





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Título:**

“Evaluación de la Capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio en laboratorio.”

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental**

**Autores:**

Brando Marcelo, Chavarrea Macas  
Jenny Magaly, Aguaisa Tamay

**Tutor:**

Ing. Ana Belén Mejía Pérez Msc.

Riobamba – Ecuador, 2021

© 2021, Brando Marcelo Chavarrea Macas y Jenny Magaly Aguaisa Tamay

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Brando Marcelo Chavarrea Macas y Jenny Magaly Aguaisa Tamay, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como sus autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Universidad Nacional de Chimborazo.

Riobamba, 17 de Diciembre de 2021

**Brando Marcelo Chavarrea Macas**

**060581945-7**

**Jenny Magaly Aguaisa Tamay**

**220010284-2**



## DICTAMEN FAVORABLE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**Facultad:** Ingeniería  
**Carrera:** Ingeniería Ambiental

### 1. DATOS INFORMATIVOS DOCENTE TUTOR/MIEMBRO

**Apellidos:** Mejía Pérez  
**Nombres:** Ana Belén  
**Cedula/Pasaporte:** 0603877499  
**Tutor/Miembro:** Tutor

### 2. DATOS INFORMATIVOS DEL ESTUDIANTE

**Apellidos:** Chavarrea Macas  
**Nombres:** Brando Marcelo  
**C.I / Pasaporte:** 060581945-7  
**Título del Proyecto de Investigación:** Evaluación de la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio en laboratorio.  
**Dominio Científico:** Hábitat sustentable y seguro para el desarrollo territorial  
**Línea de Investigación:** Medio Ambiente y biodiversidad

### 3. CONFORMIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Aspectos	Conformidad Si/No	Observaciones
1. Título	Si	
2. Introducción	Si	
3. Planteamiento del problema	Si	
4. Objetivos: General y Específicos	Si	
5. Estado del arte relacionado a la temática de investigación	Si	
6. Metodología	Si	
7. Resultados y discusión	Si	
8. Cronograma del trabajo investigativo	Si	
9. Bibliografía normas APA	Si	
10. Anexos	Si	

Fundamentado en las observaciones realizadas y el contenido presentado, **SI** es favorable el dictamen Proyecto de Investigación Escrito, autorizando su empastado.

Lugar y Fecha: Riobamba, 03 de diciembre de 2021.



Firmado electrónicamente por:  
**ANA BELEN  
MEJIA**

Ing. Ana Belén Mejía. MSC.  
**DOCENTE TUTOR**

## CERTIFICADO DEL TRIBUNAL

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: Evaluación de la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio en laboratorio.

**Presentado por:** Chavarrea Macas Brando Marcelo y Aguaisa Tamay Jenny Magaly

**Dirigido por:** Ing. Ana Belén Mejía Pérez M.Sc.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

Dra.Silvia Hipatia Torres Rodríguez PhD

\_\_\_\_\_  
Presidenta del Tribunal



Firmado electrónicamente por:  
SILVIA HIPATIA  
TORRES  
RODRIGUEZ

\_\_\_\_\_  
Firma

Ing. Ana Belén Mejía Pérez M.Sc.

\_\_\_\_\_  
Director del Proyecto



Firmado electrónicamente por:  
ANA BELEN  
MEJIA

\_\_\_\_\_  
Firma

Ing. Carla Fernanda Silva Padilla

\_\_\_\_\_  
Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente por:  
CARLA  
FERNANDA  
SILVA PADILLA

\_\_\_\_\_  
Firma

Ing. Maria Fernanda Rivera Castillo M.Sc

\_\_\_\_\_  
Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente por:  
MARIA FERNANDA  
RIVERA CASTILLO

\_\_\_\_\_  
Firma



## CERTIFICACIÓN

Que, **CHAVARREA MACAS BRANDO MARCELO** con CC: **060581945-7**, estudiante de la Carrera de **AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "Evaluación de la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio en laboratorio", que corresponde al dominio científico **HÁBITAT SUSTENTABLE Y SEGURO PARA EL DESARROLLO TERRITORIAL** y alineado a la línea de investigación **MEDIO AMBIENTE Y BIODIVERSIDAD**, cumple con el 2%, reportado en el sistema Anti plagio nombre del sistema, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 06 de diciembre de 2021



Firmado electrónicamente por:  
**ANA BELEN  
MEJIA**

Ing. Ana Belén Mejía M.Sc.  
**TUTOR**

## ***DEDICATORIA***

El presente trabajo está dedicado a las personas que amo, mi padre Marcelo y mi madre Elsy, mis hermanos y Johanna por acompañarme durante toda mi vida estudiantil apoyándome con sus palabras de aliento que a pesar de las adversidades me dan la fortaleza para seguir levantándome de cada caída, a no ceder ante las dificultades y dar mi mejor esfuerzo.

Brando Marcelo Chavarrea Macas

Dedico con todo mi corazón el presente trabajo a mis seres más queridos a mi padre Leonidas Aguaisa, mi madre Maruja Tamay a mis hermanas y hermano quienes han sido un pilar fundamental en mi vida en mi formación y me ha dado la fuerza suficientes su apoyo incondicional nunca me ha dejado sola en los buenos y como en los malos momentos por aconsejarme, por el cariño, por el respeto les dedico este logro.

Jenny Magaly Aguaisa Tamay

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida, por la salud, el entendimiento y la fuerza para culminar mis estudios de manera satisfactoria.

Agradezco a mis amados padres Marcelo y Elsy por ser el pilar de mi esfuerzo por su ayuda en los momentos difíciles y por darnos buenos momentos que perduraran en nuestro recuerdo.

Agradezco a la Universidad Nacional de Chimborazo, ya que a través de los valores y conocimiento impartidos a través de los docentes complementaron a mi formación académica en especial a la Ingeniera Ana Belén Mejía por colaborarnos con su paciencia y responsabilidad para la culminación de este trabajo investigativo.

Brando Marcelo Chavarrea Macas.

Mi agradecimiento va dirigido primero a Dios por darme la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida, a mi Padres Leónidas Aguaisa y Maruja Tamay quienes me ha apoyado en cada etapa de mi vida me han dado la fuerza para seguir luchando por mis sueños, también a la empresa Construcciones de Servicios Generales “Aguaisa-David” C.A, por haberme brindado su apoyo en la elaboración del presente trabajo de tesis.

Jenny Magaly Aguaisa Tamay

## Índice de contenido

Índice de tablas .....	VI
Índice de Figuras .....	VII
Índice de imágenes .....	VIII
RESUMEN.....	XI
CAPÍTULO I.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	3
1.2.1. Justificación y problemática .....	3
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos .....	5
CAPÍTULO II.....	6
2.1. MARCO TEÓRICO .....	6
2.2. Metales pesados: Características generales .....	6
2.2.1. Movilización de Metales Pesados.....	7
2.2.2. Oxido reducción rédox.....	7
2.2.3. Sorción-Desorción .....	8
2.2.4. Cadmio: Características generales .....	8
2.2.7. Efectos a la salud causados por la exposición al cadmio.....	9
2.3. Biorremediación.....	10
2.3.1. Fitorremediación.....	10
2.3.2. Mecanismos de la Fitorremediación.....	11
2.3.2.1. Fitoextracción .....	11
2.3.2.2. Fitoestabilización .....	12
2.3.2.3. Fitodegradación .....	12
2.3.2.4. Rizofiltración .....	12

2.3.2.5.	Fitovolatilización .....	12
2.4.	Potencial de fitorremediación .....	12
2.4.1.	Técnicas para la cuantificación de metales pesados .....	13
2.5.	Especies utilizadas para la fitorremediación.....	14
2.5.1.	<i>Brassica rapa</i> .....	14
2.5.2.	<i>Raphanus sativus</i> .....	15
CAPÍTULO III.....		38
3.	METODOLOGÍA .....	17
3.1.	Tipo y diseño de la investigación .....	17
3.2.	Unidad de análisis .....	17
3.3.	Población de estudio .....	17
3.4.	Tamaño de la muestra .....	17
3.5.	Técnica de recolección de datos .....	18
3.5.1.	Recopilación y revisión documental.....	18
3.5.2.	Toma de muestras .....	18
3.5.3.	Muestreo de suelo .....	18
3.6.	Ensayo de campo potencial fitorremediador.....	19
3.6.1.	Montaje del ensayo .....	19
3.6.2.	Sistema de plantación para el estudio .....	20
3.6.2.1.	Preparación del sustrato para la siembra.....	20
3.6.2.2.	Ubicación del experimento .....	20
3.6.2.3.	Plantación de las especies en las jardineras .....	20
3.6.2.4.	Determinación de concentraciones de cadmio en la muestra de suelo ..	21
3.6.2.5.	Conservación de la muestra y almacenamiento .....	21
3.6.2.6.	Administración del metal Cd en las jardineras .....	22
3.7.	Técnica de interpretación y análisis de la información.....	22
3.7.1.	Análisis fisicoquímico del suelo .....	22
3.8.	Análisis químico .....	23
3.8.1.	Análisis foliar de la muestra vegetal.....	23
3.8.2.	Muestra de suelo .....	23
3.8.3.	Determinación de Cd mediante absorción atómica Espectrofotometría	24

3.8.4.	Análisis estadístico .....	25
3.8.5.	Diseño experimental .....	26
3.9.	Evaluación de fitoextracción .....	26
3.9.1.	Cuantificación de la eficiencia de fitoextracción.....	26
3.9.2.	Factor de bioconcentración (BCF).....	27
3.9.3.	Factor de translocación (TF).....	28
3.9.4.	Índice de germinación.....	29
CAPÍTULO IV.....		52
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	30
4.2.	Resultados de las propiedades físicas químicas del suelo .....	31
4.3.	Análisis químico de concentración de cadmio .....	33
4.3.1.	Eficiencia en la remoción del cadmio en el suelo.....	33
4.4.	Análisis de la fisiología vegetal .....	37
4.4.1.	Crecimiento de la planta .....	37
4.4.2.	Índice de germinación.....	39
4.4.3.	Número de hojas .....	42
4.4.4.	Área foliar .....	43
4.4.5.	Longitud de la planta .....	44
4.5.	Eficiencia de la fitoextracción .....	46
4.5.1.	Factor de bioconcentración (BCF).....	47
4.5.2.	Factor de Translocación (TF).....	48
CAPÍTULO V.....		72
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
5.1.	Conclusiones .....	50
4.2.	Recomendaciones .....	52
CAPÍTULO VI.....		76
6.	BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS .....	53
6.1.	Referencias bibliográficas .....	53
6.2.	Anexos.....	59

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b>	Taxonomía de la <i>Brassica rapa</i> .....	15
<b>Tabla 2.</b>	Clasificación taxonómica del <i>Raphanus sativus</i> .....	16
<b>Tabla 3.</b>	Coordenadas y puntos de muestreo .....	17
<b>Tabla 4.</b>	Etiquetado de las concentraciones en el diseño experimental .....	26
<b>Tabla 5.</b>	Resumen de las propiedades fisicoquímicas iniciales del suelo .....	31
<b>Tabla 6.</b>	Resumen de las propiedades fisicoquímicas finales del suelo .....	32
<b>Tabla 7.</b>	Resultados del porcentaje de remoción de Cd en el suelo .....	33
<b>Tabla 8.</b>	Resumen de la eficiencia de la planta en la remoción de cadmio .....	35
<b>Tabla 9.</b>	Resumen del índice de germinación por tratamiento y por planta.....	39
<b>Tabla 10.</b>	Resumen de BCF raíz y BCF aérea .....	47
<b>Tabla 11.</b>	Resultados del factor de translocación (TF) .....	48
<b>Tabla 12.</b>	Resumen de medidas de las partes de las plantas del testigo .....	67
<b>Tabla 13.</b>	Resumen medidas partes de las plantas del tratamiento S1r .....	68
<b>Tabla 14.</b>	Resumen medidas partes de las plantas del tratamiento S2r .....	69
<b>Tabla 15.</b>	Resumen de medidas partes de las plantas del tratamiento S3r .....	70
<b>Tabla 16.</b>	Resumen del cálculo de la densidad aparente y real .....	71
<b>Tabla 17.</b>	Resumen de evaluación de la capacidad fitoextractora.....	71
<b>Tabla 18.</b>	Resumen de datos y cálculo de la eficiencia de las plantas.....	71
<b>Tabla 19.</b>	Resumen fisiología del rábano .....	72
<b>Tabla 20.</b>	Datos elongación radicular de la especie <i>Brassica rapa</i> .....	75
<b>Tabla 21.</b>	Datos de elongación radicular de la especie <i>Raphanus sativus</i> .....	76

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Croquis muestreo aleatorio simple.....	19
<b>Figura 2.</b> Dimensiones de la jardinera y cubeto .....	20
<b>Figura 3.</b> Calibración para Cd AAS en LabSu .....	25
<b>Figura 4.</b> Gráfico de barras de la remoción de Cd en el suelo.....	34
<b>Figura 5.</b> Curva del porcentaje de remoción de Cd en el suelo.....	34
<b>Figura 6.</b> Concentración de cadmio en la parte aérea y la parte de la raíz del rábano ...	35
<b>Figura 7.</b> Comparativa de la eficiencia en la planta .....	36
<b>Figura 8.</b> Diseño crecimiento por tratamiento.....	38
<b>Figura 9.</b> Análisis de normalidad RDUO Crecimiento (cm).....	38
<b>Figura 10.</b> Índice de germinación por planta.....	40
<b>Figura 11.</b> Elongación radicular del rábano .....	41
<b>Figura 12.</b> Elongación radicular del nabo silvestre .....	42
<b>Figura 13.</b> Media del número de hojas por tratamiento.....	43
<b>Figura 14.</b> Promedio del área foliar por tratamiento .....	44
<b>Figura 15.</b> Media de la longitud por tratamiento.....	45
<b>Figura 16.</b> Normalidad de los datos de longitud.....	45
<b>Figura 17.</b> Comparativa del Crecimiento por la eficiencia de cada tratamiento .....	46
<b>Figura 18.</b> Factor de Bioconcentración de la raíz y la parte aérea .....	48
<b>Figura 19.</b> Factor de translocación por tratamiento comparativa.....	49

## Índice de imágenes

<b>Imagen 1.</b> Sitio de muestreo .....	84
<b>Imagen 2.</b> Dueños de la finca .....	84
<b>Imagen 3.</b> Cuarteo para la muestra a analizar .....	84
<b>Imagen 4.</b> Conservación de la muestra .....	84
<b>Imagen 5.</b> Semilla de <i>Raphanus sativus</i> .....	84
<b>Imagen 6.</b> Recolección de semillas de <i>Brassica rapa</i> .....	84
<b>Imagen 7.</b> Secado de las muestras de suelo .....	85
<b>Imagen 8.</b> Preparación de la muestra previo al análisis.....	85
<b>Imagen 9.</b> Homogenizado en la digestión de suelos.....	85
<b>Imagen 10.</b> Digestion de la muestra para el análisis.....	85
<b>Imagen 11.</b> Filtrado del digesto previo al análisis. ....	85
<b>Imagen 12.</b> Espectrofotometro Thermo SOLAAR iCE 3000 series.....	85
<b>Imagen 13.</b> Secado de la muestra para la determinación de sustancia seca. ....	86
<b>Imagen 14.</b> Reposo de la muestra en el desecador .....	86
<b>Imagen 15.</b> Balanza analítica para pesaje .....	86
<b>Imagen 16.</b> Registro de datos y resultados .....	86
<b>Imagen 17.</b> Reactivo cloruro de cadmio monohidratado.....	86
<b>Imagen 18.</b> Pesaje del contaminante.....	86
<b>Imagen 19.</b> homogenización de la muestra en mortero .....	87
<b>Imagen 20.</b> Confirmacion de la cantidad de ppm del contaminante por EAA.....	87
<b>Imagen 21</b> Prueba de textura de la muestra de suelo.....	87
<b>Imagen 22.</b> Tabla de Munsell para color de la muestra.....	87
<b>Imagen 23.</b> Secado de las muestras vegetales .....	87
<b>Imagen 24.</b> Triturado de la muestra vegetal en mortero .....	87
<b>Imagen 25.</b> Muestras listas para el analisis de cadmio en la planta.....	88
<b>Imagen 26.</b> Curva de calibración del espectrofotómetro .....	88

<b>Imagen 27.</b> Jardinera dimensión 100x25x25 cm .....	88
<b>Imagen 28.</b> Cubetos de recolección de infiltraciones .....	88
<b>Imagen 29.</b> Cubetos y jardineras con el contaminante .....	88
<b>Imagen 30.</b> Siembra de las especies vegetales.....	88
<b>Imagen 31.</b> Etiquetado de las muestras secas .....	89
<b>Imagen 32.</b> Medición de las partes de la especie <i>Raphanus sativus</i> .....	89
<b>Imagen 33.</b> Muestras de los tratamientos S1r, S2r y S3r.....	89
<b>Imagen 34.</b> Muestras vegetales de la parte aérea y la raíz.....	89
<b>Imagen 35.</b> Homogenización de la muestra vegetal .....	89
<b>Imagen 36.</b> Desarrollo foliar especie <i>Raphanus sativus</i> .....	89
<b>Imagen 37.</b> Secado al sol de la planta de rábano .....	90
<b>Imagen 38.</b> Cosecha de la especie <i>Raphanus sativus</i> .....	90
<b>Imagen 39.</b> Experimento 60 días después de la siembra .....	90
<b>Imagen 40.</b> Preparación para el sacado.....	90
<b>Imagen 41.</b> Laminado del bulbo para el sacado .....	90
<b>Imagen 42.</b> Semillas en la germinadora a 25°C .....	91
<b>Imagen 43.</b> Germinador <i>Brassica rapa</i> .....	91
<b>Imagen 44.</b> Germinador <i>Raphanus sativus</i> .....	91
<b>Imagen 45.</b> Prueba de germinación testigo <i>Brassica rapa</i> .....	91
<b>Imagen 46.</b> Prueba de germinación testigo <i>Raphanus sativus</i> .....	91
<b>Imagen 47.</b> Prueba de germinación S1r <i>Brassica rapa</i> .....	92
<b>Imagen 48.</b> Prueba de germinación S1n <i>Raphanus sativus</i> .....	92
<b>Imagen 49.</b> Prueba de germinación S2r <i>Brassica rapa</i> .....	92
<b>Imagen 50.</b> Prueba de germinación S2n <i>Raphanus sativus</i> .....	92
<b>Imagen 51.</b> Prueba de germinación S3r <i>Brassica rapa</i> .....	92
<b>Imagen 52.</b> Prueba de germinación S3n <i>Raphanus sativus</i> .....	92

## **Índice de Anexos**

Anexo 1. Certificados del Laboratorio Ambiental LABSU de la ciudad del coca.....	59
Anexo 2. Informes de resultados de análisis de laboratorio .....	60
Anexo 3. Tablas de cálculos de los resultados de laboratorio .....	67
Anexo 4. Análisis Estadístico en InfoStat .....	78
Anexo 5. Medios de verificación del cumplimiento en campo y laboratorio .....	84
Anexo 6. Mapas Elaborados .....	93

## RESUMEN

En Ecuador existe la problemática de la presencia de cadmio en los productos de exportación cuyas concentraciones exceden la normativa reglamentaria. Al superar el límite establecido en el CODEX alimentario se producen daños a la salud humana debido a los efectos tóxicos del metal en el organismo. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio a escala de laboratorio. El experimento se realizó en la ciudad del Coca de la provincia de Orellana manipulando una muestra representativa de suelo procedente de la finca cacaotera Richard Valdibiezo. El ensayo se efectuó en 4 jardineras con un volumen de 35700 cm<sup>3</sup>, empleando como contaminante al cloruro de cadmio monohidratado (CdCl<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O) en cuatro concentraciones (0ppm, 51.99 ppm, 99.56 ppm, 199.73 ppm). La cuantificación de cadmio en la planta y el suelo se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica al término de los 60 días después de la siembra (dds).

Los resultados finales mostraron que la especie *Brassica rapa* no se desarrolló en las jardineras pasado el tiempo de experimentación, mientras que la especie *Raphanus sativus* mostró tener eficiencia fitoextractora del metal cadmio. En la jardinera con suelo contaminado S1r se obtuvo el mejor resultado de fitorremediación con una eficiencia total de 20.31%. La especie vegetal es clasificada como excluyente del metal cadmio aplicando la fórmula del factor de bioconcentración (BCF) y se estableció que se da una translocación eficiente de los metales absorbidos por la raíz a los demás tejidos aplicando la fórmula del factor de translocación (TF).

Palabras Clave: *Brassica rapa*, *Raphanus sativus*, fitorremediación, fitorremediador, cadmio

## ABSTRACT

In Ecuador, there is the problem of the presence of cadmium in export products whose concentrations exceed the regulatory norm. When exceeding the limit established in the food CODEX, damage to human health occurs due to the toxic effects of the metal in the body. The research objective was to evaluate the phytoremediation capacity of two plant species, *Raphanus sativus* and *Brassica rapa* in contaminated soils with cadmium on a laboratory scale. The experiment was carried out in the city of Coca in the province of Orellana, manipulating a representative sample of ground from the Richard Valdibiezo cocoa farm. The test was carried out in 4 planters with a volume of 35700 cm<sup>3</sup>, using as pollutant cadmium chloride monohydrate (CdCl<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O) in four concentrations (0ppm, 51.99 ppm, 99.56 ppm, 199.73 ppm). The cadmium quantification in the plant and the soil was carried out by atomic absorption spectrophotometry at the end of 60 days after sowing (dds). The final results showed this, the *Brassica rapa* species did not develop in the planters after the experimentation time, while the *Raphanus sativus* species showed phytoextraction efficiency of metal cadmium. In the planter with contaminated soil S1r, the best phytoremediation result was obtained with a total efficiency of 20.31%. The plant species are classified as excluding cadmium metal by applying the bioconcentration factor (BCF) formula and it was established that an efficient translocation of the metals absorbed by the root occurs to the other tissues by applying the translocation factor (TF) formula.

**Key Words:** Brassica rapa, Raphanus sativus, phytoremediation, phytoremediator, cadmium.

DARIO  
JAVIER  
CUTIOPA  
LA LEON

Firmado digitalmente por  
DARIO JAVIER  
CUTIOPALA LEON  
Fecha: 2021.12.09  
09:39:29 -05'00'

Reviewed by:  
Lic. Dario Javier Cutiopala Leon  
**ENGLISH PROFESSOR**  
c.c. 0604581066

## CAPÍTULO I.

### 1. INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país mayoritariamente agrícola siendo esta una fuente importante de recursos económicos para la población por su amplia demanda en el mercado internacional destacando el cacao, el café y el banano. Existen exigencias en cuanto a la calidad de los productos alimenticios específicamente estos deben estar libres de metales pesados para evitar su acción tóxica en los organismos vivos. Ecuador es un país que se encuentra expuesto a este tipo de contaminación de forma natural por la meteorización de la roca madre y de forma artificial por las actividades antrópicas como el uso de fitosanitarios químicos para el control de plagas, actividades mineras y la industria, uno de los contaminantes más preponderantes en los suelos según investigaciones de autores como Carrera (1994), Carrillo (2003), INIAP-PROMSA (2003) e INIAP (2009), es el cadmio el cual es el componente principal de algunos fertilizantes fosfatados que son utilizados en la agricultura, se ha convertido en uno de los elementos de contaminación ambiental más graves y perjudiciales para la salud y el ambiente, generalmente se puede encontrar en organismos comestibles como los crustáceos y algunos hongos según el Codex Alimentarius (2013).

Cabe resaltar que según estudios realizados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Organización Mundial de la Salud (2020) los elementos como el cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni) y plomo (Pb), si se encuentran presentes en cantidades elevadas pueden resultar tóxicos para los organismos vivos e incluso pueden producir afecciones a la salud desde las más leves como mareos y náusea hasta las más graves como enfermedades renales y hepáticas, lo cual enmarca una discusión en materia ambiental y de salud humana. Por ello, en las últimas décadas se han implementado sistemas de tratamiento eficientes y de bajo costo en la remoción de metales pesados, por ejemplo la fitorremediación.

Según Hoyos & Guerrero (2013) en el suelo, el plomo y el cadmio pueden quedar retenidos por procesos de adsorción, complejación y precipitación, teniendo en cuenta que la función más importante del suelo es su productividad que es la base de supervivencia de los seres humanos, cabe destacar que tiene especial importancia en el sector agrícola, debido a su valor económico y alimenticio.

En el capítulo II, se presenta el marco teórico, en el cual se ha considerado los

antecedentes de la investigación, las bases teóricas y conceptuales, definición de términos básicos, hipótesis de la investigación e identificación de variables.

En el capítulo III. El diseño metodológico está considerado tipo y nivel de investigación, métodos de investigación, diseño de la investigación, técnicas de muestreo, técnicas e instrumentos de recopilación de datos, técnicas de procesamiento de datos.

En el capítulo VI, se muestra el análisis de resultados, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, anexos

Por lo tanto, la presente investigación surge como una propuesta que busca evaluar la eficiencia fitorremediadora en suelos contaminados con cadmio a escala de laboratorio utilizando especies vegetales como el *Raphanus Sativus* y la *Brassica rapa*, especies alimenticias de ciclo corto consideradas para el tratamiento de suelos contaminados según estudios como el de Delgadillo-López *et al.* (2011) enmarca un listado de especies vegetales estudiadas para la remediación de suelos contaminados en las que se encuentran las plantas propuestas para el desarrollo de la investigación, para ello la propuesta es diseñar un ensayo a base de 4 jardineras con determinadas concentraciones del contaminante a condiciones constantes de horas de sol, temperatura y humedad.

## **1.1. Planteamiento del problema**

### ***1.1.1. Justificación y problemática***

En Ecuador existen zonas agrícolas con la presencia de metales pesados que ocasionan secuelas negativas a la salud y al ambiente, según varios estudios se han evidenciado la presencia de elementos como el cadmio. En las fincas cacaoteras de Santa Rosa y el Naranjal en la parte litoral del Ecuador se ha encontrado una concentración de 1 ppm de cadmio (Cd) siendo una cantidad mayor a la permitida según la FAO/WHO (2009) que establece el límite de cadmio aceptados por la legislación internacional es de 1 mg/kg, en Europa los niveles máximos permitidos para cadmio en chocolate es de 0.1 a 0.3 mg/kg.

Los niveles altos de concentración de metales pesados en los suelos ecuatorianos se atribuyen al agua destinada para el riego agrícola como el caso que reportó el Municipio de Guayaquil acerca de los ríos Gala, Chico, Siete y Teguel contaminados por la actividad minera preponderante en la zona del Cantón Camilo Ponce de la provincia del Azuay según enmarca el artículo presentado en el XII congreso Ecuatoriano de la ciencia del suelo de Mite *et al.* (2010).

La contaminación por metales pesados se ha convertido en una preocupación constante a nivel mundial, las actividades industriales y los fitosanitarios usados en la agricultura contribuyen en gran medida a esta problemática, que ocasiona contaminación en grandes extensiones de suelos y agua según Alaboudi *et al.* (2018). La preocupación ambiental radica en que los metales pesados no se degradan, son de difícil remoción y se acumulan en cultivos usados para la alimentación humana y animal.

El cadmio, es uno de los metales pesados encontrados en los suelos y el fruto de uno de los principales productos de exportación del Ecuador como es el cacao, el cual se cultiva en la costa del país, las estribaciones de las montañas de los Andes y la Amazonía (Cerrón *et al.*, 2020).

En enero del 2019 la Unión Europea quien es uno de sus principales destinos del cacao ecuatoriano endureció los controles y redujo los límites permisibles de cadmio a 0.8 mg/kg, lo que podría ocasionar limitaciones para que el cacao ecuatoriano entre al mercado europeo sino cumple con los controles establecidos (Díaz *et al.*, 2018).

En Ecuador desde el año 2015 se cuenta con el acuerdo ministerial 097 que es una reforma del libro VI del texto unificado de legislación secundaria del ministerio de ambiente (TULSMA) que en el anexo 2: norma para calidad ambiental del recurso suelo y criterios de

remediación para suelos contaminados, se establecen los criterios de la calidad del suelo además de su remediación en el caso de contaminación por orígenes antrópicos.

Sanz (2015) especifica que la fitorrecuperación, como un método emergente que utiliza la capacidad de ciertas especies vegetales para sobrevivir en ambientes contaminados con metales pesados y sustancias orgánicas; a la vez tienden a extraer contaminantes, acumularlos en sus tejidos, inmovilizarlos en sus raíces o transformarlos mediante procesos biológicos. Las plantas utilizadas en la fitorremediación presentan mecanismos constitutivos y adaptados para tolerar o acumular un elevado contenido de metales en su rizósfera y en sus tejidos.

Según Delgadillo *et al.* (2011) el éxito de este tratamiento depende de la selección de las especies vegetales apropiadas para recuperar un suelo específico, así como de una adecuada elección de enmiendas (materia orgánica, agentes quelantes, cal, etc.).

Buscando una solución para tratar esta problemática, se ha buscado alternativas de biorremediación y remoción de cadmio entre dos especies vegetales de la familia Brassicaceae reportadas como buenas acumuladoras de cadmio en sus estructuras por presentar características como raíz axonomorfa y buena adaptabilidad a distintos tipos de suelos.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizarán las especies *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* con la finalidad de determinar la eficiencia fitorremediadora específicamente en la remoción de cadmio del suelo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* en suelos contaminados con cadmio en laboratorio.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Cuantificar el porcentaje de remoción de cadmio en el suelo por medio de la medición de la concentración del metal pesado usando espectrometría de absorción atómica.
2. Medir la bioacumulación de cadmio en los tejidos vegetales de las plantas fitorremediadoras.
3. Determinar la especie con mejor capacidad fitoextractora de cadmio, mediante la evaluación del mejor tratamiento aplicado.
4. Examinar la respuesta biológica del *Raphanus sativus* y *Brassica rapa*, a la exposición de cadmio mediante el análisis de su fisiología vegetal.

## CAPÍTULO II.

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Metales pesados: Características generales

Londoño *et al.* (2016) señala que los metales pesados en la tabla periódica, son elementos químicos con valores de densidad mayor a 4 g/cm<sup>3</sup>, t masa y peso atómico por encima de 20 unidades de masa atómica unificada (u), y presentan toxicidad en concentraciones bajas. Existen alrededor de 70 elementos metálicos, de los cuales 59 son considerados metales pesados por su elevado peso atómico superior a 20 u, cabe destacar que entre ellos se encuentran 17 elementos que pueden ser tóxicos a una elevada concentración. Los elementos traza son esenciales en cantidades bajas para el desarrollo de animales y plantas, pueden resultar tóxicos si su concentración es relativamente alta en el organismo por tiempo prolongado.

Rodríguez-Heredia (2017) describió que los metales pesados pueden ser micronutrientes esenciales como el arsénico (As), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), selenio (Se), vanadio (V) y zinc (Zn). Los metales pesados no esenciales como el berilio (Be), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio(Sb), estaño (Sn) y titanio(Ti).

Londoño *et al.* (2016) señala que los metales pesados pueden tener origen natural como resultado de la meteorización del material parental, logran ser degradados por diferentes agentes físicos y químicos en tal forma que no perjudique a la vida incorporándose por distintos mecanismos de transporte hacia la cadena trófica, pero su origen más común es el antrópico relacionado a las actividades como la expansión urbana, el desarrollo industrial, la explotación minera, la agricultura y las relacionadas con la movilidad, los vehículos, las vías y los centros de servicio mecánico.

De acuerdo a su forma química los metales pueden encontrarse en el suelo como cationes (Ag<sup>+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>) por lo que pueden aparecer con varias formas químicas. La disponibilidad el Cr, Ni, Pb y Zn. Se encuentra en concentraciones en el rango de 1-1500 mg/kg el Co, Cu y As entre 0.1-250 mg/kg mientras que el Cd y Hg entre 0.01-2 mg/kg.

La vía de ingreso a los organismos vivos es por inhalación, ingestión y por vía

dérmica causan daños al organismo debido a que no pueden ser asimilados por el organismo vivo causando su bioacumulación especialmente en los tejidos. Muestra más gravedad dependiendo del tiempo de exposición y la cantidad de concentración del metal (Mejía *et al.*, 2013).

### **2.1.1. Movilización de Metales Pesados**

Los procesos de meteorización químicos y mecánicos generan una dinámica de los metales en el ambiente afectando la interacción de los sistemas atmosféricos, hidrosféricos en conjunto con la biosfera. Su disponibilidad y movilidad están sujetos a procesos de precipitación-disolución, complejación-disociación y sorción-desorción. Los factores externos como la energía solar, el ciclo hidrológico, la geomorfología del sitio y las propiedades del suelo influyen de forma directa en conjunto con las actividades antrópicas. Debe existir un periodo de tiempo prolongado bajo condiciones estables en el que puede alcanzar un equilibrio en el suelo por su capacidad de amortiguamiento. La interferencia del ser humano y sus diferentes actividades modifican de forma negativa la dinámica de los metales pesados provocando la degradación del suelo ( Huertos & Baena, 2008).

Violante *et al.* (2010) puntualizó que el movimiento de un metal no está atado a su naturaleza química, también depende de una serie de parámetros del suelo como el grado de acidez o alcalinidad, el contenido de materia orgánica, la cantidad de carbonatos, minerales presentes en la arcilla, en la capacidad de intercambio catiónica los cationes de cambio son igualmente utilizables dependiendo del mineral o minerales que lo forman como complejo de cambio, la permeabilidad y la actividad microbiana.

### **2.1.2. Oxido reducción rédox**

Violante *et al.* (2010) hace referencia a las transformaciones químicas en las que los electrones se transfieren al reactivo provocando cambios en su estado de oxidación, como resultado de un proceso en el que el agente oxidante recibe los electrones del agente reductor que da los electrones para la obtención del metal en su estado libre. Existen microorganismos capaces de alterar los metales tóxicos a partir de procesos microbiológicos que repercuten tanto a su movilidad como a la reducción de la toxicidad sujeta a las transformaciones biogeoquímicas.

### **2.1.3. Sorción-Desorción**

Según Mayoral *et al.* (2011) la materia orgánica es la responsable de la sorción de los metales, el comportamiento de los metales pesados durante el intercambio catiónico resulta ser estratificado esto se debe a la selectividad de la materia orgánica para formar estructuras en forma de esferas generando estructuras más complejas que evitan la pérdida de iones metálicos, su toxicidad se reduce y aumenta su pH.

La dinámica de los metales se ve afectada por la aceleración de los ciclos biogeoquímicos a causa de las actividades humanas, estas producen perturbaciones en el ambiente afectando directamente a la vida animal silvestre y las especies vegetales; estos procesos recaen en el consumo de materiales que contienen metales pesados como los desechos derivados de la actividad industrial así como la disposición final de estos residuos, los fertilizantes y pesticidas de la actividad agrícola. Produciendo su incorporación directa al suelo se acumulan en los tejidos de las plantas debido a que no se los pueden reducir, se incorporan a la cadena trófica y a los distintos ciclos (Madrigal *et al.*, 2008).

### **2.1.4. Cadmio: Características generales**

Es un elemento químico cuyo número atómico es el 48, su símbolo es Cd, tiene una masa atómica de 112,411 unidades de masa atómica unificada (u). Presenta características como; ser dúctil, un factor de corrosión bajo, considerado uno de los metales más contaminantes para los suelos ya que tiene una elevada movilidad y puede ingresar a los tejidos vivos por su característica de bioacumulación, se puede encontrar en forma disuelta en agua, formando parte de una estructura mineral e incorporado a las cuerpos vivos (Cachumba, 2012).

El cadmio no se encuentra en estado libre como elemento en la naturaleza pero se puede hallar formando diferentes compuestos en el ambiente producto de la actividad industrial que producen su liberación hacia la atmósfera, el agua y el suelo (Yassi *et al.*, 2002).

La fragmentación de rocas por la actividad minera libera gran cantidad de este elemento hacia las fuentes hídricas incorporándose a los ciclos geoquímicos y biológicos. Las partículas de cadmio en el aire pueden viajar largas distancias antes de caer sobre la tierra o el agua, y algunas de ellas pueden disolverse. Este metal se adhiere fuertemente a partículas de tierra (Barón, 2016).

### **2.1.5. Fuentes de emisión y aplicación del cadmio**

Rodríguez-Heredia (2017) relató cuales son las principales fuentes y aplicaciones del cadmio mostradas a continuación:

Baterías recargables Ni / Cd, incineradores municipales, fertilizantes fosfatados, detergentes y productos refinados del petróleo, pigmentos y estabilizadores en plásticos y PVC (cloruro de polivinilo), pinturas, pigmentos en galvanoplastia, catalizadores y conservantes en la industria del plástico, Pinturas, fabricación de aleaciones, refinamiento de zinc. Además de la quema de carbón, madera y petróleo, recursos naturales como minerales, actividad volcánica e incendios forestales.

Turner (2019) establece que la distribución de cadmio en el ambiente ha aumentado a través de actividades humanas como la refinación de metales no ferrosos, la incineración de combustibles de origen fósil, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de desechos municipales, el reciclaje de desechos metálicos y electrónicos.

### **2.1.6. Vías de entrada al organismo**

Según Rodríguez-Heredia (2017) generalmente el ingreso el cadmio al organismo se da por el consumo de alimentos contaminados en los que más resaltan son los mariscos y algunos cereales, una determinada cantidad se puede encontrar en el tabaco. El cuerpo humano absorbe cadmio a través del tracto gastrointestinal, hasta el 5% de la ingesta total de cadmio y hasta el 50% del total absorbido a través de los pulmones.

### **2.1.7. Efectos a la salud causados por la exposición al cadmio.**

El cadmio se acumula en el cuerpo humano, principalmente en los riñones, y provoca hipertensión arterial. La absorción pulmonar es mayor que la absorción intestinal, por lo que el riesgo de inhalar cadmio es mayor. En los seres humanos, la exposición a largo plazo se asocia con disfunción renal; también puede causar enfermedad pulmonar (está relacionada con el cáncer de pulmón) y causar osteoporosis en humanos y animales. El ingreso medio diario, para humanos, se estima en 0.15 µg procedente del aire y 1 µg del agua. Fumar 20 cigarrillos equivale a inhalar aproximadamente entre 2 y 4 µg de cadmio. Está relacionado con la aparición de casos de cáncer de animales de experimentación y de cáncer de próstata humano.

Londoño *et al.* (2016) menciona que la severidad de los efectos, síntomas y cambios en el organismo relacionados a la concentración del contaminante, el período de exposición y la vía de ingreso del metal se estima que en los riñones (túbulos renales) se puede acumular hasta por 30 años según la organización mundial de la salud.

La exposición prolongada conlleva enfermedades como la anemia, mal funcionamiento renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos (cefalea, vértigo, alteración del sueño, contracciones musculares involuntarias), cáncer de próstata y pulmón.

ATSDR (2008) resalta que un envenenamiento agudo puede inducir daños al sistema respiratorio peligrosos como la neumonitis e incluso edemas pulmonares, daños al sistema digestivo leves como náuseas, vómito, dolor abdominal, diarrea, y más graves como gastroenteritis, fallo renal, y finalmente puede ocurrir mutaciones cromosómicas e incluso defectos congénitos.

Arévalo-López *et al.* (2021) resalta que el cadmio es el metal pesado de mayor preocupación debido a su potencial de acumulación que afectando a la salud humana, tiene un valor de tolerabilidad bajo en el rango de 0.2 – 0.5 ppm para los alimentos como en el caso del cacao.

## **2.2. Biorremediación**

Bonilla (2013) define al término biorremediación como una rama biológica que intenta resolver los problemas de contaminación causados por las alteraciones en el ambiente, para ello se ha diseñado formas de extraer, degradar e inmovilizar compuestos contaminantes utilizando microorganismos y plantas.

La biorremediación tiene una gran ventaja sobre los métodos de descontaminación fisicoquímicos ya que presenta bajos costos de operación, los contaminantes pueden ser transformados sin requerir un tratamiento adicional y se puede realizar de manera in-situ o ex-situ. “La biorremediación implica el enriquecimiento biológico de ecosistemas contaminados con Cd para eliminar los contaminantes del suelo” (Luo & Zhang, 2021).

### **2.2.1. Fitorremediación.**

Es un método de biorremediación que incluye el uso de especies vegetales, las son utilizadas por su capacidad para absorber, volatilizar, tolerar y acumular altas

concentraciones de contaminantes. Este método se diferencia de otros al no afecta la estructura del suelo y no utiliza reactivos químicos, es económico, sencillo y limpio. La aplicación de esta tecnología se basa en prácticas agronómicas comunes que buscan abordar el mejor estado de los recursos, entendido como la capacidad del suelo para realizar sus funciones de la mejor manera (Bonilla, 2013).

Figuroa (2014) describe que la fitorremediación es una técnica que en términos generales enmarca la extracción de los contaminantes metálicos en el suelo absorbidos por especies vegetales que a través de sus raíces eliminan o reducen su biodisponibilidad en el agua, suelo o aire.

La fitorremediación enmarca una tipología basada en el proceso que cumple la planta estas alternativas contemplan varios procesos los cuales contribuyen a la descontaminación de suelos, aguas contaminadas y sedimentos mediante el uso de plantas especializada (Kabata-Pendias, 2010).

### **2.2.2. Mecanismos de la Fitorremediación.**

Los mecanismos de fitorremediación son: fitoestabilización, fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización, rizofiltración y fitodegradación; los tipos de fitorremediación se basan en el rol que cumplen en la remoción de contaminantes es por ello que se consideran para el tratamiento de contaminantes específicos agrupados de acuerdo a lo establecido por la EPA (1997) complementado por (Figuroa, 2014).

**2.2.2.1. Fitoextracción.** Según Figuroa (2014), radica en la absorción de contaminantes por las tejidos vegetales como las raíces, los tallos o las hojas utilizando especies acumuladoras de compuestos orgánicos para su extracción mediante su absorción y concentración en las partes cosechables sin mostrar indicios de toxicidad. La planta debe seleccionarse según el tamaño de las raíces, la velocidad de madures, capacidad de acaparamiento de contaminantes, biomasa y potencial de evapotranspiración.

“Los pastos, musgos y helechos son el género que presentan mayor adaptabilidad a las diferentes condiciones ambientales y pueden captar gran cantidad de contaminante” (Bonilla, 2013; Volke *et al.* 2005).

**2.2.2.2. Fitoestabilización.** También denominada Fitoimmobilización se trata del uso de plantas para estabilizar los contaminantes en el entorno, evitando la movilidad o el transporte hacia las capas subterráneas o a la atmósfera, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio. Las especies vegetales inmovilizan los metales por la adsorción por sus raíces evitando su ingreso a la cadena trófica (Ali *et al.*, 2013).

Esta técnica es utilizada para inmovilizar y reducir la biodisponibilidad de contaminantes mediante procesos como precipitación, complejación y reducción de la valencia del metal resultando un metal menos tóxico como en el caso del cromo VI a cromo III (Rafati *et al.*, 2011).

**2.2.2.3. Fitodegradación.** Es la degradación de contaminantes orgánicos por acción de plantas acuáticas y terrestres que mediante enzimas oxigenasas y deshalogenasas desintoxican el ambiente por sus actividades metabólicas. Estudios científicos han demostrado que pueden fitodegradar herbicidas e insecticidas sintéticos utilizando plantas modificadas genéticamente (Ali *et al.*, 2013).

**2.2.2.4. Rizofiltración.** Es la absorción de los contaminantes y su posterior descomposición por acción microbiana en la rizosfera, cuya zona está constituida por los alrededores de la raíz. Las plantas que se utilizan son producidas en invernaderos y sembradas en la zona contaminada, donde las raíces toman el agua junto con el contaminante (Figueroa, 2014).

**2.2.2.5. Fitovolatilización.** En este proceso se da la conversión a su forma volátil de los contaminantes absorbidos para su liberación a la atmósfera, generalmente se utiliza en contaminantes orgánicos y algunos metales pesados como el mercurio y el selenio, es una de las técnicas menos usadas por que no elimina el contaminante solo lo transfiere (Ali *et al.*, 2013).

### **2.3. Potencial de fitorremediación**

El concepto de usar plantas para limpiar ambientes contaminados no es nuevo. Hace unos 300 años, se propusieron plantas para su uso en el tratamiento de aguas residuales. A fines del siglo XIX, *Thlaspi caerulescens* y *Viola calaminaria* fueron las primeras especies de plantas documentadas en acumular altos niveles de metales en las hojas Hartman (1975). Utsunomyia (1980), Chaney (1983) y Baker *et al.* (1991) innovaron y desarrollaron la idea de utilizar plantas para extraer metales de suelos

contaminados. Dado que el cultivo y la cosecha de plantas son procesos relativamente económicos en comparación con las prácticas de ingeniería tradicionales que dependen de la manipulación intensiva del suelo.

### **2.3.1. Técnicas para la cuantificación de metales pesados**

La más común es la espectrofotometría de absorción atómica para la identificación de los elementos metálicos la que funciona a partir de la pulverización en una llama a alta temperatura en una determinada longitud de onda producida de una lámpara que dirige a la muestra hasta la llama y dispersándola en forma de gotículas finas, finalmente evaporándose dejando la sal la cual se disocia en átomos del elemento a determinar.

Previo a la lectura de metales pesados es necesario un digesto de la muestra para eliminar la materia orgánica para ello es necesario un pretratamiento de la muestra que consiste en su secado y homogenización. El proceso de digestión se da mediante la aplicación de temperatura y un reactivo durante un periodo de tiempo, posteriormente se da un filtrado del digesto obteniendo la muestra en estado líquido para su lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica (IDEAM, 2017).

### **2.3.2. Espectrofotometría de absorción atómica**

La espectrofotometría de absorción atómica de llama (EAA) es la forma más utilizada de espectrofotometría atómica, de manera que los iones metálicos pueden medirse fácilmente a nivel de mg/L (ppm).

La técnica EAA está basada en una fuente de átomos elementales o iones que son estimulados por la luz monocromática, se mide la absorción producida. La fuente de átomos en forma elemental está expresada por un nebulizador, junto con una llama de aire/acetileno, la primera etapa es la formación de las micro gotas de la solución de analito por nebulización, una bomba peristáltica abastece de manera constante la solución de analito se proporciona aire en una dirección hasta formar una ligera niebla de gotas diminutas y el aerosol se dirige en una llama de aire / acetileno formando la atomización del analito. Los gases se mezclan antes de la combustión, la llama está dirigida por una rendija de flujo gas de alrededor de 10 cm de extensión y 2-3 mm de amplitud, el acetileno se quema para proporcionar una temperatura de alrededor de 2000 °C a 2200 °C. El acetileno y el aire del espectrofotómetro de absorción atómica de llama se juntan antes de

pasar a través del flujo de gas y es en este punto donde la mezcla de estos se enciende y para los gases de escape se coloca una campana de extracción directamente encima de la chimenea de salida del espectrofotómetro (Remache, 2013).

## **2.4.Especies utilizadas para la fitorremediación**

### **2.4.1. *Brassica rapa***

Especie vegetal denominada comúnmente como nabo silvestre, nabo forrajero o en otros lugares con el nombre de yuyo, es una planta silvestre, filogenéticamente similar a 9 subespecies de la *Brassica rapa subsp. Campestris* originaria de zonas montañosas, sin embargo, se desconoce el momento de la domesticación. Hay dos centros principales de origen de *Brassica rapa* el Mediterráneo y la región de Afganistan-Pakistan (Sammour *et al.*, 2021).

#### 2.4.1.1. Morfología

- a) Raíz: posee un tipo de raíz napiforme que es muy característica para la acumulación de sustancias de reserva aunque también puede ser delgada.
- b) Tallo: presenta un tallo erecto, cilíndrico que presenta vellosidades simple o ramificada, erecta, glabra.
- c) Hojas: alternas y oblongas presenta hojas inferiores pecioladas pinnatífidas o lobuladas con el borde irregular con unas dimensiones de 4 a 20 cm de largo y un ancho de 1.8 a 8 cm. Hojas superiores sentadas sin peciolo, amplexicaules es decir abrazadas al tallo, con un borde entero, presentan dimensiones de hasta 6 cm de largo y un ancho de alrededor de 1.3 cm.
- d) Flores: presentan inflorescencias en forma de un racimo con una dimensión de entre 10 y 30 cm, son de color amarillo con cuatro sépalos color verde de 4 mm y cuatro pétalos y seis estambres.
- e) Fruto y semilla: Pedicelos 1-2.5 cm, silícula extendida, lineal, cilíndrica, dehiscente, 2-6 cm de largo, ápice con un pico de 1-3 cm de largo.
- f) Semillas: globulares, de 1.5-2 mm en diámetro, café o negras. (Rzedowski & Calderon, 2010)

#### 2.4.1.2. Taxonomía

La tabla 1 muestra la clasificación taxonómica de la especie *Brassica rapa* que es una sub especie también conocida como *Brassica rapa* o *Brassica campestris* y clasificada por Carlos Linneo.

**Tabla 1.**

*Taxonomía de la Brassica rapa.*

Reino	Plantae
Subreino	Traqueobionta
Superdivisión	Spermatophyta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Dilleniidae
Orden	Capparales
Familia	Cruciferae
Género	Brassica
Especie	rapa
Nombre científico	Brassica rapa Subsp. Campestris
Nombre común	yuyo, nabo silvestre, mostaza

**Nota:** Fuente: Rzedowski & Calderon (1979).

#### 2.4.2. *Raphanus sativus*

Especie vegetal cuyo nombre común es rábano o rabanito, su nombre científico es *Raphanus Sativus*, presenta características de tubérculo y perteneciente a la familia de las brassicaceae y se cosecha entre 15 y 45 días después de la siembra en condiciones normales. Son especies anuales o bianuales, con hábito de crecimiento indeterminado, que pueden permanecer en estado de roseta hasta la próxima temporada de crecimiento (Oblitas, 2019).

##### 2.4.2.1. Morfología

- Raíz:** presenta una forma muy variable en cuanto a su tamaño, presenta características físicas como un grosor y carnosidad distintivos además de una piel roja, rosada, blanca, pardo-oscura o manchada dependiendo de la variedad y las condiciones.
- Tallo:** es un tallo breve antes de la floración, con una roseta de hojas. En el momento de la floración de la planta se alarga alcanzando una altura comprendida entre el rango de 0,50 a 1 m, de color verdusco claro y puede presentar vellosidades.
- Hojas:** Básales, pecioladas, de lámina lobulada o pinnatipartida, con 1-3 pares de

segmentos laterales de borde irregularmente dentado; hojas caulinas escasas, pequeñas, oblongas, glaucas, algo pubescentes, menos lobuladas y dentadas que las basales.

- d) Flores: En racimos grandes y abiertos; sépalos erguidos; pétalos casi siempre blancos, a veces rosados o amarillentos; estilo delgado con un estigma ligeramente lobulado.
- e) Fruto: Esponjoso, con un pico largo, semillas globosas o casi globosas, rosadas o castaño claras, con un tinte amarillento; cada fruto tiene de 1 a 10 semillas incluidas en un tejido esponjoso.
- f) Semillas: Son de color café a rojizo claro (Díaz *et al.*, 2018)

#### 2.4.2.2. Taxonomía

La tabla 2 muestra la clasificación taxonómica de la especie *Raphanus sativus* de la familia brassicaceae fue descrita por Carlos Linneo y publicado en su libro Plantarum.

**Tabla 2.**

*Clasificación taxonómica del Raphanus sativus.*

Reino	Plantae
Superdivisión	Embryophyta
División	Tracherphyta
Subdivisión	Spermatophytina
Clase	Magnoliopsida
Superorden	Rosanae
Orden	Brassicales
Familia	Brassicaceae
Género	Raphanus
Especie	Raphanus sativus L

**Nota:** Fuente: (Brooks *et al.*, 1977).

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y diseño de la investigación

La investigación de tipo experimental aplicada y descriptiva, estuvo sujeta a un estudio y tratamiento de datos obtenidos como respuesta al planteamiento del ensayo de campo.

#### 3.2. Unidad de análisis

Medio ambiente investigación descriptiva

#### 3.3. Población de estudio

Población: Suelos de la finca Cacaotera Richard Valdibiezo de la Parroquia Unión Milagreña de la Comunidad Virgen del Carmen (suelo en estado de producción) de la provincia de Orellana del cantón la Joya de los Sachas, parroquia Unión Milagreña.

#### 3.4. Tamaño de la muestra

En la tabla 3 se muestra los 17 puntos de muestreo, considerando un peso de 168 kg de suelo, con un volumen de muestra de 0.3 m<sup>3</sup> de suelo. Para visualizar la proyección de los puntos de muestreo dirigirse al anexo 5.2. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo.

**Tabla 3**

*Coordenadas y puntos de muestreo*

<b>Punto</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>
1	298938,86	9954618,64
2	298947,32	9954622,95
3	298959,71	9954660,1
4	298959,52	9954660,84
5	298948,67	9954660
6	298976,2	9954659,13
7	298993,66	9954639,53
8	298993,99	9954639,53
9	298990,75	9954637,74
10	298979,89	9954630,51
11	298980,12	9954625,02
12	298936,24	9954676,57

13	298892,67	9954688,99
14	298884,94	9954671,52
15	298891,76	9954660,74
16	298915,43	9954650,42
17	298922,66	9954653,77

**Nota:** La tabla 3 muestra las coordenadas UTM proyectadas (WSG 84) zona 18S tomadas con un GPS de Smartphone.

### **3.5. Técnica de recolección de datos**

#### **3.5.1. Recopilación y revisión documental**

En esta etapa se dio una revisión de documentación enmarcando los aspectos generales y de interés con respecto a la temática, los aspectos geológicos de la zona donde se recolectó la muestra de suelo y si la presencia de metales pesados resulta ser relevante. Como principal fuente de información se consideró tesis, artículos científicos, artículos de revistas y visitas de campo.

#### **3.5.2. Toma de muestras**

La ubicación de la zona de muestreo de suelo se obtuvo en la finca cacaotera de la provincia de Orellana el cantón Joya de los Sachas en la parroquia Unión milagreña en la comunidad Virgen del Carmen en la región amazónica ecuatoriana. De coordenadas UTM (WSG 84) zona 18S (298948.67 E, 9954660.00N). Para visualizar la finca cacaotera Richard Valdibiezo dirigirse al anexo 5.4. Imagen satelital del sitio de muestreo y el anexo 5.3. Plano vial de carreteras para llegar al sitio de muestreo.

#### **3.5.3. Muestreo de suelo**

Para el inicio del muestreo consideró la forma del terreno y se delimita las áreas homogéneas, en cuanto a las características físicas y topográficas. Adicional a ello se debe contar con los materiales necesarios como un barreno muestreador o pala de punta, bolsas plásticas o baldes para la recolección de las submuestras y bolsas para el empaquetado de las muestras cabe resaltar que cada muestra debe ser etiquetada.

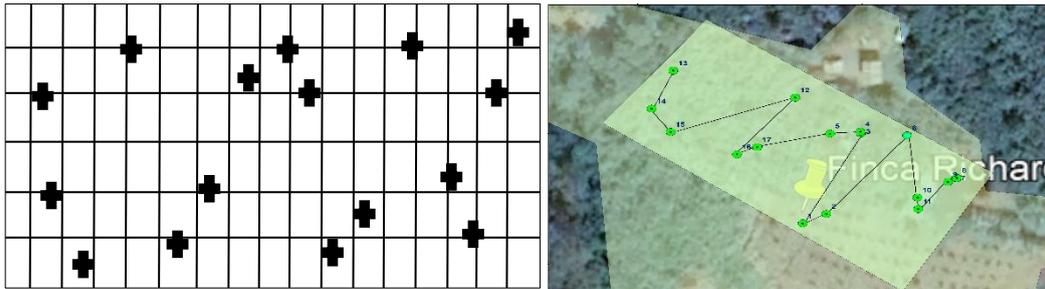
El muestreo del suelo se realizó a una profundidad de 30 cm utilizando la técnica de recorrido zig-zag, que consiste en líneas cruzadas caminando de 25 a 30 pasos desde cada punto seleccionado y se tomó una muestra simple. Al final se obtuvo alrededor de 17 submuestras, que posteriormente se mezclaron y las muestras fueron llevadas a

laboratorio para su análisis y determinación de parámetros como el pH, textura, densidad aparente y concentración de cadmio.

La Figura 1 contempla los 17 puntos de muestreo considerando una parcela rectangular dentro del área de la finca, se realizó la selección del área que presentaba cultivos de cacao.

**Figura 1**

*Croquis muestreo aleatorio simple*



**Nota:** El mapa fue elaborado con información del Instituto Geográfico Militar ecuatoriano en el Geo portal del IGM

### **3.6. Ensayo de campo potencial fitorremediador**

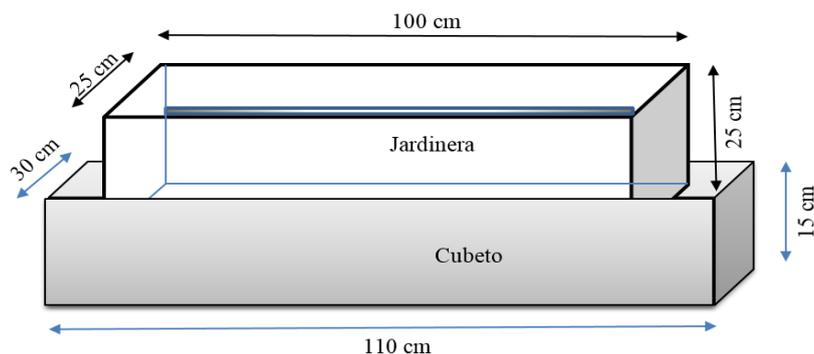
#### **3.6.1. Montaje del ensayo**

Se prepararon las condiciones necesarias y el sitio adecuado para el montaje del experimento. La muestra fue obtenida de una finca cacaotera de la provincia de Orellana en la región amazónica Ecuatoriana, se recolectó alrededor de 168 kg, las semillas de las especies vegetales se recolectaron el mes de diciembre de 2020 con un peso de 1 onza (Oz) por especie, el ensayo comprendió 20 plantas por especie en jardineras de 1 x 0.25 x 0.25m el experimento se lo instaló en la provincia de Orellana en la ciudad del Coca para visualizar el mapa del sitio del experimento dirigirse al Anexo 5.5. Mapa de ubicación del sitio del Experimento.

La Figura 2 muestra una representación del sistema de recolección de líquido por infiltración para su recirculación el cubeto, recubierto de una membrana impermeable además de las dimensiones de la jardinera y el cubeto.

**Figura 2**

*Dimensiones de la jardinera y cubeto*



**Nota:** Esquema que expresa unidades en centímetros de cada jardinera

### **3.6.2. Sistema de plantación para el estudio**

**3.6.2.1. Preparación del sustrato para la siembra.** El sustrato pasó por una serie de procesos para tener el tamaño y condiciones homogéneas en toda la jardinera por ello se estableció una separación de materiales sólidos de diferentes tamaños considerando raíces, piedras y restos vegetales.

Posterior a ello se secó a luz del sol por 3 días, para mejorar la incorporación del contaminante al suelo seco de las jardineras.

Se realizó un pesaje de la cantidad de suelo en cada jardinera siendo un total de 42 kg por cada concentración, se esparció hasta tener una película delgada de tierra, se espolvorea el contaminante  $CdCl_2 \cdot H_2O$ , se finalizó mezclando el sustrato y se lo trasladó hacia la jardinera.

**3.6.2.2. Ubicación del experimento.** Se realizó una correspondiente homogenización, secado y pesaje de 42 kg de suelo por cada jardinera, el proyecto fue realizado en la provincia de Francisco de Orellana en la ciudad del Coca en la Av. 6 de diciembre y Luis Uquillas, las coordenadas del experimento proyectadas al sistema UTM WGS 84 zona 18s (Este 278662,8- Norte 9948275,9).

**3.6.2.3. Plantación de las especies en las jardineras.** Para la siembra de la especie *Raphanus sativus* se procedió a colocar 3 semillas a una profundidad de 1.5 cm con una separación de 10 cm, para la especie *Brassica Rapa* se realizó siembra en surco.

Para evitar las pérdidas por infiltración se colocó las jardineras en un cubeto para recolectar excedente de líquido, el riego se dio con una regadera, se regó una vez al día considerando como hora fija las 18:00 horas

#### **3.6.2.4. Determinación de concentraciones de cadmio en la muestra de suelo.**

- a) Preparación de las muestras. Antes de la medición de metales, las muestras deben estar acondicionadas al ambiente según el método que se establezca para la determinación de metales en suelos según Water Environment Federation (2012), el Espectrofotómetro de Absorción Atómica debe ser operado según lo señala el PEU-LABSU-01.
- b) Condiciones ambientales. Las condiciones óptimas para la operación del Espectrómetro son:  
Temperatura: (18 – 35) °C.  
Humedad relativa: (40% - 80%).
- c) Curva de calibración. Se realizó de acuerdo a los criterios de aceptación o rechazo del Control de Calidad para formar la curva de calibración se partió de un estándar madre de 1000 ppm para lo cual se tomó 10 ml para preparar una concentración de 100 ppm y a partir de esta solución preparar la curva de calibración con las concentraciones requeridas para cada metal.
- d) Procedimiento para muestras sólidas.
  - La muestra fue triturada y homogenizada para permitir uniformidad de las partículas, se usó un tamiz para obtener partículas del mismo tamaño.
  - Por cada procedimiento de digestión, se pesó e incorporó a un tubo de digestión 3 g (peso húmedo) o 2 g (peso seco) de muestra.
  - Se añadió 10 mL de ácido nítrico concentrado y 10 mL de agua bidestilada, se efectuó la digestión a 150°C por 30 min en el bloque de digestión.
  - Después de enfriar la muestra, se diluye a 100 mL con agua destilada. Las partículas presentes en el extracto fueron removidas por filtración mediante papel filtro cuantitativo

Los métodos para el análisis de cadmio en laboratorio siguieron los procesos de la siguiente metodología, Método 3111, metales por llama (espectrometría de absorción atómica).

**3.6.2.5. Conservación de la muestra y almacenamiento.** Una vez recolectada la muestra se colocó en una bolsa con sellado hermético para almacenar en lo posible su estado original evitando cualquier tipo de contaminación, para la conservación de la muestra se secó a una temperatura no superior a 35°C para así evitar cambios drásticos en las características físicas y químicas. La muestra pasó por fases de homogenización,

tamizado y almacenamiento previo a su análisis.

**3.6.2.6. Administración del metal Cd en las jardineras.** Para la contaminación del suelo con cloruro de cadmio monohidratado ( $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$ ) se suministró el reactivo en estado sólido, para garantizar características ideales en el suelo y evitar inconvenientes en la homogenización.

Primero se secó a la intemperie con el sol como agente de secado, se realizó durante 3 días por el estado climático. Este proceso consiste en extender el sustrato en una plataforma de secado cabe resaltar que antes de ello se removió los sólidos de gran tamaño como raíces, restos vegetales y fragmentos de rocas.

Posteriormente se trituró los agregados con la ayuda de un mortero para homogenizar el sustrato para mejorar la adherencia del contaminante a las partículas del suelo. Finalmente se calculó el peso de químico que se va a suministrar al sustrato considerando el peso de cada jardinera.

### **3.7. Técnica de interpretación y análisis de la información**

#### **3.7.1. Análisis fisicoquímico del suelo**

**3.7.1.1. pH del suelo.** Aplicando el método potenciométrico, para ello se diluyó una parte de la muestra del suelo en 2 partes de agua destilada. El equipo utilizado fue un pH-metro EI/27 de sondas o electrodos.

**3.7.1.2. Textura del suelo.** Se aplicó el método de la textura al tacto que consiste en la caracterización de la textura del suelo a través del sentido táctil, cabe resaltar que la muestra de suelo fue humedecida para reconocer la arenosidad o asperidad, la lisura por la presencia de limo y la plasticidad o adhesividad.

**3.7.1.3. Color.** Se aplicó el método de Munsell Soil Colour Charts se realizó una comparativa del color de la muestra de suelo con los códigos presentes en la tabla hasta obtener el color y el código más próximos a la tonalidad de la muestra.

**3.7.1.4. Densidad Aparente.** Se aplicó la bibliografía de métodos analíticos y control de calidad de Labsu. Es un método gravimétrico que relaciona la masa que contiene un cilindro con volumen y masa conocidos, posterior a ello se seca la muestra de suelo y se lo expresado en unidades  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

### **3.8. Análisis químico**

#### **3.8.1. Análisis foliar de la muestra vegetal**

Método: EAA (Espectrofotometría de absorción atómica por llama)

Procedimiento:

- a) Pretratamiento: para el análisis de la planta fue necesario eliminar los restos del sustrato por lo que fue necesaria una limpieza mediante un lavado.
- b) Calcinación: se secó las partes de la planta durante 12 horas en la estufa posteriormente se trituró y se homogenizó
- c) Digestión: se pesó 2 gramos en una balanza analítica, se colocó 10 ml de agua bidestilada adicionando 10 ml de una solución de ácido nítrico al 67% y se procedió a la digestión bajo parámetros preestablecidos temperatura de 150°C durante 2 horas.
- d) Filtrado: se filtró la muestra digerida y se aforó con agua destilada, se utilizó papel filtro para separar la fase sólida y obtener la muestra en fase líquida.
- e) Espectrofotometría: se realizó una calibración del equipo efectuando una curva de calibración con el reactivo a determinadas concentraciones utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica por llama, se aplicó el método EPA-3051 para muestras vegetales.

#### **3.8.2. Muestra de suelo**

Método: EAA (Espectrofotometría de absorción atómica por llama)

Procedimiento:

- a) Secado: se ubicó la muestra en la estufa durante 12 horas, se homogenizó y se pesó 2 g de la muestra seca.
- b) Digesto: se colocó los 2 gramos de la muestra con 10 ml de agua bidestilada en un tubo de 100 ml. Posteriormente se le añadió 10 ml de solución de ácido nítrico al 67% y se procedió a su digestión bajo parámetros establecidos como 150°C durante 2 horas.
- c) Filtrado: se dio la separación de la fase sólida y líquida utilizando papel filtro para su análisis en el espectrofotómetro.
- d) Espectrofotometría: se realizó una calibración del equipo y se determinó las

concentraciones en el suelo mediante un análisis de cadmio basado en el método EPA-3050 para el suelo preparado.

### **3.8.3. Determinación de Cd mediante absorción atómica Espectrofotometría**

Para la lectura del metal pesado cadmio se utilizó un espectrofotómetro Thermo SOLAAR iCE 3000 series.

#### **a) Equipamiento**

- Espectrómetro de Absorción Atómica EI-71.
- Lámpara de cátodo hueco de Cd
- Erlenmeyer
- Filtros de 0,45  $\mu\text{m}$
- Ácido nítrico trace metal grade
- Aire Comprimido
- Acetileno extra puro AA
- Jeringas
- Agua HPLC
- Pipetas Volumétricas
- Estándar de Cd 1000  $\mu\text{g/ml}$ .
- Balones aforados

#### **b) Condiciones del equipo**

El equipo cumplió con estas condiciones óptimas de operación recomendadas en el instructivo para el correcto funcionamiento y lectura respectiva de las muestras:

- Longitud de onda (nm): 228.8.
- Lámpara de cátodo hueco: Cadmio
- Combustible: Acetileno.
- Oxidante: Aire.
- Tipo de llama: Oxidante (pobre, azul).
- Flujo combustible (L/min): 1.2
- Altura del mechero: 7.0
- Corrección de fondo: Requerido.

### c) Calibración del Equipo

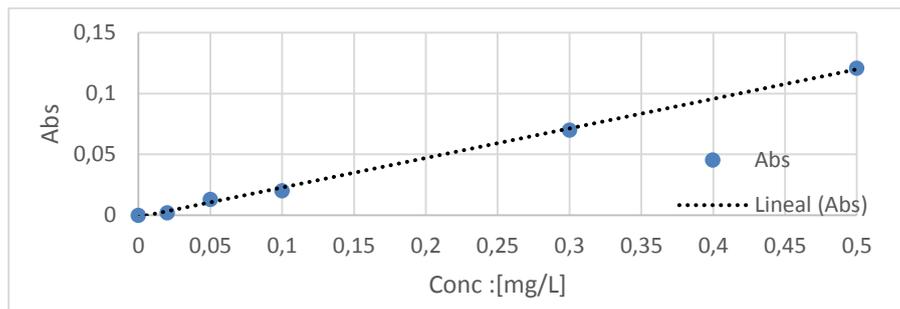
Se efectuó una calibración del equipo utilizando los reactivos a determinadas concentraciones del metal para crear una curva de calibración que fija un límite de detección para reducir el rango de error, los parámetros de espectrofotometría da una longitud de onda de 228.8 nanómetros (nm).

Posterior a la calibración se coloca la muestra para su análisis, en el programa Thermo SOLAAR V11, 00 y se coloca los valores, de ser el caso se coloca los valores de la dilución para los cálculos y correcciones.

La Figura 3 muestra la curva de calibración del equipo representada por el valor de la concentración de los reactivos de calibración en mg/L en el eje x, con respecto al valor dado por la señal de la absorbancia del equipo.

**Figura 3**

*Calibración para Cd EAA en LabSu*



**Nota:** abreviaturas; Abs = absorbancia, Conc = Concentración

#### 3.8.4. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de concentraciones iniciales y finales, la remoción del contaminante en el suelo y la presencia de cadmio en la planta cuantificada de la bioacumulación en los tejidos vegetales lo que permitió comparar la eficacia de las especies vegetales en la remediación de suelos contaminados con cadmio.

El análisis de fisiología vegetal se realizó estadísticamente con los datos obtenidos de germinación, crecimiento, número de hojas, área foliar, porcentaje de eficiencia (%eficiencia) en la remoción de cadmio y longitud de la planta. Utilizando un análisis ANOVA para un diseño completamente al azar, con una prueba de normalidad prueba de normalidad de Kolmogorov con un alfa del 0.05 al 95% de confianza, verificando la hipótesis planteada con la prueba Turkey para identificar diferencias significativas.

### 3.8.5. Diseño experimental

Se planteó basados en el diseño experimental completamente al azar con la finalidad de identificar diferencias entre los tratamientos, esto se realizó utilizando el test Turkey para comparar las medias de las variables en relación a los tratamientos y verificar si existen diferencias significativas entre los factores estudiados.

Para mejorar la comprensión entre la variable estudiada se colocó etiquetas a las concentraciones del ensayo, en la tabla 4 se muestra los nombres acorde a cada jardinera que compone la parte experimental del estudio.

**Tabla 4**

*Etiquetado de las concentraciones en el diseño experimental*

Jardinera	Etiqueta		Concentración de cadmio [ppm]
	<i>Raphanus sativus</i>	<i>Brassica rapa</i>	
1	S0r	S0n	testigo
2	S1r	S1n	51.99
3	S2r	S2n	99.56
4	S3r	S3n	199.73

**Nota:** Abreviaturas; ppm=partes por millón.

### 3.9. Evaluación de fitoextracción

Existen factores o índices que permiten conocer la capacidad de las especies vegetales para la absorción o translocación de contaminantes a sus demás tejidos.

Zhao *et al.* (2003) definieron al factor de translocación (TF) como, la relación entre la concentración de los metales en la parte aérea y la concentración en las raíces.

El factor de bioconcentración o de absorción biológica se utilizó para medir la acumulación o exclusión de metales en los tejidos de las especies vegetales (raíz, tallos y hojas) en relación a la concentración del metal en el suelo se evalúa utilizando el factor de bioconcentración (BCF) denotando que si el valor es inferior a uno su capacidad es de exclusión en contraste si el valor es superior a 1 entonces la capacidad es hiperacumuladora (Medina & Montano, 2014).

#### 3.9.1. Cuantificación de la eficiencia de fitoextracción

Se pudo determinar la eficiencia de la fitoextracción de planta al aplicar un balance de masa donde se calculó las pérdidas como producto de procesos como la volatilización o la infiltración.

### **Entrada = Salida**

$$[Cd_{SI}] = [Cd_r] + [Cd_h] + [Cd_{SF}] + \text{Pérdidas}$$

$$\text{Pérdidas} = [Cd_{SI}] - [Cd_r] - [Cd_h] - [Cd_{SF}]$$

$$[Cd_{Planta}] = [Cd_r] + [Cd_h]$$

$$\% \text{Eficiencia} = \frac{[Cd_{planta}]}{[Cd_{SI}]} * 100$$

Donde:

$[Cd_{SI}]$  = Concentración de cadmio en el suelo Inicial (mg/kg).

$[Cd_{SF}]$  = Concentración de cadmio en el suelo final (mg/kg).

$[Cd_r]$  = Concentración de cadmio en la raíz de la planta (mg/kg).

$[Cd_h]$  = Concentración de cadmio en las hojas de la planta (mg/kg).

$[Cd_{planta}]$  = Concentración de cadmio en toda la planta (mg/kg).

### **3.9.2. Factor de bioconcentración (BCF)**

Se puede calcular mediante la relación entre la concentración del metal en la planta en unidades ppm, por la concentración del metal en el sustrato en unidades ppm.

El BCF se pudo calcular a través de las formulas propuestas por Medina & Montano (2014); Olivares & Pena (2009); Baker & Brooks (1989).

$$FBC_{raíz} = \frac{[metal]_{raíz}}{[metal]_{suelo}}$$

$$FBC_{aérea} = \frac{[metal]_{aérea}}{[metal]_{suelo}}$$

Donde:

$FBC_{raíz}$ : Factor de bioconcentración en la raíz de la planta.

$FBC_{aérea}$ : Factor de bioconcentración en la parte aérea.

$[metal]_{raíz}$ : Concentración del metal en la raíz de la planta

$[metal]_{aérea}$ : Concentración del metal en la parte aérea de la planta.

$[metal]_{suelo}$ : Concentración del metal en el suelo.

**3.9.2.1. Valores referenciales parte aérea.** Calculado el factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta establece una clasificación para la especie vegetal denotada como:

Si el  $BCF_{a\acute{e}rea} < 1$  planta es excluyente

Si el  $1 < BCF_{a\acute{e}rea} < 10$  la planta es acumuladora

Si el  $BCF_{a\acute{e}rea} > 10$  la planta es hiperacumuladora

**3.9.2.2. Valores referenciales parte raíz.** Calculado el factor de bioconcentración en la parte de la raíz de la planta establece una clasificación para la especie vegetal denotada como:

Si el  $BCF_{ra\acute{z}} < 1$  planta es excluyente

Si el  $1 < BCF_{ra\acute{z}} < 10$  la planta es acumuladora

Si el  $BCF_{ra\acute{z}} > 10$  la planta es hiperacumuladora

### **3.9.3. Factor de translocación (TF).**

Se basa en la relación entre la concentración del metal en la parte aérea (hojas y tallo) de la planta en unidades (ppm o mg/kg) y la concentración del metal en la raíz de la planta en unidades (ppm o mg/kg).

El TF se pudo calcular aplicando el método planteado por Medina & Montano (2014), Olivares & Pena (2009) y Baker & Brooks (1989).

$$TF = \frac{[metal]_{a\acute{e}rea}}{[metal]_{ra\acute{z}}}$$

Donde:

TF: factor de translocación

$[metal]_{ra\acute{z}}$ : Concentración del metal solo en la raíz de la planta.

$[metal]_{a\acute{e}rea}$ : Concentración del metal solo en la parte aérea de la planta

Si el  $TF > 1$  significa que la planta traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta (Baker & Brooks, 1989), por lo que su potencial es la de hiperacumular metales pesados en la parte aérea.

Si  $TF < 1$  significa que la planta no traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de fitoestabilizar metales en sus raíces.

### 3.9.4. Índice de germinación

Siguiendo la metodología de Varnero, Rojas y Orellana (2007), se utilizaron cajas Petri y papel filtro humedecido como simulador de un extracto para la germinación de las semillas de la especie *Raphanus sativus* y *Brassica rapa*, el periodo de experimentación comprendió 4 días en una cámara germinativa a 25°C, se simularon los tratamientos incorporando el contaminante cloruro de cadmio en las concentraciones (0, 50, 100 y 200) en un atomizador para humedecer el papel filtro que contiene 20 semillas por tratamiento, cabe resaltar que se necesitó de una caja Petri que contenía semillas de cada especie que fue humedecida con agua destilada como muestra testigo para comparar los tratamientos y poder estudiar el efecto del cadmio a nivel germinativo.

Finalmente para el cálculo del índice de germinación se aplicó las siguientes formulas descritas por Tam & Tiquia (1994).

$$PGR = \frac{N^{\circ} \text{de semillas germinadas en el extracto}}{N^{\circ} \text{de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radículas en el extracto}}{\text{Elongación de radículas en el testigo}} \times 100$$

$$IG = \frac{PGR \times CRR}{100}$$

Donde:

PGR: Porcentaje de germinación relativo

CRR: Crecimiento radicular relativo

IG: Índice de germinación

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Cálculo del peso del reactivo $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$

Para su incorporación al suelo se obtuvo la cantidad del contaminante en gramos para cada concentración requerida en las jardineras del ensayo para el cálculo se tomó en cuenta la masa molar establecida por Roth (2010), en las propiedades físicas y químicas del reactivo.

Jardinera 2, etiqueta S1

$$\begin{aligned} [\text{Cd}]50 \text{ ppm} &= \frac{0.050 \text{ g Cd}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ mol CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{112.42 \text{ g Cd}} \times \frac{201.32 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CdCl}_2\text{H}_2\text{O}} \\ &= \frac{0.089 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{\text{Kg}} \times 42 \text{ kg} = 3.738 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Jardinera 3, etiqueta S2

$$\begin{aligned} [\text{Cd}]100 \text{ ppm} &= \frac{0.10 \text{ g Cd}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ mol CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{112.42 \text{ g Cd}} \times \frac{201.32 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CdCl}_2\text{H}_2\text{O}} \\ &= \frac{0.179 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{\text{Kg}} \times 42 \text{ kg} = 7.518 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Jardinera 4, etiqueta S3

$$\begin{aligned} [\text{Cd}]200 \text{ ppm} &= \frac{0.20 \text{ g Cd}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ mol CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{112.42 \text{ g Cd}} \times \frac{201.32 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CdCl}_2\text{H}_2\text{O}} \\ &= \frac{0.358 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O}}{\text{Kg}} \times 42 \text{ kg} = 15.036 \text{ g CdCl}_2\text{H}_2\text{O} \end{aligned}$$

Considerando el peligro que representa el reactivo cloruro de cadmio monohidratado al ser tóxico y peligroso para el ambiente, se tomaron las precauciones establecidas por Roth (2010) en la ficha de datos de seguridad; medidas en caso de liberación accidental, la manipulación se dio utilizando guantes de protección de PVC o PE y almacenamiento en recipientes de polietileno.

En cuanto a su información toxicológica para evitar efectos al organismo se tomaron las debidas precauciones, como guantes de goma impermeables para evitar el contacto con la piel, mascarillas para evitar la ingesta e inhalación del reactivo.

## 4.2. Resultados de las propiedades físicas químicas del suelo

En la tabla 5 se muestra los valores del análisis de los parámetros fisicoquímicos de las jardineras en el laboratorio acreditado de LABSU.

**Tabla 5.**

*Resumen de las propiedades Fisicoquímicas Iniciales del Suelo.*

Parámetro	Unidades	Medición			
		S0	S1	S2	S3
pH	N/A	7.07	6.95	7.02	7.15
D <sub>A</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0.6007	0.6007	0.6007	0.6007
D <sub>r</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0.798	0.798	0.798	0.798
Textura	N/A	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso
Humedad	%	27.680	28.345	28.284	29.009
Color	N/A	2.5YR 2.5/1	2.5YR 2.5/1	2.5YR 2.5/1	2.5YR 2.5/1

**Nota:** los significados de las abreviaturas; pH= potencial hidrogeno, D<sub>A</sub>= densidad aparente, D<sub>r</sub>= densidad real, N/A= no aplica, S0= suelo testigo, S1= suelo contaminado a 51.99 ppm, S2= suelo contaminado a 99.56 ppm, S3= suelo contaminado a 199.73 ppm.

La caracterización inicial de los parámetros pH (7.07, 6.95, 7.02, 7.15) neutro, D<sub>A</sub>= 0.6007, D<sub>r</sub>= 0.798, Textura franco arcillo limosa, Humedad= 27.680% y color= 2.5YR 2.5/1, condiciones en las que se encontraba el suelo previo a la ejecución del experimento.

Según Astuti *et al.* (2015) en el PDYOT de la provincia de Orellana se clasifica a los suelos como ácidos en estado de vejez, colores amarillentos pardos y con texturas finas del tipo franco arcillo limoso. Comparado a los resultados de la muestra de suelo del cantón Joya de los Sachas muestra similitudes en la textura y color a excepción del pH ya que muestra una tendencia neutra debido a que se encuentra en estado de labranza, la presencia de cationes en el suelo ocasiona la formación del complejo arcillo-húmico, coloides que al contacto con el agua tienden a quedar en suspensión.

La tabla 6 muestra los resultados de las propiedades fisicoquímicas del suelo después de la cosecha de la *Raphanus sativus* dado un periodo de experimentación de 60 días de siembra se puede notar un ligero aumento en el pH del suelo de las jardineras.

**Tabla 6.***Resumen de las propiedades Fisicoquímicas Finales del Suelo.*

Parámetro	Unidades	Medición			
		S0r	S1r	S2r	S3r
pH	N/A	7.03	7.01	7.13	7.25
D <sub>A</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0.7758	0.8131	0.8036	0.7462
D <sub>r</sub>	g/cm <sup>3</sup>	0.8362	0.8425	0.8409	0.8309
Textura	N/A	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso
Humedad	%	8.50	4.11	5.22	11,99
Color	N/A	2.5YR 2.5/1	2.5YR 2.5/1	2.5YR 2.5/1	2.5YR 2.5/1

**Nota:** los significados de las abreviaturas; pH: potencial hidrogeno, D<sub>A</sub>: densidad aparente, D<sub>r</sub>: densidad real, S0r = suelo testigo + rábano, S1r = contaminado a 51.99 ppm + rábano, S2r= contaminado a 99.56 ppm + rábano, S3r= contaminado a 199.73 ppm + rábano.

El pH obtenido en las jardineras posterior al estudio se encuentra en un rango neutro siendo el valor más alto el de la jardinera S3r (7.25), al comparar este valor con el rango de pH de la tabla 2 de criterios de remediación (valores máximos permisibles) para uso agrícola anexo 2 del Libro VI del TULSMA, que es de 6 a 8 se determina que el suelo se encuentra cumpliendo con la normativa, a diferencia de los valores presentados por el INIAP (2016), que en el apartado del contenido nutricional de los suelos de la Amazonía ecuatoriana presentan un pH entre el rango de 4.9 a 5.2 en estado natural, lo que indica que el pH neutro de los suelos la finca Richard Valdibiezo se debe a que se encuentra en uso agrícola.

En cuanto a la textura el suelo se llegó a establecer que es franco arcillo limoso por sus características de retención media de agua denotada por sus componentes moderadamente finos como son la arena y arcilla, en cuanto a su plasticidad es baja ya que en la prueba de la cinta no forma cintas largas, mediante la utilización de la tabla de Munsell se encontró la similitud del color de la muestra con el color 2.5YR 2.5/1 (reddish black) rojizo color representativo de la parte Amazónica ecuatoriana concordando con lo establecido en el PDYOT de la provincia de Orellana (Astuti *et al.*, 2015).

### 4.3. Análisis químico de la concentración de cadmio

#### 4.3.1. Eficiencia de la remoción del cadmio en el suelo

La tabla 7 muestra los resultados del análisis de cadmio inicial del suelo y sus respectivas comparativas posteriores a la cosecha de la especie *Raphanus sativus*.

**Tabla 7.**

*Resultados del Porcentaje de Remoción de Cd en el Suelo.*

[Cd] tratamiento (ppm)	[Cd] inicial suelo (ppm)	[Cd] final suelo (ppm)	[Cd] removido (ppm)	% Remoción
S0r	0	0	0	0
S1r	51.99	39.482	12.508	24.058
S2r	99.56	80.576	18.984	19.068
S3r	199.73	176.518	23.212	11.622

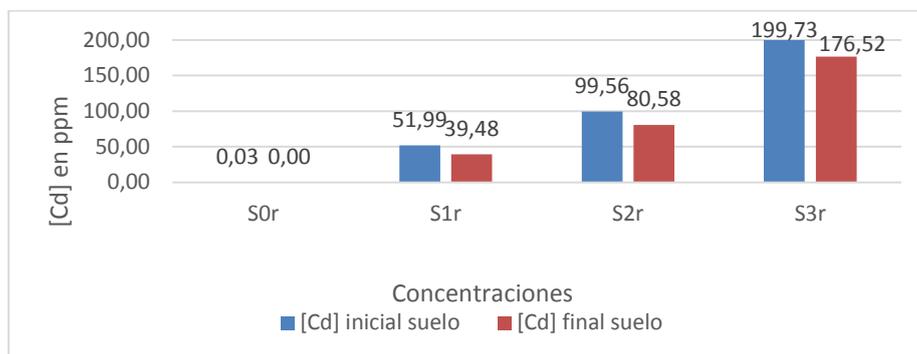
**Nota:** Abreviaturas; [Cd]=concentración de cadmio, %Remoción= porcentaje de remoción de cadmio.

La *Raphanus sativus*, presentó una tendencia general a concentrar Cd en los distintos tratamientos a los que fue expuesta, obteniendo un mayor porcentaje de remoción de cadmio (24.058 %) para la jardinera S1r. Esta tendencia según Méndez (2020) pueden estar relacionada con la formación de complejos bioquímicos durante el metabolismo de la planta, debido a que el cadmio es un metal capaz de desplazar a otros iones metálicos, por la dinámica que siguen los metales pesados en el suelo al incorporarse a los tejidos de la planta.

Analizando los resultados de la concentración de cadmio removida sugiere que las características fitoextractoras de Cd de las plantas se manifiestan de manera importante a los 60 días de edad. En general, el valor más alto de concentración de cadmio removido se dio en el tratamiento S3r (23.212 ppm) con un porcentaje de remoción del 11.6 %, los resultados coinciden con lo resaltado por Hoyos & Guerrero (2013) donde se reporta una fitoextracción de 178.75 ppm de cadmio, en el tratamiento donde se suministró 2100 ppm totales incorporando 300 ppm cada 8 días durante 60 días.

**Figura 4**

*Gráfico de barras de la remoción de Cd en el suelo*

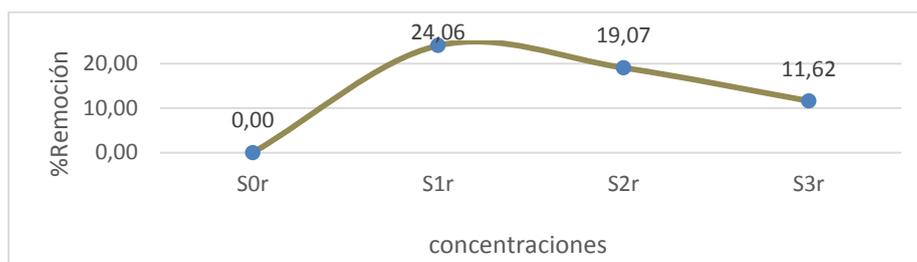


**Nota:** Abreviaturas; [Cd]=concentración de cadmio, S0r=testigo rábano, S1r= contaminado a 51.99 ppm rábano, S2r= contaminado a 99.56 ppm rábano, S3r= contaminado a 199.73 ppm rábano.

En la Figura 4 se puede visualizar la comparativa de la concentración de cadmio inicial y final en el suelo, es evidente la reducción del contaminante denotando el efecto positivo para el tratamiento de fitorremediación con la especie *Raphanus sativus* al término del proyecto. La tendencia establece que al aumentar los niveles de contaminación la concentración de cadmio removida en los suelos contaminados es mayor.

**Figura 5**

*Curva del porcentaje de remoción de Cd en el suelo*



**Nota:** Abreviaturas; %Remoción=porcentaje de remoción de cadmio, S0r=testigo rábano, S1r= contaminado a 51.99 ppm rábano, S2r= contaminado a 99.56 ppm rábano, S3r= contaminado a 199.73 ppm rábano.

En la Figura 5 se muestra la curva del porcentaje de remoción de Cd en los tratamientos, mostrando que el tratamiento más efectivo de remoción se encuentra en el tratamiento S1r dado que el porcentaje de remoción de cadmio va decreciendo conforme aumenta la concentración del contaminante en el suelo, se deduce que la reducción del contaminante denota un efecto positivo para el tratamiento de fitorremediación con la

especie *Raphanus sativus*. La tendencia establece que al aumentar los niveles de contaminación el porcentaje de remoción es menor.

En la tabla 8 se muestra los resultados de los análisis de Cd en los tejidos de la planta para determinar la existencia de la disminución del contaminante por la siembra de la especie vegetal, también se muestra la eficiencia fitoextractora de cadmio de la planta en la parte de la raíz y la parte aérea.

**Tabla 8.**

*Resumen de la eficiencia de la planta Raphanus sativus en la remoción de cadmio.*

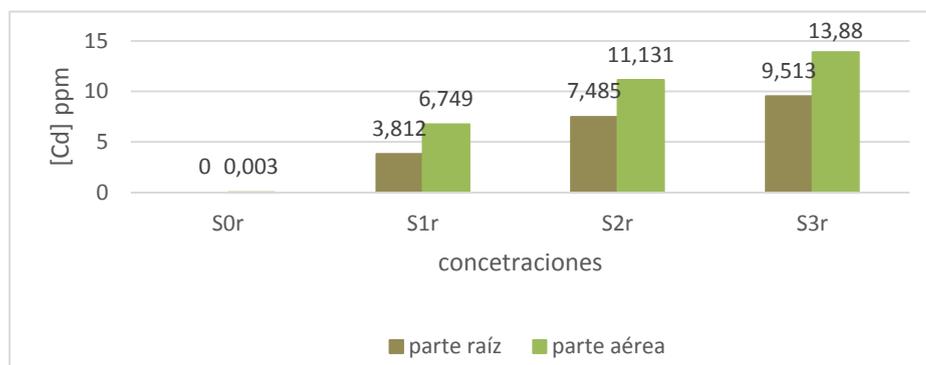
Tratamientos	Pérdidas (ppm)	Parte Raíz		Parte aérea		Eficiencia total (%)
		[Cd] (ppm)	Eficiencia raíz (%)	[Cd] (ppm)	Eficiencia hojas (%)	
<b>S0r</b>	0	0	0	0	0	0
<b>S1r</b>	1.95	3.812	7.33	6.749	12.98	20.31
<b>S2r</b>	0.37	7.485	7.52	11.131	11.18	18.70
<b>S3r</b>	0.00	9.513	4.76	13.88	6.95	11.71

**Nota:** [Cd]=concentración de cadmio, S0r = suelo testigo + rábano, S1r = suelo contaminado a 51.99 ppm + rábano, S2r = suelo contaminado a 99.56 ppm + rábano, S3r = suelo contaminado a 199.73 ppm + rábano.

Los resultados sugieren que los efectos fitoextractores de *Raphanus sativus* de la familia de las *Brassicaceae* muestran una menor cantidad de Cd en la raíz dando un valor de 9.513 ppm, mientras que en la parte aérea fue de 11.131 ppm, este valor difiere al obtenido por Hoyos & Guerrero (2013), en su estudio en el que se detalla una mayor concentración de Cd en la parte de la raíz. Los resultados de la parte aérea de la especie *Raphanus sativus* con un valor de 53.25 ppm, mientras que en la parte de la raíz fue de 125.25 ppm. Esta diferencia en los resultados se debe a la mejora del sustrato ya que se incorporó 80 % de musgo + 20 % de humus, también se dio un control de 12 horas luz y 12 horas oscuridad. Estas diferencias con el experimento se debe a que no se utilizó enmiendas orgánicas, ni se controló el parámetro horas/Luz y no se realizó el trasplante de la especie al medio contaminado. Una forma de destacar los resultados obtenidos se da al comparar el valor obtenido en la parte de la raíz (9.513 ppm) con los obtenidos por Hesami *et al.* (2018) el cual demostró que la especie *Erysimum crassicaule* perteneciente a la misma familia *Brassicaceae* logró concentrar 3.40 ppm de Cd en su raíz un valor inferior al dado por la *Raphanus sativus*.

**Figura 6.**

*Concentración de cadmio en la parte aérea y la parte de la raíz del rábano.*

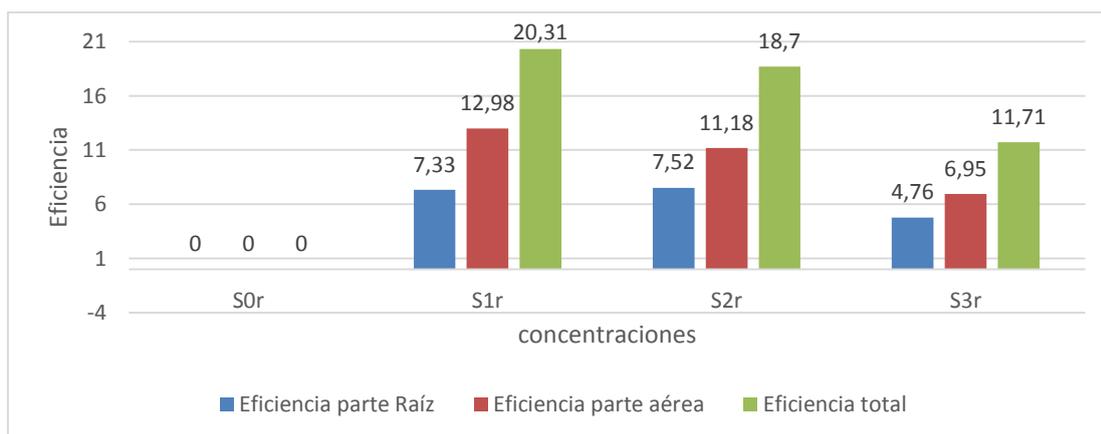


**Nota:** Abreviaturas; [Cd]=concentración de cadmio, ppm = partes por millón.

En la Figura 6 se puede visualizar la comparativa del cadmio presente en la raíz y la parte aérea del rábano (*Raphanus sativus*), se establece que a mayor concentración del contaminante, aumenta su extracción y por ende es más su acumulación en los tejidos de la planta. En todos los tratamientos la concentración de cadmio en la parte aérea de la planta es mayor que en la parte de la raíz lo cual está relacionado a la translocación del metal hacia los demás tejidos. El tratamiento que presentó un valor de concentración de cadmio más alto es el tratamiento con etiqueta S3r.

**Figura 7**

*Comparativa de la eficiencia fitoextractora de la planta *Raphanus sativus*.*



**Nota:** abreviaturas; [Cd] = concentración de cadmio, S0r = suelo testigo + rábano, S1r = suelo contaminado a 51.99 ppm + rábano, S2r = suelo contaminado a 99.56 ppm + rábano, S3r = suelo contaminado a 199.73 ppm + rábano.

En la Figura 7 se visualiza los valores de la eficiencia de la especie *Raphanus sativus* en relación a la concentración de cadmio medido en sus tejidos, para la parte aérea

y la parte raíz, analizando el grupo de plantas del tratamiento S2r estas muestran la mayor eficiencia de extracción de cadmio en la parte de la raíz con un 7.48 %. El grupo de plantas que muestran una mayor eficiencia extractora de cadmio en la parte aérea son las del tratamiento S1r. Finalmente el grupo de plantas del tratamiento S3r aunque mostraron un valor mayor de cadmio en los análisis, muestran la más baja eficiencia de extracción de cadmio en relación a la concentración inicial de cadmio en el suelo.

#### **4.4. Análisis de la fisiología vegetal**

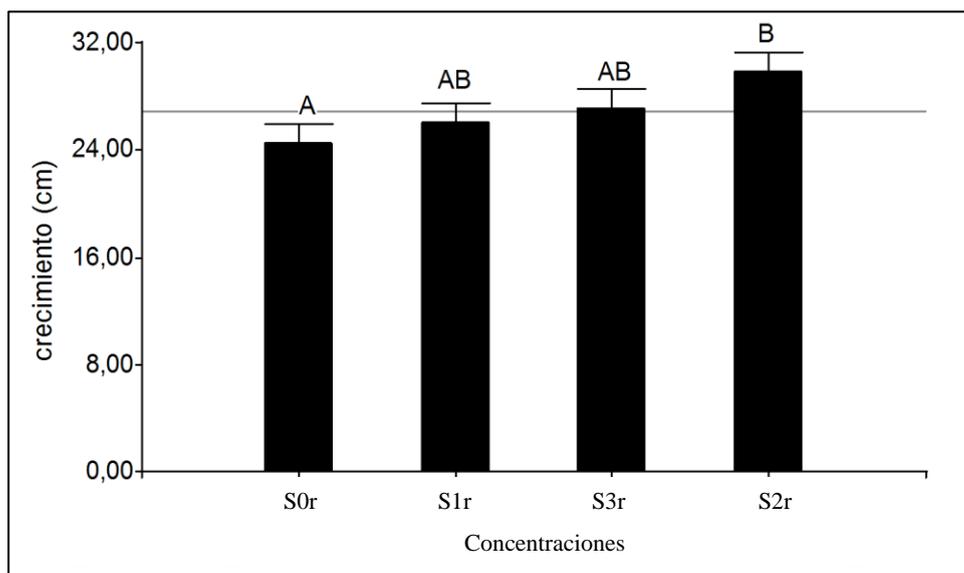
La obtención de los datos de crecimiento de la planta se recopiló a una temperatura media de 24.4 °C, sin control de horas luz y humedad del 89 %, equitativa para cada tratamiento.

##### ***4.4.1. Crecimiento de la planta***

El diseño experimental con un nivel de confianza del 95 % y un alfa = 0.05 resultó un valor de la prueba  $F = 2.60$ ; un valor de  $P = 0.0581$ , resultando que al ser mayor el valor de  $P$  que el valor de alfa se rechaza la hipótesis nula en referencia que en promedio el crecimiento de las plantas de los distintos tratamientos es el mismo, aceptando la hipótesis alterna referente a que el crecimiento en al menos un grupo de plantas de los tratamientos es distinto. El test de Turkey arrojó los siguientes resultados: un DMS = 5.246 identificando la diferencia en las medias del tratamiento S2r y S0r resultando un mayor crecimiento en el tratamiento S2r con una media = 29.89 cm. Para visualizar el análisis dirigirse al Anexo 4.1.1. ANOVA para el Crecimiento de la planta.

**Figura 8**

*Diseño crecimiento por tratamiento*

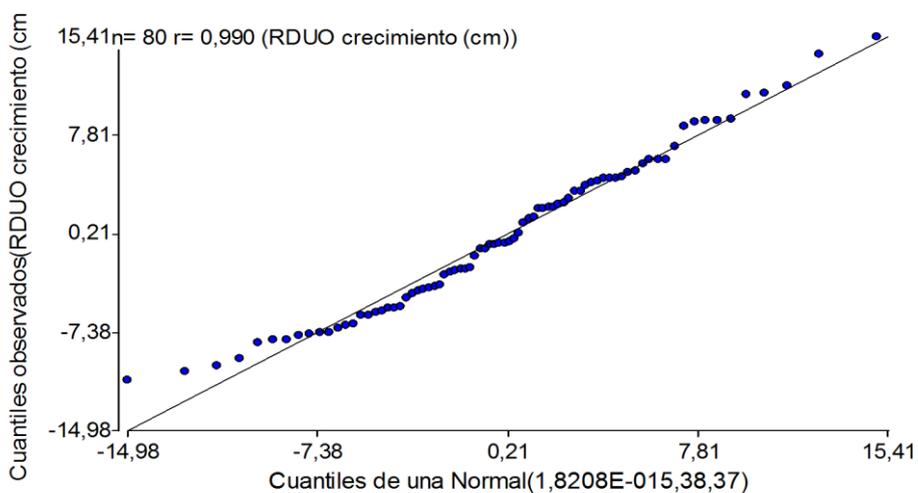


**Nota:** Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

La Figura 8 muestra las diferencias significativas entre las medias del crecimiento de los tratamientos considerando el bigote el valor del DMS = 5.246 resultante para poder encontrar las diferencias significativas denotando que testigo S0r es diferente al tratamiento S2r, la prueba de normalidad de Kolmogorov dio un  $P = 0.7564$ , es decir mayor al nivel de significancia de 0.05 demostrando que el conjunto de datos presenta normalidad y el diseño es el correcto para el conjunto de datos.

**Figura 9**

*Análisis de normalidad RDUO Crecimiento (cm)*



**Nota:** se considera el residuo de los valores del crecimiento para la comparación con los cuantiles de la normalidad.

En la Figura 9 demuestra la alineación de los datos a la recta que correlaciona los cuartiles observados y los cuartiles de la normal dando un valor de correlación = 0.990, es decir tiene una distribución normal.

#### 4.4.2. Índice de germinación

Las primeras raíces comenzaron a emerger a las 29 horas del experimento de germinación, se midió el PGR (porcentaje de germinación relativo), el CRR (crecimiento radicular relativo) para el cálculo del (IG) índice de germinación aplicando la metodología propuesta por Varnero *et al.* (2007) debido a la carencia de información reciente en cuanto al índice de germinación de las especies vegetales.

En la tabla 9 se puede visualizar los datos obtenidos para cada variable cuantificable utilizada para el cálculo del índice de germinación por especie vegetal considerando el respectivo tratamiento en comparación con el testigo o blanco de las respectivas especies *Raphanus sativus* y *Brassica rapa*.

**Tabla 9.**

*Resumen del índice de germinación por tratamiento y por planta.*

Datos	<i>Raphanus sativus</i>				<i>Brassica rapa</i>			
	S0r	S1r	S2r	S3r	S0n	S1n	S2n	S3n
SG	16	17	20	17	11	14	13	10
PGR (%)	100	106.25	125	106.25	100	127.27	118.18	90.9
ER (cm)	2.26	2.19	1.89	1.77	0.77	0.64	0.74	0.64
CRR (%)	100	96.71	83.53	78.3	100	83.19	96.56	82.82
IG (%)	100	102.75	104.41	83.19	100	105.88	114.12	75.29

**Nota:** SG=semillas germinadas, PGR=porcentaje de germinación relativo, ER=elongación radicular, CRR=crecimiento radicular relativo, IG=Índice de germinación.

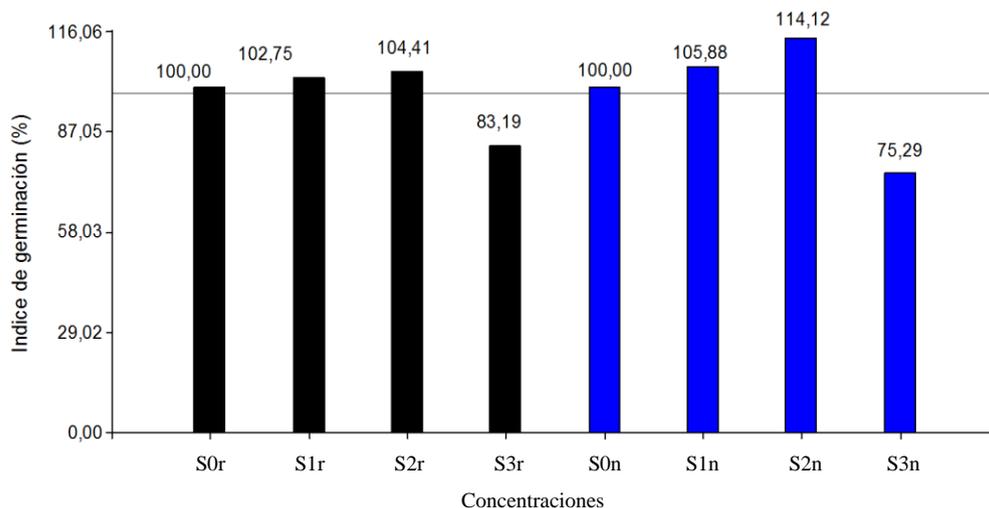
En cuanto al índice de germinación la especie *Raphanus sativus* en el tratamiento testigo S0r tuvo la menor cantidad de semillas germinadas (16) en contraste con el tratamiento S2r que obtuvo el mayor número de semillas germinadas (20). En cambio para la especie *Brassica rapa* el tratamiento que obtuvo menor número de semillas germinadas fue el S3n con 10 semillas germinadas mientras que el tratamiento con más semillas germinadas fue el S1n con 14. También se resalta que el índice de germinación más alto se dio para el tratamiento S3r en *Raphanus sativus*, y de igual forma el tratamiento S3n para el índice más alto de germinación en *Brassica rapa*. Según establece Tam & Tiquia (1994); Zucconi *et al.* (1981) el valor del índice de germinación menor o

igual al 50 % demuestra la presencia de sustancias fitotóxicas dado que los valores del índice de germinación son mayores al 50 % no se evidencia efectos tóxicos a su germinación pero se destaca la mayor sensibilidad de la especie *Brassica rapa* a la exposición de cadmio.

Comparando los valores más bajos de índice de germinación obtenidos para la especie *Raphanus sativus* (83.19 %) con lo expuesto por Varnero *et al.* (2007) cuyos resultados arrojan que su índice de germinación es menor al 80 % para la especie *Lactuca sativa*, demostrando así una mayor tolerancia al metal Cd para las especies *Raphanus sativus* y *Brassica rapa* frente a otras especies de plantas usadas en fitorremediación.

**Figura 10.**

*Índice de germinación por planta.*



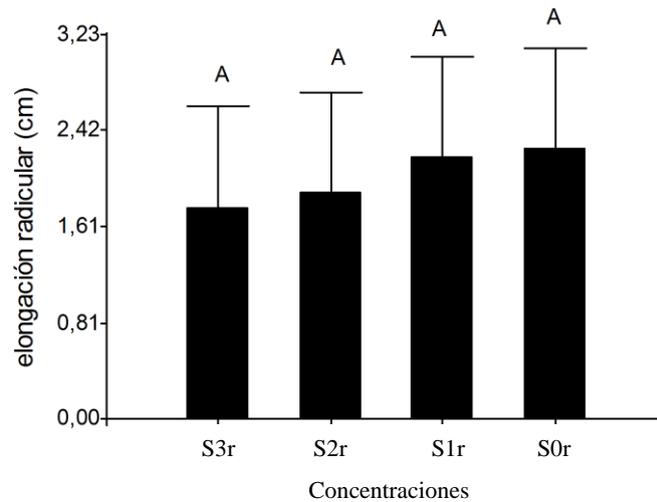
**Nota:** La línea es la media del índice de germinación; Abreviaturas: S0r= testigo rábano, S1r= contaminado a 51.99 ppm rábano, S2r= contaminado a 99.56 ppm rábano, S3r= contaminado a 199.73 ppm rábano, S0n= testigo nabo, S1n= contaminado a 51.99 ppm nabo, S2n= contaminado a 99.56 ppm nabo, S3n= contaminado a 199.73 ppm nabo.

En la Figura 10 se puede visualizar el porcentaje del índice de germinación de las especies *Raphanus sativus* y *Brassica rapa*, los resultados obtenidos para ambas especies muestran un índice de germinación mayor en los tratamientos S1 y S2 cuyos valores son incluso superiores al índice de germinación del testigo, para las dos especies se evidencia la reducción del índice de germinación en el tratamiento S3.

**4.4.2.1. Elongación radicular de la especie *Raphanus sativus*.** Para el análisis de los datos del crecimiento radicular se aplicó un ANOVA con el nivel de confianza del 95% y un valor de significancia de 0.05, dando un p-valor = 0.3775 mayor al nivel de significancia es decir se acepta la hipótesis nula que establece que en promedio el desarrollo radicular en los tratamientos es similar, ya que no existen diferencias significativas.

**Figura 11.**

*Elongación radicular del rábano.*



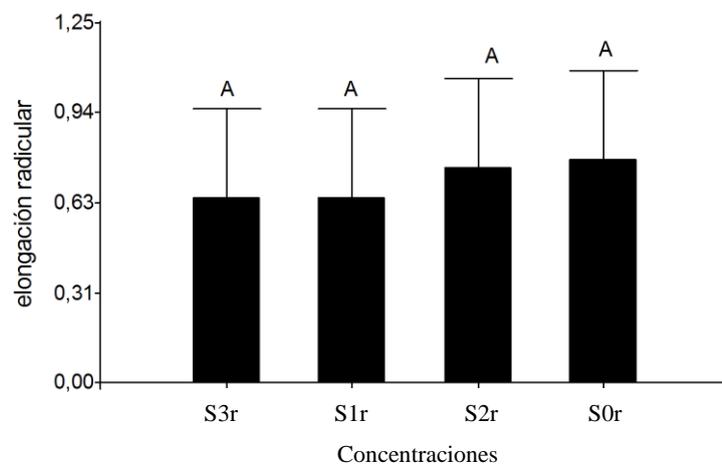
**Nota:** Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

La Figura 11 indica en forma gráfica la elongación radicular de los distintos tratamientos, se puede evidenciar que las medias de la elongación radicular aplicando el test de Turkey no encontró diferencias significativas, el valor del bigote fue establecido con el DMS = 0.84767 calculado en el test de Turkey, para visualizar el análisis estadístico dirigirse al Anexo 4.1.2. Elongación radicular del rábano.

**4.4.2.2. Elongación radicular de la especie *Brassica rapa*.** Para el análisis de los datos del crecimiento radicular se aplicó un ANOVA con el nivel de confianza del 95% y un valor de significancia de 0.05, dando un p-valor = 0.3775 mayor al nivel de significancia es decir se acepta la hipótesis nula referente a que en promedio el desarrollo radicular en los tratamientos es similar, no existen diferencias significativas.

**Figura 12**

*Elongación radicular del nabo silvestre*



**Nota:** Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

En la Figura 12 se puede evidenciar que las medias de la elongación radicular basado en el test de Turkey no encontró diferencias significativas, el valor del bigote fue establecido con el DMS = 0.30893 calculado en el test de Turkey, para visualizar el análisis estadístico dirigirse al Anexo 4.1.3. Elongación radicular del nabo silvestre.

#### **4.4.3. Número de hojas**

Las hojas embrionarias o cotiledones emergieron simultáneamente a los 5 días de la siembra, las hojas verdaderas brotaron al término de siete días en el tratamiento, presentaron una media de 7 hojas por planta para el tratamiento a S2r y S3r, mientras que para el tratamiento S1r y S0r fue de 6 hojas.

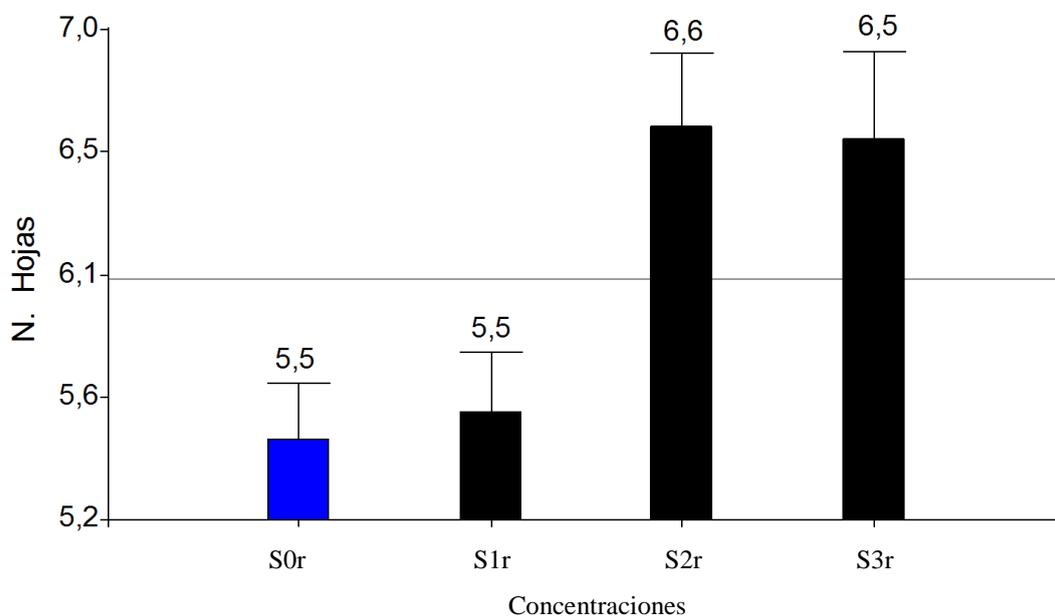
Se realizó una inferencia basada en una muestra utilizando la prueba T para una media de 6,04 dando un valor de  $P = 0.51$  es decir un  $p$  (unilateral) es mayor que el nivel de significancia del 0.05 es decir se acepta la hipótesis nula referente a que en promedio el número de hojas es de máximo 6. Para visualizar el análisis estadístico dirigirse al anexo 4.1.4.A Prueba T para una media en el número de hojas.

Realizando una comparación de inferencia basada en 2 muestras utilizando la prueba T para la comparación entre el número de hojas del tratamiento blanco entre los demás tratamientos se establece que el valor de  $P = 0.9926$  prueba unilateral, es decir que el valor de  $P$  es mayor que el nivel de significancia de 0.05, se acepta la hipótesis nula referente a que el número de hojas del tratamiento S0r es menor o igual que los demás

tratamientos, es decir no hay diferencias significativas. Para visualizar el análisis estadístico dirigirse al anexo 4.1.4.B inferencia basada en 2 muestras prueba T.

**Figura 13**

*Media del número de hojas por tratamiento*



**Nota:** se realizó una comparación en relación al número de hojas del tratamiento blanco.

En la Figura 13 se puede visualizar gráficamente la comparación de la media del número de hojas por tratamiento, por lo tanto la hipótesis que afirma que el número de hojas del tratamiento S0r es menor o igual que los demás tratamientos, es aceptada al no existir diferencias significativas.

La prueba de normalidad de Kolmogorov dio un  $P = 0.0119$ , es decir  $< 0.05$  demostrando que el conjunto de datos no presentan una distribución normal. Para visualizar el análisis estadístico dirigirse al anexo 4.1.4.C. ANOVA para el número de hojas.

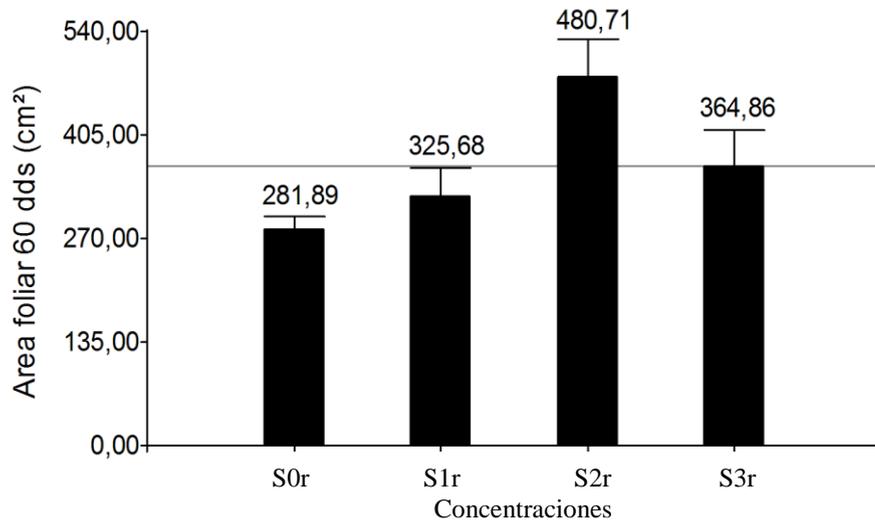
#### **4.4.4. Área foliar**

Se realizó una inferencia basada en una muestra utilizando la prueba T para una media del área foliar de  $363.29 \text{ cm}^2$  dando un valor de  $P = 0.5001$ , es decir un p (unilateral) es mayor que el nivel de significancia del 0.05 es decir se acepta la hipótesis nula que

hace referencia a que en promedio el área foliar es de máximo 363.29 cm<sup>2</sup>. Para visualizar el análisis estadístico dirigirse al anexo 4.1.5. Prueba T para el Área foliar.

**Figura 14.**

*Promedio del área foliar por tratamiento.*



**Nota:** se utilizó como valor del bigote el valor del error estándar.

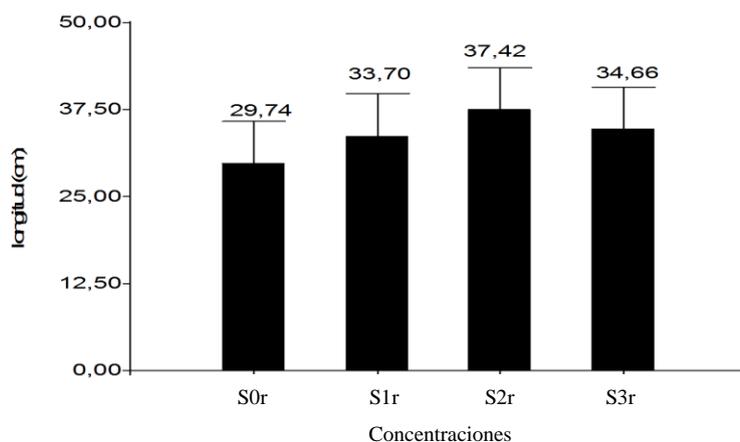
En la Figura 14 se muestra los valores representados gráficamente del área foliar al término de los 60 dds, se puede visualizar que en promedio el tratamiento S2r tiene un área foliar mayor con 480.71 cm<sup>2</sup> de área, contrastando al área foliar del tratamiento blanco con un valor de 281.89 cm<sup>2</sup> siendo inferior incluso que la media del conjunto de datos.

#### **4.4.5. Longitud de la planta**

El análisis de varianza arroja los siguientes resultados, un p-valor = 0.0137 que es menor al valor de significancia de 0.05 por consiguiente la hipótesis nula se acepta es decir que en promedio no hay diferencias significativas entre la longitud de las plantas de los tratamientos. Para visualizar el análisis estadístico dirigirse al anexo 4.1.6.ANOVA para la Longitud de la planta.

**Figura 15.**

*Media de la longitud por tratamiento.*

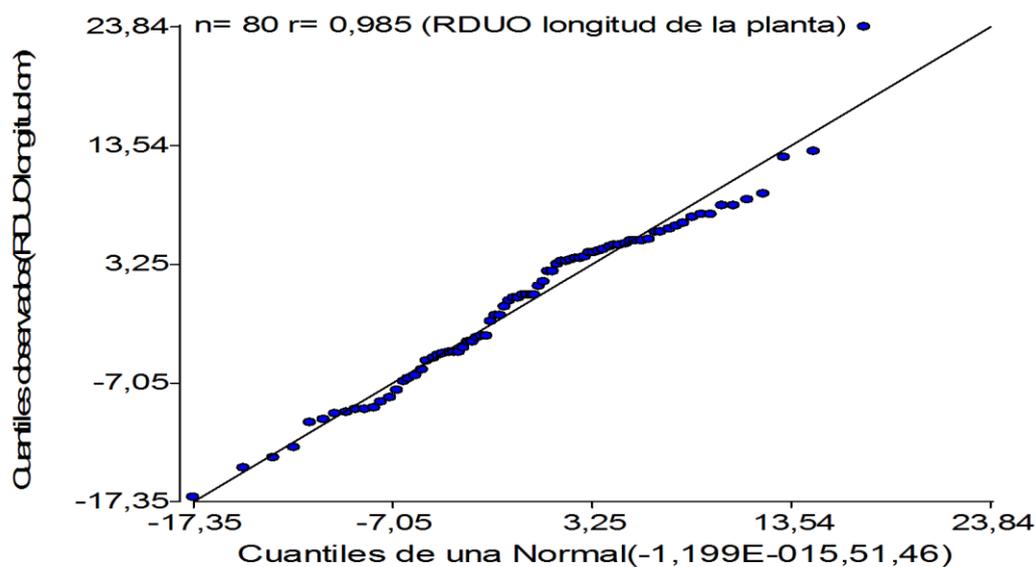


**Nota:** para graficar el bigote se utilizó el DMS=6,07529.

La Figura 15 representa gráficamente que no existe diferencia significativa entre las medias de la longitud de las plantas de los diferentes tratamientos. Cabe resaltar que el tratamiento S2r presentó los valores más altos en relación a la longitud de las plantas de *Raphanus sativus* dando un valor de 37.42 cm.

**Figura 16.**

*Normalidad de los datos de longitud.*



**Nota:** se consideró el residuo de los valores de longitud de la planta en cm para la comparación con los cuantiles de la normalidad.

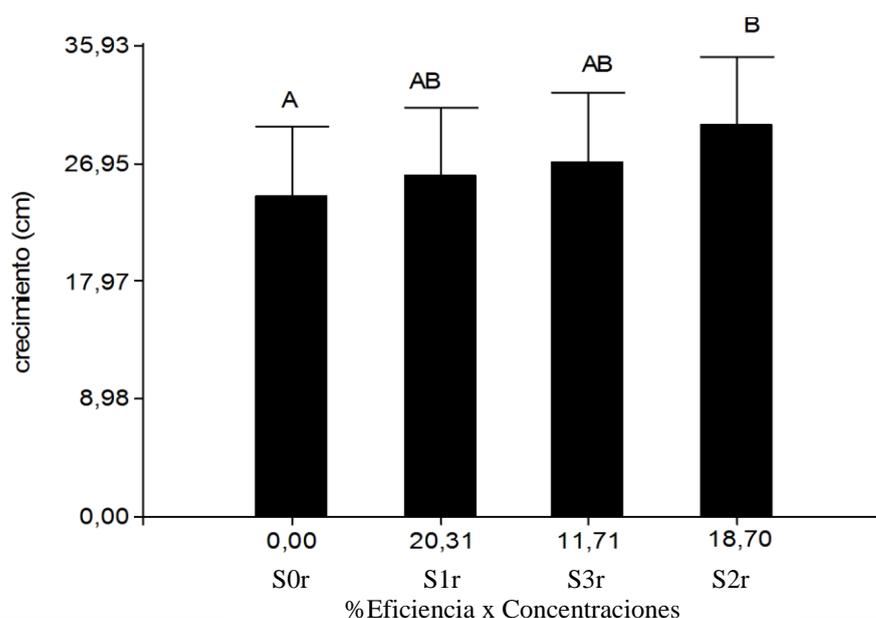
En la Figura 16 se muestra la alineación de los datos a la recta que correlaciona los cuartiles observados y los cuantiles de una normal dando un valor de correlación = 0.985, es decir tiene una tendencia a una distribución normal.

#### 4.5. Eficiencia de la fitoextracción

Realizando un análisis de varianza completamente al azar utilizando un ANOVA con un nivel de confianza del 95% y un valor de significancia del 0.05 para los datos de crecimiento por eficiencia en la remoción de cadmio se obtuvo un P-valor = 0.0581 que es mayor a la significancia de 0.05 por ende se rechaza la hipótesis nula estableciendo que al menos una media del crecimiento es diferente en comparación con la eficiencia de la fitoextracción por tratamiento, para visualizar el análisis estadístico dirigirse al anexo 4.1.7. ANOVA para la eficiencia de la planta.

**Figura 17.**

*Comparativa del Crecimiento por la eficiencia de cada tratamiento*



**Nota:** para graficar el bigote se utilizó el DMS= 5,24600; fuente: Autores (2021)

En la Figura 17 se puede visualizar en un gráfico de barras y bigotes el mayor crecimiento 29.89 cm de media se obtuvo que en el tratamiento S2r con una eficiencia fitoextractora del 18.7% es decir que el crecimiento no se ve afectado por la contaminación con  $CdCl_2H_2O$  hasta la concentración S2r pero tiende a reducirse a 27.09 cm en el tratamiento S3r con una eficiencia fitoextractora de 11.71%.

#### 4.5.1. Factor de bioconcentración (BCF)

Se calcula con los valores de la tabla 10, es necesario conocer la concentración de cadmio en la parte de la raíz y la parte aérea de la planta en relación con la concentración de cadmio en el suelo posterior al tratamiento.

**Tabla 10.**

*Resumen de BCF raíz y BCF aérea.*

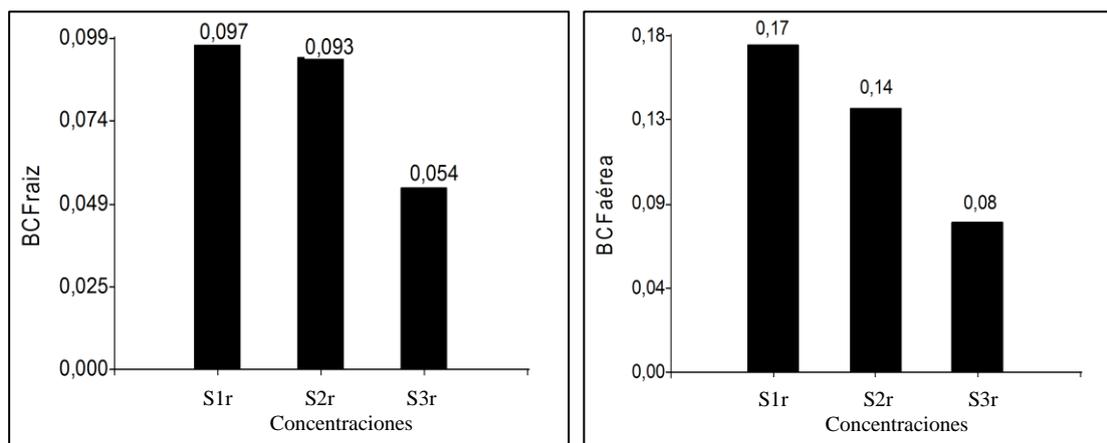
Tratamiento	[Cd] parte raíz (ppm)	[Cd] parte aérea (ppm)	[Cd] Suelo (ppm)	BCF raíz	BCF aérea	BCF
S1r	3.812	6.749	39.482	0.097	0.171	0.268
S2r	7.485	11.131	80.576	0.093	0.138	0.231
S3r	9.513	13.88	176.518	0.054	0.079	0.133

**Nota:** BCF=factor de bioconcentracion, [Cd]= concentracion de cadmio, ppm=partes por millon.

La especie *Raphanus sativus* muestra potencial de acumulación de Cd en sus tejidos, con un valor del factor de bioconcentración (BCF) correspondiente a 0.268 cuyo resultado se asemeja al obtenido por Boros-Lajszner *et al.* (2020) en *Quercus robur* (Roble común), por dicha razón la investigación determina su eficiencia en las técnicas de fitoextracción de Cd. La especie *Raphanus sativus* conocido comúnmente como rábano, presenta diferentes mecanismos para soportar la alta cantidad de cadmio que logran acumular en sus tejidos. De igual forma al comparar el BCF de *Hieracium pilosella* (vallosilla), también presenta una capacidad similar de acumular Cd, su factor de bioconcentración es de 0.35. Aunque los metales pesados en general ingresan a la planta a través de la raíz, algunas especies los tienden a hiperacumular los metales en los tejidos radiculares, estos son retenidos por las células madre que son estructuras que desarrollan y protegen los tejidos de la planta, entre ellos el tejido foliar según Cay *et al.* (2019) de esta manera, las células madre no permiten que la planta transporte grandes cantidades de metales a sus partes aéreas (tallo y hojas) y, por tanto, no asimilan la toxicidad del cadmio y su efecto en el desarrollo fisiológico y los procesos metabólicos es menor.

**Figura 18**

*Factor de Bioconcentración de la raíz y la parte aérea*



**Nota:** BCF= factor de bioconcentración.

La Figura 18 muestra el BCF tanto para la raíz, como para la parte aérea de la planta para cada tratamiento, el cual es inferior a 1 dando como resultado que la especie *Raphanus sativus* tiene una respuesta excluyente del metal cadmio siguiendo la metodología de Medina & Montano (2014).

#### 4.5.2. Factor de Translocación (TF)

En la tabla 11 se muestra el valor del factor de translocación calculado mediante la relación de la concentración de cadmio en la parte aérea dividida por la concentración de cadmio en la parte de la raíz.

**Tabla 11.**

*Resultados del factor de translocación (TF).*

Tratamiento	[Cd] parte raíz (ppm)	[Cd] parte aérea (ppm)	TF
S1r	3.812	6.749	1.7704617
S2r	7.485	11.131	1.48710755
S3r	9.513	13.88	1.45905603

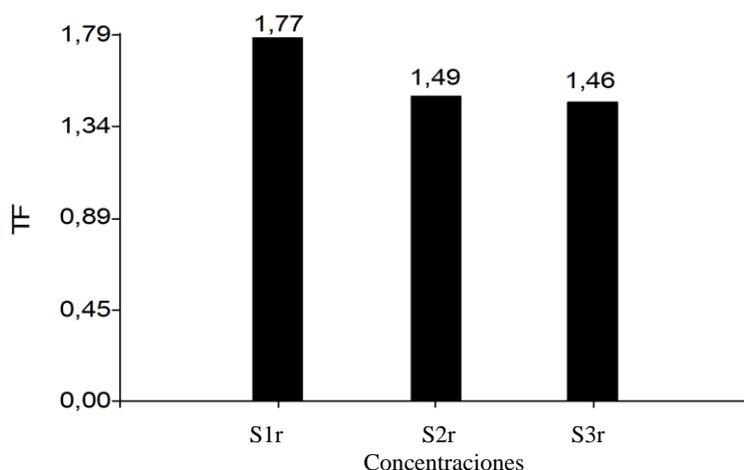
**Nota:** [Cd]=concentración de cadmio, TF=factor de translocación.

El factor de translocación (TF) de *Raphanus sativus* que se obtuvo en el tratamiento S1r fue de 1.77, cuyo resultado se asemeja al obtenido por Mishra *et al.* (2017) con valor del factor de translocación correspondiente al 1.75, así mismo se encontró un valor semejante para el factor de translocación de 1.48 en el estudio de Midhat *et al.*

(2019). El proceso de translocación de Cd a la parte aérea de la planta hace que la actividad fotosintética también se reduzca (Ramírez Gottfried *et al.*, 2019). Por ejemplo, la planta de maíz en suelos contaminados con Cd y plomo (Pb) presenta una disminución en la materia seca de hojas, tallos y raíces. También, su crecimiento es más lento, comparado con plantas sembradas en suelos donde no hay presencia de este metal. No obstante, es utilizada regularmente para fitoestabilización, ya que su Factor de Translocación (TF) es menor a uno (Munive *et al.*, 2018). Aunque en general, diferentes plantas cultivadas en suelos metalíferos tienen la capacidad de acumular altas concentraciones de metales pesados en sus diferentes partes sin efectos negativos sobre el crecimiento, como algunas especies de la familia *Brassicaceae*, *Poaceae*, *Fabaceae* o *Asteraceae* (Pandey & Bajpai, 2018).

**Figura 19.**

*Factor de translocación por tratamiento comparativa.*



**Nota:** TF=factor de translocación, ppm=partes por millón.

La Figura 19 muestra de manera gráfica el factor de translocación de la especie *Raphanus sativus* en los tratamientos, el tratamiento S1r presenta el valor más alto con un TF de 1.77, este resultado se obtiene de la relación entre la concentración del metal presente en la parte aérea con la concentración del metal en la parte de la raíz. Todos los tratamientos tienen un valor de TF superior a 1 en los tejidos de la *Raphanus sativus*, es decir trasladan eficientemente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta por lo que su potencial es la de hiperacumular metales pesados en la parte aérea.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Según la evaluación de la capacidad fitoremediadora de la especie *Raphanus sativus* con los resultados del experimento sujeto a las concentraciones de contaminación de suelo de las jardineras (S1r, S2r y S3r), se determinó que el mejor porcentaje de eficiencia de la planta fue 20.31 % en el suelo de la jardinera S1r, el experimento también determinó el factor de bioconcentración (BCF) que fue  $< 1$  para todas las concentraciones por lo cual se concluye que la especie vegetal tiene tolerancia al metal pero presenta una respuesta excluyente al mismo y se resalta que el factor de translocación (TF) es  $>1$  para todas las concentraciones es decir que transloca de manera eficiente el cadmio a sus demás tejidos estableciendo su potencial fitorremediador.
- La exposición de la especie *Raphanus sativus* a suelos contaminados con cadmio a escala de laboratorio presentó una reducción de las concentraciones de cadmio en el suelo de hasta 23.21 ppm en los ejemplares de la jardinera S3r, el mejor porcentaje de remoción de Cd fue de 24.06 % en el suelo de la jardinera S1r, la cuantificación de cadmio en la planta y en el suelo contaminado se dio al finalizar el experimento a los 60 días después de la siembra mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA).
- Existió la tendencia en la especie *Raphanus sativus*, de acumular cadmio en los tejidos de la parte aérea ya que en los ejemplares de todas las jardineras la concentración de Cd es mayor en las hojas en comparación con la concentración obtenida en la parte de la raíz, el experimento reporta un total de 13.88 ppm de Cd en la jardinera S3r para la parte aérea, comparado con 9.513 ppm de Cd en la jardinera S3r para la parte de la raíz. Los ejemplares de la jardinera S3r de la especie *Raphanus sativus* acumularon la mayor cantidad en ppm del metal llegando a una eficiencia de 11.71%.
- En la prueba de experimentación no se logró determinar la especie con mejor capacidad fitorremediadora de cadmio debido a que la especie *Brassica rapa* no

se desarrolló en el medio contaminado a pesar de que en la prueba de germinación la semilla da un índice de germinación (IG) > 70%, en contraste con la especie *Raphanus sativus* quien muestra bioacumulación de cadmio en los tejidos de las plantas de cada tratamiento estableciendo un porcentaje de remoción del 24.05 %. En la experimentación con la especie *Raphanus sativus* a consecuencias de la exposición a las concentraciones de  $\text{CdCl}_2\text{H}_2\text{O}$ , no se evidenció una influencia negativa en el desarrollo fisiológico, esto se concluyó mediante la comparación de las plantas de control con las expuestas al contaminante mediante un análisis de varianza. No se mostró diferencias estadísticamente significativa en el desarrollo radicular, tampoco se vio afectado negativamente el crecimiento debido a que en todos los tratamientos se obtuvo una media de crecimiento mayor que los ejemplares de la especie de control. El metal cadmio afecta a la germinación de las semillas en los tratamientos S3r y S3n ocasionando la disminución del número de semillas germinadas debido a la alta concentración del metal cadmio.

## **1.2.Recomendaciones**

- Se sugiere un estudio que abarque un periodo de experimentación más prolongado para poder comprender de mejor manera la respuesta fisiológica de las especies vegetales al llegar al estado de madurez comprendiendo la floración y la formación de semillas ya que en muchas especies los contaminantes se concentran en las semillas o los frutos.
- Se recomienda mejorar las condiciones del tratamiento incorporando enmiendas orgánicas para mejorar las propiedades del suelo, adicionalmente realizar un control de horas luz para estimular el crecimiento y mejorar sus procesos biológicos.
- Se sugiere incinerar la cosecha de las plantas y evitar su ingesta porque posee una concentración del metal superior a la permitida para el consumo ya que puede ocasionar graves problemas a la salud.
- Se recomienda estudiar la tolerancia de las semillas al contaminante debido a que si las afecta negativamente la planta no se desarrollara en el medio de experimentación.
- Al momento de realizar el análisis de cadmio es necesario tener en cuenta la cantidad de materia orgánica presente en la muestra ya que puede presentar inconvenientes a la hora del análisis de laboratorio.
- Se recomienda al Laboratorio Ambiental LABSU nutrir su catálogo de análisis en plantas debido a que es necesario conocer parámetros como los micronutrientes y análisis de clorofila.
- Para mejorar los resultados obtenidos se recomienda realizar una investigación que relacione el pH del suelo para estudiar el efecto sobre la eficiencia la extracción de metales pesados como el cadmio.

## CAPITULO VI.

### 6. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

#### 6.1. Referencias bibliográficas

- Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.05.007>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Arévalo-López, J., Pichis-García, L., Olivera-Cayotopa, R., Rimachi-Valle, D., & Márquez-Dávila, M. (2021). Cite this article: Cayotopa-Torres. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 155–160. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.017>
- Astuti, S. I., Arso, S. P., & Wigati, P. A. (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Orellana 2015-2019. *Analisis Standar Pelayanan Minimal Pada Instalasi Rawat Jalan Di RSUD Kota Semarang*, 3, 103–111.
- ATSDR. (2008). *ToxFAQs sobre el cadmio*. 2.
- Baker, AJM y Brooks, RR (1989) Plantas superiores terrestres que hiperacumulan elementos metálicos. Una revisión de su distribución, ecología y fitoquímica. *Biorecovery*, 1, 81-126. <http://dx.doi.org/10.1080/01904168109362867>
- Bernal Figueroa, A. A. (2014). Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. In *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* (Vol. 5, Issue 2, pp. 245–258). <https://doi.org/10.22490/21456453.1340>
- Bonilla, S. (2013). Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación. In *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO*. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Boros-Lajszner, E., Wyszowska, J., & Kucharski, J. (2020). Application of white mustard and oats in the phytostabilisation of soil contaminated with cadmium with the addition of cellulose and urea. *Journal of Soils and Sediments*, 20(2), 931–942. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02473-6>
- Cay, S., Engin, M., Uyanik, A., Cay, C. y Guney, S. (2019). Phytoremediation of cadmium in soil and hydroponics by *Tradescantia fluminensis*. *Carpathian Journal*

- of Earth and Environmental Sciences, 14(2), 269-274.  
doi:10.26471/cjees/2019/014/078
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612.  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Díaz, L., Mendoza, E., Bravo, M., & Domínguez, N. (2018). Determination of levels of cadmium and lead in cocoa beans from organic cocoa farms in Vinces (Ecuador) [Determinación de Cadmio y Plomo en almendras de cacao (Theobroma cacao), proveniente de fincas de productores orgánicos del cantón Vinces. *Espiraes Revista Multidisciplinaria de Investigacion*, 2(15), 77–92.  
<http://revistaespirales.com/index.php/es/article/view/213%0Ahttps://www.latindex.org/latindex/ficha?folio=26456>
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48–60.
- Hesami, R., Salimi, A., & Ghaderian, S. M. (2018). Lead, zinc, and cadmium uptake, accumulation, and phytoremediation by plants growing around Tang-e Douzan lead–zinc mine, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8701–8714.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-1156-y>
- Hoyos-Cerna, M., & Guerrero-Padilla, A. (2013). BIOACUMULACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN Brassica oleracea SUBSP. CAPITATA (L.) METZG. Y Raphanus sativus L. In *Sciéndo* (Vol. 16, Issue 2).  
[https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/download/849/pdf\\_24](https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/download/849/pdf_24)
- INEN. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-CODEX Norma General Para Los Contaminantes Y Toxinas 193:2013*.  
[https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_codex\\_193.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_codex_193.pdf)
- INIAP. (2016). *Agroforestería Sostenible Agroforestería Sostenible en la Amazonía Ecuatoriana*, N ° 2.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). Determinación de metales pesados totales con digestión ácida y solubles lectura directa por Espectrofotometría de absorción atómica. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 16.  
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Metales+en+agua+por+Absorci>

- Kabata-Pendias, A. (2010). Trace elements in soils and plants: Fourth edition. In *Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- Luo, J.-S., & Zhang, Z. (2021). Mechanisms of cadmium phytoremediation and detoxification in plants. *The Crop Journal*, 9, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.02.001>
- Madrigal, I., Benoit, P., Barriuso, E., Réal, B., Dutertre, A., Moquet, M., Trejo, M., & Ortiz, L. (2008). Caracterización de la sorción y desorción de herbicidas en suelos con diferentes tipos de ocupación (Pesticide sorption and desorption from soils having different land use). *Revista Ingenieria e Investigacion (COL)*, 28(3), 96–104.
- Mayoral, E., de la Cruz, E., Longoria, L. C., & Nahmad-Achar, E. (2011). Estudio del proceso de adsorción-desorción de contaminantes en medios confinados mediante simulaciones computacionales. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 27(3), 253–261.
- Medina, K. D., & Montano, Y. N. (2014). Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el juncus arcticus contaminadas con el pasivo ambiental. *Universidad Nacional Santiago Antúnez De Mayolo*. [https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/p\\_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis\\_Medina\\_y\\_Montano\\_2014.pdf](https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis_Medina_y_Montano_2014.pdf)
- Méndez, N. L. (2020). *Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio : Revisión de Literatura*. 22.
- Midhat, L., Ouazzani, N., Hejjaj, A., Ouhammou, A., & Mandi, L. (2019). Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169(November 2018), 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.009>
- Mishra, T., Pandey, V. C., Singh, P., Singh, N. B., & Singh, N. (2017). Assessment of phytoremediation potential of native grass species growing on red mud deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 206–209.

- <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.12.015>
- Mite, F., Carrillo, M., & Durando, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas de Ecuador. *Xii Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo, June 2016*, 17–19.
- Munive Cerrón, R., Gamarra Sánchez, G., Munive Yachachi, Y., Puertas Ramos, F., Valdiviezo Gonzales, L., Cabello Torres, R., Universidad Nacional del Centro del Perú, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, & Universidad Cesar Vallejo. (2020). Lead and cadmium uptake by sunflower from contaminated soil and remediated with organic amendments in the form of compost and vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, *11*(2), 177–186. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.02.04>
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A., & Gamarra, G. (2018). Phytoremediation with corn (*Zea mays* L.) and Stevia compost on soils degraded by contamination with heavy metals. *Scientia Agropecuaria*, *9*(4), 551–560. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11>
- Muso Cachumba, J. J. (2012). DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD FITORREMIADORA DE CADMIO DEL CAMACHO (*Xanthosoma undipes* Koch) ESPECIE VEGETAL NATIVA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE EP PETROECUADOR EN EL DISTRITO AMAZÓNICO. In *ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO DEPARTAMENTO*. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6255/1/T-ESPE-040215.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Organización Mundial de la Salud. (2020). PROGRAMA CONJUNTO FAO/OMS SOBRE NORMAS ALIMENTARIAS COMITÉ DEL CODEX SOBRE CONTAMINANTES DE LOS ALIMENTOS Décima. *CX/CF*, *20*(14), 141–146, 154–155. [http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-14%252FWD%252Fcf14\\_07s.pdf](http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-14%252FWD%252Fcf14_07s.pdf)
- Pandey, V. C., & Bajpai, O. (2018). Phytoremediation: From Theory Toward Practice. In *Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813912-7.00001-6>
- Pardo Barón, L. M. (2016). Perfil del riesgo en inocuidad asociado a la presencia de

- residuos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). *Ciencia Unisalle - Universidad de La Salle. Colombia*, 1–81. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1055&context=ing\\_alimentos](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1055&context=ing_alimentos)
- Rafati, M., Khorasani, N., Moattar, F., Shirvany, A., Moraghebi, F., & Hosseinzadeh, S. (2011). Phytoremediation potential of *populus alba* and *morus alba* for cadmium, chromium and nickel absorption from polluted soil. *International Journal of Environmental Research*, 5(4), 961–970.
- Ramírez Gottfried, R. I., García Carrillo, M., Alvares Reyna, V. D. P., González Cervantes, G., & Hernández Hernández, V. (2019). Potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1529–1540. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i7.1731>
- Remache Tixe, A. M. (2013). *VALIDACIÓN DE MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE METALES EN DIFERENTES MATRICES POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1859/1/T-UCE-0017-39.pdf>
- Rodríguez-Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *Medisan*, 21(12), 3372–3385. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1029-30192017001200012](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192017001200012)
- Roth, C. (2010). Ficha de datos de seguridad Ficha de datos de seguridad. *Carlo Erba Reagents*, 2(1907), 2–7. [https://hybris-static-assets-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/sys-master/pdfs/h96/hc3/9673630253086/EN\\_ST-WB-MSDS-2601489-1-1-1.PDF](https://hybris-static-assets-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/sys-master/pdfs/h96/hc3/9673630253086/EN_ST-WB-MSDS-2601489-1-1-1.PDF)
- Rzedowski, J., & Calderon Rzedowski, G. (2010). Flora Fanerogámica del Valle de México. In *Lexicon of Pulse Crops*. <https://doi.org/10.1201/b22282-12>
- Sammour, R. H., Karam, M. A., Morsi, Y. S., & Ali, R. M. (2021). Population structure and phylogenetic relationships in *brassica rapa* L. Subspecies by using isozyme markers. *Brazilian Journal of Biology*, 81(3), 601–610. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.226889>
- Sanz, S. B. (2015). Aplicación de la Fitorremediación. In *Universidad Complutense*.
- Tam, N. F. Y., & Tiquia, S. (1994). Assessing toxicity of spent pig litter using a seed germination technique. *Resources, Conservation and Recycling*, 11(1–4), 261–274.

[https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90094-9)

- Turner, A. (2019). Cadmium pigments in consumer products and their health risks. *Science of the Total Environment*, 657, 1409–1418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.096>
- Varnero, M. T., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). Índices de Fitotoxicidad de residuos orgánicos durante el copostage. *Revista Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7(1), 28–37. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912007000100003>
- Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A. G., & Pigna, M. (2010). Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 268–292. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005>
- Water Environment Federation. (2012). APHA, AWWA, WEF. “Standard Methods for examination of water and wastewater.” *Anales de Hidrología Médica*, 5(2), 185–186–186. [https://doi.org/10.5209/rev\\_ANHM.2012.v5.n2.40440](https://doi.org/10.5209/rev_ANHM.2012.v5.n2.40440)
- Yassi, A., Kjellström, T., De Kok, T., & Guidotti, T. L. (2002). Salud Ambiental Basica. In *Applied Economics Letters* (Vol. 23, Issue 6). [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/41273364/salud\\_basica.pdf?1452973386=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSalud\\_basica.pdf&Expires=1594855963&Signature=SOIyTCW3NL0waVEd~4cGQMEMkq9bQxIVdiGyd9ukF4I9lxwStW43VsIj4jeL9yYleQpNyqkcUamUyucIOzq](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/41273364/salud_basica.pdf?1452973386=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSalud_basica.pdf&Expires=1594855963&Signature=SOIyTCW3NL0waVEd~4cGQMEMkq9bQxIVdiGyd9ukF4I9lxwStW43VsIj4jeL9yYleQpNyqkcUamUyucIOzq)
- Zafra Mejía, C. A., Peña Valbuena, N. Á., & Álvarez Prieto, S. (2013). Contaminación por metales pesados en los sedimentos acumulados sobre el corredor vial Bogotá - Soacha. *Revista Tecnura*, 17(37), 99–108. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.3.a09>

## 6.2. Anexos

### Anexo 1. Certificados del Laboratorio Ambiental LABSU de la ciudad Puerto Francisco de Orellana (el Coca).

 <p><b>LABSU</b> LABORATORIO AMBIENTAL Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido</p>	<b>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO – LABORATORIO LABSU</b> E-mail: laboratorio@labsu.com Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Apto Quito: 17-10-7410 Telefax: 062881105 Servicio al Cliente 0993460306	Página 1 de 1
		<b>Oficio N°</b> <b><u>LABSU 21 - 090</u></b>
		<b>PRIORIDAD:</b> Alta

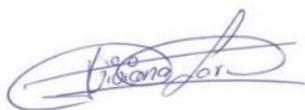
Orellana, 26 de octubre de 2021

### CERTIFICADO

Certifico que la señorita Jenny Magaly Aguaisa Tamay con número de cédula 2200102842 y el señor Brando Marcelo Chavarrea Macas con número de cédula 0605819457, estudiantes de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Chimborazo, realizaron los análisis de su proyecto de tesis "Evaluación de la capacidad fitorremediadora de dos especies vegetales Raphanus sativus y Brassica rapa en suelos contaminados con cadmio en laboratorio", en el Vicariato Apostolico de Aguarico Laboratorio Ambiental LABSU, desde el 8 de Marzo del 2021 hasta 27 de Septiembre del 2021 en el horario de 2:30 hasta las 18:00.

Es todo cuanto puedo decir en honor a la verdad.

Atentamente,



Viviana Lara Villegas  
Dirección General  
Vicariato Apostólico de Aguarico – Laboratorio LABSU



PG0102-01

## Anexo 2. Informes de resultados de análisis de laboratorio

### Anexo2.1. Informe de análisis de cadmio LABSU de caracterización Inicial del suelo

 <b>LABSU</b> <b>LABORATORIO AMBIENTAL</b> Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido	<b>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO</b> Fray P. de Villarquemado S/N y Av. Labaka E-mail: laboratorio@labsu.com.ec Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Telefax:(593)06- 2881105	 <b>SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO</b> Acreditación N° SAE LEN 07-003 <b>LABORATORIO DE ENSAYOS</b>
	<b>INFORME DE ENSAYO N°: 134.852</b>	

1 de octubre de 2021

#### 1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Solicitado por: **JENNY AGUAISA & BRANDO CHAVARREA**  
 Dirección: Calle 6 de Diciembre y Luis Uquillas-Coca.  
 Fecha hora de toma de muestra: 2 021 02 14 16:00. Responsable: Jenny Aguaisa/Brando Chavarrea.

Identificación de la muestra: Suelo para la caracterización inicial del Proyecto: "Evaluación de la capacidad fitoremediadora de dos especies vegetales, Raphanus Sativus y Brassica Rapa en suelos contaminados con Cadmio en el Laboratorio". Código: ST 1 inicial.

#### 2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

Fecha hora ingreso al Laboratorio: 2 021 02 16 15:08.  
 Fecha del análisis: 2 021 02 16 a 2 021 10 01.  
 Condiciones Ambientales de Análisis: T. Máx: 26,5°C T. Mín: 21,5°C  
 Código de LabSu: s 15 537

#### 2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:

Ítem	Análisis solicitados	Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU	Unidad	Código s 15 537	Incertidumbre (k=2) $\alpha$
1	Cadmio	EPA 3050 B; SM 3030 B, 3111 B/PEE-LABSU-06/20	mg/Kg	< 1,50	$\pm$ 23%

#### 2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES

##### 2.2.1.- COMENTARIOS

- › (2) La incertidumbre declarada se basa en la incertidumbre expandida; multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%
- › El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.
- › Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

#### 3.- RESPONSABLES DEL INFORME:

  
**Ing. Gilberto López Pérez**  
**DIRECTOR TÉCNICO**  
**AUTORIZACIÓN**

  
**LABSU**  
 RUC. 1790161692001

  
**Ing. Michell Llerena Veloz**  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**  
**REVISIÓN**

Anexo2.2. Informe de análisis de cadmio LABSU de suelo contaminado a diferentes concentraciones de contaminación 50ppm, 100ppm, 200 ppm

 <b>LABSU</b> <b>LABORATORIO AMBIENTAL</b> Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido	<b>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO</b> Fray P. de Villarquemado S/N y Av. Labaka E-mail: laboratorio@labsu.com.ec Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Telefax:(593)06- 2881105	 <b>SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO</b> Acreditación N° SAE LEN 07-003 <b>LABORATORIO DE ENSAYOS</b>	
	<b>INFORME DE ENSAYO N°: 139.172</b>		
	SPS: 21 - 0 060		Análisis de Suelos

Coca, 1 de octubre de 2021

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Solicitado por: **JENNY AGUIISA & BRANDO CHAVARREA**  
 Dirección: Calle 6 de Diciembre y Luis Uquillas-Coca.  
 Fecha hora de toma de muestra: 2 021 03 18 N/A Responsable: Jenny Aguaisa/Brando Chavarrea.

Identificación de la muestra: Suelo contaminado a diferentes concentraciones. Código: a) SC 50 ppm inicial; b) SC 100 ppm inicial; c) SC 200 ppm inicial para el Proyecto: "Evaluación de la capacidad fitoremediadora de dos especies vegetales, Raphanus Sativus y Brassica Rapa en suelos contaminados con Cadmio en el Laboratorio".

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha hora ingreso al Laboratorio: 2 021 03 19 09:15.  
 Fecha del análisis: 2 021 03 19 a 2 021 10 01.  
 Condiciones Ambientales de Análisis: T. Máx: 26,5°C T. Mín: 21,5°C  
 Código de LabSu: s 15 560

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

Ítem	Análisis solicitados	Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU	Unidad	Código s 15 560			Incertidumbre (k=2) (%)
				a	b	c	
1	Cadmio	EPA 3050 B; SM 3030 B; 3111 B/PEE-LABSU-06/20	mg/Kg	51,99	99,56	199,73	± 23%

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

**2.2.1.- COMENTARIOS**

- (2) La incertidumbre declarada se basa en la incertidumbre expandida; multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%
- El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.
- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

**3.- RESPONSABLES DEL INFORME:**

  
 Ing. Gilberto López Pérez.  
**DIRECTOR TÉCNICO**  
**AUTORIZACIÓN**



  
 Ing. Michell Llerena Veloz.  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**  
**REVISIÓN**

Anexo 2.3. Informe de análisis de Cadmio LABSU del Testigo de muestra foliar  
*Raphanus sativus*

 <b>LABORATORIO AMBIENTAL</b> Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido	<b>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO</b> Fray P. de Villarquemado S/N y Av. Labaka E-mail: laboratorio@labsu.com.ec Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Telefax:(593)06- 2881105	<b>Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° SAE LEN 07-003</b>
	<b>INFORME DE ENSAYO N°: 139 171</b>	
SPS: 21 - 0 019		Análisis de Plantas

1 de octubre de 2021

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Solicitado por: **JENNY AGUAISA & BRANDO CHAVARREA**  
 Dirección: Calle 6 de Diciembre y Luis Uquillas-Coca.  
 Fecha hora de toma de muestra: 2 021 09 26 11:00. Responsable: Jenny Aguaisa/Brando Chavarrea.

Identificación de la muestra: Foliar, muestra de la hoja del rábano, testigo del Proyecto: "Evaluación de la capacidad fitoremediadora de dos especies vegetales, Raphanus Sativus y Brassica Rapa en suelos contaminados con Cadmio en el Laboratorio". Código: RTH sin contaminación.

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha hora ingreso al Laboratorio: 2 021 09 26 11:50.  
 Fecha del análisis: 2 021 09 26 a 2 021 10 01.  
 Condiciones Ambientales de Análisis: T. Máx: 26,5°C T. Mín: 21,5°C  
 Código de LabSu: **b 2 861**

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

Ítem	Análisis solicitados	Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU	Unidad	Código b 2 861	Incertidumbre (k=2) m
1	*Cadmio	EPA 3050 B; SM 3030 B, 3111 B/PEE-LABSU-06/20	mg/Kg	0,007	~

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

**2.2.1.- COMENTARIOS**

- › (2) La incertidumbre declarada se basa en la incertidumbre expandida; multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%
- › El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.
- › Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

**3.- RESPONSABLES DEL INFORME:**

 Ing. Gilberto López Pérez <b>DIRECTOR TÉCNICO</b> AUTORIZACIÓN		 Ing. Michell Llerena Veloz <b>RESPONSABLE DE CALIDAD</b> REVISIÓN
---	---	---

Anexo 2.4. Informe de análisis de Cadmio LABSU del testigo de la especie *Raphanus sativus*

 <p><b>LABSU</b> LABORATORIO AMBIENTAL Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido</p>	<p><b>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO</b> Fray P. de Villarquemado S/N y Av. Labaka E-mail: laboratorio@labsu.com.ec Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Telefax:(593)06- 2881105</p>	<p><b>Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° SAE LEN 07-003</b></p>	
	<p><b>INFORME DE ENSAYO N°: 139 170</b></p>		
	<p>SPS: 21 - 0 019</p>		<p>Análisis de Plantas</p>

1 de octubre de 2021

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Solicitado por: **JENNY AGUIAISA & BRANDO CHAVARREA**

Dirección: Calle 6 de Diciembre y Luis Uquillas-Coca.

Fecha hora de toma de muestra: 2 021 09 26 11:00. Responsable: Jenny Aguisa/Brando Chavarrea.

Identificación de la muestra:

Foliar, muestra de la raíz del rábano, testigo del Proyecto: "Evaluación de la capacidad fitoremediadora de dos especies vegetales, *Raphanus Sativus* y *Brassica Rapa* en suelos contaminados con Cadmio en el Laboratorio". Código: RTR sin contaminación.

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha hora ingreso al Laboratorio: 2 021 09 26 11:50.

Fecha del análisis: 2 021 09 26 a 2 021 10 01.

Condiciones Ambientales de Análisis: T. Máx: 26,5°C T. Mín: 21,5°C

Código de LabSu: b 2 860

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

Ítem	Análisis solicitados	Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU	Unidad	Código b 2 860	Incertidumbre (k=2) <sup>o</sup>
1	*Cadmio	EPA 3050 B, SM 3030 B, 3111 B/PEE-LABSU-06/20	mg/Kg	0,003	~

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

**2.2.1.- COMENTARIOS**

- › (2) La incertidumbre declarada se basa en la incertidumbre expandida; multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%
- › El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.
- › Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

**3.- RESPONSABLES DEL INFORME:**

  
**Ing. Gilberto López Pérez**  
**DIRECTOR TÉCNICO**  
**AUTORIZACIÓN**



  
**Ing. Michell Llerena Veloz**  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**  
**REVISIÓN**

Anexo 2.5. Informe de análisis de Cadmio LABSU en la parte aérea post tratamiento con la *Raphanus sativus*.

 <p><b>LABSU</b> LABORATORIO AMBIENTAL Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido</p>	<p>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO Fray P. de Villarquemado S/N y Av. Labaka E-mail: laboratorio@labsu.com.ec Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Telefax: (593)06- 2881105</p>	<p><b>Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° SAE LEN 07-003</b></p>
	<p><b>INFORME DE ENSAYO N°: 139 169</b></p>	
<p>SPS: 21 - 0 019</p>		<p>Análisis de Plantas</p>

Coca, 1 de octubre de 2021

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Solicitado por: **JENNY AGUAISA & BRANDO CHAVARREA**

Dirección: Calle 6 de Diciembre y Luis Uquillas-Coca.

Fecha hora de toma de muestra: 2 021 09 26 11:00.

Responsable: Jenny Aguaisa/Brando Chavarrea.

Identificación de la muestra: Foliar, muestra de la hoja del rábano después del tratamiento del Proyecto: "Evaluación de la capacidad fitoremediadora de dos especies vegetales, Raphanus Sativus y Brassica Rapa en suelos contaminados con Cadmio en el Laboratorio". Código: a) RCH final 50 ppm; b) RCH final 100 ppm; c) RCH final 200 ppm.

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha hora ingreso al Laboratorio: 2 021 09 26 11:50.

Fecha del análisis: 2 021 09 26 a 2 021 10 01.

Condiciones Ambientales de Análisis: T. Máx: 26,5°C T. Mín: 21,5°C

Código de LabSu: **b 2 859**

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

Ítem	Análisis solicitados	Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU	Unidad	Código b 2 859			Incertidumbre (k=2) <sup>2)</sup>
				a	b	c	
1	*Cadmio	EPA 3050 B; SM 3030 B, 3111 B/PEE-LABSU-06/20	mg/Kg	6,749	11,131	13,880	~

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

**2.2.1.- COMENTARIOS**

2) La incertidumbre declarada se basa en la incertidumbre expandida; multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%

El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.

Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

**3.- RESPONSABLES DEL INFORME:**

  
 Ing. Gilberto López Pérez.  
**DIRECTOR TÉCNICO**  
 AUTORIZACIÓN

  
 Ing. Michell Llerena Veloz.  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**  
 REVISIÓN

Anexo 2.6. Informe de análisis de Cadmio LABSU en la parte de la raíz post tratamiento con la especie *Raphanus sativus*

 <b>LABSU</b> <b>LABORATORIO AMBIENTAL</b> Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido	<b>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO</b> Fray P. de Villarquemado S/N y Av. Labaka E-mail: laboratorio@labsu.com.ec Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Telefax: (593)06- 2881105	<b>Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° SAE LEN 07-003</b>
	<b>INFORME DE ENSAYO N°: 139 168</b>	
SPS: 21 - 0 019	Análisis de Plantas	

Coca, 1 de octubre de 2021

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Solicitado por: **JENNY AGUAISA & BRANDO CHAVARREA**  
 Dirección: Calle 6 de Diciembre y Luis Uquillas-Coca.  
 Fecha hora de toma de muestra: 2 021 09 26 11:00. Responsable: Jenny Aguaisa/Brando Chavarrea.

Identificación de la muestra: Foliar, muestra de la raíz del rábano después del tratamiento del Proyecto: "Evaluación de la capacidad fitoremediadora de dos especies vegetales, Raphanus Sativus y Brassica Rapa en suelos contaminados con Cadmio en el Laboratorio". Código: a) RCR final 50 ppm; b) RCR final 100 ppm; c) RCR final 200 ppm.

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha hora ingreso al Laboratorio: 2 021 09 26 11:50.  
 Fecha del análisis: 2 021 09 26 a 2 021 10 01.  
 Condiciones Ambientales de Análisis: T. Máx: 26,5°C T. Mín: 21,5°C  
 Código de LabSu: b 2 858

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

Ítem	Análisis solicitados	Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU	Unidad	Código b 2 858			Incertidumbre (k=2) (2)
				a	b	c	
1	*Cadmio	EPA 3050 B; SM 3030 B, 3111 B/PEE-LABSU-06/20	mg/Kg	3,812	7,485	9,513	~

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

**2.2.1.- COMENTARIOS**

- (2) La incertidumbre declarada se basa en la incertidumbre expandida; multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%
- El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.
- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

**3.- RESPONSABLES DEL INFORME:**

  
**Ing. Gilberto López Pérez**  
**DIRECTOR TÉCNICO**  
**AUTORIZACIÓN**

  
**LABSU**  
 RUC. 1790161692001  
 ORELLANA

  
**Ing. Michell Llerena Veloz**  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**  
**REVISIÓN**

Anexo 2.6. Informe de análisis de Cadmio LABSU en el suelo final a diferentes concentraciones.

 <b>LABSU</b> <b>LABORATORIO AMBIENTAL</b> Suelos, Aguas, Alimentos, Emisiones, Ruido	<b>VICARIATO APOSTOLICO DE AGUARICO</b> Fray P. de Villarquemado S/N y Av. Labaka E-mail: laboratorio@labsu.com.ec Coca, Provincia de Orellana - Ecuador Telefax:(593)06- 2881105	 <b>SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO</b> Acreditación N° SAE LEN 07-003 <b>LABORATORIO DE ENSAYOS</b>
	<b>INFORME DE ENSAYO N°: 139 173</b>	
SPS: 21 - 0 180		Análisis de Suelos

Coca, 1 de octubre de 2021

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Solicitado por: **JENNY AGUAISA & BRANDO CHAVARREA**  
 Dirección: Calle 6 de Diciembre y Luis Uquillas-Coca.  
 Fecha hora de toma de muestra: 2 021 09 26 10:00. Responsable: Jenny Aguaisa/Brando Chavarrea.

Identificación de la muestra: Suelo contaminado final a diferentes concentraciones para el Proyecto: "Evaluación de la capacidad fitoremediadora de dos especies vegetales, Raphanus Sativus y Brassica Rapa en suelos contaminados con Cadmio en el Laboratorio". Tratamiento Rábano. Código: a) SC 50 ppm final; b) SC 100 ppm final; c) SC 200 ppm final.

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha hora ingreso al Laboratorio: 2 021 09 26 10:48.  
 Fecha del análisis: 2 021 09 26 a 2 021 10 01.  
 Condiciones Ambientales de Análisis: T. Máx: 26,5°C T. Mín: 21,5°C  
 Código de LabSu: s 15 684

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

Ítem	Análisis solicitados	Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU	Unidad	Código s 15 684			Incertidumbre (k=2) <sup>2)</sup>
				a	b	c	
1	Cadmio	EPA 3050 B, SM 3030 B, 3111 B/PEE-LABSU-06/20	mg/Kg	39,482	80,576	176,518	± 23%

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

**2.2.1.- COMENTARIOS**

- › (2) La incertidumbre declarada se basa en la incertidumbre expandida; multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%
- › El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.
- › Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

**3.- RESPONSABLES DEL INFORME:**

  
 Ing. Gilberto Dóñez Pérez  
**DIRECTOR TÉCNICO**  
**AUTORIZACIÓN**



  
 Ing. Michell Llerena Veloz  
**RESPONSABLE DE CALIDAD**  
**REVISIÓN**

### Anexo 3. Tablas de cálculos de los resultados de laboratorio

**Tabla 12.**

*Resumen de Medidas de las partes de las plantas del Testigo.*

SOr									
N° de plantas	Extensión (cm)	Raíz diámetro (cm)	Tallo (cm)	Hoja largo (cm)	Hoja grosor (cm)	crecimiento (cm)	Tamaño total de la planta (cm)	N. Hojas	Área foliar 60 dds
1	4.6	1.7	5.9	20.9	7.4	26.8	31.4	5	289.98
2	9.3	2.5	7.7	16.2	7.7	23.9	33.2	7	328.86
3	4.3	2.0	4.2	21.3	8.3	25.5	29.8	5	330.15
4	4.7	2.3	5.7	16.3	7.9	22.0	26.7	6	288.51
5	5.6	0.9	5.2	14.6	6.4	19.8	25.4	4	141.21
6	8.4	2.1	6.9	19.8	8.4	26.7	35.1	7	434.85
7	5.5	2.8	1.1	25.7	6.8	26.8	32.3	5	328.85
8	8.0	1.7	4.7	14.0	7.0	18.6	26.6	7	256.63
9	4.8	0.9	2.5	26.2	7.0	28.7	33.5	5	343.30
10	5.9	2.6	4.2	16.1	6.8	20.3	26.2	6	247.53
11	5.2	2.6	7.0	17.8	8.2	24.8	30.0	6	327.07
12	5.7	1.3	4.0	25.0	6.7	29.0	34.7	5	312.5
13	3.8	1.2	2.8	18.7	6.8	21.5	25.3	5	237.95
14	4.1	2.6	3.2	27.2	6.1	30.4	34.5	5	312.8
15	5.0	0.9	2.8	26.8	5.7	29.6	34.6	4	227.46
16	4.7	1.9	2.8	26.0	6.3	28.8	33.5	6	370.5
17	4.6	1.1	1.9	19.8	5.3	21.7	26.3	5	198.33
18	4,1	0.9	2.7	14.6	5.2	17.4	21.4	6	172.26
19	4.5	0.6	1.0	23.0	6.3	24.0	28.5	4	216.2
20	2.2	0.6	2.1	21.4	5.7	23.5	25.7	6	272.85

**Nota:** Abreviatura; dds=días después de la siembra.

**Tabla 13***Resumen de Medidas de las partes de las plantas del Tratamiento S1r*

S1r									
N° de plantas	Extensión (cm)	Raíz diámetro (cm)	Tallo (cm)	Hoja largo (cm)	Hoja grosor (cm)	Crecimiento (cm)	Tamaño total planta (cm)	N° hojas	Área foliar 60 dds
1	7.5	2	2	30	8	32	42	6	540
2	6	1.8	1.5	24	6	25.5	32	7	378
3	4	0.9	8	29	6.5	37	40.5	6	424.12
4	6.5	5	6	29	9	35	39	5	489.37
5	7	0.7	7	23.5	6	30.5	41	5	264.37
6	5	4.4	4.9	30	10	34.9	40	7	787.5
7	9.3	4.8	3	20.5	7	23.5	38	6	322.87
8	8	2.3	4	26	8	30	39	6	468
9	7.5	1	5	22.5	7.5	27.5	38	5	316.40
10	12	1.3	10	22	6	32	42	7	346.5
11	4	2	2.6	26	8	28.6	37	4	312
12	4	1.5	3.8	22	7	25.8	35	5	288.75
13	3	0.7	2.5	16	6	18.5	24.5	5	180
14	2.5	0.5	3	19	5	22	27	6	213.75
15	5	0.9	3	13	4	16	21	5	97.5
16	3	0.8	3.5	17	7	20.5	29	4	178.5
17	7	0.9	2.5	22	6	24.5	34	7	346.5
18	3	0.6	2	16	4	18	24	4	96
19	4.5	0.5	2	16	6	18	26	5	180
20	2	0.6	2.5	18	7	20.5	25	6	283.5

**Nota:** Abreviatura; dds=días después de la siembra.

**Tabla 14***Resumen de Medidas de las partes de las plantas del Tratamiento S2r*

S2r									
N° de plantas	Extensión (cm)	Raíz diámetro (cm)	Tallo (cm)	Hoja largo (cm)	Hoja grosor (cm)	Crecimiento (cm)	Tamaño total de la planta (cm)	N. hojas	Área foliar 60 dds
1	5.4	0.5	15	26	7.2	41	44	8	561.6
2	8	3.8	7.5	34	10	41.5	50	9	1147.5
3	7.5	4.2	3.2	26.1	10.5	29.3	40	6	616.61
4	6.5	1	9.8	27	9.2	36.8	41	6	558.9
5	9.5	0.7	8.4	25	7.5	33.4	45	6	421.87
6	6.1	1.1	1.9	27	5.7	28.9	37	7	403.98
7	8	2.5	1.2	23	9.5	24.2	38	8	655.5
8	8.4	0.9	2.5	23	6.5	25.5	31	7	392.43
9	6.5	0.8	2	24	7.5	26	33	5	337.5
10	5.8	1.9	2.5	27	10.5	29.5	38	7	744.18
11	8	1.8	15	24	9.5	39	43.5	7	598.5
12	7	1	2.3	21.5	5.5	23.8	30.5	6	266.06
13	6.5	1.4	4	28	7	32	38	5	367.5
14	5.9	1.2	2.5	20.5	5.9	23	32.5	5	226.78
15	7.5	0.8	2.9	30.5	7	33.4	42	6	480.37
16	9.5	1	3.5	24	6	27.5	38	6	324
17	5.5	0.5	2	20.5	4.5	22.5	20.5	7	242.15
18	10	0.6	7	28.5	6.5	35.5	45	9	625.21
19	9.5	0.9	1.5	23	8	24.5	34.5	6	414
20	4.5	0.8	3.5	17	6	20.5	27	6	229.5

**Nota:** Abreviatura; dss=días después de la siembra.

**Tabla 15***Resumen de Medidas de las partes de las plantas del Tratamiento S3r*

<b>S3r</b>									
<b>N° de plantas</b>	<b>Raíz extensión (cm)</b>	<b>Raíz diámetro (cm)</b>	<b>Tallo (cm)</b>	<b>Hoja largo (cm)</b>	<b>Hoja grosor (cm)</b>	<b>Crecimiento (cm)</b>	<b>Tamaño total de la planta (cm)</b>	<b>N° hojas</b>	<b>Área foliar 60 dds</b>
1	2.6	2.5	2.8	32.8	7	35.6	38.2	10	861
2	6.5	2	16	25.2	7.2	41.2	47.7	7	476.28
3	9.5	1	3.4	26.2	7.8	29.6	39.1	5	383.175
4	6.8	1	3.2	20.2	5.4	23.4	30.2	6	245.43
5	4.2	1.2	2.2	13.8	5.8	16	20.2	5	150.075
6	16	0.8	16	26.5	9.4	42.5	58.5	7	653.8875
7	4.4	1	1.2	15.5	4	16.7	21.1	6	139.5
8	8	2	9.5	22.5	6.5	32	40	6	329.0625
9	6.47	0.9	2.5	20.5	6	23	29.47	7	322.875
10	7.8	4.6	2	19	4	21	28.8	5	142.5
11	9.5	4	5.5	24.5	7	30	39.5	9	578.8125
12	7	1.5	8	23.6	7.5	31.6	38.6	8	531
13	15	1.4	4	24.5	7.4	28.5	43.5	8	543.9
14	8	6	6	30	7.5	36	44	7	590.625
15	9	0.9	4.5	27.2	6	31.7	40.7	5	306
16	9	3.8	3.5	21	6	24.5	33.5	6	283.5
17	5.5	1.8	3.2	15.7	5.5	18.9	24.4	5	161.90625
18	4.9	1.5	1.2	19.2	5.2	20.4	25.3	5	187.2
19	5.6	0.5	1.5	18	4.8	19.5	25.1	7	226.8
20	5.6	0.4	2.2	17.5	4	19.7	25.3	7	183.75

**Nota:** Abreviatura; dss=días después de la siembra.

**Tabla 16.***Resumen del cálculo de la Densidad Aparente y Real.*

Tratamiento	S0r	S1r	S2r	S3r
Pw	7.3590489	3.55749388	4.52075643	10.3825509
PSS	79.1874511	82.9890061	82.0257436	76.1639491
Vw	7.37379649	3.56462313	4.52981606	10.4033576
Vs	94.6965035	98.5056769	97.5404839	91.6669424
Dr	0.8362236	0.84247943	0.8409405	0.83087695
Da	0.77581286	0.81305734	0.80362009	0.7461911
Ep	7.22423319	3.49232159	4.43793744	10.1923455

**Nota:** Pw=peso del agua, PSS=peso suelo seco, Vw=volumen de agua, Vs=volumen del suelo, Dr=densidad real, Da=densidad aparente, Ep=Espacio poroso.

**Tabla 17.***Resumen de Evaluación de la Capacidad Fitoextractora.*

Tratamiento	[Cd] parte raíz (ppm)	[Cd]parte aérea (ppm)	[Cd]Suelo F (ppm)	BCF raíz	BCF aérea	TF
S1r	3.812	6.749	39.482	0.097	0.171	1.770
S2r	7.485	11.131	80.576	0.093	0.138	1.487
S3r	9.513	13.88	176.518	0.054	0.079	1.459

**Nota:** [Cd]=concentración de cadmio.

**Tabla 18.***Resumen de datos y cálculo de la Eficiencia de las plantas.*

Especie	Datos	Unidades	Tratamiento S1r	Tratamiento S2r	tratamiento S3r
<i>Raphanus sativus</i>	[Cd]raíz	Ppm	3.812	7.485	9.513
	[Cd]hojas	Ppm	6.749	11.131	13.88
	[Cd]planta	Ppm	10.561	18.616	23.393
	[Cd]suelo inicial	Ppm	51.99	99.56	199.73
	[Cd]suelo final	Ppm	39.482	80.576	176.518
	[Cd]extraído	Ppm	12.508	18.984	23.212
	Remoción	%	24.1	19.1	11.6
	Eficiencia raíz	%	7.33	7.52	4.76
	Eficiencia hojas	%	12.98	11.18	6.95
	Eficiencia total	%	20.31	18.70	11.71

**Nota:** [Cd]=concentración de cadmio.

**Tabla 19.***Datos de Fisiología del rábano.*

Tratamiento	longitud (cm)	crecimiento (cm)	[Cd] final	%Eficiencia	N. Hojas	RABS RAIZ_N. Hojas	RDUO longitud de la planta	RDUO crecimiento (cm)
S0r	31.4	26.8	0	0	5	0.09006883	1.665	2.31
S0r	33.2	23.9	0	0	7	0.3196145	3.465	-0.59
S0r	29.8	25.5	0	0	5	0.09006883	0.065	1.01
S0r	26.7	22	0	0	6	0.12335293	-3.035	-2.49
S0r	25.4	19.8	0	0	4	0.32613681	-4.335	-4.69
S0r	35.1	26.7	0	0	7	0.3196145	5.365	2.21
S0r	32.3	26.8	0	0	5	0.09006883	2.565	2.31
S0r	26.6	18.6	0	0	7	0.3196145	-3.135	-5.89
S0r	33.5	28.7	0	0	5	0.09006883	3.765	4.21
S0r	26.2	20.3	0	0	6	0.12335293	-3.535	-4.19
S0r	30	24.8	0	0	6	0.12335293	0.265	0.31
S0r	34.7	29	0	0	5	0.09006883	4.965	4.51
S0r	25.3	21.5	0	0	5	0.09006883	-4.435	-2.99
S0r	34.5	30.4	0	0	5	0.09006883	4.765	5.91
S0r	34.6	29.6	0	0	4	0.32613681	4.865	5.11
S0r	33.5	28.8	0	0	6	0.12335293	3.765	4.31
S0r	26.3	21.7	0	0	5	0.09006883	-3.435	-2.79
S0r	21.4	17.4	0	0	6	0.12335293	-8.335	-7.09
S0r	28.5	24	0	0	4	0.32613681	-1.235	-0.49
S0r	25.7	23.5	0	0	6	0.12335293	-4.035	-0.99
S1r	42	32	10.561	20.31	6	0.10286877	8.3	5.985
S1r	32	25.5	10.561	20.31	7	0.29913033	-1.7	-0.515
S1r	40.5	37	10.561	20.31	6	0.10286877	6.8	10.985
S1r	39	35	10.561	20.31	5	0.110553	5.3	8.985
S1r	41	30.5	10.561	20.31	5	0.110553	7.3	4.485
S1r	40	34.9	10.561	20.31	7	0.29913033	6.3	8.885
S1r	38	23.5	10.561	20.31	6	0.10286877	4.3	-2.515

S1r	39	30	10.561	20.31	6	0.10286877	5.3	3.985
S1r	38	27.5	10.561	20.31	5	0.110553	4.3	1.485
S1r	42	32	10.561	20.31	7	0.29913033	8.3	5.985
S1r	37	28.6	10.561	20.31	4	0.34662098	3.3	2.585
S1r	35	25.8	10.561	20.31	5	0.110553	1.3	-0.215
S1r	24.5	18.5	10.561	20.31	5	0.110553	-9.2	-7.515
S1r	27	22	10.561	20.31	6	0.10286877	-6.7	-4.015
S1r	21	16	10.561	20.31	5	0.110553	-12.7	-10.015
S1r	29	20.5	10.561	20.31	4	0.34662098	-4.7	-5.515
S1r	34	24.5	10.561	20.31	7	0.29913033	0.3	-1.515
S1r	24	18	10.561	20.31	4	0.34662098	-9.7	-8.015
S1r	26	18	10.561	20.31	5	0.110553	-7.7	-8.015
S1r	25	20.5	10.561	20.31	6	0.10286877	-8.7	-5.515
S2r	44	41	18.616	18.7	8	0.26894049	6.575	11.11
S2r	50	41.5	18.616	18.7	9	0.44051337	12.575	11.61
S2r	40	29.3	18.616	18.7	6	0.10999689	2.575	-0.59
S2r	41	36.8	18.616	18.7	6	0.10999689	3.575	6.91
S2r	45	33.4	18.616	18.7	6	0.10999689	7.575	3.51
S2r	37	28.9	18.616	18.7	7	0.08626468	-0.425	-0.99
S2r	38	24.2	18.616	18.7	8	0.26894049	0.575	-5.69
S2r	31	25.5	18.616	18.7	7	0.08626468	-6.425	-4.39
S2r	33	26	18.616	18.7	5	0.32341866	-4.425	-3.89
S2r	38	29.5	18.616	18.7	7	0.08626468	0.575	-0.39
S2r	43.5	39	18.616	18.7	7	0.08626468	6.075	9.11
S2r	30.5	23.8	18.616	18.7	6	0.10999689	-6.925	-6.09
S2r	38	32	18.616	18.7	5	0.32341866	0.575	2.11
S2r	32.5	23	18.616	18.7	5	0.32341866	-4.925	-6.89
S2r	42	33.4	18.616	18.7	6	0.10999689	4.575	3.51
S2r	38	27.5	18.616	18.7	6	0.10999689	0.575	-2.39
S2r	20.5	22.5	18.616	18.7	7	0.08626468	-16.925	-7.39
S2r	45	35.5	18.616	18.7	9	0.44051337	7.575	5.61
S2r	34.5	24.5	18.616	18.7	6	0.10999689	-2.925	-5.39
S2r	27	20.5	18.616	18.7	6	0.10999689	-10.425	-9.39

S3r	38.2	35.6	23.393	11.71	10	0.61687733	3.5415	8.51
S3r	47.7	41.2	23.393	11.71	7	0.10035098	13.0415	14.11
S3r	39.1	29.6	23.393	11.71	5	0.30933235	4.4415	2.51
S3r	30.2	23.4	23.393	11.71	6	0.09591059	-4.4585	-3.69
S3r	20.2	16	23.393	11.71	5	0.30933235	-14.4585	-11.09
S3r	58.5	42.5	23.393	11.71	7	0.10035098	23.8415	15.41
S3r	21.1	16.7	23.393	11.71	6	0.09591059	-13.5585	-10.39
S3r	40	32	23.393	11.71	6	0.09591059	5.3415	4.91
S3r	29.47	23	23.393	11.71	7	0.10035098	-5.1885	-4.09
S3r	28.8	21	23.393	11.71	5	0.30933235	-5.8585	-6.09
S3r	39.5	30	23.393	11.71	9	0.45459967	4.8415	2.91
S3r	38.6	31.6	23.393	11.71	8	0.28302679	3.9415	4.51
S3r	43.5	28.5	23.393	11.71	8	0.28302679	8.8415	1.41
S3r	44	36	23.393	11.71	7	0.10035098	9.3415	8.91
S3r	40.7	31.7	23.393	11.71	5	0.30933235	6.0415	4.61
S3r	33.5	24.5	23.393	11.71	6	0.09591059	-1.1585	-2.59
S3r	24.4	18.9	23.393	11.71	5	0.30933235	-10.2585	-8.19
S3r	25.3	20.4	23.393	11.71	5	0.30933235	-9.3585	-6.69
S3r	25.1	19.5	23.393	11.71	7	0.10035098	-9.5585	-7.59
S3r	25.3	19.7	23.393	11.71	7	0.10035098	-9.3585	-7.39

**Nota:** el residuo fue calculado en el programa InfoStat tras el análisis de varianza.

**Tabla 20.***Datos Elongación Radicular de la especie Brassica rapa.*

Tratamiento	Elongación radicular	RDUO elongación radicular
S0n	1.5	0.727272727
S0n	0.6	-0.172727273
S0n	0.7	-0.072727273
S0n	1.2	0.427272727
S0n	0.8	0.027272727
S0n	1	0.227272727
S0n	0.6	-0.172727273
S0n	0.2	-0.572727273
S0n	0.7	-0.072727273
S0n	0.5	-0.272727273
S0n	0.7	-0.072727273
S1n	1.1	0.457142857
S1n	0.8	0.157142857
S1n	1	0.357142857
S1n	0.6	-0.042857143
S1n	0.6	-0.042857143
S1n	0.5	-0.142857143
S1n	0.6	-0.042857143
S1n	0.5	-0.142857143
S1n	0.6	-0.042857143
S1n	0.7	0.057142857
S1n	0.5	-0.142857143
S1n	0.5	-0.142857143
S1n	0.6	-0.042857143
S1n	0.4	-0.242857143
S2n	1.4	0.653846154
S2n	1	0.253846154
S2n	0.6	-0.146153846
S2n	0.7	-0.046153846
S2n	1.1	0.353846154
S2n	0.4	-0.346153846
S2n	0.6	-0.146153846
S2n	0.7	-0.046153846
S2n	0.8	0.053846154
S2n	0.7	-0.046153846
S2n	0.5	-0.246153846
S2n	0.6	-0.146153846
S2n	0.6	-0.146153846
S3n	0.5	-0.14
S3n	1.1	0.46
S3n	0.6	-0.04
S3n	0.6	-0.04
S3n	0.8	0.16
S3n	1	0.36
S3n	0.4	-0.24
S3n	0.3	-0.34
S3n	0.9	0.26
S3n	0.2	-0.44

**Nota:** el residuo calculado en InfoStat en el análisis de varianza.

**Tabla 21***Datos de Elongación Radicular de la especie Raphanus sativus*

Tratamiento	Elongación radicular (cm)	RDUO Elongación radicular (cm)
S0r	4	1.73125
S0r	3.2	0.93125
S0r	3.2	0.93125
S0r	2.5	0.23125
S0r	2.9	0.63125
S0r	1.5	-0.76875
S0r	2.5	0.23125
S0r	2.2	-0.06875
S0r	2	-0.26875
S0r	2.2	-0.06875
S0r	2.5	0.23125
S0r	2.4	0.13125
S0r	1.2	-1.06875
S0r	1.5	-0.76875
S0r	1.6	-0.66875
S0r	0.9	-1.36875
S1r	4	1.805882353
S1r	2.5	0.305882353
S1r	3	0.805882353
S1r	2.7	0.505882353
S1r	2.5	0.305882353
S1r	3.4	1.205882353
S1r	2.2	0.005882353
S1r	3.6	1.405882353
S1r	2.6	0.405882353
S1r	1.7	-0.494117647
S1r	1.2	-0.994117647
S1r	2.1	-0.094117647
S1r	2.3	0.105882353
S1r	1.3	-0.894117647
S1r	1.3	-0.894117647
S1r	0.5	-1.694117647
S1r	0.4	-1.794117647
S2r	2.7	0.805
S2r	4.1	2.205
S2r	1.9	0.005
S2r	2.8	0.905
S2r	3	1.105
S2r	2.9	1.005
S2r	2.6	0.705
S2r	2.1	0.205
S2r	2.3	0.405
S2r	2.4	0.505
S2r	1.2	-0.695
S2r	0.9	-0.995
S2r	1.2	-0.695
S2r	2.1	0.205
S2r	1.1	-0.795
S2r	1	-0.895
S2r	1.5	-0.395

S2r	0.9	-0.995
S2r	0.7	-1.195
S2r	0.5	-1.395
S3r	2.9	1.123529412
S3r	3	1.223529412
S3r	3.2	1.423529412
S3r	3.5	1.723529412
S3r	1.5	-0.276470588
S3r	2	0.223529412
S3r	2.4	0.623529412
S3r	2	0.223529412
S3r	2.1	0.323529412
S3r	1.7	-0.076470588
S3r	1.1	-0.676470588
S3r	1	-0.776470588
S3r	0.6	-1.176470588
S3r	0.8	-0.976470588
S3r	1	-0.776470588
S3r	1	-0.776470588
S3r	0.4	-1.376470588

---

**Nota:** el residuo fue calculado en el programa InfoStat tras el análisis de varianza.

## Anexo 4. Análisis Estadístico en InfoStat

### Anexo 4.1.1. ANOVA para el crecimiento de la planta

Nueva tabla : 10/10/2021 - 22:55:12 - [Versión : 30/04/2020]

#### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
crecimiento (cm)	80	0.09	0.06	23.50

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	311.28	3	103.76	2.60	0.0581
Tratamiento	311.28	3	103.76	2.60	0.0581
Error	3031.22	76	39.88		
Total	3342.50	79			

#### Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.24600

Error: 39.8845 gl: 76

Tratamiento	Medias	n	E.E.
S0r	24.49	20	1.41 A
S1r	26.02	20	1.41 A B
S3r	27.09	20	1.41 A B
S2r	29.89	20	1.41 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

#### Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov)

Variable	ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-Valor
RDUO crecimiento (cm)	Normal (0.38.37)	0.00	38.37	80	0.08	0.7564

### **Anexo 4.1.2. Elongación radicular rábano**

Nueva tabla : 15/10/2021 - 23:44:33 - [Versión : 30/04/2020]

#### **Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Elongación radicular (cm)	70	0.05	2.1E-03	46.84

#### **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.82	3	0.94	1.05	0.3775
tratamiento	2.82	3	0.94	1.05	0.3775
Error	59.32	66	0.90		
Total	62.15	69			

#### **Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.84767**

Error: 0.8988 gl: 66

tratamiento	Medias	n	E.E.
S3r	1.78 17	0.23	A
S2r	1.90 20	0.21	A
S1r	2.19 17	0.23	A
S0r	2.27 16	0.24	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes  
( $p > 0.05$ )

### **Anexo 4.1.3. Elongación radicular del nabo**

Nueva tabla : 15/10/2021 - 23:50:30 - [Versión : 30/04/2020]

#### **Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
elongación radicular	48	0.05	0.00	40.13

#### **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.17	3	0.06	0.71	0.5525
tratamiento	0.17	3	0.06	0.71	0.5525
Error	3.47	44	0.08		
Total	3.64	47			

#### **Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.30893**

Error: 0.0789 gl: 44

tratamiento	Medias	n	E.E.
S3n	0.64 10	0.09	A
S1n	0.64 14	0.08	A
S2n	0.75 13	0.08	A
S0n	0.77 11	0.08	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes  
( $p > 0.05$ )

#### Anexo 4.1.4.A. Prueba T para una media en el número de hojas

Nueva tabla : 10/10/2021 - 02:25:15 - [Versión : 30/04/2020]

##### Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 6.04

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
N. Hojas	80	6.04	1.26	5.80 -0.02		0.5071

#### Anexo 4.1.4.B. inferencia basada en 2 muestras prueba T

##### Prueba T para muestras Independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)-Media(2)	pHomVar	p-valor	prueba
Tratamiento	N. Hojas	{blanco}	{100 ppm.200 ppm.50 ppm}		20	60	-0.78	0.1294	0.9926 UnilatDer

#### Anexo 4.1.4.C. ANOVA para el numero de hojas

Nueva tabla : 13/10/2021 - 16:28:32 - [Versión : 30/04/2020]

##### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
N. Hojas	80	0.19	0.15	19.16

##### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	23.24	3	7.75	5.79	0.0013
Tratamiento	23.24	3	7.75	5.79	0.0013
Error	101.65	76	1.34		
Total	124.89	79			

##### Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.96067

Error: 1,3375 gl: 76

Tratamiento	Medias	n	E.E.
S0r	5.45	20	0.26 A
S1r	5.55	20	0.26 A
S3r	6.55	20	0.26 B
S2r	6.60	20	0.26 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

##### Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov)

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadistico D	p-valor
RDUO N. Hojas	Normal(0.1.29)	0.00	1.29	80	0.18	0.0119

#### Anexo 4.1.5. Prueba T para el Área foliar

##### Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 363.29

Variable	n	Media	DE	LI(95)	T	p(Unilateral D)
Area foliar 60 dds (cm <sup>2</sup> )	80	363.29	186.85	328.52	-1.3E-04	0.5001

#### **Anexo 4.1.6. ANOVA para la Longitud de la planta**

C:\Users\SPACE\Desktop\Brando\Infostat\Nueva.tabla.IDB2 :  
13/10/2021 - 16:34:34 - [Versión : 30/04/2020]

#### **Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
longitud de la planta	80	0.13	0.10	21.59

#### **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	607.73	3	202.58	3.79	0.0137
Tratamiento	607.73	3	202.58	3.79	0.0137
Error	4065.32	76	53.49		
Total	4673.05	79			

#### **Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=6.07529**

Error: 53.4911 gl: 76

Tratamiento	Medias	n	E.E.
S0r	29.74	20	1.64 A
S1r	33.70	20	1.64 A B
S3r	34.66	20	1.64 A B
S2r	37.43	20	1.64 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes  
( $p > 0.05$ )

#### **Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov)**

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-valor
RDUO longitud de la planta..	Normal(0.51.46)		0.00	51.46	80	0.10 0.3730

### **Anexo 4.1.7. ANOVA para la eficiencia de la planta**

C:\Users\SPACE\Desktop\Brando\Infostat\Nueva.tabla.IDB2 :  
13/10/2021 - 17:45:45 - [Versión : 30/04/2020]

#### **Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
crecimiento (cm)	80	0.09	0.06	23.50

#### **Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	311.28	3	103.76	2.60	0.0581
%Eficiencia	311.28	3	103.76	2.60	0.0581
Error	3031.22	76	39.88		
Total	3342.50	79			

#### **Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.24600**

Error: 39.8845 gl: 76

%Eficiencia	Medias	n	E.E.
0.00	24.49	20	1.41 A
20.31	26.02	20	1.41 A B
11.71	27.09	20	1.41 A B
18.70	29.89	20	1.41 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes  
( $p > 0.05$ )

C:\Users\SPACE\Desktop\Brando\Infostat\Nueva.tabla.IDB2 :  
13/10/2021 - 17:54:07 - [Versión : 30/04/2020]

#### **Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov)**

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadístico D	p-valor	
RDUO crecimiento (cm)	Normal	(0.38.37)	0.00	38.37	80	0.08	0.7564

## Anexo 5. Medios de verificación del cumplimiento en campo y laboratorio (fotografías)

### Anexo 5.1. Evidencias fotográficas de la realización del proyecto en campo



**Imagen 1.** Sitio de muestreo



**Imagen 2.** Dueños de la finca



**Imagen 3.** Cuarteo para la muestra a analizar



**Imagen 4.** Conservación de la muestra



**Imagen 5.** Semilla de *Raphanus sativus*



**Imagen 6.** Recolección de semillas de *Brassica rapa*

**Anexo 4.2** Evidencias fotográficas de la realización del proyecto en laboratorio caracterización del suelo.



**Imagen 7.** Secado de las muestras de suelo



**Imagen 8.** Preparación de la muestra previo al análisis



**Imagen 9.** Homogenizado en la digestión de suelos



**Imagen 10.** Digestion de la muestra para el análisis



**Imagen 11.** Filtrado del digesto previo al análisis.



**Imagen 12.** Espectrofotometro Thermo SOLAAR iCE 3000 series.



**Imagen 13.** Secado de la muestra para la determinación de sustancia seca.



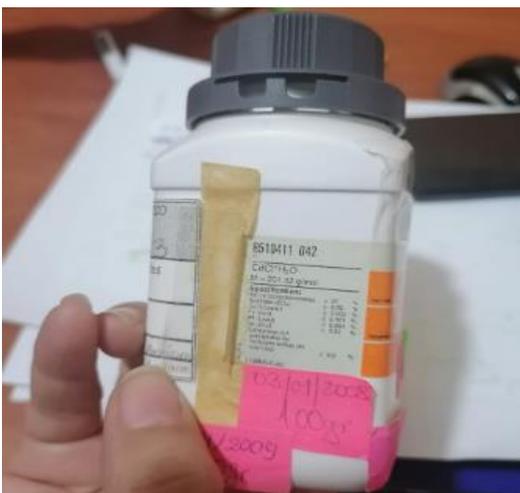
**Imagen 14.** Reposo de la muestra en el desecador



**Imagen 15.** Balanza analítica para pesaje



**Imagen 16.** Registro de datos y resultados



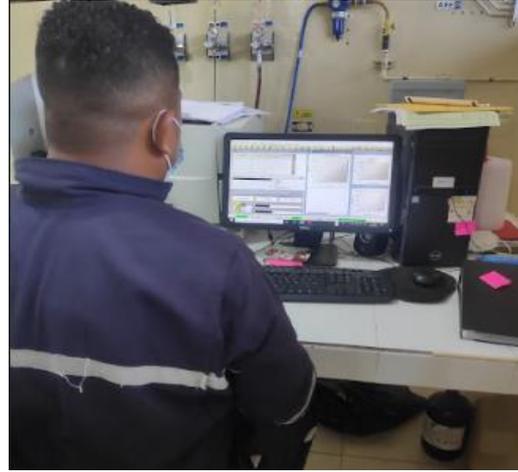
**Imagen 17.** Reactivo cloruro de cadmio monohidratado



**Imagen 18.** Pesaje del contaminante



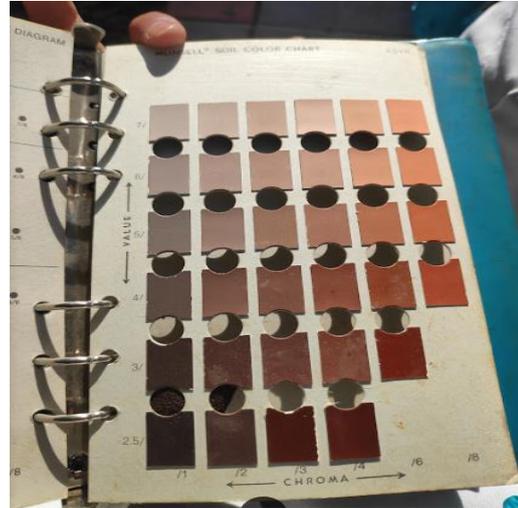
**Imagen 19.** Homogenización de la muestra en mortero



**Imagen 20.** Confirmación de la cantidad de ppm del contaminante por AAS.



**Imagen 21.** Prueba de textura de la muestra de suelo



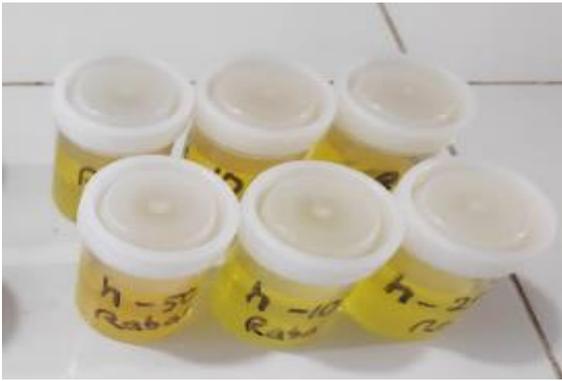
**Imagen 22.** Tabla de Munsell para color de la muestra



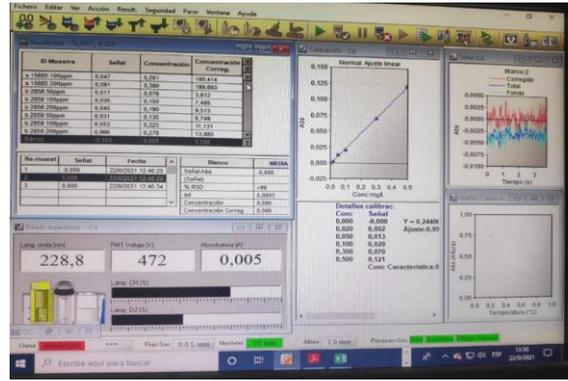
**Imagen 23.** Secado de las muestras vegetales



**Imagen 24.** Triturado de la muestra vegetal en mortero



**Imagen 25.** Muestras listas para el análisis de cadmio en la planta



**Imagen 26.** Curva de calibración del espectrofotómetro

### Anexo 4.3. Montaje del Experimento



**Imagen 27.** Jardinera dimensión 100 x 25 x 25 cm



**Imagen 28.** Cubetos de recolección de infiltraciones



**Imagen 29.** Cubetos y jardineras con el contaminante



**Imagen 30.** Siembra de las especies vegetales



**Imagen 31.** Etiquetado de las muestras secas



**Imagen 32.** Medición de las partes de la especie *Raphanus sativus*



**Imagen 33.** Muestras de los tratamientos S1r, S2r, S3r



**Imagen 34.** Muestras vegetales de la parte aérea y la raíz



**Imagen 35.** Homogenización de la muestra vegetal



**Imagen 36.** Desarrollo foliar especie *Raphanus sativus*



**Imagen 37.** Secado al sol de la planta de rábano



**Imagen 38.** Cosecha de la especie *Raphanus sativus*



**Imagen 39.** Experimento 60 días después de la siembra

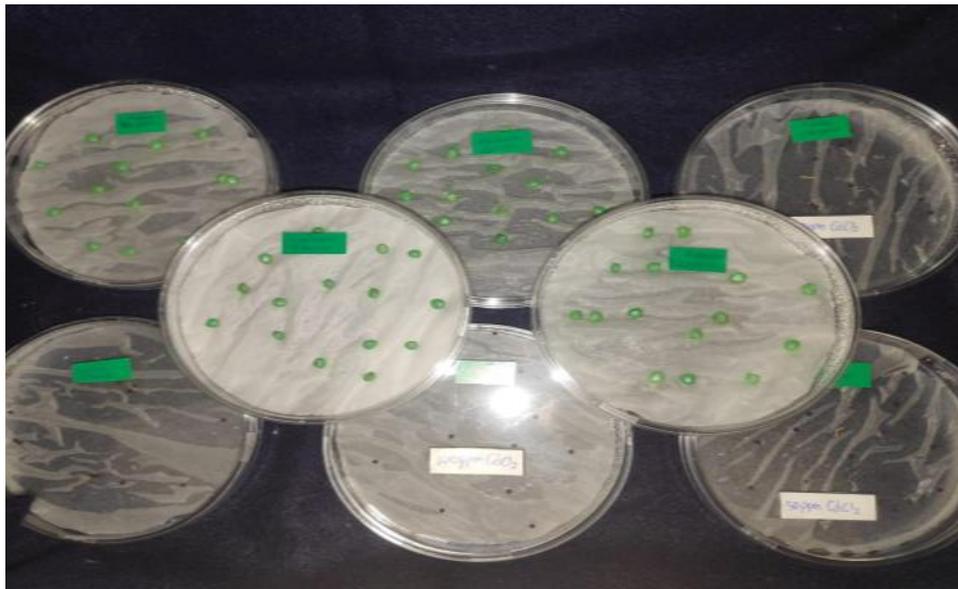


**Imagen 40.** Preparación para el sacado



**Imagen 41.** Laminado del bulbo para el sacado

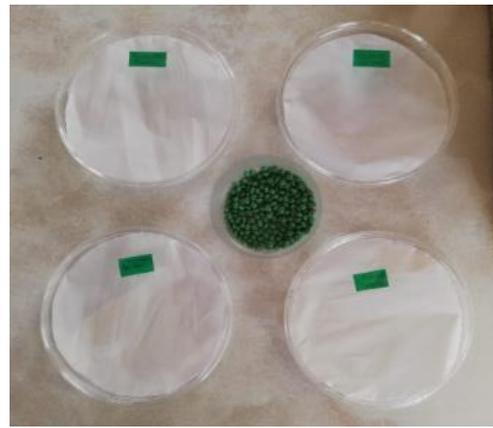
Anexo 4.4. Ensayo de germinación de la *Brassica rapa* y *Raphanus sativus*



**Imagen 42.** Semillas en la germinadora a 25°C



**Imagen 43.** Germinador *Brassica rapa*



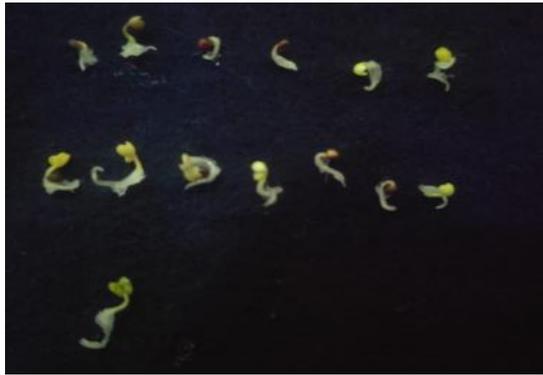
**Imagen 44.** Germinador *Raphanus sativus*



**Imagen 45.** Prueba de germinación testigo *Brassica rapa*



**Imagen 46.** Prueba de germinación testigo *Raphanus sativus*



**Imagen 47.** Prueba de germinación  
S1n *Brassica rapa*



**Imagen 48.** Prueba de germinación  
S1r *Raphanus sativus*



**Imagen 49.** Prueba de germinación  
S2n *Brassica rapa*



**Imagen 50.** Prueba de germinación  
S2r *Raphanus sativus*



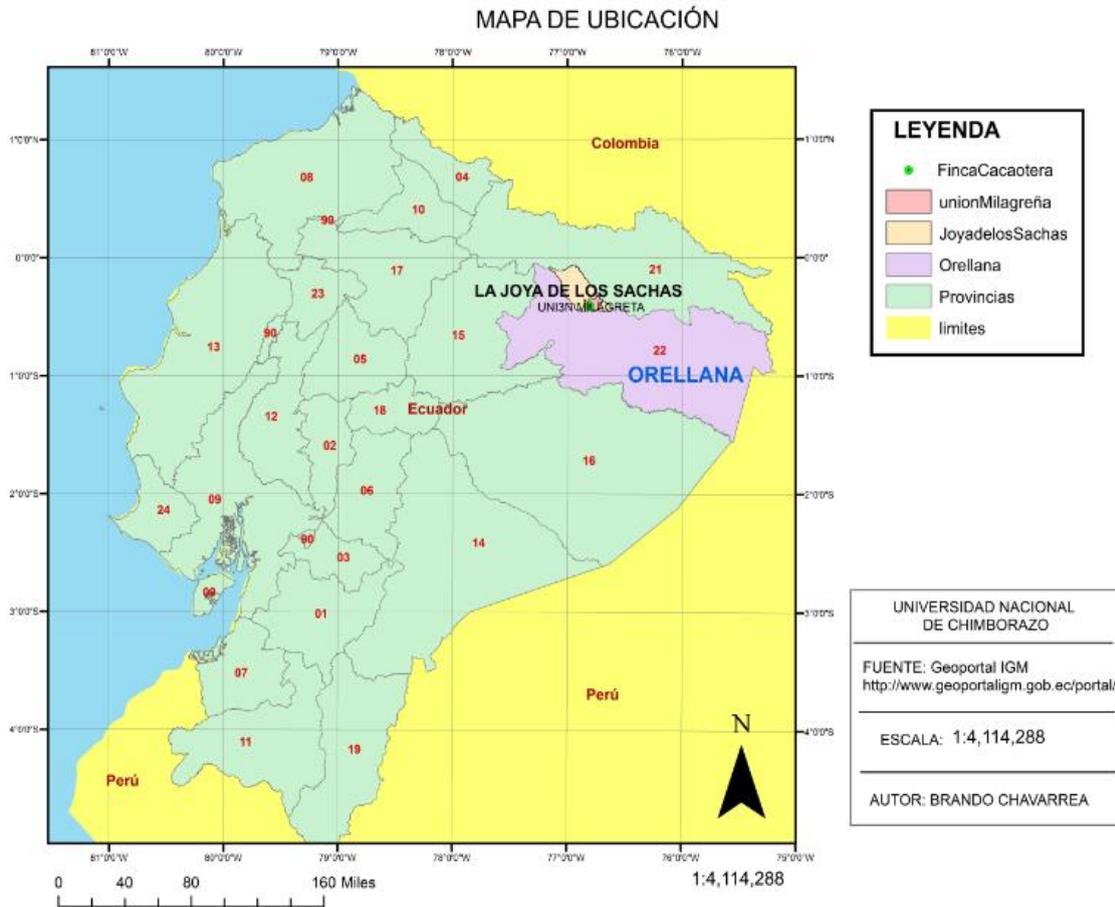
**Imagen 51.** Prueba de germinación  
S3n *Brassica rapa*



**Imagen 52.** Prueba de germinación  
S2r *Raphanus sativus*

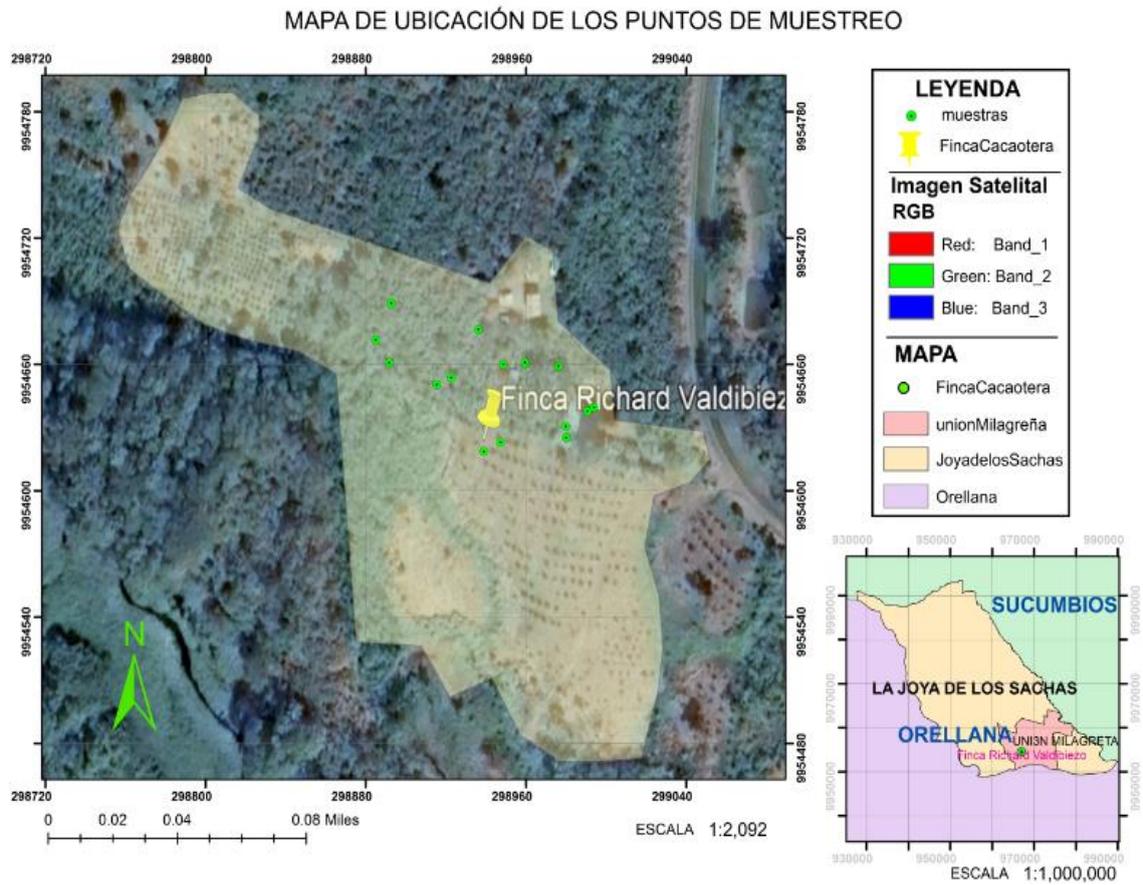
## Anexo 6. Mapas Elaborados

### Anexo 5.1. Mapa de ubicación del sitio de muestreo



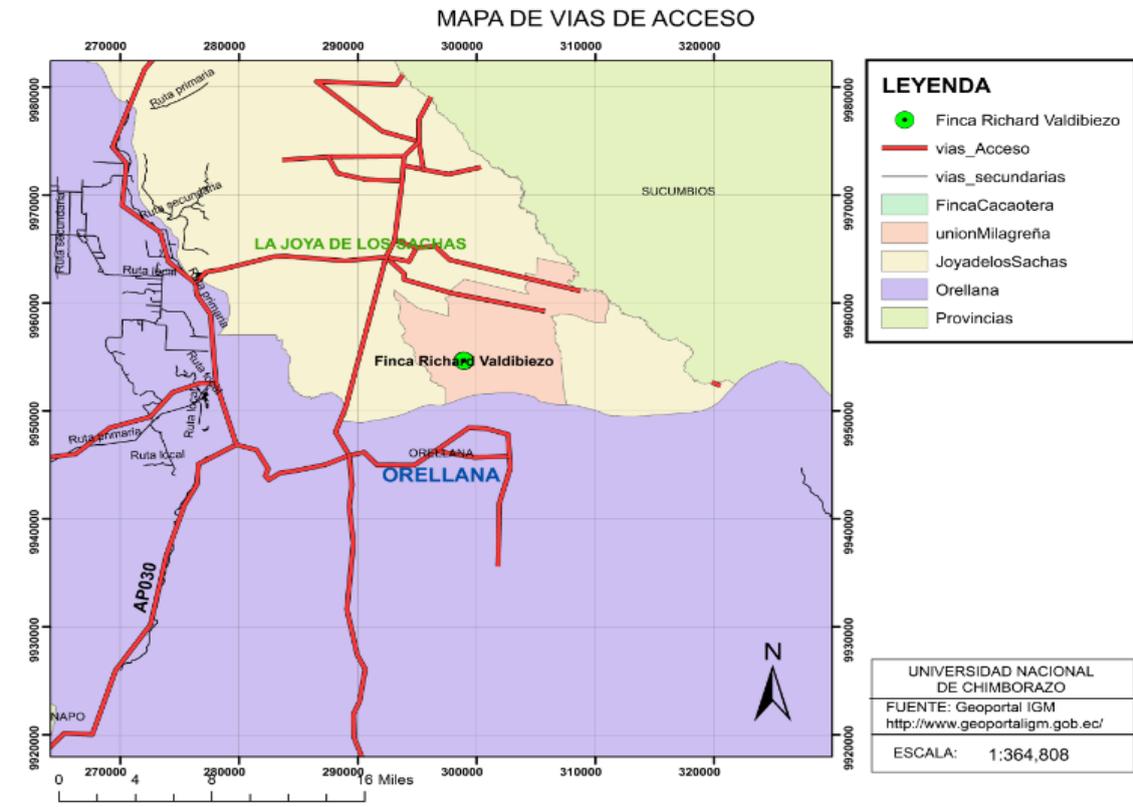
**Nota:** el mapa fue elaborado con información del Instituto Geográfico Militar ecuatoriano en el Geo portal del IGM está representado a una escala 1: 4, 114,288

## Anexo 5.2. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo



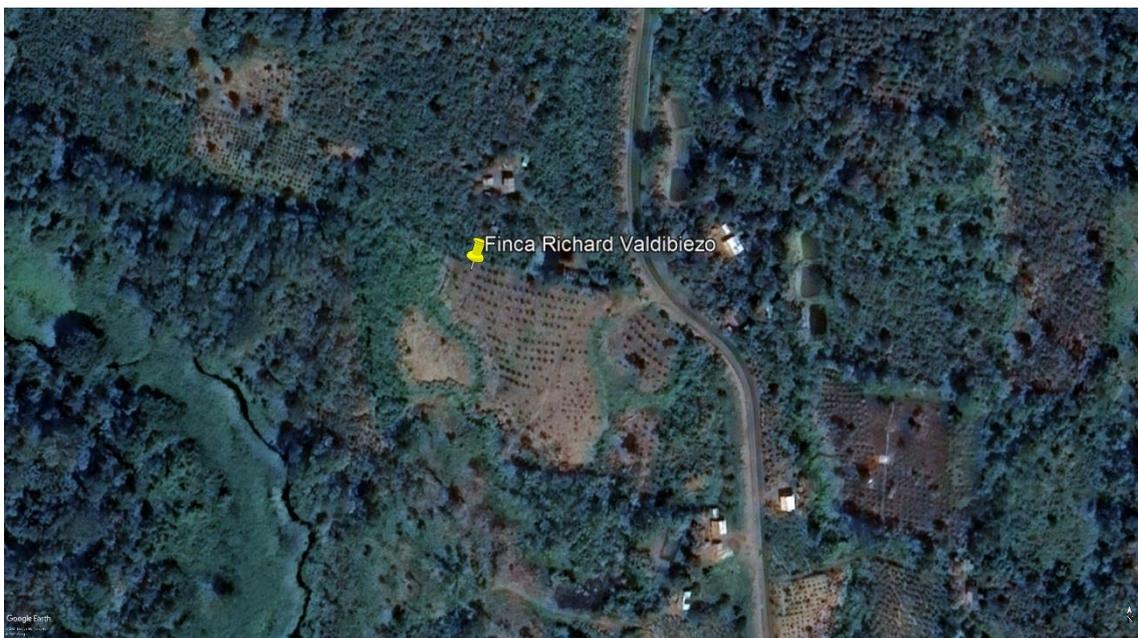
**Nota:** el mapa fue elaborado con información del Instituto Geográfico Militar ecuatoriano en el Geo portal del IGM está representado a una escala 1: 2,092

### Anexo 5.3. Plano vial de carreteras para llegar al sitio



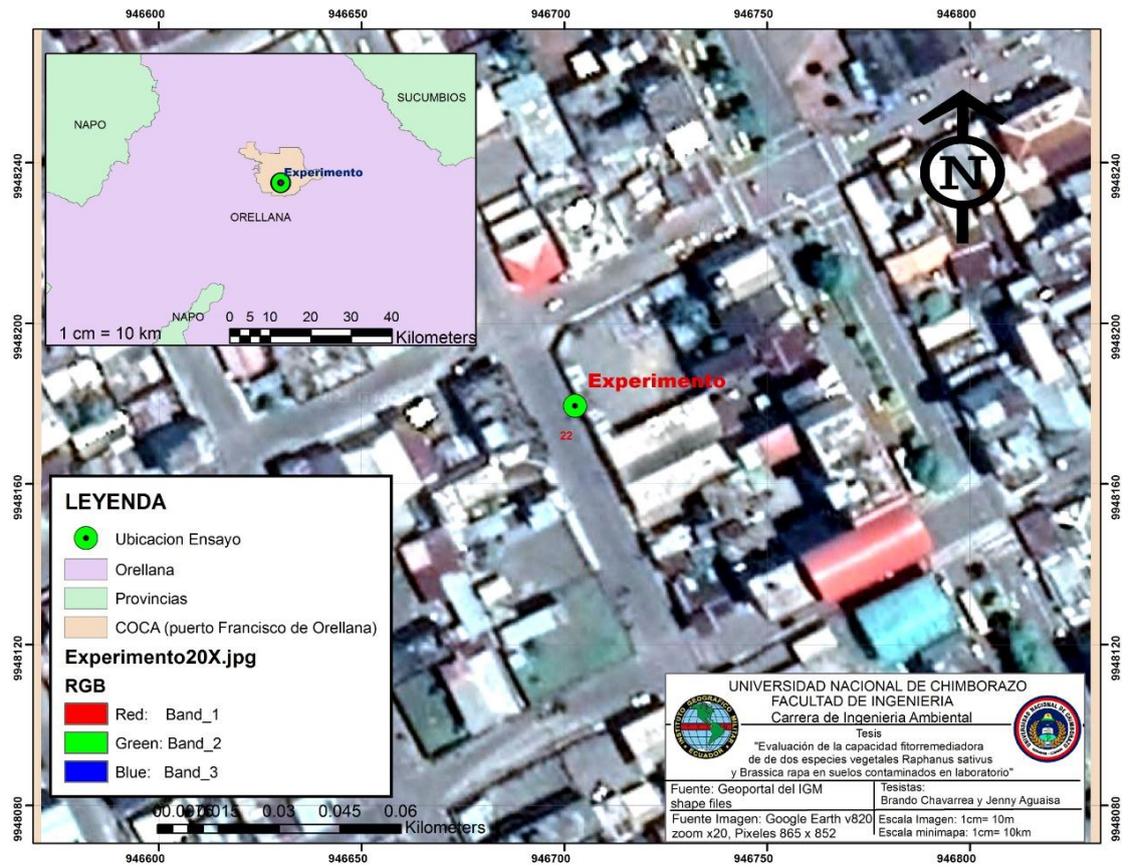
**Nota:** el mapa fue elaborado con información del Instituto Geográfico Militar ecuatoriano en el Geo portal del IGM está representado a una escala 1: 364,808

### Anexo 5.4. Imagen satelital del sitio de muestreo



**Nota:** la imagen fue obtenida en moderada resolución utilizando el programa google earth a una resolución de 3840 x 2160 pixeles.

## Anexo 5.5. Mapa de ubicación del sitio del Experimento



**Nota:** La imagen fue descargada del satélite de google en su versión 820 con un zoom x20 con una resolución de 865x852 píxeles.