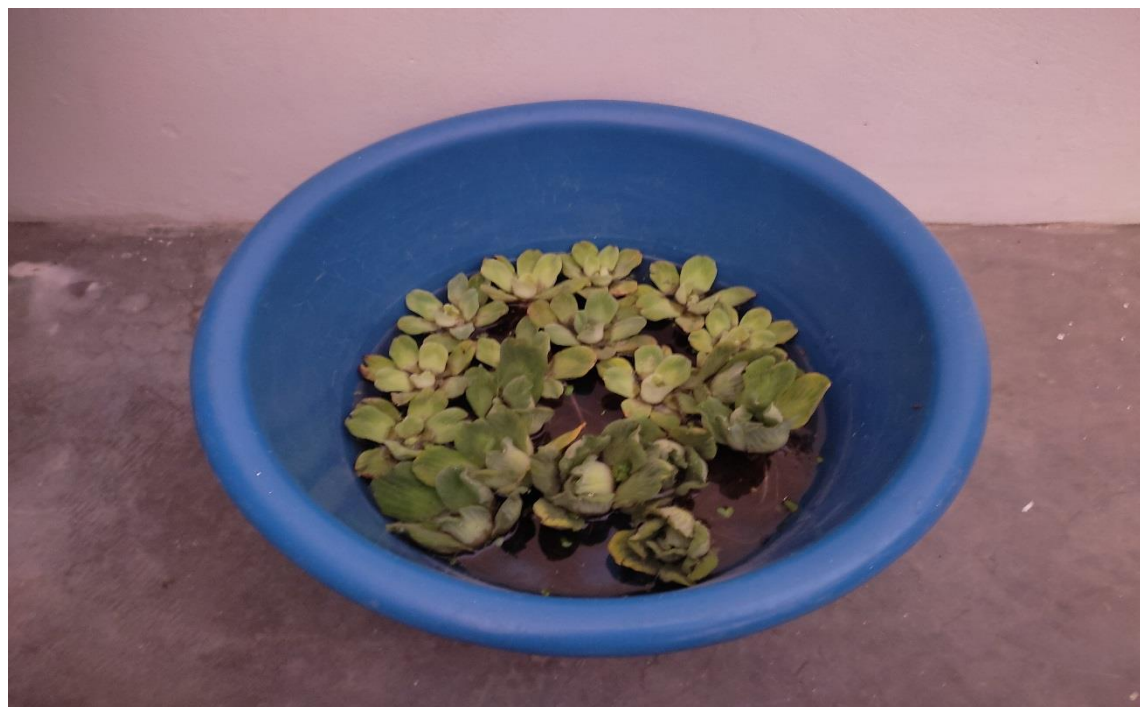
### Figura 20

*Aclimatación de la especie Eichhornia Crassipes*



### Figura 21

*Aclimatación de la especie Pistia Stratiotes*





**Figura 22**

*Aclimatación de la Azolla Filiculoides*

**Figura 23**

*Cambio morfológico de la especie Eichhornia Crassipes después de la exposición a los metales pesados*



**Figura 24**

*Cambio morfológico de la especie Pistia Stratiotes después de la exposición a los metales pesados*

**Figura 25**

*Cambio morfológico de la especie Azolla Filiculoides después de la exposición a los metales pesados*

