

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**



**EFFECTO DEL CADMIO DE LA ROCA FOSFÓRICA Y EL EFECTO  
ANTAGÓNICO DEL ZINC EN PLANTONES DE *Theobroma cacao* (CACAO) VAR.  
CCN-51**

**Tesis**

**Para optar el título de:  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**Presentado por:  
MARIA ESMILDA MALCA QUEZADA**

**Asesor:  
HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI**

**Tingo María – Perú**

**2022**



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo María  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



Km 1.21 carretera Tingo María. Telf. (062) 561136 E.mail: [fagro@unas.edu.pe](mailto:fagro@unas.edu.pe)

*"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"*

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**Nº 008 -2022-FA-UNAS**

BACHILLER : MARIA ESMILDA MALCA QUEZADA

TÍTULO : "EFECTO DEL CADMIO DE LA ROCA FOSFÓRICA Y EL EFECTO ANTAGÓNICO DEL ZINC EN PLANTONES DE *Theobroma cacao* (CACAO) var. CCN-51"

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano  
VOCAL : M.Sc. Llerme Navarro Vasquez  
VOCAL : M.Sc. Jorge Adriazola del Águila

ASESOR : Dr. Hugo Alfredo, Huamani Yupanqui

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 09/05/2022

HORA DE SUSTENTACIÓN : 8:00 pm.


LUGAR DE SUSTENTACIÓN : Sala virtual - Facultad de Agronomía


CALIFICATIVO : Muy Bueno

RESULTADO : Aprobado

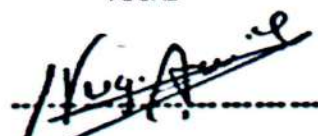
OBSERVACIONES A LA TESIS : En hoja adjunta

Tingo María, 09 de mayo de 2022

  
Dr. José Wilfredo, Zavala Solórzano  
PRESIDENTE

  
M.Sc. Llerme Navarro Vasquez  
VOCAL

  
M.Sc. Jorge Luis Adriazola del Águila  
VOCAL

  
Dr. Hugo Alfredo Huamani Yupanqui  
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL  
(RIDUNAS)

Correo: [repositorio@unas.edu.pe](mailto:repositorio@unas.edu.pe)



"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

**CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 104 - 2023 - CS-RIDUNAS**

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

**CERTIFICA QUE:**

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:

Facultad de Agronomía

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de investigación

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EFFECTO DEL CADMIO DE LA ROCA FOSFÓRICA Y EL EFFECTO ANTAGÓNICO DEL ZINC EN PLANTONES DE <i>Theobroma cacao</i> L. (CACAO) VAR. CCN-51	MARÍA ESMILDA MALCA QUEZADA	22% Veintidós

Tingo María, 02 de mayo de 2023

  
Mg. Ing. García Villegas, Christian  
Coordinador del Repositorio Institucional  
Digital (RIDUNAS)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**



**EFECTO DEL CADMIO DE LA ROCA FOSFÓRICA Y EL EFECTO  
ANTAGÓNICO DEL ZINC EN PLANTONES DE *Theobroma cacao* (CACAO) VAR.  
CCN-51.**

Autor	:	Maria Esmilda Malca Quezada
Asesor	:	Dr. Hugo Alfredo Huamani Yupanqui
Área de Investigación	:	Suelos y fertilizantes
Línea (s) de investigación	:	Fertilidad, clasificación, biología, manejo y conservación de suelos
Eje temático	:	Metales pesados en plantones de cacao
Lugar de Ejecución	:	Invernadero - Facultad de Agronomía - UNAS
Duración del trabajo	:	6 meses
Financiamiento	:	S/ 6 343,00

**Tingo María – Perú, 2023**

# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

## FACULTAD DE AGRONOMÍA

### ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

#### REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

##### I. DATOS GENERALES DE PREGRADO

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva

Facultad : Agronomía

Título de la tesis : Efecto del cadmio de la roca fosfórica y el efecto antagónico del zinc en plántones de *Theobroma cacao* (Cacao) var. CCN-51

Autor : Maria Esmilda Malca Quezada

DNI : 46376812

Correo electrónico : maria.malca@unas.edu.pe

Asesor de tesis : Dr. Hugo Alfredo Huamani Yupanqui

Escuela profesional : Agronomía

Área de Investigación : Suelos y fertilizantes

Línea (s) de investigación : Fertilidad, clasificación, biología, manejo y conservación de suelos

Eje temático de investigación : Metales pesados en plántones de cacao

Lugar de Ejecución : Invernadero - Facultad de Agronomía – UNAS

Duración : 6 meses

Fecha de Inicio : 15 de enero del 2019

Término : 15 de junio 2019

Financiamiento : S/ 6 343,00

FEDU : No

Propio : Si

Otros : No

**Tingo María - Perú - Noviembre, 2023**

## DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fortaleza y guía en tiempos difíciles.

A mis queridos padres Guzmán Malca Díaz y Bertha Quezada Trujillo, quienes me brindaron el amor, paciencia, apoyo incondicional que me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía de no temer las adversidades y a los buenos consejos pude convertirme en una gran profesional.

Mis hermanos Wilmer, Noé, Nike y Liliana por su gran cariño y apoyo incondicional, durante mi etapa de estudiante y todo este proceso por estar conmigo en todo momento. A toda mi familia, porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Mis amigos, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias, siempre las llevo en mi corazón.

## **AGRADECIMIENTO**

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Agronomía que contribuyeron a mi formación profesional.
- A mis asesores Dr. Hugo Alfredo Huamani Yupanqui, M Sc. Elvis Ottos Díaz por su valiosa colaboración en el presente trabajo.
- A los miembros del jurado, Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, M. Sc. Jorge Luis Adriazola Del Águila y M. Sc. Llerme Navarro Vásquez por su apoyo en la revisión y corrección de la redacción de la tesis.
- A la Facultad de Agronomía, por permitirme usar el invernadero para instalar el trabajo de investigación por un período de 6 meses y brindarme las instalaciones del laboratorio para realizar los análisis correspondientes.
- Al responsable del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Facultad de Agronomía, Ing. Gilmer Milton Neira Trujillo por permitirme usar las instalaciones del laboratorio y brindarme su valioso tiempo para explicarme a detalle las dudas que presenté durante proceso de los análisis de muestras de suelos y foliares en el laboratorio y por su valiosa colaboración en la interpretación de datos.
- A mis amigos Brush, Magdalena y Deisy, quienes me ayudaron en la realización del presente trabajo e investigación.
- A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la culminación de la presente tesis.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Generalidades de <i>Theobroma cacao</i> .....	3
2.2. Metales pesados en el suelo.....	3
2.3. Generalidades del cadmio.....	3
2.3.1. Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en plantas.....	4
2.3.2. Efecto de la toxicidad del cadmio en las plantas.....	5
2.3.3. Factores del suelo que influyen en la disponibilidad y acumulación de metales pesados.....	5
2.3.4. Acumulación de cadmio en las plantas de <i>Theobroma cacao</i> .....	7
2.4. Generalidades del zinc.....	8
2.4.1. Importancia del zinc en las plantas.....	8
2.4.2. Niveles adecuados de zinc en el tejido de las plantas.....	8
2.4.3. Aplicaciones foliares de Zn.....	9
2.5. Roca fosfórica.....	9
2.6. Fertilización foliar.....	11
2.6.1. Factores que influyen en la fertilización foliar.....	11
2.6.2. Etapas para la absorción foliar de nutrientes.....	12
2.7. Conductividad eléctrica (CE).....	12
2.8. Antecedentes del trabajo de investigación.....	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1. Lugar de ejecución.....	14
3.2. Materiales y métodos.....	14
3.2.1. Componentes en estudio.....	14
3.2.2. Tratamientos en estudio.....	15
3.2.3. Diseño experimental.....	15
3.2.4. Análisis físico - químico del suelo agrícola.....	16
3.2.5. Ejecución del experimento.....	17
3.2.6.1. Instalación del experimento.....	17
3.2.6.2. Recolección y germinación de cacao.....	18
3.2.6.3. Aplicación del sulfato de zinc en las plántulas de <i>Theobroma cacao</i> .....	18



3.2.6.4. Evaluación de las propiedades biométricas de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	18
3.2.6.5. Obtención de muestras finales de suelos.....	19
3.2.6.6. Determinación de cadmio .....	19
3.2.6. Análisis de correlación.....	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
4.1. Propiedades químicas del suelo .....	22
4.1.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el pH y conductividad eléctrica del suelo.....	22
4.1.2. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en el pH del suelo .....	24
4.1.3. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el P y Zn disponibles del suelo .....	26
4.1.4. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en el P y Zn disponibles del suelo .....	28
4.1.5. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en la CIC y en los contenidos de Ca y Mg del suelo .....	30
4.1.6. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en la CIC y en el contenido de Ca del suelo.....	33
4.2. Cadmio en el suelo.....	35
4.2.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el Cd disponible y total del suelo .....	36
4.2.2. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en el Cd disponible y total del suelo.....	39
4.3. Características biométricas de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	41
4.3.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en las características biométricas de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	42
4.3.2. Ritmo de crecimiento de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	45
4.3.3. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en la longitud radicular de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	47
4.4. Contenidos de cadmio, zinc y fósforo en el tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	49
4.4.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el contenido de Cd del tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	49

4.4.2. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el contenido de Zn del tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	51
4.4.3. Efecto principal de la roca fosfórica en el contenido de fósforo del tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	52
4.5. Análisis de correlación y regresión.....	53
4.6. Análisis de correlación .....	57
4.7. Modelos matemáticos .....	60
V. CONCLUSIONES.....	61
VI. PROPUESTAS A FUTURO .....	62
VII. REFERENCIAS .....	63
ANEXO .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Contenido de cadmio en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.....	10
2. Composición química del fosfato Bayovar.....	11
3. Rangos interpretativos para la conductividad eléctrica.....	13
4. Descripción de los tratamientos.....	15
5. Esquema del análisis de varianza.....	16
6. Análisis físico - químico del suelo.....	17
7. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el pH y conductividad eléctrica del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B).....	23
8. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en el pH del suelo.....	25
9. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el P y Zn disponibles del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B).....	27
10. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en el P y Zn disponibles del suelo.....	29
11. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para la CIC y contenidos de Ca y Mg del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B).....	32
12. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en la CIC y en el contenido de Ca del suelo.....	34
13. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el Cd disponible y total del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B).....	36
14. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en el Cd disponible y total del suelo.....	39
15. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para las características biométricas de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B).....	44
16. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en la longitud radicular de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	47
17. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de Cd en el tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B).....	49
18. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de Zn en el tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B).....	51

19. Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de P en el tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> por el efecto de los niveles de Cd (A) .....	53
20. Coeficientes de correlación para P, Zn y Cd del suelo .....	57
21. Coeficientes de correlación para los contenidos de P, Cd y Zn del tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	58
22. Coeficientes de correlación para las características biométricas de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	59
23. Resumen del análisis de varianza de las propiedades químicas del suelo .....	75
24. Análisis de varianza de los efectos simples de las propiedades químicas del suelo ...	75
25. Resumen del análisis de varianza del Cd disponible y total del suelo .....	76
26. Análisis de varianza de los efectos simples del Cd disponible y total del suelo.....	76
27. Resumen del análisis de varianza de las características biométricas de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	77
28. Análisis de varianza de los efectos simples de la longitud radicular de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	77
29. Resumen del análisis de varianza de los contenidos de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	78
30. Análisis de Varianza de correlación para el Cd, P y Zn disponibles del suelo .....	78
31. Análisis de Varianza de correlación para el contenido de Cd del tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Absorción y participación del cadmio en el interior de la planta de cacao.....	4
2. Influencia del pH en la concentración de diferentes metales en la solución del suelo ..	6
3. Ubicación del lugar de ejecución .....	14
4. pH del suelo por el efecto de los tratamientos .....	26
5. Contenidos de P y Zn disponibles del suelo por el efecto de los tratamientos .....	30
6. Capacidad de intercambio catiónico y contenido de Ca del suelo por el efecto de los tratamientos .....	35
7. Contenidos de Cd disponible y total del suelo por efecto de los niveles de roca fosfórica.....	38
8. Contenidos de Cd disponible y total del suelo por efecto de los niveles de zinc.....	38
9. Contenidos de Cd disponible y total del suelo por el efecto de los tratamientos.....	41
10. Efecto de los tratamientos T <sub>3</sub> y T <sub>12</sub> en el crecimiento de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	45
11. Ritmo de crecimiento de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> .....	46
12. Longitud radicular por el efecto de los tratamientos.....	48
13. Correlación y regresión entre los niveles de Cd aplicados al suelo y los contenidos de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	54
14. Correlación y regresión entre los niveles de Zn aplicados foliarmente y los contenidos de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de <i>Theobroma cacao</i> .....	55
15. Correlación y regresión entre los niveles de Cd aplicados al suelo y contenidos de Cd disponible y total del suelo .....	56
16. Correlación y regresión entre los niveles de Zn aplicados foliarmente y contenidos de Cd disponible y total del suelo .....	56
17. Análisis Físico - químico del suelo antes de la ejecución del experimento .....	80
18. Análisis químico especial de la roca fosfórica .....	81
19. Ficha técnica de la roca fosfórica Fosyeiki parte (a).....	82
20. Ficha técnica de la roca fosfórica Fosyeiki parte (b) .....	83
21. Análisis químico del suelo parte (a).....	84
22. Análisis químico del suelo parte (b).....	85
23. Análisis químico del suelo parte (c).....	86
24. Análisis especial de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> parte (a).....	87
25. Análisis especial de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> parte (b).....	88

26. Análisis especial de los plantones de <i>Theobroma cacao</i> parte (c).....	89
27. Diferencias entre raíz, tallo y hojas de los tratamientos T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> y T <sub>4</sub> .....	90
28. Diferencias entre raíz, tallo y hojas de los tratamientos T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> , T <sub>7</sub> y T <sub>8</sub> .....	90
29. Diferencias entre raíz, tallo y hojas de los tratamientos T <sub>9</sub> , T <sub>10</sub> y T <sub>11</sub> .....	91
30. Efecto de tres repeticiones del tratamiento T <sub>12</sub> .....	91
31. Medición de la longitud radicular del tratamiento T <sub>10</sub> .....	92

## RESUMEN

El trabajo experimental se ejecutó en las instalaciones del invernadero de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, con el objetivo de evaluar el efecto contaminante del Cd contenido en la roca fosfórica (A) y su antagonismo con el Zn (B) en plántones de *T. cacao* var. CCN-51. El estudio empleó el diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial de 3A x 4B con tres repeticiones y para la comparación de medias se utilizó la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ). Los resultados indican que los niveles crecientes de roca fosfórica aplicados al suelo incrementan proporcionalmente las concentraciones de Cd disponible y total en el suelo, mientras que las aplicaciones foliares de Zn tuvieron efecto significativo en la reducción de Cd en el suelo. Además, se encontró que las aplicaciones foliares de Zn no muestran un efecto significativo en la reducción de Cd en el tejido de los plántones de *T. cacao*. También, se evidenció el efecto negativo de la mayor dosis de Cd (1 ppm) en las características biométricas de los plántones de *T. cacao*, sin embargo, cuando no se realizó la contaminación con Cd, al aplicar 80 mg/L de Zn foliarmente se reportó una mayor longitud radicular.

**Palabras claves:** metales pesados, niveles, suelo, tejido vegetal, toxicidad.

## ABSTRACT

The experimental work was carried out in the greenhouse installations of the Universidad Nacional Agraria de la Selva's Agronomy Faculty with the objective of evaluating the contamination effect of the Cd content in the phosphate rock (A) and its antagonism with Zn (B) for the CCN-51 variety of *T. cacao* seedlings. The study employed a completely randomized design (CRD; DCA in Spanish) with a factorial arrangement of 3A x 4B with three repetitions, and for the means comparison the Duncan test ( $\alpha = 0.05$ ) was utilized. The results indicated that the growing levels of phosphate rock applied to the soil proportionately increased the concentrations of available and total Cd in the soil, while the foliar applications of Zn had significant effects on the reduction of Cd in the soil. Moreover, it was found that the foliar applications of Zn did not prove to have a significant effect on the reduction of Cd in the tissue of the *T. cacao* seedlings. Also, a negative effect was evidenced in the biometric characteristics of the *T. cacao* seedlings from a greater dose of Cd (1 ppm), however, when there was no Cd contamination, a greater root length was reported with the foliar application of 80 mg/L of Zn.

**Keywords:** heavy metals, levels, soil, plant tissue, toxicity.



## I. INTRODUCCIÓN

El cadmio (Cd) es un metal pesado no esencial, altamente tóxico, tiene efectos dañinos en los seres humanos, plantas, microorganismos y suelos (Rodríguez Albarracín, 2018). El Cd en el suelo resulta de la combinación de los procesos naturales y antropogénicos. Los procesos naturales incluyen la meteorización de las rocas, la actividad volcánica, los incendios forestales la erosión y la deposición en los sedimentos de los ríos, en cambio los procesos antropogénicos abarcan las actividades industriales y mineras, al igual que las actividades agrícolas de irrigación y fertilización (Meter et al., 2019).

Actualmente, los suelos agrícolas en el Perú han incrementado considerablemente la concentración de Cd. Esto se debe principalmente al uso de fertilizantes fosforados derivados de material sedimentario como la roca fosfórica que está constituida principalmente por la apatita (Meter et al., 2019). Estos fertilizantes en su mayoría contienen Cd y al ser utilizados en la agricultura entran en la cadena trófica (Bonomelli et al., 2003). La roca fosfórica procedente de Sechura - Perú posee 87 ppm de Cd (Zapata y Roy, 2007).

Principalmente los productores cacaoteros han evidenciado niveles altos de Cd en los suelos y almendras, siendo una amenaza potencial al momento de comercializar sus productos. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 1996), ha propuesto como nivel crítico 0,43 ppm de Cd en los suelos agrícolas y probablemente este valor ha sido superado en los suelos cacaoteros. Según Oc Llatence et al. (2018), a nivel de categorías, *T. cacao* es la especie que acumula mayor contenido de Cd en sus estructuras, debido a que es una plantación perenne y a la exposición directa con el metal.

Por otro lado, el zinc (Zn) es considerado un micronutriente esencial para las plantas (Castillo-González et al., 2018). Donde la fertilización foliar se ha convertido en una estrategia para suplir las necesidades nutricionales, como en el caso del Zn, ya que la planta solo requiere en pequeñas cantidades. Las fuentes de Zn más utilizadas son los quelatos (EDTA, ligno sulfatos, aminoácidos, etc.) y las sales como el sulfato de Zn y nitrato de Zn (Molina, 2002).

Al parecer, cuando en el suelo se tienen altos niveles de Zn con respecto al Cd, se inhibe la absorción de este último (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 1995). El efecto antagonista del Zn en la absorción del Cd ha sido observado con frecuencia (Smilde et al., 1992). También, efectos de sinergismo entre Cd y Zn en la zona adyacente a las raíces, y posibles sinergismos o antagonismos en la planta (Kabata-Pendías, 2011).

En tal sentido se plantearon los siguientes objetivos:

➤ **Objetivo general**

Determinar el efecto del cadmio de la roca fosfórica y el efecto antagónico del Zn en plantones de *Theobroma cacao* variedad CCN-51 en vivero.

➤ **Objetivos específicos**

1. Determinar las propiedades químicas del suelo por efecto de las aplicaciones de roca fosfórica y Zn.
2. Determinar los contenidos de Cd disponible y total en el suelo por el efecto de la aplicación de la roca fosfórica.
3. Evaluar el efecto del Cd y Zn en las propiedades biométricas de los plantones de *T. cacao* en vivero.
4. Determinar el efecto de la aplicación foliar de Zn en la concentración de Cd en el tejido vegetal de los plantones de *T. cacao* en vivero.
5. Determinar el análisis de correlación entre las variables estudiadas.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades de *Theobroma cacao*

Pertenece a la familia Malvaceae (Dostert et al., 2012). Es una planta oriunda de los bosques húmedos de América del sur. Sus poblaciones muestran una extensa diversidad genética (entre y dentro de ellas), tanto en su estado silvestre como cultivado. La diversidad genética se debe a su sistema reproductivo “sexual”, mecanismo de polinización cruzada natural, sistema genético de incompatibilidad, recombinación genética, etc. (García Carrión, 2010).

Las plantas de *T. cacao* se desarrollan mejor a una temperatura promedio anual de 21 °C, cuando la temperatura es muy alta o baja se producen alteraciones fisiológicas en las plantas. La precipitación debe estar entre 1 500 - 2 500 mm al año, ya que las plantas de *T. cacao* son muy sensibles al déficit de agua, así como su exceso. Los suelos deben ser de textura franco-arcilloso, con pH de 4 - 7, con alto contenido de materia orgánica, profundos y con un buen drenaje natural (Estrada et al., 2011).

### 2.2. Metales pesados en el suelo

Es un conjunto de elementos químicos que se encuentran en la naturaleza siendo parte de la corteza terrestre en pequeñas cantidades; no obstante, la concentración de estos metales ha incrementado de modo significativo en los distintos ecosistemas, a causa de las diferentes actividades antropogénicas (industriales y agrícolas) (Beltrán Pineda y Gómez Rodríguez, 2015). Constituyen un riesgo para la salud humana por el contacto frecuente laboral y ambiental. Entre los más tóxicos destacan el plomo (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As) y Cd (Pérez García y Azcona Cruz, 2012).

Los metales pesados no pueden ser destruidos o degradados, pueden ser disueltos por agentes físicos o químicos y ser lixiviados (Londoño-Franco et al., 2016). Se caracterizan por su persistencia, bioacumulación, biotransformación y alta toxicidad, por lo tanto, permanecen mayor tiempo en el ambiente (Rodríguez Albarracín, 2018). Los metales pesados no tienen una función esencial conocida en los organismos vivos y contrario a esto presentan manifestaciones tóxicas a exposiciones moderadas (Reyes Navarrete et al., 2012).

### 2.3. Generalidades del cadmio

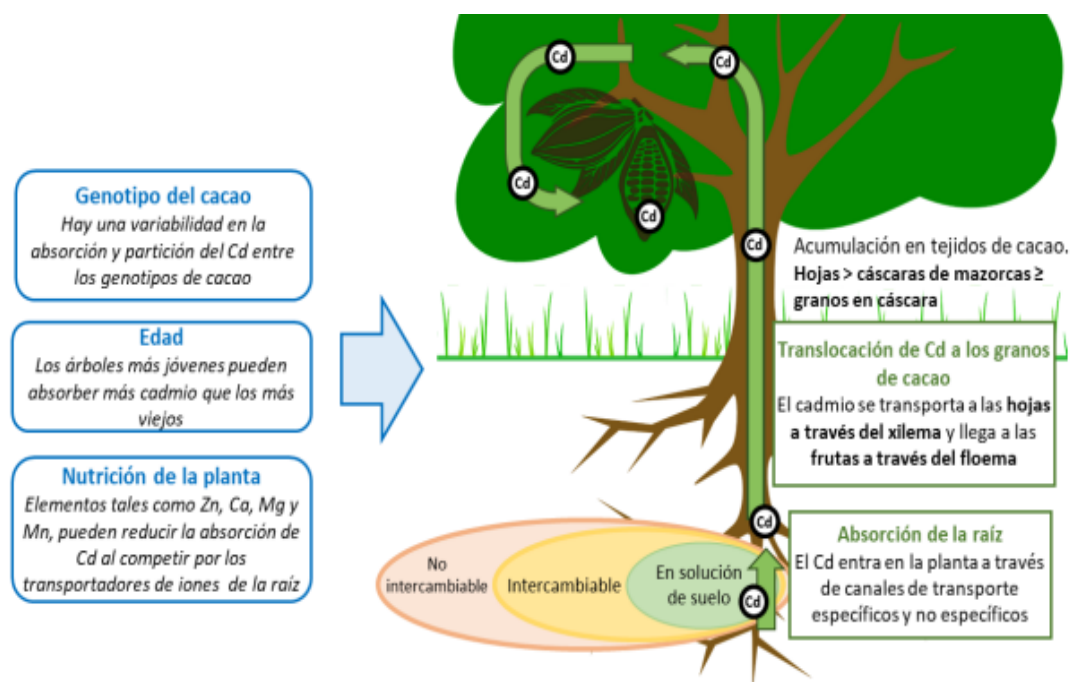
Corresponde al grupo IIB de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos. Posee un número atómico 48, número de masa atómica 112, densidad 13,5 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C, valencia +2, punto de fusión 321 °C y punto de ebullición 765 °C (Kabata-Pendias, 2011). Es un metal traza sin funciones biológicas esenciales (Gramlich et al., 2018). Es altamente tóxico, tiene efectos dañinos en los seres humanos, plantas, microorganismos y suelos (Rodríguez Albarracín, 2018).

El Cd en el suelo resulta de la combinación de los procesos naturales y antropogénicos. En los procesos naturales se encuentran la meteorización de las rocas, la actividad volcánica, los incendios forestales, la erosión y la deposición en los sedimentos de los ríos, en cambio los procesos antropogénicos abarcan las actividades industriales y mineras, al igual que las actividades agrícolas de irrigación y fertilización. El Cd en los suelos agrícolas se debe principalmente al uso de fertilizantes fosforados derivados de material sedimentario (Meter et al., 2019).

El Cd es un metal pesado no esencial, se halla en pequeñas cantidades en la corteza terrestre (Rodríguez-Serrano et al., 2008); sin embargo, su alta movilidad y poder bioacumulativo lo diferencian del resto de los de su grupo y ha motivado a los investigadores a realizar estudios sobre sus efectos e interacciones con las plantas (Hernández-Baranda et al., 2019).

### 2.3.1. Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en plantas

El Cd ingresa a las plantas en forma de  $Cd^{2+}$ , debido a que sus iones quelatos, regularmente, no se encuentran disponibles para la absorción radicular. Siendo la capa de células epidérmicas el primer tejido para la captación de iones y dentro de ella; los pelos radiculares son considerados como la zona más activa para la absorción de iones en el suelo y es la estructura que favorece la asimilación de  $Cd^{2+}$  (Seregin y Ivanov, 2004). Luego el  $Cd^{2+}$  es trasladado al xilema para llegar a las hojas. En las hojas el  $Cd^{2+}$  es llevado rápidamente hacia el floema desde donde llega a los frutos (Shahid et al., 2016). En la Figura 1, se observa la absorción, translocación y acumulación del Cd en la planta cacao.



**Figura 1.** Absorción y participación del cadmio en el interior de la planta de cacao

Fuente: Meter et al., 2019.

### **2.3.2. Efecto de la toxicidad del cadmio en las plantas**

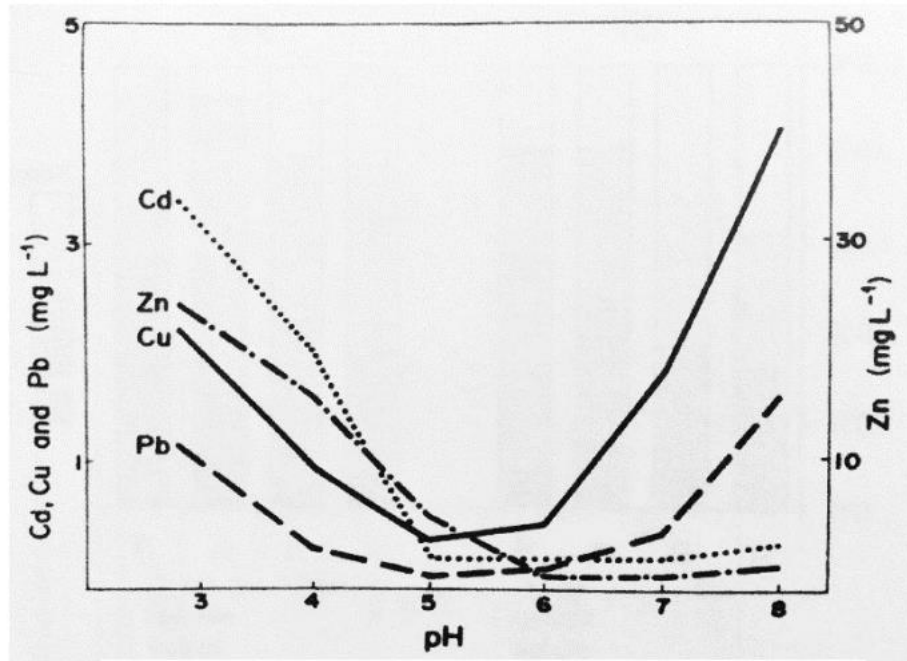
- Produce alteraciones en las características morfo-anatómicas (raíz, tallo y hoja). Genera dificultades en la nutrición, transporte de elementos esenciales, fotosíntesis, división celular y en el crecimiento de tejidos principales (Peláez et al., 2014).
- Los altos niveles de Cd en el suelo reducen la concentración de clorofila y el crecimiento vegetal (Raven Willwater, 2018). La clorosis puede aparecer por deficiencia en hierro (Fe), deficiencia de fósforo o reducción del transporte de manganeso (Mn) (Rodríguez Serrano, 2007).
- El Cd impide la entrada, el transporte y el uso de los nutrientes esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, generando problemas nutricionales e hídricos en las plantas (Rodríguez-Serrano et al., 2008).
- El Cd disminuye la absorción de nitratos y el transporte de estos de la raíz hacia el tallo e inhibe la actividad nitrato reductasa en el tallo (Gouia et al., 2000, como se citó en Rodríguez-Serrano et al., 2008).
- Aceleración de la senescencia celular (Di Toppi y Gabbrielli, 1999, como se citó en Pernía et al., 2008).

### **2.3.3. Factores del suelo que influyen en la disponibilidad y acumulación de metales pesados**

#### **➤ pH del suelo**

Esta propiedad es determinante en la disponibilidad de elementos traza, potencialmente tóxicos, como el Cd, Cu y Zn, elementos que muestran una mayor transferencia suelo-planta (Domínguez Núñez et al., 2008). Los suelos ácidos favorecen la contaminación y la toxicidad por bioacumulación de Cd, siendo neutralizado con el aumento de la materia orgánica y el pH del suelo (Bravo Realpe et al., 2014). En los suelos alcalinos el Cd se inmoviliza, ya que logra precipitarse en forma de carbonatos y fosfatos insolubles. También, se produce la formación de especies hidroxilo monovalentes como el  $\text{CdOH}^+$ , que no logran ocupar sencillamente los sitios de unión en los complejos de intercambio catiónico (Sánchez Barrón, 2016).

En la Figura 2, se observa la influencia del pH en la concentración de diferentes metales en la solución del suelo.



**Figura 2.** Influencia del pH en la concentración de diferentes metales en la solución del suelo

Fuente: Kabata-Pendias, 2011, como se citó en Sánchez Barrón, 2016.

#### ➤ Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Se entiende como la capacidad de un suelo para adsorber cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) y es igual a las cargas negativas del suelo (Jaramillo, 2002). Cuando los valores de la CIC son altos implican mayor capacidad del suelo para retener cationes y puede llevar a un descenso de la biodisponibilidad del Cd; sin embargo, cuando la CIC empieza a disminuir se produce mayor competencia entre los cationes y el  $\text{Cd}^{2+}$  para los sitios de ligazón que darán como consecuencia la desorción de Cd de las partículas del suelo a la solución del suelo (Meter et al., 2019).

#### ➤ Materia orgánica (MO)

Adriano (2001), manifiesta que la MO del suelo tiene un papel fundamental en la biodisponibilidad del Cd, esto se debe a su capacidad de intercambio para absorber el Cd. Huaynates Natividad (2014), determinó que la adición de fuentes orgánicas reduce el contenido de Cd en el suelo. Asimismo, Guzmán Ñahuirima (2019), mediante un trabajo de investigación determinó que la mejor dosis de MO para reducir el contenido de Cd en el suelo es 1,07 %, resultando con 0,69 y 1,42 ppm de Cd disponible y total, en contraste con otros niveles de MO.

En la materia orgánica humificada (MOH), los ácidos húmicos juegan un papel fundamental en la inmovilización del Cd, estableciendo enlaces fuertes en los grupos carboxílicos y fenólicos, con mayor capacidad y fuerza de retención que el resto de las fases

absorbentes, en cambio los ácidos fenólicos (AF) movilizan el metal por fenómenos de complejación y solubilización (Bravo Realpe et al., 2014).

➤ **Adsorción específica**

Se origina por la afinidad de algunos cationes metálicos por un lugar específico de adsorción, por lo que los metales son adsorbidos particularmente en cierto orden de preferencia ( $Cd^{2+} < Zn^{2+} < Pb^{2+}$ ); por consiguiente, los metales no siempre son influenciados por la competencia de otros cationes (Alloway, 1995). Esta propiedad es afectada especialmente por el pH del suelo, además por los coloides orgánicos e inorgánicos (MO y óxidos hidratados de aluminio, hierro y manganeso) y sucede cuando el contenido de los metales es bajo (Azevedo Silveira et al., 2003). Como resultado de la adsorción específica, los metales son removidos de la solución suelo y retenidos en la superficie de los coloides formando moléculas denominados complejos de esfera interna, este mecanismo generalmente es irreversible (Lamb et al., 2009).

➤ **Precipitación**

Generalmente las reacciones de precipitación están vinculadas a los suelos alcalinos y calcáreos con niveles relativamente altos de metales pesados y también a condiciones que favorezcan una baja solubilidad de estos metales y la presencia de escasos sitios de adsorción específica (Moreira, 2004).

➤ **Complejación y quelación**

La complejación de metales pesados implica a un ion metálico en solución que está siendo rodeado por uno a más ligandos orgánicos o inorgánicos (Rieuwerts et al., 1998). La quelación implica inmovilizar un ion metálico con ligandos de bajo peso molecular para formar un complejo o una molécula químicamente estable (Sierra-Álvarez, 2007). En el grupo de ligandos complejantes orgánicos se encuentran el ácido cítrico, ácido oxálico y ácido gálico, también los ácidos complejantes más estructurados, como aquellos incluidos en las fracciones húmica y fúlvica solubles (Evans, 1989).

**2.3.4. Acumulación de cadmio en las plantas de *Theobroma cacao***

Al ser una plantación perenne, sus raíces están expuestas directamente a la mayor presencia de Cd, lo que no ocurre con las otras especies, como las plantaciones temporales (Oc Llatence et al., 2018). Debido al contacto directo con el suelo, las raíces acumulan mayor contenido de Cd a diferencia de la parte aérea. El Cd posee mayor radio iónico; es por ello por lo que compite principalmente con los cationes de Ca, Na, Mg, entre otros y alcanza a penetrar por las diferentes vías de absorción, ingresando por las células corticales y trasladándose hacia los tejidos, su movilidad en el interior de la planta es muy rápida y consigue unirse con otros iones y enzimas (Correa Villacorta, 2018).

La concentración de Cd en las estructuras de la planta sigue una secuencia descendente: raíz, tallo, hoja y fruto (Ferguson, 1990; Jinadasa et al., 1997; Nigam et al., 2001, como se citó en Herrera Marcano, 2011).

#### **2.4. Generalidades del zinc**

El Zn está ubicado en el grupo 12 de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos. Posee un número atómico 30 y peso atómico 65,37 g/mol. El Zn está distribuido ampliamente en la naturaleza, sin embargo, es poco abundante, ya que solo equivale al 0,012 % de la corteza terrestre (Rubio et al., 2007). El Zn proviene especialmente de los minerales esfalerita y wurtzita que contienen ZnS y en menor medida minerales como franklinita ( $ZnFe_2O_4$ ), hopeita ( $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ), smithsonita ( $ZnCO_3$ ), willemita ( $Zn_2SiO_4$ ), zincita ( $ZnO$ ) y zinkosita ( $ZnSO_4$ ) (Barack y Helmke, 1993, como se citó en Sebastián Peña, 2007).

La deficiencia de  $Zn^{2+}$  se produce en suelos alcalinos y calcáreos. La disponibilidad del  $Zn^{2+}$  disminuye cuando el pH del suelo es elevado, el Zn se precipita en formas insolubles como  $ZnFe_2O_4$  y/o  $ZnSiO_4$ . En los suelos calcáreos, la disponibilidad del  $Zn^{2+}$  disminuye por el incremento del  $CaCO_3$ , debido a la reacción que se produce entre ambos produciendo  $ZnOH^+$  (Havlin et al., 1999). Además, suelos con alto contenido de fósforo limitan la absorción del Zn (Alloway, 2008).

Por otro lado, Estévez et al. (2000), determinaron que la aplicación conjunta de Zn y Cd muestran efectos sinérgicos entre ambos elementos. Cuando la concentración de uno de ellos es mayor favorecen la movilidad e inhiben la retención del otro.

##### **2.4.1. Importancia del zinc en las plantas**

El Zn es considerado un micronutriente esencial para la planta (Castillo-González et al., 2018). Es fundamental en la fisiología, metabolismo y la reproducción: interviene como regulador de diversas enzimas, desempeña un papel fisiológico en la estructura y función de las membranas biológicas, tiene gran importancia en la fotosíntesis e interviene sobre las enzimas implicadas en el metabolismo de la planta, regulación del crecimiento y en la reproducción (Almendros García et al., 2008). Participa en la biosíntesis del ácido indolacético fundamental en el desarrollo de las hojas y crecimiento de las zonas meristemáticas (Ramírez Aparicio, 2019).

##### **2.4.2. Niveles adecuados de zinc en el tejido de las plantas**

Epstein y Bloon (2017), señalan que el nivel adecuado de Zn en el tejido de la planta es 20 ppm. Asimismo, Amezcua Romero y Lara Flores (2017), manifiestan que la cantidad de Zn que requieren las plantas para crecer y desarrollarse favorablemente es mínima,



fluctúa de 15 - 20 ppm de tejido seco; los valores mencionados equivalen menos de 0,1 % del peso seco total del tejido.

Por otra parte, Hernández (2002), indica que la concentración de Zn en las plantas oscila de 3 - 150 ppm en base al peso seco. Los niveles de deficiencia en el tejido foliar están por debajo de los 20 - 25 ppm en base al peso seco, siendo los niveles adecuados de 25 - 150 ppm, sin embargo, cuando los valores son mayores a 400 ppm (exceso), producen toxicidad.

### **2.4.3. Aplicaciones foliares de Zn**

Para el suministro de Zn (micronutriente), la fertilización foliar es la más recomendable. Las fuentes de Zn más usadas son los quelatos (EDTA, lignosulfatos, aminoácidos, etc.) y las sales, como: sulfato de zinc y nitrato de zinc (Molina, 2002).

## **2.5. Roca fosfórica**

Es un recurso natural limitado, no renovable y los depósitos geológicos de diferente origen están distribuidos por todo el mundo. Los principales yacimientos se encuentran en Marruecos y otros países de África, en los estados Unidos de América, en el cercano Oriente y en China. En la actualidad, alrededor del 90 % de la producción mundial de roca fosfórica son utilizados por las industrias de fertilizantes fosfatados, mientras que el 10 % restante se utiliza para la elaboración de productos químicos, alimentos para animales y otros derivados (Zapata y Roy, 2007).

La roca fosfórica está compuesta principalmente por fosfato ( $P_2O_5$ ) en forma de apatitas (Zapata y Roy, 2007). Luego de varios procesos de purificación, la roca fosfórica presenta de 11,5 - 17,5 % de fósforo (27 - 41 % de  $P_2O_5$ , comúnmente 30 %) (Tisdale et al., 1993, como se citó en Quitral Villanueva, 2005).

La solubilidad es un indicador que permite determinar el desempeño agronómico de la roca fosfórica, propiedad que generalmente se mide en un laboratorio utilizando citrato de amonio neutro, ácido cítrico al 2 % o ácido fórmico al 2 %. La solubilidad refleja las propiedades químicas y mineralógicas de minerales específicos. La apatita es el principal mineral en la mayoría de las rocas fosfóricas, sin embargo, ésta cambia considerablemente en sus características físicas, químicas y cristalográficas (Chien et al., 2009).

La roca fosfórica también posee metales pesados (Cd, Cr, Hg y Pb), considerados tóxicos para los seres vivos. Las concentraciones de estos elementos tóxicos pueden variar considerablemente entre las fuentes de rocas fosfóricas y aún más dentro del mismo yacimiento. Específicamente, la roca fosfórica procedente de Sechura - Perú posee 87 ppm de Cd (Zapata y Roy, 2007).

En la Tabla 1, se muestra el contenido de Cd registrado en las diferentes rocas, donde el mayor contenido de Cd se registra en las rocas sedimentarias, principalmente en los esquistos negros, fosforitas y carbón.

**Tabla 1.** Contenido de cadmio en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas

<b>Tipo de roca</b>	<b>Rango [ppm]</b>	<b>Promedio [ppm]</b>
<b>Rocas ígneas</b>		
Riolitas	0,03 - 0,57	0,230
Granitos	0,01 - 1,60	0,200
Basaltos	0,01 - 1,60	0,130
<b>Rocas metamórficas</b>		
Gneises	0,007 - 0,26	0,040
Esquistos negros	0,30 - 219,0	-
Esquistos	0,005 - 0,87	0,020
<b>Rocas sedimentarias</b>		
Esquistos y arcillas	0,017 - 11	-
Piedras areniscas y conglomerados	0,019 - 0,4	-
Carbonatos	0,007 - 12	0,065
Fosforitas	< 10 - 980	-
Carbón	0,01 - 300	-
<b>Yacimientos minerales de azufre</b>		
Esfalerita (ZnS)	0,2 - 0,4(< 5 %)	-
Galena (PbS)	< 0,5 %	-
Tetrahedrita – Tennartita (CuZn)(SbAs)S	< 0,24 %	-
Metacinnabar (HgS)	11,70 %	-

Fuente: Alloway, 1995, como se citó en Villanueva Nilo, 2005.

El principal yacimiento de roca fosfórica en el Perú se encuentra en Bayóvar, provincia de Sechura, departamento de Piura. Es de origen sedimentario marino. Se caracteriza por su alto contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con 30,5 % (Tabla 2). Es considerada una de las más reactivas del mundo, por lo que puede ser suministrada directamente con excelentes resultados (Agrocenter, 2020).

**Tabla 2.** Composición química del fosfato Bayovar

<b>Composición Química Mínima Garantizada (Procedentes de Sechura, Piura - Perú)</b>	
<b>Componentes</b>	<b>Bayóvar</b>
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	30,5 %
Calcio (CaO)	47,5 %
Magnesio (MgO)	1,0 %
Potasio (K <sub>2</sub> O)	0,21 %
Sodio (Na <sub>2</sub> O)	1,5 %
Azufre (SO <sub>4</sub> )	3,0 %
Cloro (Cl)	3,0 %
Boro (B)	0,05 %
Silicio (SiO <sub>2</sub> )	4,2 %
Molibdeno (Mo)	47 ppm
Zinc (Zn)	87 ppm

Fuente: Agrocenter, 2020.

## 2.6. Fertilización foliar

Es una práctica que ayuda a corregir las deficiencias nutricionales en las plantas, debido a la baja fertilidad del suelo o condiciones de estrés (Murillo Castillo et al., 2013; Cruz-Crespo et al., 2020). La aplicación de los nutrientes se realiza directo al tejido vegetal en los períodos críticos del crecimiento de la planta, tiene una respuesta rápida y al objetivo a diferencia de la fertilización del suelo (Fernández et al., 2015). La absorción de los nutrientes se realiza mediante los estomas que se localizan en el haz o envés de las hojas y mediante los espacios submicroscópicos llamados ectodesmos en las hojas y al dilatarse la cutícula se originan espacios vacíos que permitirán la absorción de los nutrientes (Salas, 2002).

### 2.6.1. Factores que influyen en la fertilización foliar

#### ➤ **Formulación foliar**

Se requiere de un cálculo preciso de la cantidad del producto que se utilizará; un cálculo inadecuado podría ocasionar una sobredosificación del fertilizante y como éste es aplicado a las hojas. El agua que se usa para la disolución del fertilizante contribuye a la eficiencia de la aplicación y al buen manejo del equipo de aspersión (Molina, 2002).

#### ➤ **Ambiente**

La luz es importante en la fotosíntesis y para que las plantas puedan concentrar nutrimentos en los metabolitos se necesita de un proceso fotosintéticamente activo

en las plantas. Con respecto a la hora de aplicación, debe realizarse en la mañana o en la tarde, según las condiciones de la zona (Trinidad Santos y Aguilar Manjarrez, 1999).

La humedad relativa y la temperatura son los factores que más afectan en la performance de la fertilización foliar. La humedad relativa afecta la permeabilidad de la superficie de las hojas y las respuestas fisicoquímicas a los compuestos aplicados. La temperatura afecta los distintos parámetros fisicoquímicos de la formulación de pulverización foliar, como la tensión superficial, solubilidad, viscosidad o punto de deliquesencia (Fernández et al., 2015).

#### ➤ **Planta**

Es importante considerar la edad de la planta, estado nutricional y la especie cultivada (Fernández et al., 2015).

### **2.6.2. Etapas para la absorción foliar de nutrientes**

Murillo Castillo et al. (2013), describen tres etapas importantes para la absorción foliar de nutrientes a través de la hoja.

#### ➤ **Retención del producto en las hojas**

Los nutrientes aplicados mediante la aspersión deben permanecer por un tiempo prolongado en la superficie de las hojas.

#### ➤ **Transporte del nutriente a las células**

Los nutrientes son transportados mediante las distintas capas de la hoja, para ello tienen que atravesar diversas barreras naturales, hasta llegar a las células epidermales.

#### ➤ **Movimiento del nutriente hasta los órganos**

Los nutrientes son llevados a partir de las células epidermales hasta los órganos requeridos por la planta, donde tienen que atravesar espacios intercelulares (apoplasto) o células de distintos tejidos (simplasto). Cuando los nutrientes logran llegar al tejido vascular (xilema y principalmente floema), incrementan considerablemente su movilidad hasta el tejido requerido.

## **2.7. Conductividad eléctrica (CE)**

Mediante la CE se determina la cantidad de sales presentes en la solución del suelo. La CE es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor incrementará cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo. Es decir, a medida que incrementa la CE, mayor será la concentración de sales (Bárbaro et al., 2018). La salinidad generalmente se asocia con el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$  (cationes) ó  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$  (aniones) (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], 1999). En la Tabla 3, se muestra los rangos interpretativos para la CE del suelo.

**Tabla 3.** Rangos interpretativos para la conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica (dS/m a 25°C)	Clase de salinidad
0 - 0,98	No salino
0,98 - 1,71	Muy ligeramente salino
1,71 - 3,16	Ligeramente salino
3,16 - 6,07	Moderadamente salino
> 6,07	Fuertemente salino

Fuente: USDA, 1999.

Los suelos que presentan alta conductividad eléctrica debido a la abundancia de iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (o cloruro) producen alteraciones en las plantas, además puede incrementar la biodisponibilidad de Cd (Khoshgoftar et al., 2004; Ahmad, 2017, como se citó en Meter et al., 2019).

Las sales disminuyen el potencial osmótico de la solución del suelo, a la vez reducen la disponibilidad de agua para las plantas, aunque el suelo presente adecuadas condiciones de humedad (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura [INTAGRI], 2017). También, se producen alteraciones fisiológicas y bioquímicas en el metabolismo de las plantas, que determinan su subsistencia, al igual que su producción bajo estas condiciones (Lamz Piedra y Gonzáles Cepero, 2013).

## 2.8. Antecedentes del trabajo de investigación

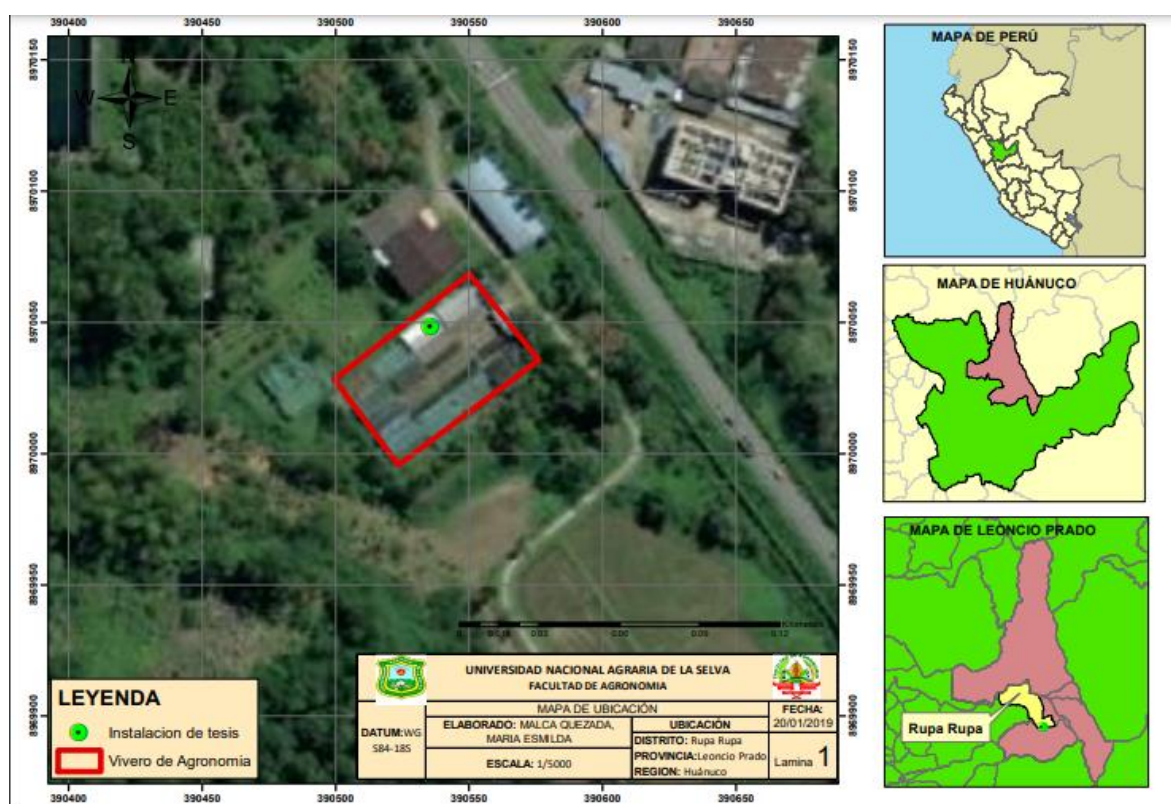
Gutiérrez Vilchez (2018), mediante un trabajo de investigación determinó que las aplicaciones foliares de Zn en el cultivo de papa incrementan las concentraciones de Zn en la hoja, cáscara y pulpa, a diferencia de los tratamientos que recibieron aplicaciones edáficas de Zn; por otro lado, estadísticamente no evidenció reducción en la concentración de Cd en las plantas por efecto de la fertilización de Zn. Asimismo, Ramírez Aparicio (2019), reportó que la aplicación de sulfato de zinc ( $\text{ZnSO}_4$ ) vía foliar en el cultivo de papa incrementa la concentración de Zn en las hojas.

Abanto Aguirre (2016), hizo un estudio sobre el efecto de diferentes fuentes fosfatadas en el contenido de Cd foliar en maíz, donde determinó que los tratamientos con los mayores niveles de fosfato diamónico (200 ppm) y roca fosfórica (200 ppm) incrementan la concentración de Cd foliar. Asimismo, Tolentino Lavado (2020), mediante un trabajo experimental determinó que las concentraciones de Cd disponible y total en el suelo incrementan con los niveles crecientes de roca fosfórica (fuente de Cd), similar comportamiento evidenció en el contenido de Cd total del tejido foliar de los plantones de *T. cacao* (etapa vivero), al aplicar 1,5, 3,5 y 4,5 ppm de Cd reportó 2,337, 2,908 y 3,669 ppm de Cd foliar.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

El trabajo experimental se ejecutó en las instalaciones del invernadero de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, cuyas coordenadas geográficas UTM son: 390535,19 metros E, 8770040,48 metros N y una altitud de 664 msnm. Según Holdrige (1987), el área en estudio se encuentra comprendida en la zona de vida Bosque muy húmedo, premontano tropical (Bmh-pmt). En la Figura 3, se observa el mapa de ubicación del trabajo experimental.



**Figura 3.** Ubicación del lugar de ejecución

Fuente: Google Earth Pro.

#### 3.2. Materiales y métodos

##### 3.2.1. Componentes en estudio

- **Factor A:** Niveles de Cd (ppm) a partir de la Roca Fosfórica.

a<sub>1</sub>: 0

a<sub>2</sub>: 0,5

a<sub>3</sub>: 1

- **Factor B:** Niveles de Zn (mg/L) a partir del Sulfato de Zinc ( $ZnSO_4$ ).

b<sub>1</sub>: 0

b<sub>2</sub>: 40

b<sub>3</sub>: 80

b<sub>4</sub>: 120

### 3.2.2. Tratamientos en estudio

Los tratamientos en estudio se describen en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Descripción de los tratamientos

Trat.	Clave	Descripción	g de RF/Kg de suelo + mg de $ZnSO_4/L$
T <sub>1</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0 ppm + Zn 0 mg	0 g de RF + 0 mg $ZnSO_4$
T <sub>2</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0 ppm + Zn 40 mg	0 g de RF + 190,48 mg $ZnSO_4$
T <sub>3</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0 ppm + Zn 80 mg	0 g de RF + 380,95 mg $ZnSO_4$
T <sub>4</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0 ppm + Zn 120 mg	0 g de RF + 571,43 mg $ZnSO_4$
T <sub>5</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg	57,27 g de RF + 0 mg $ZnSO_4$
T <sub>6</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg	57,27 g de RF + 190,48 mg $ZnSO_4$
T <sub>7</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg	57,27 g de RF + 380,95 mg $ZnSO_4$
T <sub>8</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg	57,27 g de RF + 571,43 mg $ZnSO_4$
T <sub>9</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	Cd 1 ppm + Zn 0 mg	114,55 g de RF + 0 mg $ZnSO_4$
T <sub>10</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	Cd 1 ppm + Zn 40 mg	114,55 g de RF + 190,48 mg $ZnSO_4$
T <sub>11</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	Cd 1 ppm + Zn 80 mg	114,55 g de RF + 380,95 mg $ZnSO_4$
T <sub>12</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	Cd 1 ppm + Zn 120 mg	114,55 g de RF + 571,43 mg $ZnSO_4$

### 3.2.3. Diseño experimental

Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial de 3A x 4B con tres repeticiones. Las características evaluadas fueron sometidas al análisis de variancia (ANVA) y para la diferenciación de medias se utilizó la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ).

El modelo aditivo lineal se planteó de la siguiente manera:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + E_{ijk}$$

Dónde:

$Y_{ijk}$  = Es la respuesta obtenida en la k-esima repetición a la cual se aplicó el i-esimo nivel de Cd y el j-esimo nivel de Zn.

$\mu$  = Efecto de la media general.

$A_i$  = Efecto del i-esimo nivel de Cd (ppm).

$B_j$  = Efecto del j-esimo nivel de Zn (mg) /L.

$(AB)_{ij}$  = Efecto de la interacción del i-esimo nivel de Cd con el j-esimo nivel de Zn (mg)/L.

$E_{ijk}$  = Efecto aleatorio del error experimental obtenido en la k-esima repetición a la cual se aplicó el i-esimo nivel de Cd y el j-esimo nivel de Zn.

Para:

$i = 1, 2, 3$  niveles de Cd

$j = 1, 2, 3, 4$  niveles de Zn

$k = 1, 2, 3$  repeticiones

En la Tabla 5, se presenta el esquema del Análisis de Varianza (ANVA)

que se utilizó.

**Tabla 5.** Esquema del análisis de varianza

Fuente de variación	Esquema	G. L
Repetición	$r - 1$	2
Tratamiento	$(t - 1)$	11
A (Niveles de Cd)	$(a - 1)$	2
B (Niveles de Zn)	$(b - 1)$	3
A x B (Niveles de Cd x Niveles de Zn)	$(a - 1)(b - 1)$	6
Error experimental	$(ab - 1)(r - 1)$	22
Total	$(abr - 1)$	35

#### 3.2.4. Análisis físico - químico del suelo agrícola

El suelo agrícola se extrajo de una parcela de cacao, del fundo “Los Cedros”, sector Santa Rosa de Alto Yanajanca, provincia de Marañón, departamento de Huánuco. Del suelo extraído se tomó 1 kg para ser analizado en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS.

Según la Tabla 6, el suelo presentó una textura franco-arenoso, pH fuertemente ácido, niveles bajos en MO, N, P y K, nivel muy bajo en el contenido de Ca, nivel medio en el contenido de Mg, nivel bajo en la CICE y nivel medio en Al intercambiable; respecto al contenido de Cd, el suelo registró 0,06 y 0,25 ppm de Cd disponible y total. De acuerdo con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo del Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, el límite máximo de Cd total en suelos agrícolas en el Perú es 1,4 ppm. Por lo tanto, se considera que el valor del Cd total registrado en el suelo agrícola es bajo.



**Tabla 6.** Análisis físico - químico del suelo

<b>Parámetros físicos</b>	<b>Valor</b>	<b>Método empleado</b>
Arena (%)	62	Método de Bouyoucos
Arcilla (%)	17	Método de Bouyoucos
Limo (%)	21	Método de Bouyoucos
Clase textural	Franco arenoso	Método de Bouyoucos
<b>Parámetros químicos</b>		
pH (1:1)	5,29	Potenciómetro, relación suelo agua 1:1
Materia orgánica (%)	1,61	Método de Walkley y Black
Nitrógeno (%)	0,07	% MO x 0,05
Fósforo disponible (ppm)	6,95	Método de Olsen modificado. Extracto de NaHCO <sub>3</sub> 0,5M, pH 8,5
Potasio disponible (ppm)	75,97	Desplazamiento con Acetato de Amonio 1N pH: 7,0
Cd total (ppm)	0,25	EPA-3050B
Cd disponible (ppm)	0,06	Método EDTA – EAA
Ca cambiable (Cmol (+)/Kg)	1,61	Método de Yuan: Extracción con KCl 1 N
Mg cambiable (Cmol (+)/Kg)	0,75	Método de Yuan: Extracción con KCl 1 N
K cambiable (Cmol (+)/Kg)	-	----
Na cambiable (Cmol (+)/Kg)	-	----
Al cambiable (Cmol (+)/Kg)	0,18	Método de Yuan: Extracción con KCl 1 N
H cambiable (Cmol (+)/Kg)	0,02	Método de Yuan: Extracción con KCl 1 N
CICe	3,85	Suma de cationes (Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> , H <sup>+</sup> )

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS – 2019.

### 3.2.5. Ejecución del experimento

#### 3.2.6.1. Instalación del experimento

##### a. Contaminación con cadmio al suelo mediante la roca fosfórica

El suelo agrícola fue mezclado con la roca fosfórica de acuerdo con los tratamientos planteados en la Tabla 4.

##### b. Llenado de bolsas

Una vez concluida la mezcla del suelo agrícola con la roca fosfórica, se procedió a llenar las bolsas (2 kg) con la mezcla, luego fueron humedecidas a capacidad de campo.

### **c. Incubación del suelo**

Los suelos fueron sometidos a incubación por un período de 45 días.

### **3.2.6.2. Recolección y germinación de cacao**

#### **a. Extracción de las semillas**

Se colectaron mazorcas de cacao de la variedad CCN-51, del fundo “El Cajamarquino”, situado en el distrito de Yanajanca, provincia de Marañón, departamento de Huánuco. Para obtener las semillas, el fruto se abrió con machete, sin dañar las semillas. Luego se eliminó el mucilago agregando aserrín y frotándolo suavemente.

#### **b. Pre-germinación**

Las semillas fueron colocadas en bandejas de plástico con arena, manteniéndolas húmedas y bajo sombra por 4 días.

#### **c. Siembra**

Con una estaca de madera pequeña se realizó agujeros en el medio de la bolsa con sustrato, luego se colocó la semilla con la radícula hacia abajo.

#### **d. Riego**

El riego se realizó cada 4 días, hasta que el suelo se encuentre a capacidad de campo.

### **3.2.6.3. Aplicación del sulfato de zinc en las plántulas de *Theobroma cacao***

La aplicación foliar de sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ) se realizó cuando las plántulas de *T. cacao* presentaron hojas verdaderas (aproximadamente a los 60 días después de la siembra), fraccionadas en 4 aplicaciones, mediante un asperjador manual cada 15 días.

### **3.2.6.4. Evaluación de las propiedades biométricas de los plantones de *Theobroma cacao***

La evaluación se realizó cada 30 días, durante 4 meses, después de haber realizado la siembra de las semillas de cacao en las bolsas.

#### **a. Altura de la planta**

Se midió a partir de la base del tallo hasta la yema terminal con ayuda de una regla.

#### **b. Número de hojas**

Se evaluó el número de hojas presentes en cada planta.

Las siguientes características biométricas fueron evaluadas al final del experimento.

### c. Longitud radicular

Se midió la longitud máxima alcanzada por las raíces con ayuda de una regla.

### d. Área foliar

Para determinar el área foliar se utilizó la metodología de la silueta. Inmediatamente después de extraer todas las hojas del plantón se dibujó las siluetas en una cartulina blanca, luego se realizó el corte de las siluetas para ser pesado en una balanza analítica; se determinó un área de 2 x 2 cm en la cartulina, luego se cortó y pesó. Y, por último, mediante la regla de tres simple se determinó el área foliar en cm<sup>2</sup>.

$$\text{Área foliar} = \frac{4 \text{ cm}^2 \times \text{peso (muestra de la hoja de la planta)}}{\text{peso (de 4 cm}^2\text{)}}$$

Fuente: (Llanos, 2015).

### 3.2.6.5. Obtención de muestras finales de suelos

Una vez extraída la plántula de cacao se procedió a recoger una muestra de suelo (1 kg) de cada bolsa por cada tratamiento y repetición, haciendo un total de 36 muestras. Las muestras de suelo fueron llevadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la UNAS para su respectivo análisis físico - químico.

### 3.2.6.6. Determinación de cadmio

#### a. Determinación del contenido de cadmio total en el suelo

Se utilizó el método EPA-3050B (Agencia de Protección Ambiental) de digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos (USEPA, 1996); la cuantificación del filtrado se efectuó en el espectrofotómetro de absorción atómica (SAA; modelo Varian "Spectra 55B" Hecho en Australia). La metodología consistió en:

- Pesar 2 g de suelo de TFSA (tierra fina seca al aire), molido y tamizado (tamiz de 2 mm), luego colocar dentro de un matraz de 125 ml de capacidad y resistente al calor.
- Adicionar a la muestra 25 ml de la solución nítrica-perclórica 4:1 (Vía Húmeda Digestión Acida - SNP)
- Dejar reposar por 24 horas para el proceso de mineralización.
- Colocar el matraz en la plancha de calentamiento hasta llegar a una temperatura de 175 °C.
- Dejar en digestión de 8 a 10 horas hasta que la solución se vuelva clara.

- Agitar el matraz y añadir 10 ml de agua destilada caliente para disolver la solución, filtrar la solución y enrasar a un volumen de 25 ml.
- Llevar el extracto al espectrofotómetro de absorción atómica VARÍAN - SPECTRA 55B y hacer la lectura correspondiente; pero si tiene alta concentración realizar diluciones 1 en 10.

#### **b. Determinación del contenido de cadmio disponible en el suelo**

Se determinó utilizando el EDTA 0,05 M según Gonzáles (1986), adaptado para el trabajo de investigación. La metodología consistió en:

- Pesar 5 g de suelo de TFSA (tierra fina seca al aire), molido y tamizado (tamiz de 2 mm).
- Añadir a la muestra 20 ml de solución extractante EDTA, con pH 7, luego agitar por 30 minutos y después filtrar.
- Llevar el extracto al espectrofotómetro de absorción atómica VARÍAN-SPECTRA 55B y realizar la lectura correspondiente.

#### **c. Determinación del cadmio total en el tejido vegetal de *Theobroma cacao***

Se utilizó como muestra el plantón completo de *T. cacao*, es decir, raíz, tallo y hoja. Mediante el método de Digestión Húmeda se determinó el contenido de Cd total en el tejido vegetal. La metodología consistió en:

- Pesar 2 g de tejido vegetal seco, molido y tamizado (tamiz de 2 mm), luego colocar dentro de un matraz de 125 ml de capacidad y resistente al calor.
- Adicionar a la muestra 25 ml de la solución nítrica-perclórica 4:1.
- Dejar reposar por 24 horas para el proceso de mineralización.
- Colocar el matraz en la plancha de calentamiento hasta llegar a una temperatura de 175 °C.
- Dejar en digestión de 4 a 6 horas hasta que la solución se vuelva clara transparente.

- Agitar el matraz y añadir 10 ml de agua destilada caliente para disolver la solución, filtrar la solución y enrazar en una fiola a un volumen de 25 ml.
- Llevar el extracto al espectrofotómetro de absorción atómica VARÍAN-SPECTRA 55B y realizar la lectura correspondiente.

#### **d. Determinación del contenido de cadmio total en la roca fosfórica**

Se determinó mediante el método de Digestión Húmeda con solución de Ácido nítrico perclórico proporción 5:1. La metodología consistió en:

- Pesar 4 g de roca fosfórica seco y tamizado (tamiz de 2 mm), luego colocar dentro de un matraz de 125 ml de capacidad y resistente al calor.
- Adicionar 15 ml de la solución nítrica-perclórica 5:1.
- Colocar el matraz en la plancha de calentamiento hasta llegar a una temperatura de 175 °C.
- Dejar en digestión de 3 a 4 horas hasta que la solución se vuelva pastosa. Repetir el proceso (añadir 15 ml de la solución nítrica-perclórica 5:1 y dejar en digestión de 3 a 4 horas hasta que la solución se vuelva pastosa), no secar.
- Agitar el matraz y añadir 10 ml de agua destilada caliente para disolver la solución, luego filtrar la solución y enrazar en una fiola a un volumen de 25 ml.
- Llevar el extracto al espectrofotómetro de absorción atómica VARÍAN-SPECTRA 55B y hacer la lectura correspondiente.

#### **3.2.6. Análisis de correlación**

Los resultados obtenidos fueron procesados mediante el programa estadístico SPSS21, a partir del cual se realizó el análisis de correlación de Pearson entre las variables estudiadas.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Propiedades químicas del suelo

De acuerdo con la prueba de F del Análisis de Varianza (Tabla 23 del Anexo) de las propiedades químicas del suelo de las fuentes de variación, se muestra en los tratamientos alta significancia estadística para el pH, conductividad eléctrica (CE), fósforo (P), zinc (Zn), capacidad de intercambio catiónico (CIC), calcio (Ca) y magnesio (Mg); similarmente se halló alta significancia para el efecto principal de los niveles de Cd (A) en todas las variables mencionadas; respecto al efecto principal de los niveles de Zn (B), las variables de P, Zn, CIC, Ca y Mg reportaron alta significancia estadística, mientras que en la CE solo se halló significancia estadística, mas el pH no fue significativa estadísticamente. En la interacción de los niveles de Cd y Zn (A x B), las variables de P, Zn y Ca registraron alta significancia estadística, a su vez el pH y la CIC solo significativas y la CE y el Mg no fueron significativas estadísticamente. Respecto al coeficiente de variabilidad, el pH, CE, CIC, Ca y Mg con 6,54; 9,52; 6,33; 0,49 y 1,44 %, son considerados de excelente homogeneidad; el P con 11,45 % es considerado con muy buena homogeneidad y, por último, el Zn con 21,36 % es considerado de regular homogeneidad en los resultados.

#### 4.1.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el pH y conductividad eléctrica del suelo

En la Tabla 7, se presenta la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el pH y CE del suelo por el efecto principal de los niveles de roca fosfórica como fuente de Cd (A), donde la aplicación de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd al suelo registró los mayores valores del pH y CE, diferenciándose numérica y estadísticamente de las demás aplicaciones, mientras que los menores valores de pH y la CE se registraron cuando no se aplicó roca fosfórica al suelo. Es decir, las aplicaciones de niveles crecientes de roca fosfórica incrementaron los valores del pH y la CE del suelo, esto se debe al efecto encalante de la roca fosfórica por el contenido de Ca y Mg. Respecto al efecto de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente en la CE del suelo, el nivel 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn reportó el mayor valor de la CE, pero sin diferenciarse estadísticamente del nivel 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn, mientras que el menor valor de la CE se registró cuando no se aplicó Zn ( $b_1$ ).

**Tabla 7.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el pH y conductividad eléctrica del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B)

Niveles Cd ppm (A)	Medias	n	Sig. (*)
a <sub>3</sub> : 1	6,00	12	a
a <sub>2</sub> : 0,5	5,64	12	b
a <sub>1</sub> : 0	4,91	12	c

CE (mS/cm)			
Niveles Cd ppm (A)	Medias	n	Sig. (*)
a <sub>3</sub> : 1	3,92	12	a
a <sub>2</sub> : 0,5	3,20	12	b
a <sub>1</sub> : 0	0,36	12	c

Niveles Zn mg/L (B)			
b <sub>3</sub> : 80	2,69	9	a
b <sub>4</sub> : 120	2,56	9	a b
b <sub>2</sub> : 40	2,36	9	b
b <sub>1</sub> : 0	2,34	9	b

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

El incremento del pH del suelo fue proporcional a los niveles aplicados de roca fosfórica como fuente de Cd; el pH que inicialmente fue de 5,29 incrementó hasta valores de 5,64 y 6,0, es decir de 0,35 y 0,71 unidades, por efecto de los niveles de 0,5 ppm (a<sub>2</sub>) y 1 ppm (a<sub>3</sub>) de Cd respectivamente; donde no se aplicó roca fosfórica (a<sub>1</sub>), el suelo evidenció una disminución del pH, de 5,29 a 4,91, es decir, en 0,38 unidades, esto se debe a la disminución de las bases intercambiables (Ca, Mg y K) por la absorción de las raíces.

Los materiales encalantes permiten incrementar el pH del suelo y disminuir la concentración de Al y Fe, cambios que mejoran la CIC y la disponibilidad de nutrientes (Ca, Mg, P y Zn) (Rosas-Patiño et al., 2017). Sin embargo, los cambios obtenidos en el trabajo de investigación por el efecto encalante de la roca de la fosfórica en el pH del suelo fueron bajos. Según Vivanco Villa (2016), la roca fosfórica, aun cuando presenta alta concentración de Ca no es considerada como un correctivo debido a su baja producción de iones OH<sup>-</sup>. Este mismo autor a través del trabajo de investigación “Fuentes y niveles de encalado en el crecimiento de plántones de *T. cacao* en dos profundidades de un suelo” recomienda evitar el uso de la roca fosfórica como material encalante, debido a los grandes volúmenes que se necesitarían por su bajo nivel de equivalente en carbonato de calcio (37,71 %); de los materiales

encalantes utilizados, la cal reportó el mayor incremento del pH, seguida de la dolomita y por último la roca fosfórica. Asimismo, León (1991); Zapata y Roy (2007), señalan que la roca fosfórica sólo incrementa el pH ligeramente, con un efecto más significativo en el Ca y Al intercambiable.

Con respecto a la conductividad eléctrica, cuando no se aplicó roca fosfórica ( $a_1$ ), el suelo registró 0,36 dS/m de CE, considerado como un suelo no salino, donde el efecto en las plantas es nulo, mientras que las aplicaciones de 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd al suelo registraron 3,20 y 3,92 dS/m de CE, considerados como suelos moderadamente salinos, en respuesta a estos valores, las plantas presentan cierta sensibilidad (plantas tolerantes). Generalmente el exceso de sales limita el crecimiento de las plantas al afectar el equilibrio suelo-agua (Jaramillo, 2002).

Siguiendo con el párrafo anterior, a roca fosfórica tiene una gran capacidad para liberar sales solubles (Asado Hurtado et al., 2007); dentro de su composición química destacan el  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$  (Tabla 2). Es decir, la composición química de la enmienda determina los valores de la CE (Chang et al., 1990; Clark et al., 1998, como se citó en Masola et al., 2019). Por otro lado, la presencia de sulfatos y carbonatos también incrementan los valores de la salinidad en el suelo (Andrades Rodríguez y Martínez Villar, 2022). La mayoría de los fertilizantes inorgánicos son sales y es por ello por lo que incrementa la CE del suelo. Por lo tanto, la CE es proporcional al incremento de los cationes en el suelo (USDA, 1999).

#### **4.1.2. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en el pH del suelo**

En la Tabla 24 del Anexo del Análisis de Varianza se presenta el efecto simple para el pH del suelo de la interacción de los niveles de Cd (A) y Zn (B). De acuerdo con la Tabla 8 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ), el efecto simple en el pH de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente, muestran que el nivel 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue superior numéricamente en combinación con los cuatro niveles de Zn. Por otro lado, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo, se muestra que, cuando no se contaminó el suelo con Cd ( $a_1$ ), el nivel 0 mg/L ( $b_1$ ) de Zn presentó una mejor respuesta en el pH con 5,29, sin embargo, estadísticamente fue similar al aplicar 40 mg/L ( $b_2$ ) de Zn; en el nivel 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd, la aplicación de 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn fue numéricamente superior con un pH de 5,80, pero sin diferenciarse estadísticamente de las demás aplicaciones y, en el nivel de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd,



la aplicación de 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn fue numérica y estadísticamente superior a los demás aplicaciones con un pH de 6,48.

Es así como la interacción de 1 ppm de Cd con 80 mg/L de Zn ( $a_3b_3$ ) registró el mayor pH del suelo con 6,48, mientras que las interacciones de 0 ppm de Cd con 80 mg/L de Zn ( $a_1b_3$ ) y 0 ppm de Cd con 120 mg/L de Zn ( $a_1b_4$ ) presentaron los valores más bajos, ambos con un pH de 4,58. Es decir, los niveles crecientes de roca fosfórica y Zn afectaron los valores del pH del suelo.

**Tabla 8.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en el pH del suelo

pH				
Efecto Simple	Clave	Medias	n	Sig. (*)
A en $b_1$	$a_3b_1$	5,86	3	a
	$a_2b_1$	5,53	3	a
	$a_1b_1$	5,29	3	a
A en $b_2$	$a_3b_2$	5,84	3	a
	$a_2b_2$	5,60	3	a
	$a_1b_2$	5,20	3	a
A en $b_3$	$a_3b_3$	6,48	3	a
	$a_2b_3$	5,80	3	b
	$a_1b_3$	4,58	3	c
A en $b_4$	$a_3b_4$	5,81	3	a
	$a_2b_4$	5,63	3	a
	$a_1b_4$	4,58	3	b
B en $a_1$	$a_1b_1$	5,29	3	a
	$a_1b_2$	5,20	3	a b
	$a_1b_3$	4,58	3	b
	$a_1b_4$	4,58	3	b
B en $a_2$	$a_2b_3$	5,80	3	a
	$a_2b_4$	5,63	3	a
	$a_2b_2$	5,60	3	a
	$a_2b_1$	5,53	3	a
B en $a_3$	$a_3b_3$	6,48	3	a
	$a_3b_1$	5,86	3	b
	$a_3b_2$	5,84	3	b
	$a_3b_4$	5,81	3	b

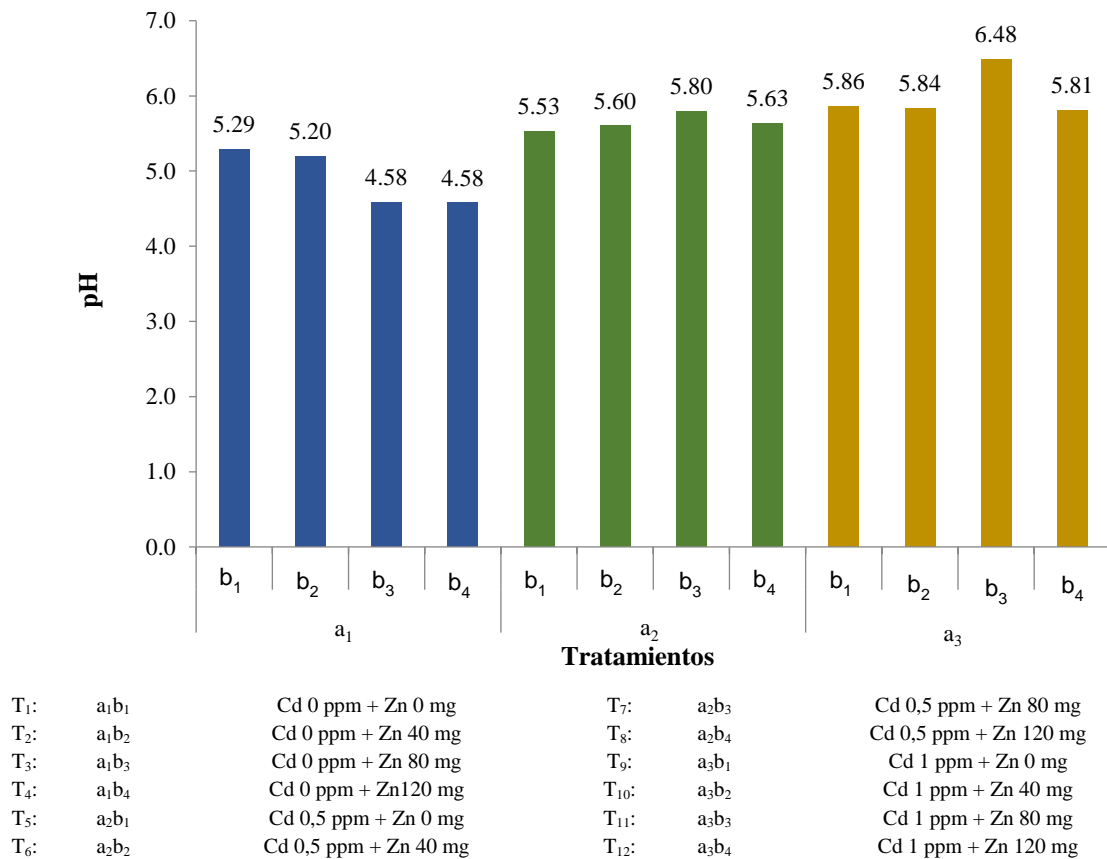
Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

$a_1b_1$ : Cd 0 ppm + Zn 0 mg  
 $a_1b_2$ : Cd 0 ppm + Zn 40 mg  
 $a_1b_3$ : Cd 0 ppm + Zn 80 mg  
 $a_1b_4$ : Cd 0 ppm + Zn 120 mg

$a_2b_1$ : Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg  
 $a_2b_2$ : Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg  
 $a_2b_3$ : Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg  
 $a_2b_4$ : Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg

$a_3b_1$ : Cd 1 ppm + Zn 0 mg  
 $a_3b_2$ : Cd 1 ppm + Zn 40 mg  
 $a_3b_3$ : Cd 1 ppm + Zn 80 mg  
 $a_3b_4$ : Cd 1 ppm + Zn 120 mg

En la Figura 4, se observa el pH del suelo por el efecto de los tratamientos, donde el mayor pH logrado fue mediante la aplicación del tratamiento T<sub>11</sub> (1 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) con 6,48, mientras que los menores valores del pH se registraron con las aplicaciones de los tratamientos T<sub>3</sub> (0 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) y T<sub>4</sub> (0 ppm de Cd + 120 mg/L de Zn), ambos con un pH de 4,58.



**Figura 4.** pH del suelo por el efecto de los tratamientos

#### 4.1.3. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el P y Zn disponibles del suelo

En la Tabla 9, se presenta la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el P y Zn disponibles del suelo por el efecto principal de los niveles de roca fosfórica como fuente de Cd (A), donde el nivel 1 ppm (a<sub>3</sub>) de Cd obtuvo los mayores valores de P y Zn disponibles con 87,14 y 13,74 ppm respectivamente, diferenciándose numérica y estadísticamente de las demás aplicaciones. Además, del efecto de las aplicaciones foliares de Zn (B) en el contenido de P disponible del suelo, los niveles 40 mg/L (b<sub>2</sub>), 80 mg/L (b<sub>3</sub>) y 120 mg/L (b<sub>4</sub>) de Zn no registraron diferencias estadísticas entre ellos, pero si del nivel 0 mg/L (b<sub>1</sub>) de Zn, quien obtuvo el menor valor de P disponible con 42,12 ppm; con respecto al Zn disponible, la aplicación de 120 mg/L (b<sub>4</sub>) de Zn reportó el valor más alto con 12,98 ppm, diferenciándose numérica y estadísticamente de los niveles 0 mg/L (b<sub>1</sub>), 40 mg/L (b<sub>2</sub>), 80 mg/L (b<sub>3</sub>) de Zn, quienes no se diferenciaron estadísticamente entre sí.

**Tabla 9.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el P y Zn disponibles del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B)

Componentes	P (ppm)			Zn (ppm)			
	Niveles Cd ppm (A)	Medias	n	Sig. (*)	Medias	n	Sig. (*)
a <sub>3</sub> : 1	87,14	12	a	13,74	12	a	
a <sub>2</sub> : 0,5	55,90	12	b	10,11	12	b	
a <sub>1</sub> : 0	5,11	12	c	7,06	12	c	
Niveles Zn mg/L (B)							
b <sub>4</sub> : 120	52,33	9	a	12,98	9	a	
b <sub>3</sub> : 80	51,68	9	a	9,70	9	b	
b <sub>2</sub> : 40	51,41	9	a	9,28	9	b	
b <sub>1</sub> : 0	42,12	9	b	9,24	9	b	

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

Es bastante evidente el incremento del P disponible en los suelos. Esto se debe a la liberación del P retenido en los coloides, además del P aportado mediante la roca fosfórica con 20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 18 del Anexo), provenientes de las “apatitas” (Cerón Rincón y Aristizábal Gutiérrez, 2012). Similar comportamiento fue evidenciado por Cabrera Condori (2015), al aplicar roca fosfórica al suelo, los niveles de P disponible incrementaron hasta 18,38 ppm. También Hualcas Cenizario (2020), reportó niveles altos de P disponible (valores mayores a 18,20 ppm), influenciados por la adición de roca fosfórica al suelo, a diferencia del testigo, quien registró un nivel bajo (3,58 ppm). Por otro lado, Lugo Soto et al. (2009), señalan que la eficiencia de la roca fosfórica como fuente de P para las plantas está relacionada con el tiempo de permanencia y degradación en el suelo. Además, Jaramillo (2002), señala que el P está fuertemente influenciado por el pH del suelo, donde la mayor disponibilidad se encuentra entre 5,5 - 6,5.

Los valores altos de Zn en los suelos obedecen al incremento de los niveles de roca fosfórica aplicados. Esto se justifica por el alto contenido de Zn en el fertilizante utilizado. Soca Núñez y Villareal Núñez (2015), reportaron 74 ppm de Zn en la roca fosfórica proveniente de “Trinidad de Guedes” (Cuba), mientras que Agrocenter (2020) reportó 87 ppm de Zn en la roca fosfórica procedente de Sechura-Perú, el más comercializado a nivel nacional. Asimismo, donde no se aplicó roca fosfórica se halló 7,06 ppm de Zn, este valor proviene del suelo agrícola utilizado. En general los valores de Zn hallados son considerados altos, están por

encima de 2,00 ppm. Es preciso mencionar, que el Zn se encuentra en suficientes cantidades en la mayoría de los suelos para satisfacer las necesidades de las plantas. La disponibilidad del Zn en el suelo se asocia a diversos factores: las arcillas, el pH (5 - 7) y el P. Según Selva (2011), se produce deficiencia de Zn por una elevada disponibilidad de P en el suelo.

Por otro lado, las aplicaciones foliares de Zn (B), tuvieron efecto en los contenidos de P y Zn disponibles del suelo, es decir, incrementaron conforme a los niveles de Zn aplicados.

#### **4.1.4. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en el P y Zn disponibles del suelo**

En la Tabla 24 del Anexo del Análisis de Varianza se presenta los efectos simples para el P y Zn disponibles del suelo de la interacción de los niveles Cd (A) y Zn (B). De acuerdo con la Tabla 10 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ), el efecto simple en el contenido de P disponible de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente, se muestra que el nivel 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue superior numérica y estadísticamente en combinación con los cuatro niveles de Zn. Asimismo, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo, se muestra que, cuando no se realizó la contaminación del suelo con Cd ( $a_1$ ), el nivel 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn obtuvo numéricamente una mejor respuesta, pero estadísticamente fue igual a los demás niveles de Zn; en el nivel de 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd, la aplicación de 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn registró el valor más alto, pero sin diferenciarse estadísticamente de las aplicaciones de 40 mg/L ( $b_2$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn y, en el nivel de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd, la aplicación de 40 mg/L ( $b_2$ ) de Zn alcanzó el valor más alto, pero sin diferenciarse estadísticamente de las demás aplicaciones de Zn. Es así como la interacción de 1 ppm de Cd con 40 mg/L de Zn ( $a_3b_2$ ) registró el valor más alto de P disponible con 90,51 ppm, mientras que la interacción de 0 ppm de Cd con 40 mg/L de Zn ( $a_1b_2$ ) obtuvo el valor más bajo de P disponible con 4,89 ppm.

Con respecto al contenido de Zn disponible (Tabla 10), el efecto simple de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente, muestran que el nivel 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue mejor en combinación con los cuatro niveles de Zn. A su vez, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo, se muestra que, cuando no se contaminó el suelo con Cd ( $a_1$ ), el nivel 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn alcanzó el mayor valor, pero sin diferenciarse estadísticamente de las demás aplicaciones de Zn; en el nivel de 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd, la

aplicación de 80 mg/L (b<sub>3</sub>) registró el valor más alto, pero sin diferenciarse estadísticamente de las demás aplicaciones de Zn, mientras que en el nivel de 1 ppm (a<sub>1</sub>) de Cd, la aplicación de 120 mg/L (b<sub>4</sub>) de Zn fue numérica y estadísticamente superior a las demás aplicaciones de Zn. Es así como la interacción de 1 ppm de Cd con 120 mg/L de Zn (a<sub>3</sub>b<sub>4</sub>) presentaron el mayor contenido de Zn disponible con 21,00 ppm, mientras que el valor más bajo se registró cuando no se realizó ninguna aplicación (a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>) con 6,64 ppm.

**Tabla 10.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en el P y Zn disponibles del suelo

Efecto Simple	P (ppm)				Zn (ppm)			
	Clave	Medias	n	Sig. (*)	Clave	Medias	n	Sig. (*)
A en b <sub>1</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	84,41	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	10,81	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	37,02	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	10,28	3	a b
	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	4,92	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	6,64	3	b
A en b <sub>2</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	90,51	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	11,84	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	58,83	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	9,19	3	a b
	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	4,89	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	6,83	3	b
A en b <sub>3</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	83,74	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	11,29	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	65,75	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	10,68	3	a b
	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	5,54	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	7,13	3	b
A en b <sub>4</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	89,91	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	21,00	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	61,98	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	10,29	3	b
	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	5,09	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	7,65	3	b
B en a <sub>1</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	5,54	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	7,65	3	a
	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	5,09	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	7,13	3	a
	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	4,92	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	6,83	3	a
	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	4,89	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	6,64	3	a
B en a <sub>2</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	65,75	3	a	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	10,68	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	61,98	3	a	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	10,29	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	58,83	3	a	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	10,28	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	37,02	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	9,19	3	a
B en a <sub>3</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	90,51	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	21,00	3	a
	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	89,91	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	11,84	3	b
	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	84,41	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	11,29	3	b
	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	83,74	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	10,81	3	b

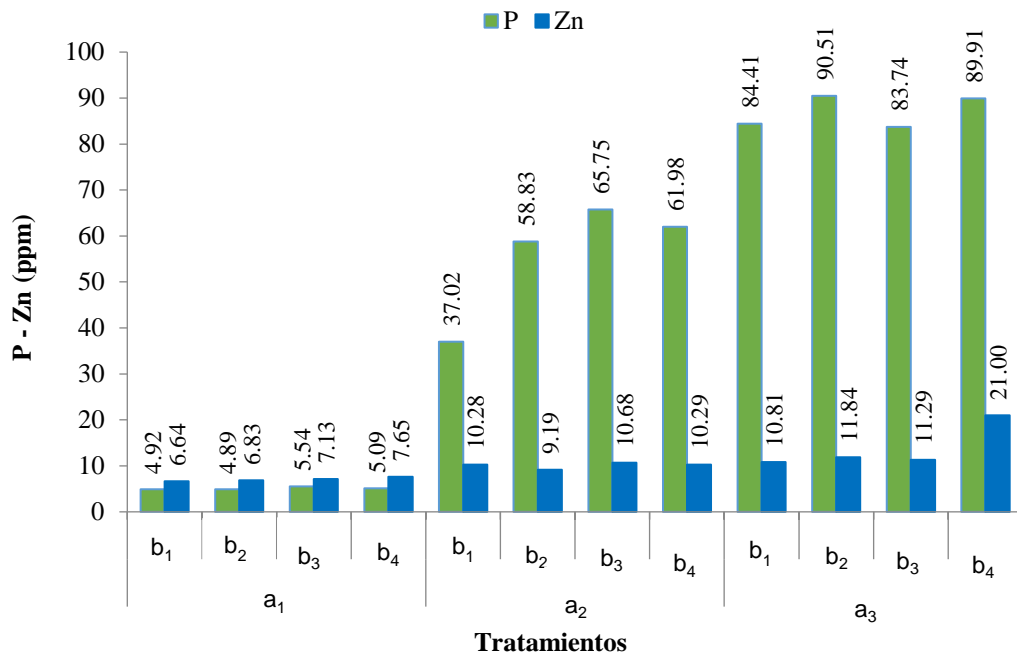
Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>: Cd 0 ppm + Zn 0 mg  
a<sub>1</sub>b<sub>2</sub>: Cd 0 ppm + Zn 40 mg  
a<sub>1</sub>b<sub>3</sub>: Cd 0 ppm + Zn 80 mg  
a<sub>1</sub>b<sub>4</sub>: Cd 0 ppm + Zn 120 mg

a<sub>2</sub>b<sub>1</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg  
a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg  
a<sub>2</sub>b<sub>3</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg  
a<sub>2</sub>b<sub>4</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg

a<sub>3</sub>b<sub>1</sub>: Cd 1 ppm + Zn 0 mg  
a<sub>3</sub>b<sub>2</sub>: Cd 1 ppm + Zn 40 mg  
a<sub>3</sub>b<sub>3</sub>: Cd 1 ppm + Zn 80 mg  
a<sub>3</sub>b<sub>4</sub>: Cd 1 ppm + Zn 120 mg

En la Figura 5, se observa los valores del P y Zn disponibles del suelo por el efecto de los tratamientos, donde el mayor valor de P disponible se registró mediante la aplicación del tratamiento T<sub>10</sub> (1 ppm de Cd + 40 mg/L de Zn) con 90,51 ppm y el menor valor se registró con el tratamiento T<sub>1</sub> (0 ppm de Cd + 0 mg/L de Zn) con 4,92 ppm; con respecto al Zn disponible, se reportó el mayor valor por el efecto de la aplicación del tratamiento T<sub>12</sub> (1 ppm de Cd + 120 mg/L de Zn) con 21,00 ppm y el menor valor se halló con el tratamiento T<sub>1</sub> (0 ppm de Cd + 0 mg/L de Zn) con 6,64 ppm.



T <sub>1</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0 ppm + Zn 0 mg	T <sub>7</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg
T <sub>2</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0 ppm + Zn 40 mg	T <sub>8</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg
T <sub>3</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0 ppm + Zn 80 mg	T <sub>9</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	Cd 1 ppm + Zn 0 mg
T <sub>4</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0 ppm + Zn 120 mg	T <sub>10</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	Cd 1 ppm + Zn 40 mg
T <sub>5</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg	T <sub>11</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	Cd 1 ppm + Zn 80 mg
T <sub>6</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg	T <sub>12</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	Cd 1 ppm + Zn 120 mg

**Figura 5.** Contenidos de P y Zn disponibles del suelo por el efecto de los tratamientos

#### 4.1.5. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en la CIC y en los contenidos de Ca y Mg del suelo

En la Tabla 11, se presenta la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para la CIC y contenidos de Ca y Mg del suelo por el efecto principal de los niveles de roca fosfórica como fuente de Cd (A), donde el mayor nivel de roca fosfórica (a<sub>3</sub>) incrementó la CIC y los contenidos de Ca y Mg del suelo, diferenciándose numérica y estadísticamente de las demás aplicaciones, caso contrario, cuando no se realizó la aplicación de roca fosfórica (a<sub>1</sub>), los valores de las variables mencionadas fueron inferiores. Asimismo, en respuesta a los niveles de Zn (B) en la CIC del suelo, los niveles 40 mg/L (b<sub>2</sub>), 80 mg/L (b<sub>3</sub>) y 120 mg/L (b<sub>4</sub>) de Zn no registraron

diferencias estadísticas entre ellos, pero si del nivel de 0 mg/L ( $b_1$ ) de Zn, quien registró el valor más bajo; por otro lado, el efecto en los contenidos de Ca y Mg del suelo, se muestra que el nivel 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn fue superior estadísticamente a los demás niveles, siendo el nivel 0 mg/L ( $b_1$ ) de Zn, quien expresó las menores concentraciones de Ca y Mg en el suelo.

Inicialmente el suelo registró una CIC de 3,85 Cmol(+)/kg, al aplicar niveles crecientes de roca fosfórica se logró incrementar hasta 7,69 Cmol(+)/kg, sin embargo, estos valores son considerados bajos para esta propiedad del suelo. Esto se debe al deficiente contenido de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  de la roca fosfórica. Donde no se realizó la aplicación de roca fosfórica, el suelo evidenció una disminución en la CIC, hasta 2,79 Cmol(+)/kg. Según Meter et al. (2019), cuando la CIC empieza a disminuir, existe mayor competencia entre los cationes y el  $Cd^{2+}$  para los sitios de ligación que tienen como consecuencia la desorción de Cd de las partículas del suelo a la solución del suelo.

López Baéz et al. (2016), señalan que el 32 % del comportamiento de la CIC es explicado por el nivel de acidez del suelo, cuando el pH del suelo está por debajo de 5,5 los suelos presentan baja CIC. La dependencia de la CIC con la acidez del suelo se debe a que conforme incrementa el pH del suelo se producen nuevas cargas negativas en el complejo de cambio, sin embargo, en el trabajo de investigación, el incremento del pH por efecto de la aplicación de roca fosfórica fue bajo (Tabla 7).

Bajo el efecto de la aplicación de la roca fosfórica, los suelos evidenciaron un incremento en los contenidos de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , a diferencia del suelo que no recibió roca fosfórica. Sin embargo, Vivanco Villa (2016), reportó que la roca fosfórica tiene un deficiente aporte de Ca y Mg, a diferencia de otros encalantes, como la cal hidratada, que se caracteriza por su alto contenido de Ca y la dolomita por el contenido de Mg. Además, Hualcas Cenizario (2020), reportó por el efecto de la adición de roca fosfórica al suelo 3,93 Cmol (+)/kg de Mg (superior a este estudio), incrementando las cargas negativas del suelo y modificando la CIC. En respuesta a la fertilización foliar de Zn, los valores de la CIC,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  del suelo incrementaron proporcionalmente a los niveles de Zn utilizados.

**Tabla 11.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para la CIC y contenidos de Ca y Mg del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B)

Componentes	CIC			Ca			Mg		
	(Cmol(+)/kg)								
Niveles Cd ppm (A)	Medias	n	Sig. (*)	Medias	n	Sig. (*)	Medias	n	Sig. (*)
a <sub>3</sub> : 1	7,69	12	a	3,72	12	a	1,22	12	a
a <sub>2</sub> : 0,5	5,68	12	b	2,49	12	b	1,08	12	b
a <sub>1</sub> : 0	2,79	12	c	1,67	12	c	0,66	12	c
Niveles Zn mg/L (B)									
b <sub>4</sub> : 120	5,66	9	a	2,72	9	a	1,03	9	a
b <sub>3</sub> : 80	5,61	9	a	2,62	9	b	1,01	9	b
b <sub>2</sub> : 40	5,33	9	a	2,59	9	c	0,97	9	c
b <sub>1</sub> : 0	4,95	9	b	2,56	9	d	0,94	9	d

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )



#### 4.1.6. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en la CIC y en el contenido de Ca del suelo

En la Tabla 24 del Anexo del Análisis de Varianza se presenta los efectos simples para la CIC y el contenido de Ca en el suelo de la interacción de los niveles de Cd (A) y Zn (B). De acuerdo con la Tabla 12 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ), el efecto simple en la CIC de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente, se muestra que el nivel 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue superior estadísticamente en combinación con los cuatro niveles de Zn. Asimismo, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo, se muestra que, en los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ) y 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd, el nivel de 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn logró los valores más altos y, en el nivel de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd, la aplicación de 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn alcanzó el valor más alto, pero estadísticamente fue similar a las aplicaciones de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn. Es así como la interacción de 1 ppm de Cd con 80 mg/L de Zn ( $a_3b_3$ ) obtuvo la CIC más alta, sin embargo, la interacción de 0 ppm de Cd con 0 mg/L de Zn ( $a_1b_1$ ) presentó el valor más bajo.

Para el contenido de Ca (Tabla 10), de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente, muestran que el nivel 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue superior estadísticamente en combinación con los cuatro niveles de Zn. A su vez, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo, se muestra que, en las aplicaciones de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd, el nivel 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn alcanzó los valores más altos en el contenido de Ca, diferenciándose estadísticamente de las demás aplicaciones de Zn. Finalmente, la interacción de 1 ppm de Cd con 120 mg/L de Zn ( $a_3b_4$ ) logró el valor más alto en el contenido de Ca en el suelo con 3,87 Cmol (+)/kg, sin embargo, el menor valor se halló con la interacción de 0 ppm de Cd con 0 mg/L de Zn ( $a_1b_1$ ) con 1,59 Cmol (+)/kg.

Se logró evidenciar que la interacción de los niveles crecientes de roca fosfórica y Zn influenciaron en los valores de la CIC y el contenido de Ca en el suelo.

**Tabla 12.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en la CIC y en el contenido de Ca del suelo

Efecto Simple	CIC (Cmol(+)/kg)				Ca (Cmol(+)/kg)			
	Clave	Medias	n	Sig. (*)	Clave	Medias	n	Sig. (*)
A en b <sub>1</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	7,63	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	3,65	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	4,70	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	2,45	3	b
	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	2,52	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	1,59	3	c
A en b <sub>2</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	7,62	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	3,66	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	5,72	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	2,48	3	b
	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	2,63	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	1,63	3	c
A en b <sub>3</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	7,85	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	3,68	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	6,01	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	2,49	3	b
	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	2,98	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	1,68	3	c
A en b <sub>4</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	7,67	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	3,87	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	6,27	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	2,53	3	b
	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	3,03	3	c	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	1,76	3	c
B en a <sub>1</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	3,03	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	1,76	3	a
	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	2,98	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	1,68	3	b
	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	2,63	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	1,63	3	c
	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	2,52	3	a	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	1,59	3	d
B en a <sub>2</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	6,27	3	a	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	2,53	3	a
	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	6,01	3	a	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	2,49	3	b
	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	5,72	3	a	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	2,48	3	b
	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	4,70	3	b	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	2,45	3	c
B en a <sub>3</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	7,85	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	3,87	3	a
	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	7,67	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	3,68	3	b
	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	7,63	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	3,66	3	b c
	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	7,62	3	a	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	3,65	3	c

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

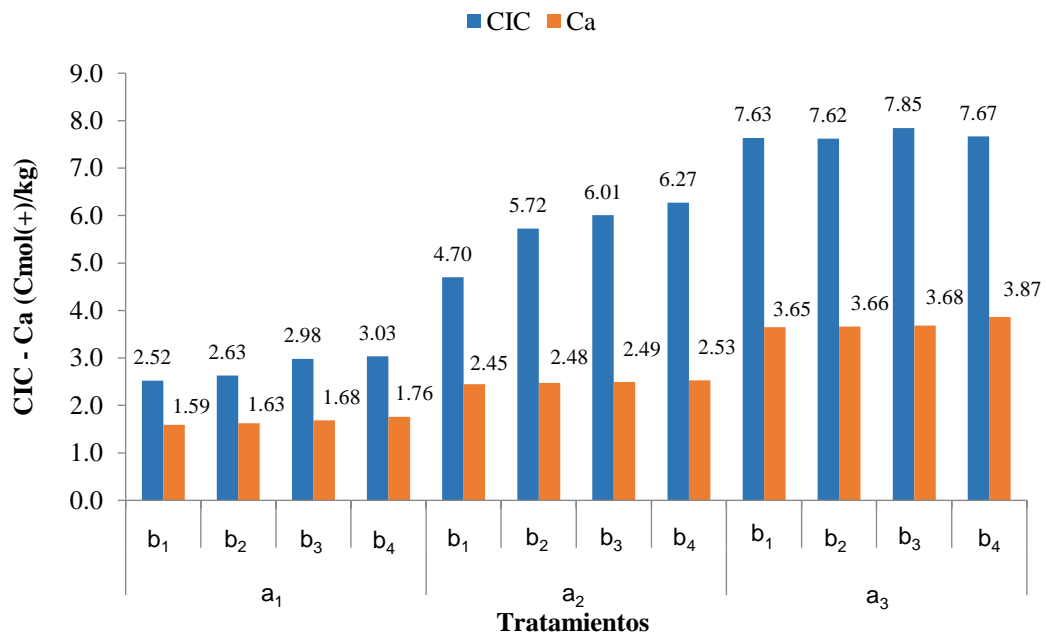
a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>: Cd 0 ppm + Zn 0 mg  
a<sub>1</sub>b<sub>2</sub>: Cd 0 ppm + Zn 40 mg  
a<sub>1</sub>b<sub>3</sub>: Cd 0 ppm + Zn 80 mg  
a<sub>1</sub>b<sub>4</sub>: Cd 0 ppm + Zn 120 mg

a<sub>2</sub>b<sub>1</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg  
a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg  
a<sub>2</sub>b<sub>3</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg  
a<sub>2</sub>b<sub>4</sub>: Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg

a<sub>3</sub>b<sub>1</sub>: Cd 1 ppm + Zn 0 mg  
a<sub>3</sub>b<sub>2</sub>: Cd 1 ppm + Zn 40 mg  
a<sub>3</sub>b<sub>3</sub>: Cd 1 ppm + Zn 80 mg  
a<sub>3</sub>b<sub>4</sub>: Cd 1 ppm + Zn 120 mg

En la Figura 6, se observa la CIC del suelo por el efecto de los tratamientos, donde el menor valor se obtuvo con el tratamiento T<sub>1</sub> (0 ppm de Cd + 0 mg/L de Zn) con 2,52 Cmol(+)/kg y el mayor valor se registró por efecto de la aplicación del tratamiento T<sub>11</sub> (1 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) con 7,85 Cmol(+)/kg. El incremento de la CIC obedece principalmente a los niveles crecientes de la roca fosfórica, sin embargo, estos valores están por debajo de los 15 Cmol(+)/kg, considerados como niveles bajos para la CIC (López Baéz et al., 2016). Para el contenido de Ca, el menor valor se reportó con el tratamiento T<sub>1</sub> (0 ppm de Cd + 0 mg/L de Zn)

con 1,59 Cmol(+)/kg, mientras que el mayor valor se registró por efecto de la aplicación del tratamiento T<sub>12</sub> (1 ppm de Cd + 120 mg/L de Zn) con 3,87 Cmol(+)/kg, no obstante, estos resultados son considerados como niveles bajos para este elemento, a pesar del bajo efecto, el aporte de la roca fosfórica fue significativo, de hecho, el valor inicial del Ca fue 1,61 Cmol(+)/kg (Figura 17 del Anexo). La roca fosfórica posee 32 % de CaO (Figura 18 del Anexo), el cual contribuye al incremento de Ca en el suelo. Según el International Plant Nutrition Institute (IPNI, 2014), el valor crítico para el Ca es 0,5 meq/100 g, el cual nos indicaría que los suelos no presentaron deficiencia de este elemento.



T <sub>1</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0 ppm + Zn 0 mg	T <sub>7</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg
T <sub>2</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0 ppm + Zn 40 mg	T <sub>8</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg
T <sub>3</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0 ppm + Zn 80 mg	T <sub>9</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	Cd 1 ppm + Zn 0 mg
T <sub>4</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0 ppm + Zn 120 mg	T <sub>10</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	Cd 1 ppm + Zn 40 mg
T <sub>5</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg	T <sub>11</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	Cd 1 ppm + Zn 80 mg
T <sub>6</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg	T <sub>12</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	Cd 1 ppm + Zn 120 mg

**Figura 6.** Capacidad de intercambio catiónico y contenido de Ca del suelo por el efecto de los tratamientos

#### 4.2. Cadmio en el suelo

De acuerdo con la prueba de F del análisis de variancia (Tabla 25 del Anexo) para los contenidos de Cd disponible y total del suelo de las fuentes de variación, se muestra en los tratamientos y efectos principales de los niveles de Cd (A) y Zn (B) alta significancia estadística para Cd disponible y total. Respecto a la interacción de los niveles de Cd y Zn (A x B), se encontró alta significancia estadística para Cd disponible, más Cd total solo fue significativo. Respecto al coeficiente de variabilidad, el Cd disponible registró 6,77 %, considerado de

excelente homogeneidad, mientras que el Cd total con 10,46 % es considerado de muy buena homogeneidad en los resultados.

#### 4.2.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el Cd disponible y total del suelo

En la Tabla 13 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ), se presenta los contenidos de Cd disponible y total del suelo por el efecto principal de los niveles de roca fosfórica como fuente de Cd (A), donde la aplicación de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd reportó los mayores valores de Cd disponible y total en el suelo con 0,76 y 1,22 ppm respectivamente, diferenciándose numérica y estadísticamente a las demás aplicaciones, mientras que los menores valores de Cd en el suelo se registraron sin la aplicación de roca fosfórica ( $a_1$ ) con 0,03 y 0,09 ppm de Cd disponible y total; es decir, la aplicación de roca fosfórica tuvo un efecto contaminante de Cd en el suelo. Respecto al efecto de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente en los contenidos de Cd disponible y total del suelo, donde no se aplicó Zn ( $b_1$ ), se reportó estadísticamente la mayor presencia de Cd disponible y total con 0,45 y 0,77 ppm, mientras que los menores valores de Cd disponible y total en el suelo se registraron cuando se aplicó 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn con 0,34 y 0,64 ppm respectivamente. Es decir, las aplicaciones de niveles crecientes de Zn foliar tienen efecto en la reducción del contenido de Cd en el suelo.

**Tabla 13.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el Cd disponible y total del suelo por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B)

Componentes	Cd disponible (ppm)			Cd total (ppm)			
	Niveles Cd ppm (A)	Medias	n	Sig. (*)	Medias	N	Sig. (*)
	$a_3$ : 1	0,76	12	a	1,22	12	a
	$a_2$ : 0,5	0,40	12	b	0,75	12	b
	$a_1$ : 0	0,03	12	c	0,09	12	c
Niveles Zn mg/L (B)							
	$b_1$ : 0	0,45	9	a	0,77	9	a
	$b_2$ : 40	0,40	9	b	0,70	9	b
	$b_3$ : 80	0,39	9	b	0,66	9	b c
	$b_4$ : 120	0,34	9	c	0,62	9	c

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

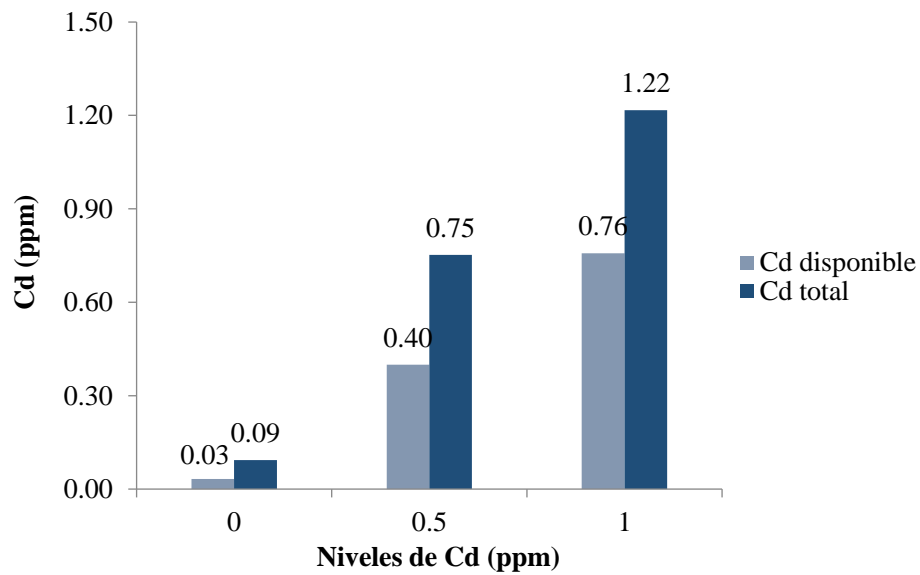
La aplicación de fertilizantes fosforados son una de las principales fuentes para incrementar la concentración de Cd en los suelos agrícolas (Meter et al., 2019). Los fertilizantes fosfatados derivados a partir de la roca fosfórica constituyen más del 50 % de la entrada total de Cd a los suelos agrícolas (De Meeûs et al., 2002).

La roca fosfórica contiene entre 8 y 500 mg kg<sup>-1</sup> de Cd (Laegrei et al., 1999, como se citó en Bonomelli et al., 2003). Mediante un trabajo de investigación, Tolentino Lavado (2020), evidenció el incremento del Cd en el suelo por efecto de la roca fosfórica; al realizar aplicaciones de 1,5; 3,0 y 4,5 ppm de Cd al suelo mediante la roca fosfórica, en un período de 4 meses, reportó 0,292; 0,417 y 0,478 ppm de Cd disponible y 0,696; 1,896 y 2,520 ppm de Cd total. Asimismo, Guzmán Ñahuirima (2019), reportó que las aplicaciones de 1,5; 3,0 y 4,5 de Cd mediante el sulfato de cadmio, el suelo acumuló 0,99; 1,09 y 1,27 ppm de Cd disponible y 1,54; 1,78 y 2,00 ppm de Cd total respectivamente. Es decir, las aplicaciones de niveles crecientes de Cd al suelo mediante la roca fosfórica, sulfato de cadmio, u otras fuentes de Cd, el suelo incrementara la concentración de dicho metal.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos propuso como nivel crítico 0,43 ppm de Cd total en los suelos agrícolas (USEPA, 1996). Por lo tanto, las aplicaciones de 0,5 ppm (a<sub>2</sub>) y 1 ppm (a<sub>3</sub>) de Cd al suelo mediante la roca fosfórica con 0,75 y 1,22 ppm de Cd total están por encima del nivel crítico, sin embargo, cuando no se realizó la contaminación con Cd (a<sub>1</sub>), el suelo presentó 0,09 ppm de Cd total, pudiéndose considerar como un suelo no contaminado. Según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo del Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, el límite máximo de Cd total en suelos agrícolas en el Perú es 1,4 ppm; entonces podemos considerar que las aplicaciones de roca fosfórica no alcanzaron el límite máximo de Cd total en el suelo, pero si los niveles de roca fosfórica incrementarían, el suelo también acumularía mayor Cd.

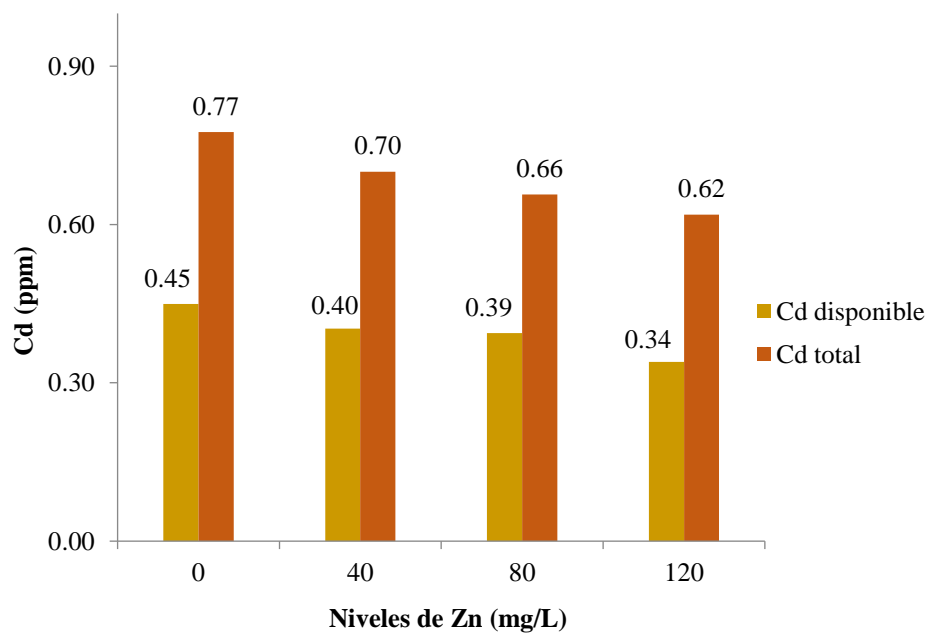
Como resultado de las aplicaciones foliares de Zn, se tiene que los valores de Cd total en el suelo están por encima del nivel crítico (0,43 ppm) según lo establecido por la USEPA (1996); pero al mismo tiempo, se ha evidenciado un efecto significativo en la reducción del Cd disponible y total en el suelo. Es decir, a medida que aumentaron los niveles de Zn, los valores del Cd en el suelo disminuyeron. Gómez Arias (2020), evidenció por efecto de la aplicación del sulfato de Zn al suelo menor presencia de Cd con 30,35 %, a diferencia del testigo con 44,54 %.

En la Figura 7, se observa los valores de Cd disponible y total en el suelo por efecto de las aplicaciones de la roca fosfórica como fuente de Cd; cuando no se contaminó el suelo con Cd (a<sub>1</sub>), se registraron los menores valores de Cd disponible y total con 0,03 y 0,09 ppm, mientras que los mayores valores se registraron cuando se aplicó 1 ppm (a<sub>3</sub>) de Cd al suelo con 0,76 ppm y 1,22 ppm de Cd disponible y total. Es decir, a medida que incrementaron los niveles de roca fosfórica, mayor fue la acumulación de Cd disponible y total en el suelo.



**Figura 7.** Contenidos de Cd disponible y total del suelo por efecto de los niveles de roca fosfórica

En la Figura 8, se observa los valores de Cd disponible y total del suelo por el efecto de las aplicaciones foliares de Zn; cuando no se aplicó Zn ( $b_1$ ), se registró los mayores valores de Cd disponible y total en el suelo con 0,45 y 0,77 ppm, sin embargo, cuando se aplicó 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn se obtuvo los menores valores de Cd disponible y total con 0,34 y 0,62 ppm. Por lo tanto, los resultados muestran que las aplicaciones foliares de Zn reducen los valores de Cd disponible y total en el suelo.



**Figura 8.** Contenidos de Cd disponible y total del suelo por efecto de los niveles de zinc

#### 4.2.2. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en el Cd disponible y total del suelo

En la Tabla 26 del Anexo del Análisis de Varianza se presenta los efectos simples de los contenidos de Cd disponible y total del suelo de la interacción de los niveles de Cd (A) y Zn (B). De acuerdo con la Tabla 14 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ), el efecto simple en el contenido de Cd disponible de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente, se muestra que el nivel 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue superior estadísticamente en combinación con los cuatro niveles de Zn.

**Tabla 14.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en el Cd disponible y total del suelo

Efecto Simple	Cd disponible (ppm)				Cd total (ppm)			
	Clave	Medias	n	Sig. (*)	Clave	Medias	n	Sig. (*)
A en $b_1$	$a_3b_1$	0,89	3	a	$a_3b_1$	1,43	3	a
	$a_2b_1$	0,42	3	b	$a_2b_1$	0,78	3	b
	$a_1b_1$	0,04	3	c	$a_1b_1$	0,12	3	c
A en $b_2$	$a_3b_2$	0,75	3	a	$a_3b_2$	1,22	3	a
	$a_2b_2$	0,42	3	b	$a_2b_2$	0,78	3	b
	$a_1b_2$	0,04	3	c	$a_1b_2$	0,11	3	c
A en $b_3$	$a_3b_3$	0,76	3	a	$a_3b_3$	1,16	3	a
	$a_2b_3$	0,39	3	b	$a_2b_3$	0,72	3	b
	$a_1b_3$	0,03	3	c	$a_1b_3$	0,09	3	c
A en $b_4$	$a_3b_4$	0,63	3	a	$a_3b_4$	1,06	3	a
	$a_2b_4$	0,36	3	b	$a_2b_4$	0,74	3	b
	$a_1b_4$	0,02	3	c	$a_1b_4$	0,06	3	c
B en $a_1$	$a_1b_2$	0,04	3	a	$a_1b_1$	0,12	3	a
	$a_1b_1$	0,04	3	a	$a_1b_2$	0,11	3	a
	$a_1b_3$	0,03	3	a	$a_1b_3$	0,09	3	a
	$a_1b_4$	0,02	3	a	$a_1b_4$	0,06	3	a
B en $a_2$	$a_2b_1$	0,42	3	a	$a_2b_1$	0,78	3	a
	$a_2b_2$	0,42	3	a	$a_2b_2$	0,78	3	a
	$a_2b_3$	0,39	3	a b	$a_2b_4$	0,74	3	a
	$a_2b_4$	0,36	3	b	$a_2b_3$	0,72	3	a
B en $a_3$	$a_3b_1$	0,89	3	a	$a_3b_1$	1,43	3	a
	$a_3b_3$	0,76	3	b	$a_3b_2$	1,22	3	b
	$a_3b_2$	0,75	3	b	$a_3b_3$	1,16	3	b c
	$a_3b_4$	0,63	3	c	$a_3b_4$	1,06	3	c

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

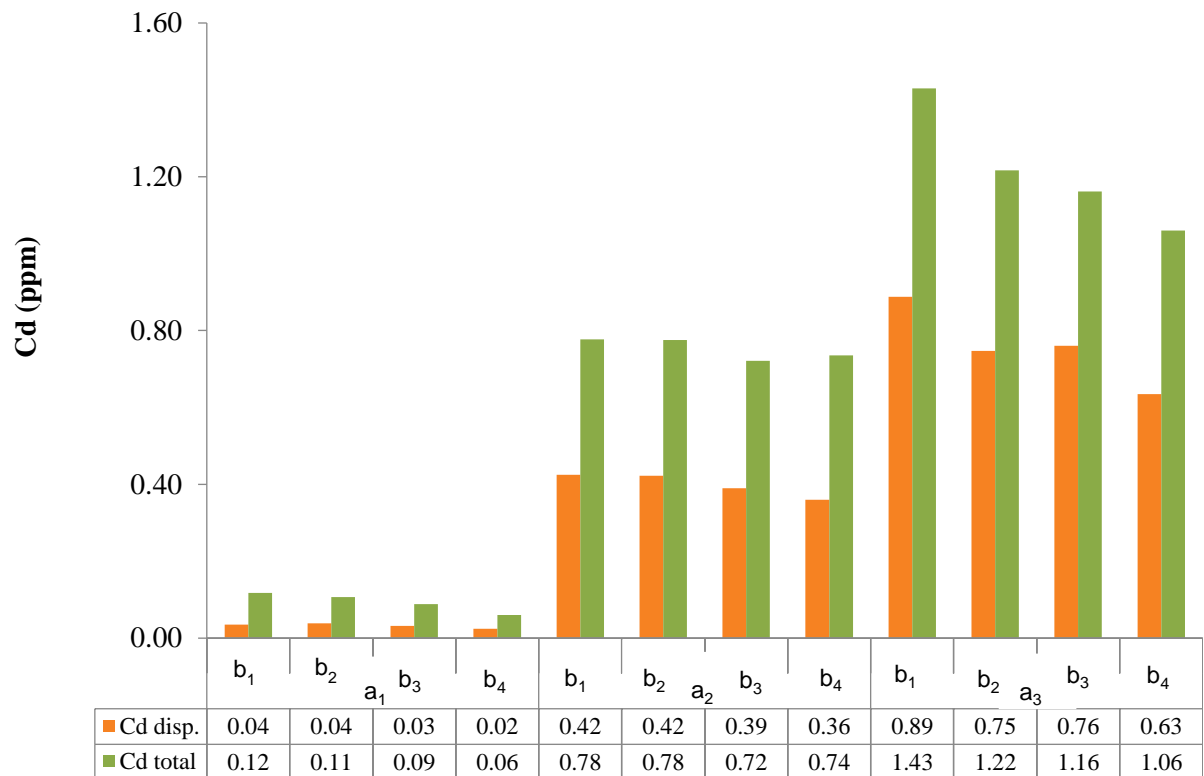
T <sub>1</sub> :	$a_1b_1$	Cd 0 ppm + Zn 0 mg	T <sub>7</sub> :	$a_2b_3$	Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg
T <sub>2</sub> :	$a_1b_2$	Cd 0 ppm + Zn 40 mg	T <sub>8</sub> :	$a_2b_4$	Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg
T <sub>3</sub> :	$a_1b_3$	Cd 0 ppm + Zn 80 mg	T <sub>9</sub> :	$a_3b_1$	Cd 1 ppm + Zn 0 mg
T <sub>4</sub> :	$a_1b_4$	Cd 0 ppm + Zn 120 mg	T <sub>10</sub> :	$a_3b_2$	Cd 1 ppm + Zn 40 mg
T <sub>5</sub> :	$a_2b_1$	Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg	T <sub>11</sub> :	$a_3b_3$	Cd 1 ppm + Zn 80 mg
T <sub>6</sub> :	$a_2b_2$	Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg	T <sub>12</sub> :	$a_3b_4$	Cd 1 ppm + Zn 120 mg

Siguiendo el anterior párrafo, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo, se muestra que, cuando no se realizó la contaminación del suelo con Cd ( $a_1$ ), los niveles 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn fueron estadísticamente iguales; en los niveles de 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd, cuando no se aplicó Zn ( $b_1$ ), se registraron los valores más altos de Cd disponible. Por lo tanto, la interacción de 1 ppm de Cd con 0 mg/L ( $b_1$ ) de Zn ( $a_3b_1$ ) presentó el mayor contenido de Cd disponible con 0,89 ppm, sin embargo, la interacción de 0 ppm de Cd con 120 mg/L de Zn ( $a_1b_4$ ) obtuvo el menor valor de Cd disponible con 0,02 ppm.

Para el efecto simple en el contenido de Cd total de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente (Tabla 14), se muestra que el nivel de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue superior en combinación con los cuatro niveles de Zn. Asimismo, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo, se muestra que, en los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd, cuando no se aplicó Zn ( $b_1$ ), se obtuvieron los valores más altos en el contenido de Cd total en el suelo. Es decir, la interacción de 1 ppm de Cd con 0 mg/L de Zn ( $a_3b_1$ ) obtuvo el valor más alto de Cd total con 1,43 ppm, sin embargo, la interacción de 0 ppm de Cd con 120 mg/L de Zn ( $a_1b_4$ ) logró el valor más bajo de Cd total con 0,06 ppm.

En la Figura 9, se observa los valores de Cd disponible y total del suelo por el efecto de los tratamientos, donde los tratamientos  $T_1$  (0 ppm de Cd + 0 mg/L de Zn),  $T_2$  (0 ppm de Cd + 40 mg/L de Zn),  $T_3$  (0 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) y  $T_4$  (0 ppm de Cd + 120 mg/L de Zn) alcanzaron los menores valores de Cd disponible y total en el suelo, mientras que los mayores valores se registraron por efecto de los tratamientos  $T_9$  (1 ppm de Cd + 0 mg/L de Zn),  $T_{10}$  (1 ppm de Cd + 40 mg/L de Zn),  $T_{11}$  (1 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) y  $T_{12}$  (1 ppm de Cd + 120 mg/L de Zn).





#### Tratamientos

T <sub>1</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0 ppm + Zn 0 mg	T <sub>7</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg
T <sub>2</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0 ppm + Zn 40 mg	T <sub>8</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg
T <sub>3</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0 ppm + Zn 80 mg	T <sub>9</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	Cd 1 ppm + Zn 0 mg
T <sub>4</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0 ppm + Zn 120 mg	T <sub>10</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	Cd 1 ppm + Zn 40 mg
T <sub>5</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg	T <sub>11</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	Cd 1 ppm + Zn 80 mg
T <sub>6</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg	T <sub>12</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	Cd 1 ppm + Zn 120 mg

**Figura 9.** Contenidos de Cd disponible y total del suelo por el efecto de los tratamientos

#### 4.3. Características biométricas de los plántones de *Theobroma cacao*

De acuerdo con la prueba de F del análisis de variancia (Tabla 27 del Anexo) de las características biométricas de los plántones de *T. cacao* de las fuentes de variación, se muestra en los tratamientos alta significancia estadística para altura de planta, área foliar y longitud radicular, mientras que el número de hojas solo fue significativo. Para el efecto principal de los niveles de Cd (A), se encontró alta significancia estadística en todas las variables estudiadas; en los niveles de Zn (B) solo presentó alta significancia estadística la longitud radicular y significancia estadística la altura de planta, más el número de hojas y el área foliar no fueron significativos. Con respecto a la interacción de los niveles de Cd y Zn (A x B), solo la longitud radicular fue significativa, sin embargo, las otras variables no presentaron significancia estadística. Los coeficientes de variabilidad presentados por las variables de altura de planta y número de hojas con 7,73 y 9,35 % son considerados de excelente homogeneidad; área foliar y longitud radicular con 14,48 y 13,59 % son considerados de muy buena homogeneidad en los resultados.

#### 4.3.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en las características biométricas de los plántones de *Theobroma cacao*

De acuerdo con la Tabla 15 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para la altura de planta y longitud radicular por el efecto principal de los niveles de Cd aplicados al suelo mediante la roca fosfórica, se muestra diferencias estadísticas significativas entre los niveles de Cd, donde los mayores valores en la altura de planta y longitud radicular se registraron cuando no se aplicó Cd ( $a_1$ ) al suelo, seguido del nivel 0,5 ppm ( $a_2$ ) y los menores valores se registraron cuando se aplicó 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd al suelo. Respecto al número de hojas, cuando se aplicó 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd al suelo, las plantas lograron estadísticamente el mayor número de hojas, seguido del nivel 0 ppm ( $a_1$ ) de Cd y el menor número de hojas se registró con el nivel 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd. Para el área foliar, cuando no se aplicó Cd ( $a_1$ ) al suelo, se registró mayor área foliar, pero no se diferenció estadísticamente del nivel 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd, mientras que la aplicación de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd reportó estadísticamente la menor área foliar. Por otro lado, la aplicación foliar de 40 mg/L ( $b_2$ ) de Zn fue numérica y estadísticamente superior en las variables de altura de planta y longitud radicular respecto a las demás aplicaciones, quienes no se diferenciaron estadísticamente entre ellos.

El efecto negativo del Cd se ha evidenciado comúnmente, Raven Willwater (2018), reportó que las altas concentraciones de Cd tienen un efecto depresivo sobre el crecimiento de las plantas de alfalfa. Asimismo, Hernández-Baranda et al. (2019), concluyeron que los suelos contaminados con Cd reducen el crecimiento, la actividad fotosintética y el contenido de clorofila en las plantas. Este comportamiento también fue evidenciado por Correa Villacorta (2018), en plántones de *T. cacao* CCN-51, donde los tratamientos sin Cd presentaron mayor altura con 29,15 y 29,96 cm, diferenciándose estadísticamente de los tratamientos que fueron contaminados mediante el Cd con 24,04 y 26,11 cm. Por otro lado, se ha comprobado que los fertilizantes fosforados como la roca fosfórica contienen Cd en su composición química; el uso continuo de estos fertilizantes produce daños significativos en las características biométricas de las plantas, como ya se mencionó anteriormente. Sin embargo, las aplicaciones de roca fosfórica en la etapa de vivero a dosis moderadas evidencian un comportamiento positivo, por ejemplo, Vivanco Villa (2016) reportó una altura promedio de 27,27 cm en plántones de *T. cacao*, superando al testigo con 22,70 cm; esto se debe a que la roca fosfórica posee nutrientes esenciales para las plantas, favoreciendo su crecimiento y desarrollo (Tabla 2).

El crecimiento y desarrollo radicular es afectado por la presencia de Cd en el suelo, ya que la raíz está en contacto directo con este elemento (Correa Villacorta, 2018). La concentración de Cd en las estructuras de la planta de *T. cacao* sigue una secuencia descendente: raíz, tallo, hoja y fruto (Ferguson, 1990; Jinadasa et al., 1997; Nigam et al., 2001, como se citó en Herrera Marcano, 2011). Por otro lado, Sánchez Zepeda et al. (2021), evaluaron el efecto del Cd en las plantas de *Vicia fava* (haba), donde reportaron la mayor acumulación de Cd en las raíces y un efecto significativo en la reducción de la longitud radicular. Según Pernía et al. (2021), la longitud de la radícula es un parámetro que podría emplearse como bioindicador de la toxicidad del Cd<sup>2+</sup>. A su vez, Peláez P et al. (2014), mencionan que el estrés metalífero inhibe la división celular y el crecimiento de los principales tejidos de la planta.

Con respecto al número de hojas, los niveles de roca fosfórica evidenciaron diferencias estadísticas significativas, donde el nivel de 0,5 ppm (a<sub>2</sub>) de Cd alcanzó el mayor número de hojas. Al utilizar la roca fosfórica a una dosis moderada resulta adecuado para la producción de hojas, ya que cuando se aplicó 1 ppm (a<sub>3</sub>) de Cd las plantas emitieron la menor cantidad de hojas. Sin embargo, Bello Medina (2020), al aplicar dosis crecientes de sulfato de Cd al suelo, los plantones de *T. cacao* CCN-51 no evidenciaron diferencias estadísticas significativas en el número de hojas. Por otro lado, Rehman et al. (2011), reportaron en el cultivo de tomate por el efecto del Cd reducción del número de hojas y área foliar, como se evidenció en el trabajo experimental.

En el caso del Zn, las altas concentraciones evidencian efectos de toxicidad, que implican alteraciones fisiológicas con influencias negativas en el crecimiento y desarrollo, inclusive la muerte, de modo que, todas las plantas responden a incrementos en la concentración de metales, sean estos minerales esenciales o no (Casierra-Posada y Poveda, 2005). Específicamente, las altas concentraciones de Zn limitan el crecimiento de las raíces y de los brotes (Yadav, 2010). Además, produce amarillamiento en las hojas, debido al fenómeno de clorosis (Amezcuca y Lara, 2017). Los niveles adecuados de Zn tienen un efecto positivo en las plantas, esto se puede evidenciar en la Tabla 15, donde la aplicación foliar de 40 mg/L (b<sub>2</sub>) de Zn superó estadísticamente a los demás niveles con una mejor respuesta en la altura de planta y longitud radicular con 29,78 y 28,78 cm respectivamente. Estudios realizados por Samreen et al. (2013, como se citó en Reyes Alemán et al., 2017), manifiestan que las aplicaciones de Zn incrementan la altura de la planta de frijol, explicándose que la translocación de Zn dentro de la planta permite mayor crecimiento vegetal. Asimismo, Fuentealba Sandoval (2012), reportó que la aplicación foliar de Zn en el cultivo de maíz, en un suelo deficiente de este nutriente, incrementa la producción de materia seca.

**Tabla 15.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para las características biométricas de los plantones de *Theobroma cacao* por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B)

Altura de planta (cm)				Número de hojas <sup>1</sup>				Longitud de raíz (cm)				
Niveles Cd ppm (A)	Medias	n	Sig. (*)	Niveles Cd ppm (A)	Medias		n	Sig. (*)	Niveles Cd ppm (A)	Medias	n	Sig. (*)
					VR	VT						
a <sub>1</sub> : 0	32,52	12	a	a <sub>2</sub> : 0,5	13	3,58	12	a	a <sub>1</sub> : 0	32,93	12	a
a <sub>2</sub> : 0,5	28,18	12	b	a <sub>1</sub> : 0	11	3,27	12	b	a <sub>2</sub> : 0,5	19,80	12	b
a <sub>3</sub> : 1	22,80	12	c	a <sub>3</sub> : 1	9	3,00	12	c	a <sub>3</sub> : 1	11,33	12	c
Niveles Zn mg/L (B)				Área foliar (cm <sup>2</sup> )				Niveles Zn mg/L (B)				
b <sub>2</sub> : 40	29,78	9	a	Niveles Cd ppm (A)				b <sub>2</sub> : 40	24,78	9	a	
b <sub>3</sub> : 80	27,60	9	b	a <sub>1</sub> : 0	665,36	12	a	b <sub>3</sub> : 80	20,73	9	b	
b <sub>4</sub> : 120	27,14	9	b	a <sub>2</sub> : 0,5	623,42	12	a	b <sub>1</sub> : 0	20,67	9	b	
b <sub>1</sub> : 0	26,81	9	b	a <sub>3</sub> : 1	287,61	12	b	b <sub>4</sub> : 120	19,23	9	b	

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

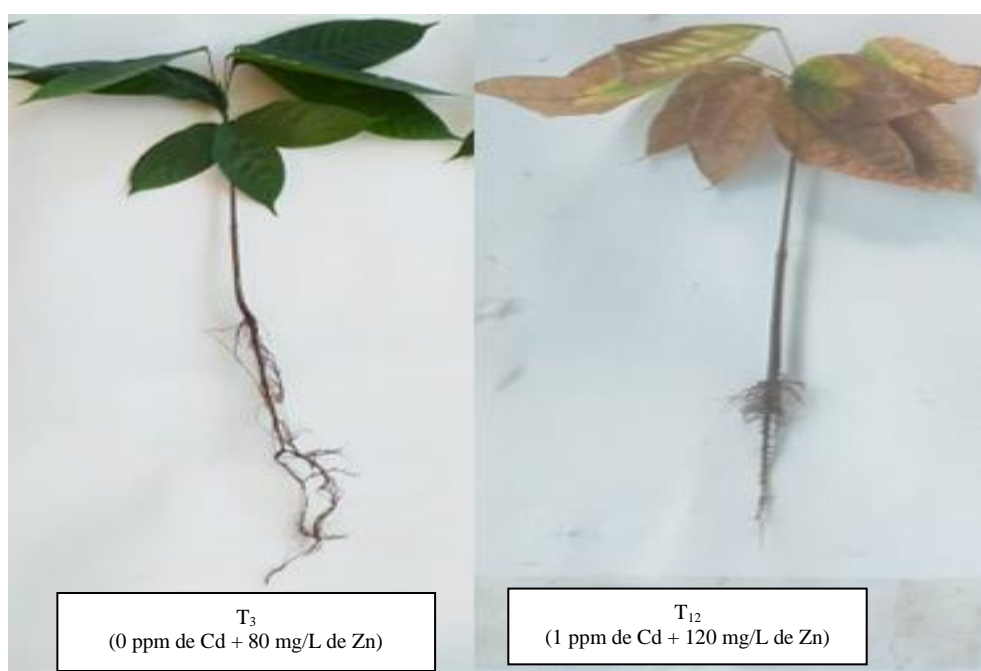
<sup>1</sup>: Datos transformados  $\sqrt{x}$

VR: Valores reales

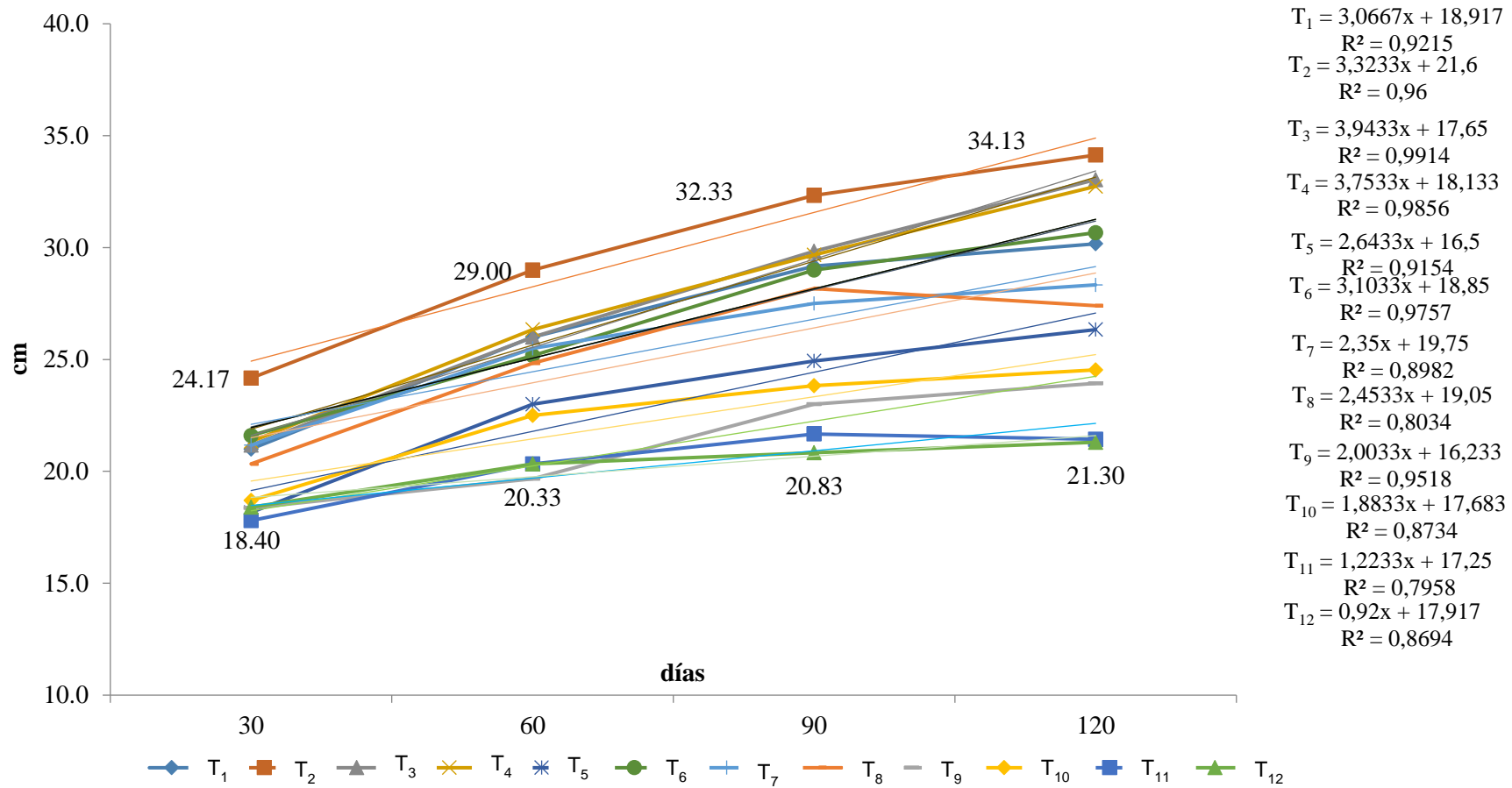
VT: Valores transformados

#### 4.3.2. Ritmo de crecimiento de los plántones de *Theobroma cacao*

En la Figura 11, se observa el ritmo de crecimiento de los plántones de *T. cacao*, con los datos evaluados cada 30 días, durante un período de cuatro meses; es decir, en la figura se observa los tratamientos, y cada tratamiento está conformado por la aplicación de niveles de Cd (A) y Zn (B). Las mayores tasas de crecimiento se reportaron con los tratamientos T<sub>3</sub> (0 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) con 3,94 cm, T<sub>4</sub> (0 ppm de Cd + 120 mg/L de Zn) con 3,75 cm y el T<sub>2</sub> (0 ppm Cd + 40 mg/L) con 3,32 cm, mientras que las menores tasas de crecimiento se registraron con los tratamientos T<sub>10</sub> (1 ppm + 40 mg/L) con 1,88 cm, T<sub>11</sub> (1 ppm + 80 mg/L) con 1,22 cm y T<sub>12</sub> (1 ppm + 120 mg/L) con 0,92 cm. Estos resultados demuestran que los suelos contaminados con Cd tienen un efecto negativo en el crecimiento de los plántones de *T. cacao*. Raven Willwater (2018), manifiesta que a medida que incrementan los niveles de Cd en los suelos, las plantas empiezan a reducir su crecimiento. El Cd<sup>2+</sup> afecta la capacidad de absorción de elementos esenciales en las plantas, lo cual se manifiesta en el bajo desarrollo de las plantas y una disminución de la biomasa total (Sánchez Zepeda et al., 2021). Sin embargo, cuando los suelos no están contaminados con Cd, al aplicar foliarmente 80 mg/L de Zn a los plántones, estos registraron la mayor la altura y longitud radicular (Tabla 16). Según Ramírez Aparicio (2019), el Zn está involucrado en la biosíntesis del ácido indolacético fundamental en el desarrollo foliar y crecimiento de las zonas meristemáticas. En la Figura 10, se observa las diferencias entre los tratamientos T<sub>3</sub> (0 ppm + 80 mg/L) y T<sub>12</sub> (1 ppm + 120 mg/L) en el crecimiento de los plántones de *T. cacao*.



**Figura 10.** Efecto de los tratamientos T<sub>3</sub> y T<sub>12</sub> en el crecimiento de los plántones de *Theobroma cacao*



T <sub>1</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0 ppm + Zn 0 mg	T <sub>5</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg	T <sub>9</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	Cd 1 ppm + Zn 0 mg
T <sub>2</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0 ppm + Zn 40 mg	T <sub>6</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg	T <sub>10</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	Cd 1 ppm + Zn 40 mg
T <sub>3</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0 ppm + Zn 80 mg	T <sub>7</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg	T <sub>11</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	Cd 1 ppm + Zn 80 mg
T <sub>4</sub> :	a <sub>1</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0 ppm + Zn 120 mg	T <sub>8</sub> :	a <sub>2</sub> b <sub>4</sub>	Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg	T <sub>12</sub> :	a <sub>3</sub> b <sub>4</sub>	Cd 1 ppm + Zn 120 mg

**Figura 11.** Ritmo de crecimiento de los plántones de *Theobroma cacao*

### 4.3.3. Efectos simples de las interacciones de la roca fosfórica y el zinc en la longitud radicular de los plántones de *Theobroma cacao*

En la Tabla 28 del Anexo del Análisis de Varianza se presenta los efectos simples para la longitud radicular de la interacción de los niveles de Cd (A) y Zn (B). De acuerdo con la Tabla 16 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ), el efecto simple en la longitud radicular de las interacciones de los niveles de Cd (A) aplicados al suelo sobre los niveles de 0 mg/L ( $b_1$ ), 40 mg/L ( $b_2$ ), 80 mg/L ( $b_3$ ) y 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn aplicados foliarmente, muestran que el nivel 0 ppm ( $a_1$ ) de Cd fue superior estadísticamente en combinación con los cuatro niveles de Zn.

**Tabla 16.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para los efectos simples de las interacciones de los niveles de Cd (A) y Zn (B) en la longitud radicular de los plántones de *Theobroma cacao*

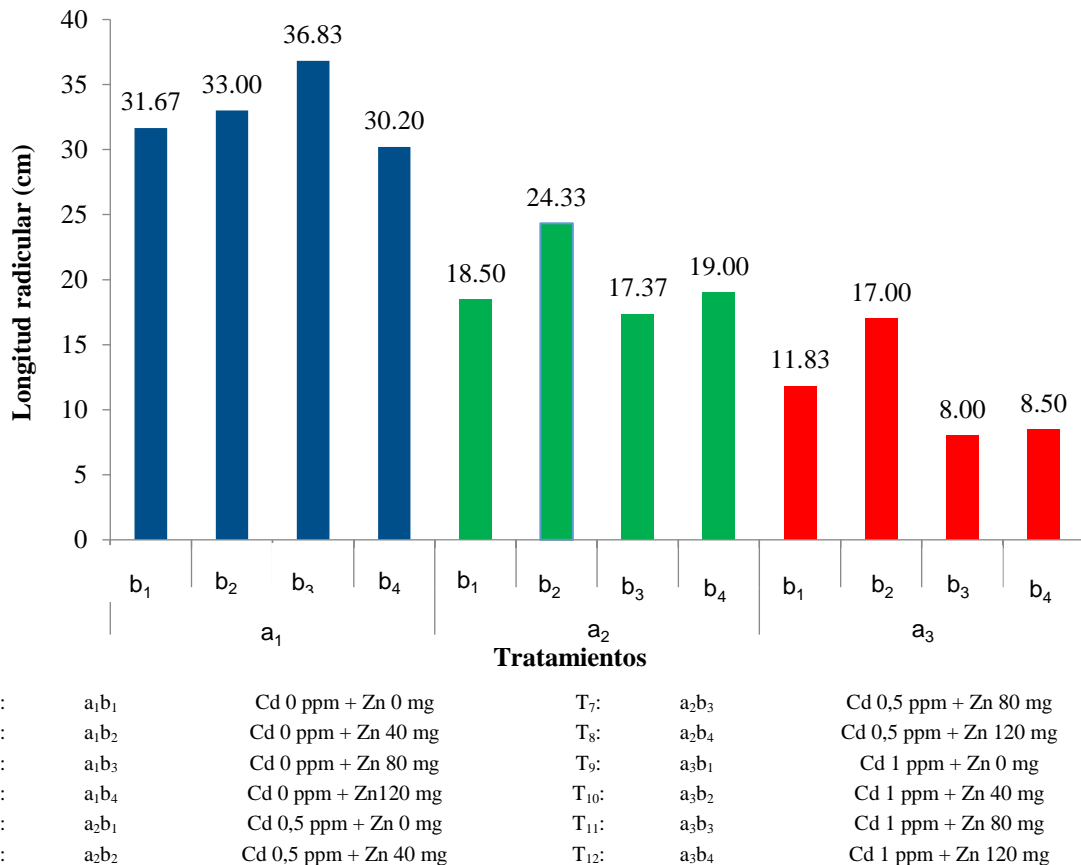
Longitud radicular (cm)				
Efecto Simple	Clave	Medias	n	Sig. (*)
A en $b_1$	$a_1b_1$	31,67	3	a
	$a_2b_1$	18,50	3	b
	$a_3b_1$	11,83	3	c
A en $b_2$	$a_1b_2$	33,00	3	a
	$a_2b_2$	24,33	3	b
	$a_3b_2$	17,00	3	c
A en $b_3$	$a_1b_3$	36,83	3	a
	$a_2b_3$	17,37	3	b
	$a_3b_3$	8,00	3	c
A en $b_4$	$a_1b_4$	30,20	3	a
	$a_2b_4$	19,00	3	b
	$a_3b_4$	8,50	3	c
B en $a_1$	$a_1b_3$	36,83	3	a
	$a_1b_2$	33,00	3	a b
	$a_1b_1$	31,67	3	b
	$a_1b_4$	30,20	3	b
B en $a_2$	$a_2b_2$	24,33	3	a
	$a_2b_4$	19,00	3	b
	$a_2b_1$	18,50	3	b
	$a_2b_3$	17,37	3	b
B en $a_3$	$a_3b_2$	17,00	3	a
	$a_3b_1$	11,83	3	b
	$a_3b_4$	8,50	3	b
	$a_3b_3$	8,00	3	b

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

T <sub>1</sub> :	$a_1b_1$	Cd 0 ppm + Zn 0 mg	T <sub>7</sub> :	$a_2b_3$	Cd 0,5 ppm + Zn 80 mg
T <sub>2</sub> :	$a_1b_2$	Cd 0 ppm + Zn 40 mg	T <sub>8</sub> :	$a_2b_4$	Cd 0,5 ppm + Zn 120 mg
T <sub>3</sub> :	$a_1b_3$	Cd 0 ppm + Zn 80 mg	T <sub>9</sub> :	$a_3b_1$	Cd 1 ppm + Zn 0 mg
T <sub>4</sub> :	$a_1b_4$	Cd 0 ppm + Zn 120 mg	T <sub>10</sub> :	$a_3b_2$	Cd 1 ppm + Zn 40 mg
T <sub>5</sub> :	$a_2b_1$	Cd 0,5 ppm + Zn 0 mg	T <sub>11</sub> :	$a_3b_3$	Cd 1 ppm + Zn 80 mg
T <sub>6</sub> :	$a_2b_2$	Cd 0,5 ppm + Zn 40 mg	T <sub>12</sub> :	$a_3b_4$	Cd 1 ppm + Zn 120 mg

Por otra parte, de las interacciones de los niveles de Zn (B) aplicados foliarmente sobre los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ), 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd en el suelo (Tabla 16), se muestra que, cuando no se realizó la contaminación del suelo con Cd ( $a_1$ ), el nivel 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn registró la mayor longitud radicular, pero estadísticamente fue igual al aplicar 40 mg/L ( $b_2$ ) de Zn; en los niveles de 0,5 ppm ( $a_2$ ) y 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd, la aplicación de 40 mg/L ( $b_2$ ) de Zn fue estadísticamente superior respecto a las demás niveles de Zn. Es así como la interacción de 0 ppm Cd con 80 mg/L de Zn ( $a_1b_3$ ) logró la mayor longitud radicular con 36,83 cm, sin embargo, la interacción de 1 ppm Cd con 80 mg/L Zn ( $a_3b_3$ ) obtuvo la menor longitud radicular con 8 cm.

En la Figura 11, se observa la longitud radicular por el efecto de los tratamientos, donde las mayores valores se lograron con los tratamientos que no recibieron roca fosfórica, pero si fertilización foliar, predominando el tratamiento  $T_3$  (0 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) con 36,83 cm, es decir, la aplicación foliar de 80 mg/L de Zn promovió el mayor desarrollo radicular, mientras que los menores valores se registraron con los tratamientos que recibieron los mayores niveles de Cd, destacando el tratamiento  $T_{11}$  (1 ppm de Cd + 80 mg/L de Zn) con 8,0 cm. Amirjani (2012), manifiesta que las raíces de las plantas son sensibles al contacto directo con el Cd. Asimismo, Bouziani et al. (2019), reportaron que los suelos con altos niveles de Cd disminuyen el crecimiento radicular.



**Figura 12.** Longitud radicular por el efecto de los tratamientos



#### 4.4. Contenidos de cadmio, zinc y fósforo en el tejido vegetal de *Theobroma cacao*

De acuerdo con la prueba de F del análisis de variancia (Tabla 29 del Anexo) de los contenidos de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de *T. cacao* de las fuentes de variación, se muestra en los tratamientos y efecto principal niveles de Cd (A) alta significancia estadística para las variables de Cd, Zn y P del tejido vegetal de *T. cacao*, sin embargo, en el efecto principal de los niveles de Zn (B) solo presentó alta significancia estadística el contenido de Zn, más Cd y P no fueron significativos. En la interacción de los niveles de Cd y Zn (A x B) no se encontró significancia estadística en ninguna de las variables estudiadas. Respecto al coeficiente de variabilidad, el Zn registró 14,33 %, considerado de muy buena homogeneidad, mientras que el Cd y el P con 22,44 y 22,93 % son considerados de regular homogeneidad en los resultados.

##### 4.4.1. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el contenido de Cd del tejido vegetal de *Theobroma cacao*

En la Tabla 17, se muestra la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de Cd en el tejido vegetal de *T. cacao* por el efecto de los niveles de roca fosfórica como fuente de Cd (A), donde la aplicación de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd al suelo registró el mayor contenido de Cd en el tejido vegetal con 19,06 ppm, diferenciándose numérica y estadísticamente de los demás niveles, seguido del nivel 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd con 12,71 ppm y cuando no se aplicó roca fosfórica ( $a_1$ ), se registró 1,07 ppm. Sin embargo, para el efecto del Zn (B) no se reportaron diferencias estadísticas entre los cuatro niveles, es decir, tuvieron un efecto similar en la acumulación de Cd en el tejido vegetal, pero numéricamente el nivel 40 mg/L ( $b_2$ ) de Zn alcanzó el mayor contenido de Cd con 12,35 ppm y el menor contenido de Cd se registró por efecto de la aplicación del nivel 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn con 9,96 ppm.

**Tabla 17.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de Cd en el tejido vegetal de *Theobroma cacao* por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B)

Niveles Cd ppm (A)	Medias Cd (ppm)	n	Significancia (*)
$a_3$ : 1	19,06	12	a
$a_2$ : 0,5	12,71	12	b
$a_1$ : 0	1,07	12	c
Niveles Zn mg/L (B)			
$b_2$ : 40	12,35	9	a
$b_3$ : 80	11,36	9	a
$b_1$ : 0	10,12	9	a
$b_4$ : 120	9,96	9	a

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

A medida que incrementaron los niveles de Cd en el suelo, debido a la fertilización con roca fosfórica, aumentó el contenido de Cd en el tejido vegetal de *T. cacao*. Similar comportamiento fue evidenciado por Tolentino Lavado (2020), al aplicar 0; 1,5; 3,5 y 4,5 ppm de Cd mediante la roca fosfórica al suelo, en un período de 120 días, reportó concentraciones de 0,180; 2,337; 2,908 y 3,669 ppm de Cd en el tejido foliar de los plantones de *T. cacao* CCN-51, diferenciándose numérica y estadísticamente entre ellos; la roca fosfórica se solubiliza y posteriormente se bioacumula en la planta. Asimismo, Guzmán Ñahuirima (2019), evaluó la concentración de Cd en el tejido foliar en plantones de *T. cacao* por efecto de la aplicación de tres niveles de Cd al suelo, donde las aplicaciones de 1,5; 3,0 y 4,5 ppm de Cd al suelo reportaron 2,50; 3,67 y 4,72 ppm de Cd foliar, diferenciándose numérica y estadísticamente entre ellos. Es decir, la acumulación de Cd en el tejido vegetal de *T. cacao* está influenciado por la cantidad y disponibilidad de Cd<sup>2+</sup> en el suelo. Según Meter et al. (2019), los suelos con alto contenido de Cd total implican un mayor potencial para la asimilación de este metal. Estudios realizados por Huamani Yupanqui et al. (2012), reportaron una correlación positiva entre el Cd total del tejido foliar y el Cd disponible en el suelo.

La absorción de Cd<sup>2+</sup> a nivel radicular está en competencia directa con otros elementos, como: Ca, K, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, por lo que pueden ser asimilados por las mismas proteínas transportadoras (Benavides et al., 2005).

Asimismo, donde no se aplicó roca fosfórica (a<sub>1</sub>) al suelo, el contenido de Cd en el tejido vegetal de *T. cacao* fue numérica y estadísticamente menor con 1,01 ppm. Este valor podría explicarse por la presencia del Cd natural en las semillas de *T. cacao* y del suelo agrícola utilizado (Figura 17 del Anexo). Varios estudios reportaron la presencia de Cd en las semillas de *T. cacao*, coincidiendo con Tantalean Pedraza (2017), quien reportó valores de 0,84 y 1,08 ppm de Cd en las almendras de cacao var. CCN-51 procedentes de suelos residuales y aluviales. Asimismo, Florida Rofner et al. (2018), reportaron 0,98 ppm en las almendras de *T. cacao* var. CCN-51. De acuerdo con Oc Llatence et al. (2018), a nivel de categorías, *T. cacao* es la especie que reporta mayor contenido de Cd en sus estructuras, debido al contacto directo con el metal, además de ser una plantación perenne, lo que no ocurre con otras especies, como las plantaciones temporales.

Las aplicaciones foliares de Zn no registraron un efecto significativo en la reducción del Cd en el tejido vegetal de *T. cacao*. El efecto antagonista del Zn en la absorción del Cd ha sido observado con frecuencia (Smilde et al., 1992), sin embargo, no se ha evidenciado en el trabajo de investigación. Mediante un trabajo de investigación, Gutiérrez Vilchez (2018), determinó que la fertilización foliar con Zn no reduce la concentración de Cd

en el tejido vegetal de *Solanum tuberosum* (papa). Asimismo, Sarwar et al. (2015), reportaron que las aplicaciones de Zn foliar y edáfico no tienen efecto en el contenido de Cd de las raíces del trigo que crecen en un suelo contaminado.

Por otro lado, mucho se ha comentado de la presencia de Cd en el sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ), sin embargo, aún no se han reportado estudios que demuestren dicha hipótesis, por lo que hubiera sido ideal realizar un análisis previo al fertilizante utilizado, posiblemente esto explicaría los altos valores de Cd bioacumulado en los plantones de *T. cacao*. Además, las pequeñas diferencias numéricas podrían atribuirse al estado de desarrollo de las hojas, tallo y raíz y variedad (CCN-51) propiamente.

#### 4.4.2. Efecto principal de la roca fosfórica y el zinc en el contenido de Zn del tejido vegetal de *Theobroma cacao*

En la Tabla 18, se muestra la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de Zn en el tejido vegetal de *T. cacao* por el efecto principal de los niveles de la roca fosfórica como fuente de Cd (A), donde la aplicación de 1 ppm ( $a_3$ ) de Cd fue numérica y estadísticamente superior a los niveles de 0 ppm ( $a_1$ ) y 0,5 ppm ( $a_2$ ) de Cd, quienes no se diferenciaron estadísticamente entre sí. Para el efecto de los niveles de Zn (B), se observa que el nivel 120 mg/L ( $b_4$ ) de Zn registró el mayor contenido de Zn en el tejido vegetal con 93,94 ppm, sin diferenciarse estadísticamente del nivel 80 mg/L ( $b_3$ ) de Zn con 89,85 ppm, sin embargo, cuando no se aplicó Zn ( $b_1$ ), se reportó el menor contenido con 49,62 ppm; interpretándose que, a mayor dosis de Zn aplicados foliarmente, mayor será la acumulación de Zn en el tejido vegetal de *T. cacao*.

**Tabla 18.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de Zn en el tejido vegetal de *Theobroma cacao* por el efecto de los niveles de Cd (A) y Zn (B)

Niveles Cd ppm (A)	Medias Zn (ppm)	n	Significancia (*)
$a_3$ : 1	99,19	12	a
$a_2$ : 0,5	70,55	12	b
$a_1$ : 0	64,70	12	b
Niveles Zn mg/L (B)			
$b_4$ : 120	93,94	9	a
$b_3$ : 80	89,85	9	a b
$b_2$ : 40	79,18	9	b
$b_1$ : 0	49,62	9	c

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

El alto contenido de Zn registrado en el tejido vegetal de *T. cacao* se explicaría por el aporte que habría generado la roca fosfórica. Zapata y Roy (2007), señalan que la roca fosfórica también proporciona micronutrientes como el Zn y Mo, dependiendo de la composición química y la mineralogía de la roca fosfórica. Asimismo, Agrocenter (2020), indica que la roca fosfórica procedente de Sechura - Perú contiene 87 ppm de Zn, favoreciendo la absorción y acumulación en las plantas. Sin embargo, donde no se realizó la contaminación con Cd (a<sub>1</sub>), el contenido de Zn en el tejido vegetal de *T. cacao* fue 64,70 ppm, esto se explicaría por el alto contenido de Zn disponible en el suelo utilizado (Tabla 9). Además, al utilizar como muestra el plantón completo de *T. cacao* (raíz, tallo y hojas), posiblemente los valores del Zn hayan incrementado, a diferencia de otros estudios que solo evalúan la parte foliar, registrando valores inferiores.

El Zn es un microelemento esencial para el desarrollo de las plantas. A pesar de las pequeñas cantidades requeridas por los vegetales, la mayoría de los suelos agrícolas son deficientes de este elemento, de forma que su contenido en el tejido vegetal está por debajo del nivel requerido que permiten un normal crecimiento (Roca et al., 2007). Sin embargo, las aplicaciones foliares se han convertido como una estrategia para suplir estas necesidades. En la Tabla 18, se observa que la aplicación foliar de 120 mg/L (b<sub>4</sub>) de Zn presentó el mayor contenido de Zn en el tejido de los plantones de *T. cacao*, sin embargo, empieza a disminuir cuando los niveles son menores.

Epstein y Bloon (2004) indican que el nivel adecuado de Zn en el tejido de las plantas es 20 ppm, sin embargo, los valores registrados en el estudio están por encima del valor mencionado.

#### **4.4.3. Efecto principal de la roca fosfórica en el contenido de fósforo del tejido vegetal de *Theobroma cacao***

En la Tabla 19 de la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ), se muestra el contenido de P en el tejido vegetal de *T. cacao* por el efecto de los niveles de roca fosfórica como fuente de Cd (A), donde el mayor contenido de P en el tejido vegetal se registró por efecto de la aplicación de 1 ppm (a<sub>3</sub>) de Cd, seguido del nivel 0,5 ppm de (a<sub>2</sub>) de Cd y, por último, el nivel 0 ppm (a<sub>1</sub>) de Cd, diferenciándose numérica y estadísticamente entre ellos. Es decir, los niveles crecientes de roca fosfórica incrementaron el contenido de P en el tejido vegetal de *T. cacao*.

**Tabla 19.** Prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ) para el contenido de P en el tejido vegetal de *Theobroma cacao* por el efecto de los niveles de Cd (A)

Niveles Cd ppm (A)	Medias P (%)	n	Significancia (*)
a <sub>3</sub> : 1	0,72	12	a
a <sub>2</sub> : 0,5	0,54	12	b
a <sub>1</sub> : 0	0,21	12	c

Medias con diferentes letras en las columnas difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ )

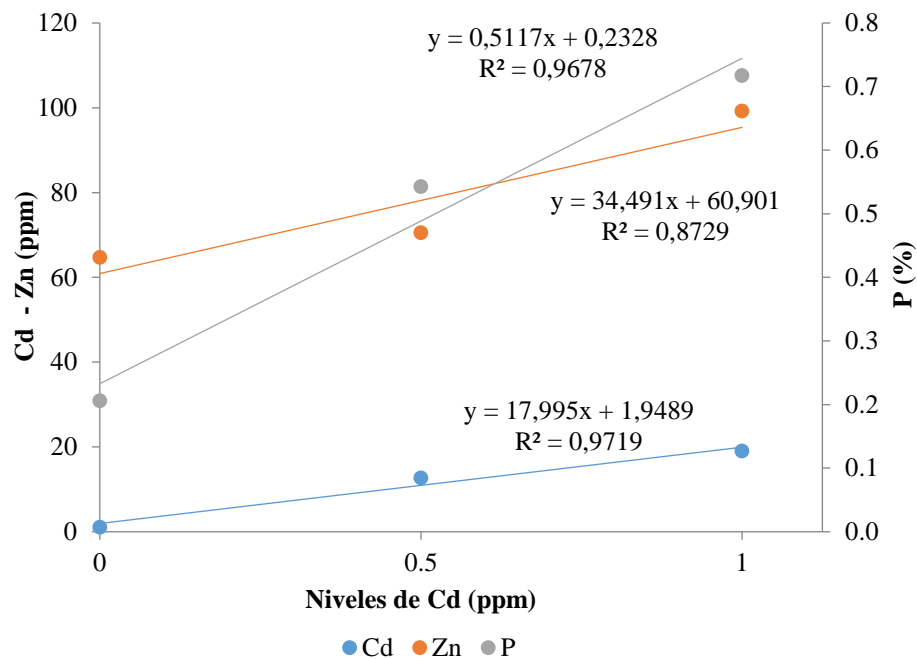
El P es asimilado especialmente durante el crecimiento vegetativo, las raíces lo absorben a partir de la solución suelo como aniones ortofosfato monovalente ( $H_2PO_4$ ) y divalente ( $HPO_4$ ) (Zapata y Roy, 2007). Para que el ion ortofosfato sea asimilado por las raíces es necesario que el pH del suelo oscile entre 6,0 - 6,5; pH por debajo de 6, el P formará compuestos no asimilables con el Fe, Al y Mn y, pH por encima de 7, el P formará compuestos con Al y Ca (Fassbender, 1994, como se citó en Toledo, 2016). Una pequeña cantidad de P entrará en contacto con la superficie de las raíces, que será asimilado inmediatamente, y se requiere su reemplazamiento para un normal crecimiento de la planta, por flujo de masas o difusión (Fernández, 2007). Una vez dentro de las raíces, el P puede quedar acumulado en esta zona o puede ser llevado a las diferentes áreas de la planta. El P mediante diversas reacciones químicas se incorpora a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados como la adenosina trifosfato (ATF) (Brown y Hu, 1999). El P es considerado un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, representa alrededor de 0,2 % del peso seco (Theodorou y Plaxton, 1993).

Se corrobora que, al incrementar los niveles de roca fosfórica al suelo, mayor es la concentración de P en el tejido vegetal de los plantones de *T. cacao*. El fosfato es el componente principal de la roca fosfórica, cuanto más alto la concentración de fosfato ( $P_2O_5$ ) en forma de apatita, mayor será el potencial para la absorción de P (Zapata y Roy, 2007). La roca fosfórica utilizada en el trabajo experimental presenta 20 % de  $P_2O_5$  (Figura 17 del Anexo).

#### 4.5. Análisis de correlación y regresión

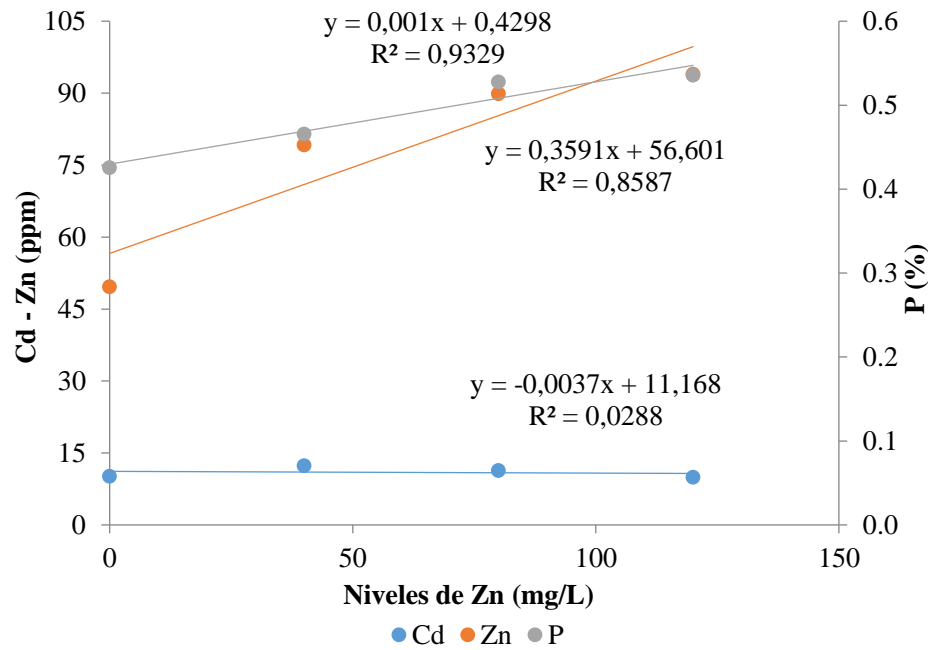
En la Figura 13, se observa que al incrementar los niveles de Cd (0, 0,5 y 1 ppm) como fuente acompañante de la roca fosfórica aumentan la presencia y/o contenido de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de *T. cacao*, presentando correlaciones positivas, con coeficientes de determinación  $R^2$  de 0,9719; 0,8929 y 0,9678 respectivamente. La roca fosfórica es conocido por su alto contenido de  $P_2O_5$  (30,5 %) y Zn (87,5 ppm) (Tabla 2); sin embargo, es una de las

principales fuentes de Cd. Fergusson (1990), manifiesta que se ha reportado hasta 300 ppm de Cd en las rocas fosfatadas.



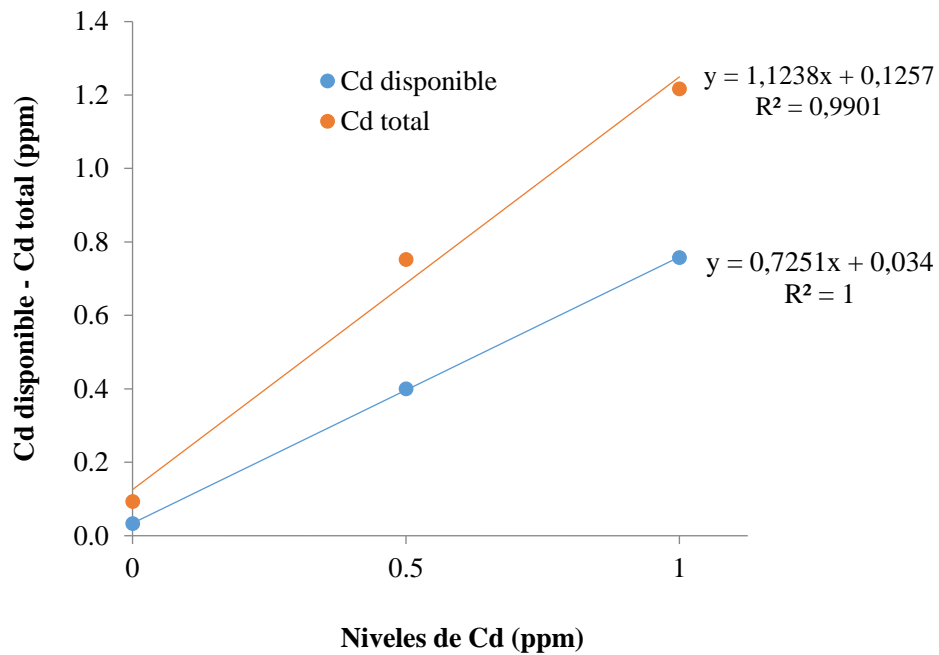
**Figura 13.** Correlación y regresión entre los niveles de Cd aplicados al suelo y los contenidos de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de *Theobroma cacao*

En la Figura 14, se observa que al incrementar los niveles de Zn (0; 40; 80 y 120 mg/L) disminuyen los promedios de la concentración y/o presencia de Cd en el tejido vegetal de *T. cacao*, mostrando una correlación negativa, con un coeficiente de determinación de  $R^2$  0,0288. Asimismo, cuando se incrementan los niveles de Zn (0; 40; 80 y 120 mg/L) también acrecientan las concentraciones de Zn y P en el tejido vegetal, ambos presentan correlaciones positivas, con coeficientes de determinación  $R^2$  de 0,8587 y 0,9329 respectivamente.



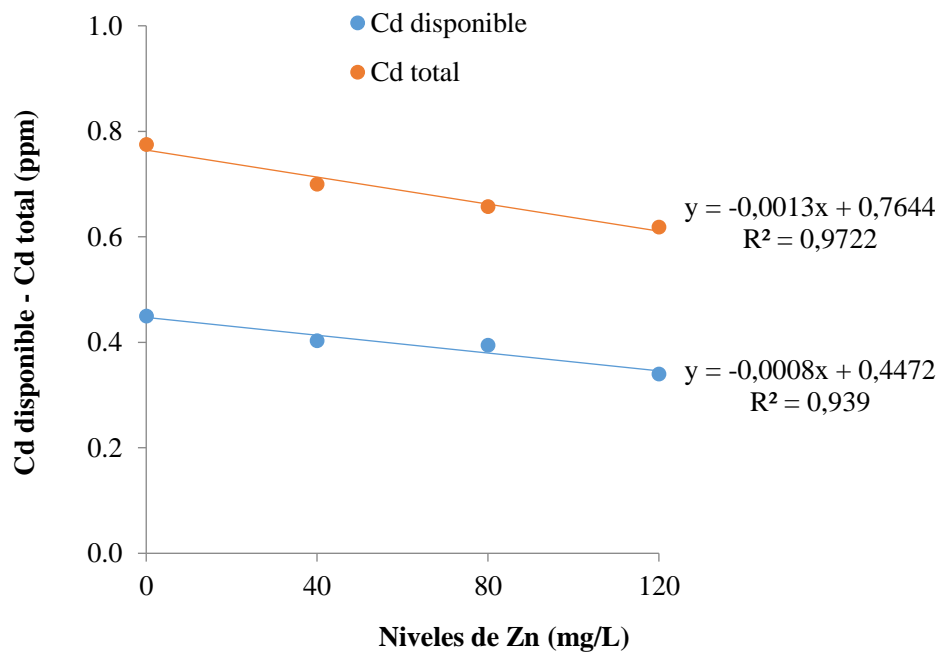
**Figura 14.** Correlación y regresión entre los niveles de Zn aplicados foliarmente y los contenidos de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de *Theobroma cacao*

En la Figura 15, se observa que al incrementar los niveles de Cd (0; 0,5 y 1 ppm) como fuente acompañante dentro de la roca fosfórica aumentan los promedios de Cd disponible y total en el suelo, presentando correlaciones positivas, con coeficientes de determinación  $R^2$  de 1 y 0,9901 respectivamente. Es decir, la aplicación de la roca fosfórica contribuye a la presencia y/o incremento de Cd disponible y total en el suelo. Similar comportamiento fue evidenciado por Tolentino Lavado (2020), descritos en el ítem (4.2.1) de Cd en el suelo.



**Figura 15.** Correlación y regresión entre los niveles de Cd aplicados al suelo y contenidos de Cd disponible y total del suelo

En la Figura 16, se observa que al incrementar los niveles de Zn (0; 40; 80 y 120 mg/L) disminuyen los promedios de Cd disponible y total en el suelo, presentando correlaciones negativas, con coeficientes de determinación  $R^2$  de 0,939 y 0,9722 respectivamente. Es decir, la aplicación foliar de Zn no contribuye a la presencia de Cd en el suelo.



**Figura 16.** Correlación y regresión entre los niveles de Zn aplicados foliarmente y contenidos de Cd disponible y total del suelo



#### 4.6. Análisis de correlación

**Tabla 20.** Coeficientes de correlación para P, Zn y Cd del suelo

Parámetros		Correlaciones												
<b>P Disponible</b>	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	Zn	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K Interc.	Na	
		0,963**	0,731**	0,941**	-0,857**	-0,856**	0,663**	0,933**	0,943**	0,981**	0,944**	0,966**	0,973**	0,947**
		Al			H		Bases Camb.		Acidez Camb.		Sat. Al			
		-0,821**			-0,782**		0,866**		-0,866**		-0,844**			
<b>Zn Disponible</b>	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K Interc.	Na	
		0,666**	0,446**	0,628**	-0,733**	-0,735**	0,663**	0,567**	0,555**	0,643**	0,701**	0,667**	0,727**	0,530**
		Al			H		Bases Camb.		Acidez Camb.		Sat. Al			
		-0,495**			-0,494**		0,533**		-0,533**		-0,511**			
<b>Cd Disponible</b>	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Zn	Cu	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K Interc.	
		0,981**	0,730**	0,904**	-0,832**	-0,831**	0,933**	0,567**	0,337*	0,981**	0,957**	0,960**	0,913**	0,927**
		Na			Al		H		Bases Camb.		Acidez Camb.		Sat. Al	
		0,896**			-0,780**		-0,740**		0,821**		-0,821**		-0,801**	
<b>Cd Total</b>	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Zn	Cu	Cd Disponible	CIC	Ca	Mg	K Interc.	
		0,973**	0,734**	0,920**	-0,829**	-0,827**	0,943**	0,555**	0,330*	0,981**	0,964**	0,943**	0,932**	0,924**
		Na			Al		H		Bases Camb.		Acidez Camb.		Sat. Al	
		0,928**			-0,821**		-0,777**		0,862**		-0,862**		-0,841**	

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral)

**Tabla 21.** Coeficientes de correlación para los contenidos de P, Cd y Zn del tejido vegetal de *Theobroma cacao*

Parámetro		Correlaciones														
<b>P Tejido</b>	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Zn	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K Interc.			
	0,882**	0,596**	0,897**	-0,827**	-0,825**	0,879**	0,662**	0,856**	0,832**	0,898**	0,867**	0,906**	0,902**			
	Na	Al	H	Bases Camb.	Acidez Camb.	Sat. Al	Ca Tejido	Mg Tejido	K Tejido	Na Tejido	Fe Tejido	Mn Tejido	Cu Tejido			
	0,855**	-0,743**	-0,714**	0,793**	-0,793**	-0,771**	0,903**	0,648**	0,367*	0,773**	-0,348*	0,757**	0,858**			
	Cd Tejido		Zn Tejido		Altura			Longitud radicular				Área foliar				
0,880**		0,644**		-0,785**			-0,853**				-0,720**					
<b>Cd Tejido</b>	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Zn	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K interc.			
	0,939**	0,680**	0,926**	-0,829**	-0,827**	0,936**	0,540**	0,933**	0,934**	0,947**	0,906**	0,930**	0,922**			
	Na	Al	H	Bases Camb.	Acides Camb.	Sat. Al	P Tejido	Ca Tejido	Mg Tejido	K Tejido	Na Tejido	Mn Tejido	Cu Tejido			
	0,923**	-0,811**	-0,775**	0,857**	-0,857**	-0,834**	0,880**	0,871**	0,776**	0,368*	0,843**	0,818**	0,817**			
	Zn Tejido		Altura			Longitud radicular				Área foliar						
0,586**		-0,801			-0,841**				-0,707**							
<b>Zn Tejido</b>	Roca fosfórica	Zn	CE	MO	N	P	K Disp.	Zn	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K Inter.	Na	P Tejido
	0,559*	0,637**	0,511**	-0,656**	-0,654**	0,579**	0,469**	0,568**	0,462**	0,429**	0,575**	0,618**	0,560**	0,631**	0,447**	0,644**
	Ca Tejido	Mg Tejido	K Tejido	Na Tejido	Mn Tejido	Cu Tejido	Cd Tejido	Altura		Longitud radicular			Área foliar			
0,669**	0,363*	0,722**	0,490**	0,818**	0,697**	0,586**	-0,507**		-0,527**			-0,506**				

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral)

**Tabla 22.** Coeficientes de correlación para las características biométricas de los plantones de *Theobroma cacao*

Parámetros	Correlaciones												
	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Zn	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K Interc.
Altura de planta	-0,863**	-0,592**	-0,796**	0,791**	0,790**	-0,777**	-0,579**	-0,824**	-0,822**	-0,834**	-0,866**	-0,799**	-0,851**
	Na	Al	H	Bases Camb.	Acides Camb.	Sat. Al	P Tejido	Ca Tejido	Mg Tejido	Na Tejido	Mn Tejido	Cu Tejido	Cd Tejido
	-0,754**	0,660**	0,700**	-0,718**	0,718**	0,670**	-0,785**	-0,739**	-0,608**	-0,829**	-0,761**	-0,765**	-0,801**
	Zn Tejido				Longitud Radicular				Área foliar				
	-0,507**				0,875**				0,741**				
Área foliar	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Zn	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	K Interc.
	-0,830**	-0,601**	-0,639**	0,639**	0,639**	-0,744**	-0,516**	-0,847**	-0,796**	-0,761**	-0,856**	-0,672**	-0,757**
	Na	Al	H	Bases Camb.	Acides Camb.	Sat. Al	P Tejido	Ca Tejido	Mg Tejido	Na Tejido	Mn Tejido	Cu Tejido	Pb Tejido
	-0,625**	0,526**	0,442**	-0,527**	0,527**	0,535**	-0,0720**	-0,619**	-0,595**	-0,856**	-0,596**	-0,790**	-0,429**
	Cd Tejido	Zn Tejido	Altura	Número de hojas			Longitud radicular						
	-0,707**	-0,506**	0,741**	0,492**			0,741**						
Número de hojas	Ca			Na Tejido			Cu Tejido			Área foliar			
	-0,329*			-0,419*			-0,397*			0,492**			
Longitud radicular	Roca fosfórica	pH	CE	MO	N	P	Zn	Cd Disponible	Cd Total	CIC	Ca	Mg	
	-0,913**	-0,719**	-0,905**	0,871**	0,870**	-0,881**	-0,676**	-0,882**	-0,883**	-0,916**	-0,899**	-0,907**	
	K Interc.	Na	Al	H	Bases Camb.	Acidez Camb.	Sat. Al	P Tejido	Ca Tejido	Mg Tejido	Na Tejido	Mn Tejido	
	-0,921**	-0,874**	0,768**	0,826**	-0,841**	0,841**	0,785**	-0,853**	-0,840**	-0,597**	-0,807**	-0,753**	
	Cu Tejido			Cd Tejido			Zn Tejido			Altura		Área foliar	
	-0,801**			-0,841**			-0,527**			0,875**		0,741**	

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral)

#### 4.7. Modelos matemáticos

Realizado el análisis de regresión lineal múltiple con las variables, se determinó los siguientes modelos matemáticos:  $Cd\ disponible = 0,381 + 1,563\ roca\ fosf\ orica - 1,206\ K\ cambiabile - 0,210\ Ca$ , cuyo Análisis de Varianza se muestra en la Tabla 30 del Anexo, con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0,986$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0,993$ .  $P\ disponible = - 41,694 + 16,732\ CIC$ , cuyo Análisis de Varianza se muestra en la Tabla 30 del Anexo, con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0,963$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0,981$ .  $Zn\ disponible = 19,021 - 6,868\ MO$ , cuyo el Análisis de Varianza se presenta en la Tabla 30 del Anexo, con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0,537$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0,733$ . Y, por último, el contenido de  $Cd\ en\ el\ tejido\ vegetal = -11,784 + 2,629\ CIC + 1,804\ Mg\ tejido + 0,001\ Mn\ tejido - 0,040\ Zn\ suelo + 3,551\ K\ tejido$ , cuyo Análisis de Varianza encuentra en la Tabla 31 del Anexo, con un coeficiente de determinación de  $r^2 = 0,959$  y un coeficiente de correlación de  $r = 0,979$ .

En el trabajo de investigación, se ha evidenciado que las aplicaciones de niveles crecientes de roca fosfórica al suelo incrementan la concentración de Cd disponible (Tabla 13). Esto se debe a que la roca fosfórica también posee metales pesados (Cd, Cr, Hg y Pb), aun siendo fuente principal de fósforo. Además, un suelo deficiente o pobre incrementa la disponibilidad de Cd.

La concentración de Cd en el tejido vegetal de *T. cacao* está influenciado por las características químicas del suelo y del contenido de nutrientes de la misma planta.

## V. CONCLUSIONES

1. Se encontró un efecto significativo del Cd de la roca fosfórica y el Zn en los plantones de *T. cacao* variedad CCN-51 en etapa de vivero.
2. La aplicación de roca fosfórica al suelo influyó en el incremento de los valores del pH, CE, P, Zn, CIC, Ca y Mg del suelo, similar comportamiento se evidenció con la aplicación de Zn foliar.
3. Se determinó que los niveles de roca fosfórica incrementaron los contenidos de Cd disponible y total en el suelo.
4. Se evidenció el efecto negativo del mayor nivel de Cd (1 ppm) en las características biométricas de los plantones de *T. cacao*, sin embargo, cuando no se contaminó el suelo con Cd, la aplicación foliar de 80 mg/L de Zn reportó la mayor longitud radicular con 36,83 cm.
5. Se encontró que las aplicaciones foliares de Zn no muestran un efecto significativo en la reducción de Cd en el tejido vegetal de *T. cacao*, sin embargo, numéricamente la aplicación foliar de 120 mg/L de Zn registró el menor promedio de Cd.
6. Se determinó que la altura de planta, área foliar, longitud radicular y contenidos de Cd, P y Zn en el tejido vegetal de *T. cacao* están correlacionados principalmente con la roca fosfórica, pH y CE.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. Realizar un estudio para determinar el efecto y comportamiento del cadmio de la roca fosfórica en el suelo y en las plantas adultas de cacao.
2. Se recomienda tener mayor cuidado en la fertilización fosfórica en el cultivo de cacao, aplicando en base a la extracción de nutrientes y en contenido de fósforo en el suelo.
3. En suelos con altos niveles de fósforo y cadmio se recomienda aplicaciones foliares de zinc.

## VII. REFERENCIAS

- Abanto Aguirre, M. A. (2016). *Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio la Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1949>.
- Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, And Risks of Heavy Metals*. Springer-Verlag. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>.
- Agencia de Protección Ambiental. (1995). *A Guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule*. <https://www.epa.gov/biosolids/guide-biosolids-risk-assessments-epa-part-503-rule>.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (1996). *Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils*. <https://www.epa.gov/esam/epa-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils>.
- Agrocenter. (21 de mayo de 2020). *Fosfato*. <http://comercialagrocenter.cl/web/bayovar.php>.
- Almendros García, P., Rico Selas, M. I., López Valdivia, L. M. y Álvarez Álvarez, J. M. (2008). Deficiencia de zinc en los cultivos y correctores de carencia del micronutriente. *Vida Rural*, 19(280), 12-16. <https://oa.upm.es/2472/>.
- Alloway, B. J. (1995). Soil process and the behavior of the heavy metals. In: Alloway, B. J. (Ed.), *Heavy metals in soils*. (2ª ed., Chapter 2., Pp. 11-37). Blackie Academic and Professional.
- Alloway, B. J. (2008). *Zinc en suelos y nutrición de cultivos*. (2ª ed.). IZA e IFA.
- Andrades Rodríguez, M. S. y Martínez Villar, E. (2022). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. Universidad de La Rioja. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267902>
- Amezcu Romero, J. C. y Lara Flores, M. (2017). El zinc en las plantas. *Ciencia*, 68(3), 28-35.
- Amirjani, M. R. (2012). Effects of Cadmium on Wheat Growth and Some Physiological Factors. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*, 2(1), 50-58. <http://www.ijfse.com/index.php/IJFSE/article/view/21>.
- Asado Hurtado, M. A., Vidal Jaimes, E. y Ruíz Seguismunda, Y. (2007). Concentración de sales en ocho tipos de compost mejorado, elaborados bajo las condiciones del huerto olerícolafrutícola de la Unheval. *Investigación Valdizana*, 1(2), 81-83. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586061877011>.

- Azevedo Silveira, M. L., Ferracciú Alleoni, L. R. y Guimarães Guilherme, L. R. (2003). Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, 60(4), 793-806. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000400029>.
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A. y Mata, D. A. (2018). *Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. INTA <https://inta.gob.ar/documentos/importancia-del-ph-y-la-conductividad-electrica-ce-en-los-sustratos-para-plantas>.
- Bello Medina, N. E. (2020). *Respuesta de cinco genotipos de Cacao (Theobroma cacao L.) a cuatro dosis de cadmio bajo condiciones de vivero en Chanchamayo* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio la Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4566>.
- Beltrán Pineda, M. E y Gómez Rodríguez, A. M. (2015). Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *I3+*, 2(2), 82-112 p. <https://doi.org/10.24267/23462329.113>.
- Benavides, M. P., Gallego, S. M. y Tomaro, M. L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 21-34. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003>.
- Bravo Realpe, I. S., Arboleda Pardo, C. A. y Martín Pinedo, F. J. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*, 63(2), 164-174. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.39569>.
- Bonomelli, C., Bonilla, C. y Valenzuela, A. (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(10), 1179-1186. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003001000007>.
- Brown, P y Hu, H. (1999). Funciones del fósforo en las plantas. *Informaciones Agronómicas*, 83(36), 9-10.
- Bouziani, Y., Degaichia, H. y Benmoussa, M. (2019). Efecto del cadmio en los parámetros germinativos del trigo harinero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(2), 301-309. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1476>.
- Cabrera Condori, E. (2015). *Aplicación de tres abonos orgánicos y roca fosfórica al cultivo de café (Coffea arabica L.) en Hermilio Valdizan* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1372>.



- Casierra-Posada, F. y Poveda, J. (2005). La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria sp.* Cv. *Camarosa*). *Agronomía Colombiana*, 23(2), 283-289. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180316955013>.
- Castillo-González, J., Ojeda-Barrios, D., Hernández-Rodríguez, A., González-Franco, A. C., Robles-Hernández, L. y López-Ochoa, G. R. (2018). Zinc metalloenzymes in plants. *Interciencia*, 43(4), 242-248.
- Cerón Rincón, L. E. y Aristizábal Gutiérrez, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/32889>.
- Chien, S. H., Prochnow, L. y Mikkelsen, R. (2009). *Uso agronómico de la roca fosfórica para la aplicación directa* (Informaciones Agronómicas N° 1). International Plant Nutrition Institute. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/DDB8DDAF22E947BB852579830071462D/\\$FILE/13.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/DDB8DDAF22E947BB852579830071462D/$FILE/13.pdf)
- Correa Villacorta, J. A. (2018). *Efecto de enmiendas cálcicas y orgánicas en la absorción de cadmio en plántones de cacao (Theobroma cacao L.) en la Región San Martín* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto]. Repositorio Institucional UNSM. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3237>.
- Cruz-Crespo, E., Jaen-Contreras, D., Cadena-Iñiguez, J., Gaytan-Acuña, A. y Arévalo Galarza, M. de L. (2020). Fertilización foliar en la calidad de tallos de lisianthus ‘flamenco purple’ (*Eustoma grandiflorum* (raf.) Shinnery.). *AgroProductividad*, 13(3), 77-84. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1671>.
- De Meeûs, C., Eduljee, G. H. y Hutton, M. (2002). Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilisers. I. *Science of the Total Environment*, 291(1-3), 189-206. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01098-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01098-1).
- Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM [Ministerio del Ambiente del Perú]. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. 2 de diciembre de 2017.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_051284.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051284.pdf).
- Domínguez Núñez, M. T., Madrid Díaz, F., Marañón Arana, T. y Murillo Carpio, J. M. (2008). Factores que condicionan la disponibilidad de elementos traza del suelo en repoblaciones forestales de la cuenca del río Guadamar (Sevilla). *Cuadernos de la*

- Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (25), 167-172.  
<https://doi.org/10.31167/csef.v0i25.9677>.
- Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. I., Weigend, M. y Luebert, F. (2012). *Hoja botánica: Cacao. Theobroma cacao* L. Repositorio Digital del Ministerio del Ambiente.  
<https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/185>
- Epstein, E. y Bloom, A. J. (2004). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives*. (2<sup>a</sup> ed). Sinauer Associates, Inc.
- Estévez, J., Andrade, M. L., Marcet, P. y Montero, M. J. (2000). Fijación y movilidad del cadmio y Zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. *Ciencia del Suelo*, 18(1), 28-35.
- Estrada, W., Romero Castellano, X. G. y Moreno Peraza, J. A. (2011). *Guía técnica del cultivo de cacao manejado con técnicas agroecológicas*. Infocafés.  
<http://infocafes.com/portal/biblioteca/guia-tecnica-del-cultivo-de-cacao-manejado-con-tecnicas-agroecologicas/>.
- Evans, L. J. (1989). Chemistry of metal retention by soils. *Environmental Science y Technology*, 23(9), 1046-1056. <https://doi.org/10.1021/es00067a001>.
- Fergusson, J. E. (1990). *The heavy elements: Chemistry, environmental impact and health effects*. Pergamon Press.
- Fernández, M. T. (2007). Fósforo: Amigo o enemigo. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 41(2), 51-57. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223114970009>
- Fernández, V., Sotiropoulos, T. y Brown, P. (2015). *Fertilización foliar: Principios científicos y prácticas de campo*. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes.  
[https://www.guiaverde.com/files/company/03032016122136\\_libro\\_2015\\_foliar\\_fertilizers\\_spanish\\_def.pdf](https://www.guiaverde.com/files/company/03032016122136_libro_2015_foliar_fertilizers_spanish_def.pdf)
- Florida Rofner, N., Claudio Melchor, S. y Gómez Benal, R. (2018). El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) en Leoncio Prado, Huánuco, Perú. *Folia Amazónica*, 27(1), 1-8. <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.438>
- Fuentealba Sandoval, V. C. (2012). *Quitozinc, quitosano, proquelate cinc y sulfato de zinc en maíz (Zea mays L.)* [Tesis de Pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio UDEC. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/1514>.
- García Carrión, L. F. (2010). *Catálogo de cultivares de cacao del Perú*. Ministerio de Agricultura. Comisión Nacional para el desarrollo y Vida sin Drogas.  
[https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/dgca/cultivares\\_cacao.pdf](https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/dgca/cultivares_cacao.pdf).

- Gómez Arias, Y. M. (2020). *Estudio comparativo del sulfato de zinc edáfico para reducir la presencia de cadmio en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en el Canton Naranjito* [Tesis de Pregrado, Universidad Agraria del Ecuador]. [https://cia.uagraria.edu.ec/cia\\_inv\\_view.php?id=30413&option=view](https://cia.uagraria.edu.ec/cia_inv_view.php?id=30413&option=view).
- González, S. (1986). Contenido natural de metales pesados extraíbles con EDTA en suelos del Valle Aconcagua. *Agricultura Técnica*, 46(3), 323-327. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/33806>.
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., y Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of the Total Environment*, 612, 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>.
- Gutiérrez Vilchez, P. P. (2018). *Biofortificación agronómica del cultivo de papa mediante aplicación foliar y edáfica de zinc y su interacción con cadmio* [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio la Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3769>.
- Guzmán Ñahuirima, J. J. (2019). *Efecto de la materia orgánica en la reducción del cadmio en el suelo y en plántulas de cacao (Theobroma cacao L.) en vivero* [Tesis de Pregrado Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1574>.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L. y Nelson, W. L. (1999). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to Nutrient Management*. (6ª ed.). <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19991905096>.
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Peña-Icart, M., Meriño-Hernández, Y. y Cartaya-Rubio, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3), 10.
- Hernández, R. (2002). *Libro de botánica*. Universidad de los Andes.
- Herrera Marcano, T. (2011). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venesuelos*, 8(1 y 2), 42-47. [http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_venes/article/view/1112](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1112).
- Holdridge, L. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Inter Americano de Cooperación para la Agricultura.
- Hualcas Cenizario, C. N. (2020). *Evaluación de las propiedades de un suelo degradado por efecto de la aplicación de enmiendas en el establecimiento del cacao (Theobroma cacao L.) en la localidad de Río Espino* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1835>.

- Huamani Yupanqui, H. A., Huauya Rojas, M. Á., Mansilla Minaya, L. G., Florida Rofner, N. y Neira Trujillo, G. M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 61(4), 339-344. [https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta\\_agronomica/article/view/38134](https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/38134).
- Huaynates Natividad, J. L. (2014). *Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio en el suelo en la localidad de Supte* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/451>.
- Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura. (2017). *La conductividad eléctrica del suelo en el desarrollo de los cultivos*. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-conductividad-electrica-del-suelo-en-el-desarrollo-de-los-cultivos>.
- International Plant Nutrition Institute. (2014). *Características del suelo y sus interpretaciones*. [http://www.ipni.net/ppiweb/Itamn.nsf/\\$webindex/article=69FC4C5285256E1B001455BC6500B0](http://www.ipni.net/ppiweb/Itamn.nsf/$webindex/article=69FC4C5285256E1B001455BC6500B0).
- Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70085>.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. (3ª ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039900>.
- Lamb, D., Ming, H., Megharaj, M. y Naidu, R. (2009). Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) partitioning and bioaccessibility in uncontaminated and long-term contaminated soils. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 1150-1158. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.124>.
- Lamz Piedra, A. y González Cepero, M. C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: La mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31-42. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193228546005>.
- León, L. A. (1991). La experiencia del Centro Internacional para el Desarrollo de Fertilizantes en el uso de rocas fosfóricas en América Latina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 17(1-4), 49-69. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/88715>.
- Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T. y Muñoz-García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. [http://dx.doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](http://dx.doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153).

- López Baéz, W., Castro Mendoza, I., Salinas Cruz, E., Reynoso Santos, R. y López Martínez, J. (2016). Propiedades de los suelos cafetaleros en la reserva de la Biosfera el Triunfo, Chipas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 607-618.
- Lugo Soto, M., Ramírez, R. y Entrena, I. (2009). Roca fosfórica y superfosfato triple como fuentes de fósforo para *Centrosoma* en un suelo ácido. *Zootecnia Tropical*, 27(4), 443-456.
- Masola, M. J., Carrizo, M. E., Alesso, C. A., & Imhoff, S. D. C. (2019). Lotes-nocheros y encalado: una alternativa para recuperar un argiudol degradado de Santa Fe. *Ciencia del suelo*, 37(1), 21-25.
- Meter, A., Atkinson, R. J. y Laliberte, B. (2019). *Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe: Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación*. Cgiar. Org. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/102354>
- Molina, E. (2002). Fertilización foliar de cultivos frutícolas. En G. Meléndez y E. Molina (Ed.), *Fertilización foliar: principios y aplicaciones* (pp. 82-100). Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas y Laboratorio de Suelos y Foliar.
- Moreira, C. S. (2004). *Adsorção competitiva de cádmio, cobre, níquel e zinco em solos* [Tesis de Posgrado Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.11.2004.tde-11112004-144415>.
- Murillo Castillo, R. G., Piedra Marín, G. y León, R. G. (2013). Absorción de nutrientes a través de la hoja. *Uniciencia*, 27(1), 232-244. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4945327>.
- Oc Llatence, W., Gonza Saavedra, C. J., Guzmán Castillo, W. y Pariente Mondragón, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 63-75. <https://doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1156>.
- Peláez P, M., Casierra-Posada, F. y Torres R, G. A. (2014). Tóxicidad de cadmio y plomo en Pasto Tanner *Brachiaria arrecta*. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(2), 3-13. <https://doi.org/10.22267/rcia.143102.27>.
- Pérez García, P. E. y Azcona Cruz, M. I. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3), 199-205.
- Pernía, B., Añazco, K., Mero, M., Mayía, Y. y Cobos, P. (2021). Efectos del cadmio sobre la germinación y crecimiento inicial de cinco variedades de *Oryza sativa* L. cultivadas en Ecuador. *Acta Agronómica*, 70(1), 82-92. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n1.87636>.

- Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R. y Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *Interciencia*, 33(2), 112-119.
- Quitral Villanueva, A. I. (2005). *Solubilización de roca fosfórica por hongos rizosféricos aislados de especies forrajeras de importancia en la X región de Chile* [Tesis de Pregrado, Universidad Austral de Chile]. Biblioteca Virtual UACH. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/faq.8s/doc/faq.8s.pdf>
- Ramírez Aparicio, J. A. (2019). *Características biométricas en el cultivo de papa (Solanum tuberosum L.) bajo fertilización edáfica y foliar con zinc* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio la Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4138>.
- Raven Willwater, K. P. (2018). Efectos del cadmio sobre el crecimiento y la composición elemental de la alfalfa en cultivo de arena. *Anales Científicos*, 79(2), 406-414.
- Rehman, F., Khan, F. A., Varshney, D., Naushin, F. y Rastogi, J. (2011). Effect of cadmium on the growth of tomato. *Biology and Medicine*, 3(2), 187-190.
- Reyes Alemán, M. D. R., Franco Mora, O., Morales Rosales, E. J. y Pérez López, D. D. J. (2017). Influencia del magnesio y zinc en la altura de planta y verdor de hojas en Liliun. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (70), 31-37. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2017701825>.
- Reyes Navarrete, M. G., Alvarado De la Peña, A. I., Antuna, D. M., García Vargas, A., González Valdez, L. S. y Vázquez Alarcón, E. D. C. (2012). *Metales pesados: importancia y análisis*. <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/8815>
- Rieuwerts, J. S., Thornton, I., Farago, M. E. y Ashmore, M. R. (1998). Factors influencing metal bioavailability in soils: Preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 10(2), 61-75. <https://doi.org/10.3184/095422998782775835>.
- Roca, N., Pazos, M. S. y Bech, J. (2007). Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del no argentino. *Ciencia del Suelo*, 25(1), 31-42.
- Rodríguez Albarracín, H. S. (2018). *Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca* [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62944>.
- Rodríguez Serrano, M. (2007). *Mecanismos moleculares de respuesta al cadmio en plantas de Pisum sativum L.: Función de las especies de oxígeno y nitrógeno reactivo* [Tesis de Doctorado, Universidad de Granada]. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/1457>.

- Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la Casa, N., Romero-Puertas, M. C., del Río, L. A. y Sandalio, L. M. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Ecosistemas*, 17(3), 139-146. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/409>.
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J. y Menjivar-Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num3\\_art:742](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742).
- Rubio, C., González Weller, D., Martín-Izquierdo, R. E., Revert, C., Rodríguez, I y Hardisson, A. (2007). El zinc: Oligoelemento esencial. *Nutrición Hospitalaria*, 22(1), 101-107.
- Salas, R. (2002). Herramientas de diagnóstico para definir recomendaciones de fertilización foliar. En G. Meléndez y E. Molina (Ed.), *Fertilización foliar: principios y aplicaciones* (pp. 7-18). Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas y Laboratorio de Suelos y Foliares.
- Sánchez Barrón, G. (2016). *Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio* [Trabajo Fin de Grado, Universidad Complutense]. Repositorio Institucional de la UCM. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/50902/>.
- Sánchez Zepeda, M., López Herrera, M. y Romero Bautista, L. (2021). Determinación de la capacidad de biacumulación de cadmio en *Vicia faba* L. y su efecto en la raíz y el crecimiento vegetativo. *Revista Biológico-Agropecuaria Tuxpan*, 9(2), 46-60. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v9i2.358>.
- Sarwar, N., Ishaq, W., Farid, G., Shaheen, MR., Imran, M., Geng, M. y Hussain, S. (2015). Zinc-cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122, 528-536. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.011>.
- Sebastián Peña, B. (2007). *Disponibilidad y efectividad relativa de quelatos de zinc aplicados a suelos en un cultivo de lino (Linum usitatissimum L.) textil* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPN. <https://oa.upm.es/1626/>.
- Selva, V. (2011). *El maíz necesita zinc*. Stoller. <https://stoller.com.ar/>
- Seregin, I. V., Shpigun, L. K. & Ivanov, V. B. (2004). Distribution and Toxic Effects of Cadmium and Lead on Maize Roots. *Russian Journal of Plant Physiology*, 51(4), 525-533. <https://doi.org/10.1023/B:RUPP.0000035747.42399.84>.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., y Antunes, P. M. C. (2016). Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system. *Reviews of*

- Environmental Contamination and Toxicology*, 241, 73-137.  
[https://doi.org/10.1007/398\\_2016\\_8](https://doi.org/10.1007/398_2016_8).
- Sierra-Álvarez, R. (2007). Fungal bioleaching of metals in preservative treated wood. *Process biochemistry*, 42(5), 798-804. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.01.019>.
- Smilde, K. W., Van Luit, B. y Van Driel, W. (1992). The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium. *Plant and Soil*, 143, 233-238. <https://doi.org/10.1007/BF00007878>.
- Soca Núñez, M. y Villarreal Núñez, J. E. (2015). Influencia de zeolita y roca fosfórica sobre el desarrollo de los cultivos de sorgo y papa. *Ciencia Agropecuaria*, (23), 60-74.
- Tantalean Pedraza, E. (2017). *Distribución del contenido de Cadmio en los diferentes órganos del Cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1242>.
- Theodorou, M. E. y Plaxton, W. C. (1993). Metabolic Adaptations of Plant Respiration to Nutritional Phosphate Deprivation. *Plant Physiology*, 101(2), 339-344. <https://doi.org/10.1104/pp.101.2.339>.
- Trinidad Santos, A. y Aguilar Manjarrez, D. (1999). Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 247-255.
- Toledo, M. (2016). *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: Conceptos y metodos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/3108>.
- Tolentino Lavado, S. (2020). *Efecto la de materia orgánica y roca fosfórica en la concentración de cadmio en suelo y plantones de cacao* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1819>.
- Villanueva Nilo. L. R. (2005). *Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz (Zea mays)* [Tesis de Posgrado, Universidad de Chile]. <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Villanueva%20Liliana.pdf>.
- Vivanco Villa, F. (2016). *Fuentes y niveles de encalado en el crecimiento de plantones de Cacao (Theobroma cacao L.) en dos profundidades de un suelo* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1248>.



- Yadav, S. K. (2010). Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 76(2), 167-179. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2009.10.007>.
- Zapata, F. y Roy, R. N. (2007). Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/ba9ae266-a2cf-56b3-8846-03dc41027c53/>.

## **ANEXOS**

**Tabla 23.** Resumen del análisis de varianza de las propiedades químicas del suelo

F.V.	G.L.	pH		CE (mS/cm)		P (ppm)		Zn (ppm)		CIC		Ca (Cmol(+)/kg)		Mg	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
		Tratamientos	11	0,89	AS	7,84	AS	3 886,67	AS	44,18	AS	13,68	AS	2,3362	AS
A (Niveles de Cd)	2	3,68	AS	42,49	AS	20 570,66	AS	133,94	AS	72,81	AS	12,7729	AS	1,0095	AS
B (Niveles de Zn)	3	0,14	NS	0,25	S	212,48	AS	29,09	AS	0,95	AS	0,0415	AS	0,0148	AS
A*B	6	0,33	S	0,08	NS	162,44	AS	21,80	AS	0,34	S	0,0047	AS	0,0003	NS
Error experimental	22	0,13		0,06		31,99		4,84		0,12		0,0002		0,0002	
Total	35														
CV (%):		6,54		9,52		11,45		21,36		6,33		0,49		1,44	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 24.** Análisis de varianza de los efectos simples de las propiedades químicas del suelo

F.V.	G.L.	pH		Zn (ppm)		P (ppm)		CIC		Ca	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
		A en b <sub>1</sub>	2	0,25	NS	15,48	NS	4 798,24	AS	19,75	AS
A en b <sub>2</sub>	2	0,32	NS	18,87	S	5 622,04	AS	19,03	AS	3,139	AS
A en b <sub>3</sub>	2	2,78	AS	15,13	NS	5 031,74	AS	18,12	AS	3,036	AS
A en b <sub>4</sub>	2	1,33	AS	149,87	AS	5 605,97	AS	16,95	AS	3,411	AS
B en a <sub>1</sub>	3	0,44	S	0,59	NS	0,27	NS	0,19	NS	0,016	AS
B en a <sub>2</sub>	3	0,04	NS	1,24	NS	499,05	AS	1,41	AS	0,003	AS
B en a <sub>3</sub>	3	0,32	NS	70,87	AS	38,05	NS	0,03	NS	0,031	AS
Error experimental	22	0,13		4,84		31,99		0,12		0,000	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 25.** Resumen del análisis de varianza del Cd disponible y total del suelo

F.V.	G.L.	Cd disponible (ppm)		Cd total (ppm)	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
Tratamientos	11	0,296	AS	0,717	AS
A (Niveles de Cd)	2	1,577	AS	3,826	AS
B (Niveles de Zn)	3	0,018	AS	0,040	AS
A*B	6	0,008	AS	0,018	S
Error experimental	22	0,001		0,005	
Total	35				
CV (%):		6,77		10,46	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 26.** Análisis de varianza de los efectos simples del Cd disponible y total del suelo

F.V.	G.L.	Cd disponible		Cd total	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
A en b <sub>1</sub>	2	0,547	AS	1,291	AS
A en b <sub>2</sub>	2	0,377	AS	0,936	AS
A en b <sub>3</sub>	2	0,398	AS	0,873	AS
A en b <sub>4</sub>	2	0,281	AS	0,781	AS
B en a <sub>1</sub>	3	0,000	NS	0,002	NS
B en a <sub>2</sub>	3	0,003	S	0,002	NS
B en a <sub>3</sub>	3	0,032	AS	0,073	AS
Error experimental	22	0,001		0,005	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 27.** Resumen del análisis de varianza de las características biométricas de los plántones de *Theobroma cacao*

F.V.	G.L.	Altura de planta (cm)		N° hojas		Área foliar (cm <sup>2</sup> )		Longitud de raíz (cm)	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
Tratamientos	11	59,08	AS	0,25	S	100 267,45	AS	286,761	AS
A (Niveles de Cd)	2	284,34	AS	1,01	AS	514 456,52	AS	1 420,300	AS
B (Niveles de Zn)	3	16,06	S	0,15	NS	9 435,42	NS	51,231	AS
A*B	6	5,51	NS	0,04	NS	7 620,44	NS	26,680	S
Error experimental	22	4,63		0,09		5 786,31		8,422	
Total	35								
CV (%):		7,73		9,35		14,48		13,59	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 28.** Análisis de varianza de los efectos simples de la longitud radicular de los plántones de *Theobroma cacao*

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Sig.
A en b <sub>1</sub>	2	611,17	305,58	AS
A en b <sub>2</sub>	2	384,89	192,44	AS
A en b <sub>3</sub>	2	1 298,05	649,02	AS
A en b <sub>4</sub>	2	706,58	353,29	AS
B en a <sub>1</sub>	3	72,87	24,29	NS
B en a <sub>2</sub>	3	86,41	28,80	S
B en a <sub>3</sub>	3	154,50	51,50	AS
Error experimental	22	202,13	8,42	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 29.** Resumen del análisis de varianza de los contenidos de Cd, Zn y P en el tejido vegetal de *Theobroma cacao*

F.V.	G.L.	Cd (ppm)		Zn (ppm)		P (%)	
		C.M.	Sig.	C.M.	Sig.	C.M.	Sig.
Tratamientos	11	187,32	AS	1 805,96	AS	0,157	AS
A (Niveles de Cd)	2	999,59	AS	4 088,58	AS	0,812	AS
B (Niveles de Zn)	3	11,37	NS	3 603,94	AS	0,025	NS
A*B	6	4,55	NS	146,09	NS	0,004	NS
Error experimental	22	6,03		125,43		0,013	
Total	35						
CV (%):		22,44		14,33		22,93	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 30.** Análisis de Varianza de correlación para el Cd, P y Zn disponibles del suelo

Análisis de varianza	Cd disponible				P disponible				Zn disponible			
	GL	SC	CM	Sig.	GL	SC	CM	Sig.	GL	SC	CM	Sig.
Regresión	3	3,230	1,077	S	1	41 921,570	41 921,570	S	1	323,686	323,686	S
Residuo	32	0,047	0,001		34	1 597,816	46,995		34	278,526	8,192	
Total	35	3,277			35	43 519,386			35	602,212		
		$r = 0,993$	$r^2 = 0,986$			$r = 0,981$	$r^2 = 0,963$			$r = 0,733$	$r^2 = 0,537$	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )

**Tabla 31.** Análisis de Varianza de correlación para el contenido de Cd del tejido vegetal de *Theobroma cacao*

Análisis De Varianza	Cd en el Tejido			
	GI	SC	CM	Sig.
<b>Regresión</b>	5	2 114,827	422,965	S
<b>Residuo</b>	30	90,909	3,030	
<b>Total</b>	35	2 205,736		
		$r = 0,979$	$r^2 = 0,959$	

NS: No significativo ( $\alpha = 0,05$ ); S: Significativo ( $\alpha = 0,05$ ); AS: Altamente significativo ( $\alpha = 0,01$ )



Figura 17. Análisis Físico - químico del suelo antes de la ejecución del experimento





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

Tingo Maria

**Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos**

Av. Universitaria s/n Telef. (062) 562342 - Celular 941531359 Aptdo. 156

[analisisdesuelosunas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosunas@hotmail.com)



## **ANALISIS ESPECIAL**

SOLICITANTE		PROCEDENCIA		
MARIA ESMILDA MALCA QUEZADA		FOSYEIKI		
Datos de la Muestra		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	CaO (%)	Cd (ppm)
Cod. Lab	Tipo			
M01181	ROCA FOSFORICA	20	32	8.73

TINGO MARIA 15 DE ENERO 2019  
RECIBO N° 0521817  
MUESTREADO POR EL SOLICITANTE



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
LAB. ANALISIS DE SUELOS

*[Signature]*  
Ing. Luis G. Mapañita Minaya  
JEFE



Figura 18. Análisis químico especial de la roca fosfórica



## FICHA TÉCNICA “ROCA FOSFÓRICA FOSYEIKI”

**NOMBRE COMERCIAL:** ROCA FOSFORICA

**PROCEDENCIA:** Bayovar - Sechura – Piura – Peru

**PRODUCTOR:** FOSYEIKI SAC

**DIRECCION:** Av. Tingo Maria 1148 – Cercado de Lima, Lima 1 PERU.

**TELEFONO:** (+51)-1-4258002

**E-MAIL:** [info@fosyeiki.pe](mailto:info@fosyeiki.pe)

**CALIDAD GARANTIZADA:** La Empresa de Fosfatos FOSYEIKI SAC garantiza que la roca fosfórica que comercializa tiene la siguiente calidad:

### 1. COMPOSICION MINIMA GARANTIZADA :

- |                  |       |
|------------------|-------|
| • FOSFORO (P2O5) | 20 %  |
| • CALCIO (CaO)   | 32 %  |
| • MAGNESIO (MgO) | 0.6 % |
| • AZUFRE (SO4)   | 5.5 % |

### 2. CARACTERISTICAS FISICAS

- ESTADO FISICO : Arena de grano fino
- HUMEDAD : 8% - 10%
- PH : 6.0 - 8.0
- COLOR : MARRON – PLOMO
- DENSIDAD : 1.49 a 1.51 TM/m<sup>3</sup>
- OLOR : INODORO

**3. SOLUBILIDAD:** La Solubilidad en ácido cítrico del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contenido en la roca fosfórica de Fosyeiki, es de 13.51% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que equivale al 60% del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total contenido en la muestra, lo que la clasifica como la MAS REACTIVA DE LAS ROCAS FOSFORICAS CONOCIDAS A NIVEL MUNDIAL.

**4. PRESENTACION:** granulada tipo arena, 100% por malla #20.

**5. EMPAQUE:** Saco de polipropileno laminado de 50 Kilos.

**Figura 19.** Ficha técnica de la roca fosfórica Fosyeiki parte (a)

**6. CERTIFICACION ORGANICA:**

Para producción orgánica, certificado por

- **CONTROL UNION PERU SAC No. CU810911**  
Confirmación de compatibilidad  
Uso de Insumos en Produccion Orgánica.
- **CONTROL IMO SUIZA**  
Registro en la lista de insumos para la Agricultura Orgánica.

- 7. MUESTREO Y TRAZABILIDAD:** La Empresa realiza muestreos permanentes a la roca fosfórica explotada y al producto final, garantizando el permanente seguimiento a los productos en proceso y despachados, mediante un estricto cumplimiento de los procedimientos de trazabilidad implementados dentro del Sistema de Gestión de Calidad. Igualmente, garantiza el peso exacto de los sacos mediante el uso de básculas y patrones calibrados y certificados por Empresas especializadas en metrología y la capacitación de sus colaboradores.
- 8. USOS:** La Roca Fosfórica es un acondicionador de suelos, que se utiliza en forma directa para todo tipo de cultivo. Su principal elemento (P2O5) es indispensable para el enraizamiento de las plantas, da resistencia contra las enfermedades y plagas, regula el pH de los suelos ácidos, mejorando la fructificación en forma natural.

**Figura 20.** Ficha técnica de la roca fosfórica Fosyeiki parte (b)



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
Carretera Central Km1.21 - Tingo María - CELULAR 941531359  
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología  
[analisisdesuelosunos@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosunos@hotmail.com)



## ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE:				MALCA QUEZADA MARIA ESMILDA										PROCEDENCIA:		HUANUCO - LEONCIO PRADO - RUPA RUPA - INVERNADERO UNAS										
N°	COD. LAB.	REFERENCIA		Textura	pH	CE	M.O.	N	P	K	Zn	Cu	Cd	Cd	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	% Bas. Camb.	% Ac. Camb.	% Sat. Al	
		TRAT	REP		1.1	mS/cm	%	%	disponible							total	Ca	Mg	K	Na	Al					H
									ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm												
1	S0766	T1	R1	Franco Arenoso	5.30	0.20	1.91	0.10	4.15	91.31	6.92	1.72	0.030	0.120	---	1.59	0.60	--	--	0.20	0.05	2.44	89.73	10.27	8.21	
2	S0767	T1	R2	Franco Arenoso	5.28	0.22	1.91	0.10	4.83	54.88	6.68	1.60	0.040	0.105	---	1.58	0.61	--	--	0.30	0.05	2.54	86.22	13.78	11.81	
3	S0768	T1	R4	Franco Arenoso	5.29	0.22	1.84	0.09	5.77	71.47	6.32	2.03	0.036	0.128	---	1.60	0.62	--	--	0.25	0.12	2.58	85.67	14.33	9.68	
4	S0769	T2	R2	Franco Arenoso	5.12	0.20	1.98	0.10	5.77	77.17	7.08	1.70	0.040	0.126	---	1.64	0.67	--	--	0.18	0.15	2.64	87.49	12.51	6.82	
5	S0770	T2	R4	Franco Arenoso	5.20	0.22	1.91	0.10	4.66	60.12	6.56	1.67	0.036	0.090	---	1.63	0.68	--	--	0.15	0.23	2.69	85.87	14.13	5.58	
6	S0771	T2	R6	Franco Arenoso	5.27	0.19	1.84	0.09	4.24	79.37	6.84	1.77	0.040	0.105	---	1.61	0.63	--	--	0.17	0.16	2.57	87.13	12.87	6.63	
7	S0772	T3	R3	Franco Arenoso	4.52	0.66	1.78	0.09	3.98	204.91	7.28	1.42	0.040	0.115	---	1.66	0.69	--	--	0.39	0.29	3.03	77.52	22.48	12.89	
8	S0773	T3	R4	Franco Arenoso	4.53	0.28	1.84	0.09	7.81	52.73	7.12	1.20	0.024	0.075	---	1.69	0.68	--	--	0.28	0.25	2.90	81.73	18.27	9.65	
9	S0774	T3	R5	Franco Arenoso	4.70	0.50	1.78	0.09	4.83	57.02	7.00	1.42	0.032	0.075	---	1.70	0.66	--	--	0.45	0.20	3.01	78.40	21.60	14.95	
10	S0775	T4	R4	Franco Arenoso	4.72	0.52	1.58	0.08	3.96	158.58	8.32	1.48	0.028	0.060	---	1.75	0.70	--	--	0.46	0.14	3.06	80.37	19.63	15.05	
11	S0776	T4	R5	Franco Arenoso	4.53	0.54	1.32	0.07	5.77	244.89	6.08	1.40	0.032	0.060	---	1.78	0.71	--	--	0.44	0.18	3.11	80.04	19.96	14.16	
12	S0777	T4	R6	Franco Arenoso	4.48	0.53	1.38	0.07	5.51	157.48	8.56	0.75	0.012	0.060	---	1.75	0.70	--	--	0.40	0.08	2.93	83.59	16.41	13.68	

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

TINGO MARIA, 15 DE OCTUBRE 2020

Juan G. Manóvilis Miroso  
 IEFK

Figura 21. Análisis químico del suelo parte (a)



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Carretera Central Km1.21 - Tingo María - CELULAR 941531359

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

[analisisdesuelosunas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosunas@hotmail.com)

# ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:				MALCA QUEZADA MARIA ESMILDA										PROCEDENCIA		HUANUCO - LEONCIO PRADO - RUPA RUPA - INVERNADERO UNAS										
N°	COD. LAB.	REFERENCIA		Textura	pH		CE	M.O.	N	P	K	Zn	Cu	Cd	Cd	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	% % %		
		TRAT	REP		1.1	mS/cm	%	%	disponible						total		Ca	Mg	K	Na	Al	H		Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al
									ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm												
13	S0778	T5	R1	Franco Arenoso	5.53	3.06	1.05	0.05	43.76	86.81	11.40	1.72	0.428	0.763	5.46	2.46	1.05	0.15	1.80	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
14	S0779	T5	R4	Franco Arenoso	5.50	3.41	1.19	0.06	33.99	81.71	9.32	1.67	0.408	0.752	5.55	2.45	1.04	0.16	1.90	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
15	S0780	T5	R5	Franco Arenoso	5.57	3.29	1.25	0.06	33.31	103.10	10.12	1.78	0.438	0.818	5.16	2.44	1.00	0.14	1.58	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
16	S0781	T6	R1	Franco Arenoso	5.60	2.79	1.38	0.07	66.79	83.61	9.48	1.56	0.412	0.777	5.92	2.48	1.08	0.19	2.17	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
17	S0782	T6	R5	Franco Arenoso	5.59	3.19	1.19	0.06	66.88	124.30	9.84	1.58	0.448	0.765	5.66	2.47	1.05	0.19	1.95	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
18	S0783	T6	R6	Franco Arenoso	5.62	3.07	1.25	0.06	42.83	100.66	8.24	1.44	0.408	0.785	5.59	2.48	1.06	0.20	1.85	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
19	S0784	T7	R2	Franco Arenoso	5.61	2.91	1.85	0.09	65.27	88.61	8.88	1.46	0.404	0.745	6.06	2.50	1.10	0.20	2.26	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
20	S0785	T7	R3	Franco Arenoso	5.60	3.97	1.25	0.06	65.86	89.26	5.84	1.56	0.390	0.724	6.01	2.49	1.10	0.22	2.20	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
21	S0786	T7	R5	Franco Arenoso	6.19	3.38	1.25	0.06	66.12	85.31	17.32	1.53	0.376	0.694	5.95	2.49	1.12	0.20	2.14	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
22	S0787	T8	R1	Franco Arenoso	5.70	2.89	1.19	0.06	68.41	90.61	11.40	1.68	0.353	0.715	6.25	2.53	1.13	0.24	2.36	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
23	S0788	T8	R2	Franco Arenoso	5.60	2.75	1.12	0.06	50.31	94.11	9.60	1.54	0.384	0.746	6.20	2.52	1.14	0.23	2.31	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
24	S0789	T8	R3	Franco Arenoso	5.60	3.63	1.05	0.05	67.22	99.81	9.88	1.56	0.344	0.745	6.36	2.53	1.14	0.23	2.45	-	-	-	100.00	0.00	0.00	

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

TINGO MARIA, 15 DE OCTUBRE 2020

Leoncio Prado  
 M. Sc. Leoncio Prado  
 I.E.F.F.

Figura 22. Análisis químico del suelo parte (b)



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
 Carretera Central Km1.21 - Tingo Maria - CELULAR 941531359  
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología  
[analisisdesuelosunas@hotmail.com](mailto:analisisdesuelosunas@hotmail.com)



## ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE:				MALCA QUEZADA MARIA ESMILDA										PROCEDENCIA:		HUANUCO - LEONCIO PRADO - RUPA RUPA - INVERNADERO UNAS										
N°	COD. LAB.	REFERENCIA		Textura	pH	CE	M.O.	N	P	K	Zn	Cu	Cd	Cd	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	% Bas. Camb.	% Ac. Camb.	% Sat. Al	
		TRAT	REP		1.1	mS/cm	%	%	disponible							total	Ca	Mg	K	Na	Al					H
									ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm												
25	S0790	T9	R1	Franco Arenoso	5.84	3.56	1.05	0.05	84.47	129.79	10.92	1.71	0.888	1.547	7.61	3.66	1.18	0.28	2.50	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
26	S0791	T9	R4	Franco Arenoso	5.88	3.49	0.99	0.05	85.15	109.90	10.84	1.58	0.820	1.482	7.61	3.65	1.18	0.29	2.49	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
27	S0792	T9	R5	Franco Arenoso	5.87	3.64	1.12	0.06	83.62	151.68	10.68	1.78	0.956	1.260	7.68	3.63	1.18	0.30	2.57	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
28	S0793	T10	R3	Franco Arenoso	5.77	3.78	0.79	0.04	95.27	269.33	11.20	2.10	0.733	1.275	7.77	3.68	1.19	0.32	2.57	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
29	S0794	T10	R5	Franco Arenoso	5.90	3.92	0.82	0.04	83.03	121.10	12.60	1.70	0.784	1.095	7.23	3.65	1.19	0.31	2.08	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
30	S0795	T10	R6	Franco Arenoso	5.85	3.86	0.86	0.04	93.23	125.89	11.72	1.63	0.724	1.280	7.87	3.66	1.21	0.32	2.69	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
31	S0796	T11	R1	Franco Arenoso	5.84	4.21	0.79	0.04	86.26	130.54	11.84	1.78	0.788	1.251	7.82	3.68	1.24	0.34	2.56	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
32	S0797	T11	R2	Franco Arenoso	5.76	4.37	0.72	0.04	83.03	125.89	11.56	1.78	0.744	1.050	8.05	3.69	1.24	0.37	2.75	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
33	S0798	T11	R4	Franco Arenoso	7.85	3.94	0.76	0.04	81.92	118.60	10.48	1.72	0.750	1.184	7.67	3.68	1.23	0.35	2.41	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
34	S0799	T12	R1	Franco Arenoso	5.75	4.07	0.59	0.03	89.91	209.86	16.36	1.46	0.620	1.185	7.87	3.87	1.26	0.35	2.39	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
35	S0800	T12	R2	Franco Arenoso	5.83	4.07	0.53	0.03	89.91	125.20	24.20	1.34	0.668	1.050	7.43	3.85	1.25	0.40	1.93	-	-	-	100.00	0.00	0.00	
36	S0801	T12	R5	Franco Arenoso	5.84	4.08	0.58	0.03	89.91	135.44	22.44	1.48	0.616	0.945	7.70	3.88	1.27	0.42	2.13	-	-	-	100.00	0.00	0.00	

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

TINGO MARIA, 15 DE OCTUBRE 2020

  
 Leoncio Prado  
 Ing. Agrónomo  
 I.E.F.A.

Figura 23. Análisis químico del suelo parte (c)



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
 Facultad de Agronomía – Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología  
 Carretera Central Km 1.21 – Tingo María – Celular 941531359  
 analisisdesuelosunas@hotmail.com



## ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:		MALCA QUEZADA MARIA ESMILDA				PROCEDENCIA	INVERNADERO DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA-RUPA RUPA - LEONCIO PRADO - HUANUCO									
MUESTRA		PLANTULAS DE CACAO														
DATOS DE LA MUESTRA						RESULTADOS EN BASE SECA ( DIGESTION HUMEDA CON NITRICO PERCLORICO 4:1)										
Referencia						PORCENTAJE (%)					PARTES POR MILLON (ppm)					
Nº	Código	Trat	Repet	(ppm) Cd	(mg) Zn	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Fe ppm	Mn ppm	Cu ppm	Pb ppm	Cd ppm	Zn ppm
1	205	T1	R1	0 ppm Cd	0 mg Zn	0.193	0.221	1.092	0.902	0.721	12007.697	1886.745	10.083	6.497	0.887	33.262
2	206	T1	R2	0 ppm Cd	0 mg Zn	0.181	0.275	1.127	0.889	0.511	10997.251	1637.091	7.023	4.624	0.900	35.804
3	207	T1	R4	0 ppm Cd	0 mg Zn	0.115	0.178	1.408	1.127	0.638	9249.538	2423.379	5.350	5.920	0.980	38.774
4	208	T2	R2	0 ppm Cd	40 mg Zn	0.153	0.262	1.039	1.148	0.413	11625.000	1912.500	8.175	6.875	0.913	66.213
5	209	T2	R4	0 ppm Cd	40 mg Zn	0.209	0.326	1.228	1.458	0.551	10871.195	1961.813	8.385	3.749	1.075	68.226
6	210	T2	R6	0 ppm Cd	40 mg Zn	0.173	0.309	1.264	1.175	0.659	8623.706	2362.146	8.036	4.249	0.962	69.465
7	211	T3	R3	0 ppm Cd	80 mg Zn	0.236	0.296	1.062	1.362	0.350	7624.619	2849.858	8.462	3.500	1.037	68.497
8	212	T3	R4	0 ppm Cd	80 mg Zn	0.254	0.296	1.098	1.635	0.414	7998.000	3536.616	8.885	5.374	1.138	79.980
9	213	T3	R5	0 ppm Cd	80 mg Zn	0.224	0.295	1.050	1.044	0.493	8375.000	3387.500	7.800	2.375	1.063	76.825
10	214	T4	R4	0 ppm Cd	120 mg Zn	0.210	0.350	1.014	1.487	0.286	7249.275	3437.156	8.399	4.250	1.200	80.867
11	215	T4	R5	0 ppm Cd	120 mg Zn	0.269	0.330	1.074	1.816	0.390	5625.000	3350.000	8.788	3.500	1.375	78.775
12	216	T4	R6	0 ppm Cd	120 mg Zn	0.256	0.358	1.006	2.109	0.314	10124.494	3199.840	8.787	5.000	1.250	79.721

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
 TINGO MARIA, 15 DE OCTUBRE 2020

Leticia C. Manaylla Mimoso  
 I.E.F.F.



**Figura 24.** Análisis especial de los plantones de *Theobroma cacao* parte (a)



## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

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

*Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - Celular 941531359*

*analisisdesuelostmas@hotmail.com*



# ANÁLISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:		MALCA QUEZADA MARIA ESMILDA				PROCEDENCIA	INVERNADERO DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA-RUPA RUPA - LEONCIO PRADO - HUANUCO																
MUESTRA		PLANTULAS DE CACAO				RESULTADOS EN BASE SECA ( DIGESTION HUMEDA CON NITRICO PERCLORICO 4:1)																	
DATOS DE LA MUESTRA						PORCENTAJE (%)											PARTES POR MILLON (ppm)						
N°	Código	Referencia				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Fe ppm	Mn ppm	Cu ppm	Pb ppm	Cd ppm	Zn ppm							
		Trat	Repet	(ppm) Cd	(mg) Zn																		
13	217	T5	R1	0.5 ppm Cd	0 mg Zn	0.530	0.488	1.621	1.147	2.221	13498.650	3774.623	10.824	4.500	13.611	56.807							
14	218	T5	R4	0.5 ppm Cd	0 mg Zn	0.553	0.436	1.910	1.523	1.670	6998.250	4773.807	9.248	4.749	11.760	52.237							
15	219	T5	R5	0.5 ppm Cd	0 mg Zn	0.462	0.468	1.541	0.761	3.345	6375.000	3762.500	7.588	2.500	9.563	41.525							
16	220	T6	R1	0.5 ppm Cd	40 mg Zn	0.540	0.490	1.684	1.589	1.902	4999.750	4362.282	12.362	5.625	15.599	74.821							
17	221	T6	R5	0.5 ppm Cd	40 mg Zn	0.557	0.474	1.612	1.406	2.009	8497.026	4373.469	9.809	4.373	13.783	72.612							
18	222	T6	R6	0.5 ppm Cd	40 mg Zn	0.507	0.474	1.645	1.511	2.596	7124.288	4687.031	8.487	2.875	14.599	73.430							
19	223	T7	R2	0.5 ppm Cd	80 mg Zn	0.659	0.474	1.889	1.507	1.211	6999.300	5586.941	9.512	3.500	15.411	78.955							
20	224	T7	R3	0.5 ppm Cd	80 mg Zn	0.519	0.499	1.673	1.863	1.792	3624.456	5574.164	12.223	3.499	13.248	77.663							
21	225	T7	R5	0.5 ppm Cd	80 mg Zn	0.499	0.491	1.164	1.473	1.168	4625.000	6037.500	11.275	1.750	9.050	71.688							
22	226	T8	R1	0.5 ppm Cd	120 mg Zn	0.559	0.539	1.322	1.620	1.460	5999.700	7187.141	11.474	2.750	9.462	82.283							
23	227	T8	R2	0.5 ppm Cd	120 mg Zn	0.558	0.543	1.435	1.268	1.184	4374.344	7611.358	12.198	3.000	12.723	80.225							
24	228	T8	R3	0.5 ppm Cd	120 mg Zn	0.562	0.505	1.606	2.081	1.342	5123.719	7894.276	12.172	5.749	13.769	84.316							

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
TINGO MARIA, 15 DE OCTUBRE 2020

  
 Lic. Malca Quezada Maria Esmilda  
 IFFC



Figura 25. Análisis especial de los plantones de *Theobroma cacao* parte (b)





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
 Facultad de Agronomía – Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología  
 Carretera Central Km 1.21 – Tingo María – Celular 941531359  
 analisisdesuelosunas@hotmail.com



## ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:		MALCA QUEZADA MARIA ESMILDA				PROCEDENCIA	INVERNADERO DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA-RUPA RUPA - LEONCIO PRADO - HUANUCO															
MUESTRA		PLANTULAS DE CACAO				RESULTADOS EN BASE SECA ( DIGESTION HUMEDA CON NITRICO PERCLORICO 4:1)																
DATOS DE LA MUESTRA						PORCENTAJE (%)											PARTES POR MILLON (ppm)					
N°	Código	Referencia				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Fe ppm	Mn ppm	Cu ppm	Pb ppm	Cd ppm	Zn ppm						
		Trat	Repet	(ppm) Cd	(mg) Zn																	
25	229	T9	R1	1 ppm Cd	0 mg Zn	0.734	0.533	1.579	1.226	5.694	7047.018	6032.247	13.277	5.356	17.195	63.620						
26	230	T9	R4	1 ppm Cd	0 mg Zn	0.312	0.516	1.546	1.190	5.517	8033.314	7705.423	14.263	5.246	17.001	55.807						
27	231	T9	R5	1 ppm Cd	0 mg Zn	0.762	0.490	3.206	1.253	5.398	10257.725	3269.650	14.970	7.693	19.201	68.727						
28	232	T10	R3	1 ppm Cd	40 mg Zn	0.533	0.572	2.744	2.139	5.531	9374.208	13147.327	12.985	6.093	26.412	124.396						
29	233	T10	R5	1 ppm Cd	40 mg Zn	0.855	0.587	1.805	1.361	5.874	4814.397	7952.055	16.933	4.482	19.673	86.028						
30	234	T10	R6	1 ppm Cd	40 mg Zn	0.665	0.469	1.542	1.221	3.701	9382.759	5831.745	14.074	4.186	18.145	77.415						
31	235	T11	R1	1 ppm Cd	80 mg Zn	0.990	0.771	1.914	1.987	6.161	9390.525	12056.222	19.569	11.511	22.810	137.829						
32	236	T11	R2	1 ppm Cd	80 mg Zn	0.769	0.546	2.174	1.869	4.376	6350.550	8763.760	14.162	7.621	21.063	122.354						
33	237	T11	R4	1 ppm Cd	80 mg Zn	0.599	0.410	1.487	1.190	4.049	7116.638	7435.014	13.091	5.806	17.380	94.839						
34	238	T12	R1	1 ppm Cd	120 mg Zn	0.813	0.620	1.937	1.559	4.519	5047.106	10052.153	16.172	3.154	15.940	120.331						
35	239	T12	R2	1 ppm Cd	120 mg Zn	0.876	0.588	1.531	2.228	3.769	5469.462	11303.555	17.844	5.014	21.764	134.777						
36	240	T12	R5	1 ppm Cd	120 mg Zn	0.706	0.537	1.566	1.346	5.228	10779.492	7495.116	13.171	3.537	12.161	104.174						

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE  
 TINGO MARIA, 15 DE OCTUBRE 2020

  
 Juan C. Mansilla Mino  
 IFFC



Figura 26. Análisis especial de los plantones de *Theobroma cacao* parte (c)



**Figura 27.** Diferencias entre raíz, tallo y hojas de los tratamientos T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> y T<sub>4</sub>



**Figura 28.** Diferencias entre raíz, tallo y hojas de los tratamientos T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub> y T<sub>8</sub>



**Figura 29.** Diferencias entre raíz, tallo y hojas de los tratamientos T<sub>9</sub>, T<sub>10</sub> y T<sub>11</sub>



**Figura 30.** Efecto de tres repeticiones del tratamiento T<sub>12</sub>



**Figura 31.** Medición de la longitud radicular del tratamiento T<sub>10</sub>

**- Determinación roca fosfórica para suplir los niveles de cadmio establecidos.**

Roca Fosfórica (RF)	=	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	20,33
	=	Cd	8,73
1Kg de (RF) .....		8,73 mg de Cd	
1 000 g de (RF) .....		8,73 mg de Cd	
1 000 000 mg de (RF) .....		8,73 mg de Cd	
<b>Entonces:</b>			
1 000 000 mg de (RF) .....		8,73 mg de Cd	
x .....		0,5 mg de Cd	
x =		57273,7 mg de (RF)	
		57,2737 g de (RF) .....	Para el Nivel 2
1 000 000 mg de (RF) .....		8,73 mg de Cd	
x .....		1 mg de Cd	
x =		114547,53 mg de (RF)	
		114,547 g de (RF) .....	Para el Nivel 3