

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



**FUENTES DE SILICIO EN LA ABSORCIÓN DEL CADMIO EN EL CULTIVO DE
(CACAO) *Theobroma cacao* L.**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:

EBER CALEB GONZALES SOBRADOS

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.

"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

N° 013 -2022-FA-UNAS

BACHILLER : **EBER CALEB GONZÁLES SOBRADOS**

TÍTULO : **"FUENTES DE SILICIO EN LA ABSORCIÓN DEL CADMIO EN EL CULTIVO DE (CACAO) *Theobroma cacao* L."**

JURADO CALIFICADOR

PRESIDENTE : Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
VOCAL : M.Sc. JOSÉ DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
VOCAL : M.Sc. CEILA PAQUITA LAO OLIVARES

ASESOR : Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 29/09/2022

HORA DE SUSTENTACIÓN : 10:00 a.m.

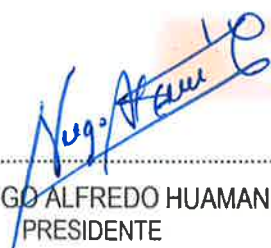
LUGAR DE SUSTENTACIÓN : Sala audiovisual- Facultad de Agronomía

CALIFICATIVO : Muy Bueno


RESULTADO : Aprobado

OBSERVACIONES A LA TESIS : En hoja adjunta

Tingo María, 29 de setiembre de 2022


.....
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
PRESIDENTE


.....
M.Sc. JOSÉ DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
VOCAL


.....
M.Sc. CEILA PAQUITA LAO OLIVARES
VOCAL


.....
Dr. JOSÉ WILFREDO ZAVALA SOLÓRZANO
ASESOR



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

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 025 - 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
FUENTES DE SILICIO EN LA ABSORCIÓN DEL CADMIO EN EL CULTIVO DE (CACAO) Theobroma cacao	EBER CALEB GONZALES SOBRADOS	18% Dieciocho

Tingo María, 08 de febrero 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

REGISTRÓ DE PROYECTO DE TESIS

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de Agronomía
Título de Tesis	: Fuentes de silicio en la absorción del cadmio en el cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i>)
Autor	: Eber Caleb Gonzales Sobrados
DNI	: 74213235
Correo electrónico	: eber.gonzales@unas.edu.pe
Asesor	: Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano
Escuela Profesional	: Agronomía
Programa de Investigación	: Suelos y fertilizantes
Línea (s) de Investigación	: Descontaminación de suelos y medio ambiente
Eje temático de investigación	: Reducción del contenido de cadmio
Lugar de Ejecución	: La morada
Duración del trabajo	: 12 meses
Fecha de Inicio	: Mayo - 2017
Término	: Mayo - 2018
Financiamiento	: S/. 4, 815. 00
FEDU	: NO
Propio	: SI
Otros	: NO

Tingo María - Perú Octubre, 2022

DEDICATORIA

A Dios por guiar mi camino y ser un pilar fundamental en mi formación de principios y valores, por su cuidado y sabiduría que siempre proveyó para lograr mis objetivos profesionales.

A mi madre TRINIDAD SOBRADOS y a mi papa GERONIMO GONZALES por ser ellos mi principal cimiento para la construcción de mi vida profesional y personal, sentó en mí la base de la responsabilidad y deseos de superación, por estar ahí cuando más lo necesite, por su gran apoyo emocional y económico para terminar mis estudios. Agradecimientos totales por siempre.

A mi esposa NERY VELEZ DE VILLA y mi hijo LUCAS GONZALES, mi eterno agradecimiento por brindarme su apoyo y amor incondicional, hasta terminar este maravilloso trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

- A Mi alma mater, Universidad Nacional Agraria de la Selva, por mi formación académica y profesional en estos años, así como también a los diferentes catedráticos que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante con mi carrera.
- Al Dr. José Wilfredo Zavala Solórzano, asesor de la presente tesis, por sus orientaciones, durante la ejecución, redacción y revisión de la tesis.
- A Los miembros del jurado de tesis: Dr. Hugo Alfredo Huamaní Yupanqui, Ing. M.Sc Ceila Paquita Lao Olivares e Ing. M.Sc. José Dolores Lévano Crisóstomo, presidente y miembros respectivamente, por su apoyo en la revisión, sugerencias y aporte al presente trabajo de investigación.
- A Todas las personas que formaron parte de esta etapa de mi vida.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1. Generalidades del cultivo de cacao.....	2
2.2. Área sembrada y rendimiento de cacao por regiones en el Perú	2
2.3. Generalidades del cadmio	4
2.4. Cadmio en el suelo.....	4
2.5. Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en la planta.....	5
2.6. Contaminación de cadmio en el cultivo del cacao en el Perú.....	6
2.7. Niveles de cadmio permitidos en las almendras de cacao	8
2.8. Silicio en la solución suelo	8
2.9. Silicio, absorción y distribución en la planta.....	9
2.10. Beneficios de aplicar silicio a los cultivos	9
2.11. Funciones del silicio en la planta	10
2.12. Eficiencia económica del silicio	11
2.13. Funciones de fertilizantes a base de silicio	11
2.14. Efectos del silicio sobre el cadmio en diferentes cultivares.	11
2.14.1. Efecto del silicio sobre cadmio en el cultivo de fresa.....	11
2.14.2. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de trigo	12
2.14.3. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de algodón.....	13
2.14.4. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de arroz	13
2.14.5. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de maní.....	14
2.14.6. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de maíz.....	14
2.14.7. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de cacao	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1. Lugar de ejecución.....	16
3.2. Material y métodos	16
- Características físico – químicas del suelo.....	16
- Componentes en estudio - Fuentes a base de silicio	17
- Diseño experimental.....	19
- Características del campo experimental	20
- Procesamiento de datos	21

-	Ejecución del experimento	21
	° Aplicación de las fuentes y niveles de silicio.....	22
	° Muestreo del suelo	22
	° Muestreo foliar	22
	° Muestreo de almendras de cacao.....	23
	° Metodología para determinar cadmio disponible en el suelo.....	23
	° Metodología para determinar de cadmio total en la planta por digestión húmeda.....	24
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
	4.1. Efecto del silicio en la reducción de cadmio total y disponible en el suelo.....	25
	4.1.1. Regresión lineal entre el contenido de cadmio total y disponible en suelo .	60
	4.2. Efecto del silicio en la reducción de cadmio en hojas y almendras de cacao.....	31
	4.2.1. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y hojas	36
	4.2.2. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y cadmio disponible en el suelo.....	37
	4.3. Análisis de rentabilidad de la aplicación de los tratamientos	38
V.	CONCLUSIONES	40
VI.	PROPUESTAS A FUTURO	41
VII.	REFERENCIAS	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Rendimiento (kg/ha) promedio de cacao a nivel nacional.	3
2. Análisis físico – químico del suelo experimental.....	16
3. Composición de la ceniza de arroz	17
4. Composición química de escoria siderúrgica – silicato de calcio (SiA)..	18
5. Descripción de los tratamientos.....	19
6. Esquema del análisis de variancia.	20
7. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) para la disminución de cadmio total y disponible suelo..	25
8. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0.05$) para los efectos del silicio en la reducción de cadmio total en el suelo	27
9. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0.05$) para los efectos del silicio en la reducción de cadmio disponible en el suelo.....	30
10. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) para la disminución de cadmio en hojas y cadmio en almendra de cacao.....	32
11. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0.05$) para los efectos de silicio en la reducción de cadmio en hojas cacao..	34
12. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0.05$) para los efectos de silicio en la reducción de cadmio en almendras de cacao.	36
13. Análisis de rentabilidad de la aplicación de fuentes y niveles de silicio.....	39
14. Datos del análisis de cadmio total y disponible en suelos (ppm)..	51
15. Datos del análisis de cadmio en hojas y almendras del cultivo de cacao.....	51
16. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio total en suelo.....	52
17. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio disponible en suelo.	52
18. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio en hojas del cultivo de cacao.....	52
19. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio en almendras del cultivo de cacao	52
20. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio total en suelo.....	53
21. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio disponible en suelo.	53
22. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio en hojas del cultivo de cacao.....	54
23. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio en almendras del cultivo de cacao.....	54
24. Detalles del costo de producción del experimento	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Fenología del cacao.	2
2. Área sembrada de cacao en el Perú.	3
3. Esquema del ingreso del cadmio a través de las células de la raíz, hasta llegar al xilema.	6
4. Regresión lineal entre el contenido de cadmio disponible y cadmio total en suelo. ...	31
5. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y hojas.	37
6. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y cadmio disponible en suelo.	38
7. Cálculo de peso efectivo de suelo para la aplicación de las fuentes por planta.	56
8. Cálculo del requerimiento de las fuentes según su concentración de escoria siderúrgica – silicato de calcio (SiA)	57
9. Cálculo para dispersión a base de ceniza de cascarilla de arroz, según las concentraciones a aplicar para cada tratamiento.	57
10. Cálculo para escoria siderúrgica – silicato de calcio, según las concentraciones para aplicar a cada tratamiento.	58
11. Dilución y la cantidad para cada planta según los tratamientos en las dos aplicaciones de dispersión a base de ceniza de cascarilla de arroz.	58
12. Dilución y la cantidad para cada planta según los tratamientos en las dos aplicaciones de Escoria siderúrgica – silicato de calcio.	59
13. Cálculos de las cantidades usadas en la fertilización con N-P-K (120-25-120).	59
14. Dilución y la cantidad para cada planta según los tratamientos en las dos aplicaciones de silicato de potasio.	60
15. Selección del terreno y demarcación de los bloques y tratamientos.	61
16. Preparación de las fuentes de silicio para su aplicación en campo.	61
17. Muestreo de los frutos por tratamiento y bloque de forma ordenada y se utilizó un machete para realizar el quiebre de la mazorca.	62
18. Extracción de los granos y su posterior empaque, para luego fermentarlo y secarlo.	62
19. Secado de los granos de cacao y molienda con el mortero.	63
20. Secado de las muestras de suelo y enrrazamiento con agua destilada a 50 ml.	63
21. Agregando ácido a las muestras para la determinación de cadmio total.	64
22. Diferentes etapas de los análisis de cadmio total, en almendras, hojas y suelo.	64

RESUMEN

Con el objetivo de encontrar el mejor efecto de las fuentes de silicio en la absorción de cadmio en el suelo, hojas y almendras en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*). Se instaló el presente trabajo de investigación, Ubicada en el centro de la ciudad de La Morada, Distrito de Cholón, Provincia de Maranhón, Provincia de Huánuko, en el margen izquierdo del río Huallaga, a 100 kilómetros de Tingo María, coordenadas UTM: 9033607 metros norte, 363590 metros este, 530 metros sobre el superficie. del océano, donde se estableció un diseño de bloques completamente al azar que consta de 11 tratamientos y 4 repeticiones con variables fijas como cantidad de fuente de silicio a 144, 287 y 575 kg/ha y varianza en base a ceniza de cascarilla de arroz a 224, 447 y 894 kg. /ha ha escoria siderúrgica - silicato cálcico y 1, 2 y 3 l/ha silicato potásico, control fertilizante y control absoluto. Como resultado se obtuvo que la aplicación de 894 kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio (T₆) y 144, 575 y 287 kg/ha de dispersión de ceniza de cascarilla de arroz (T₁), (T₃) y (T₂), obtuvieron el mejor efecto sobre la reducción del cadmio disponible en el suelo, al presentar concentraciones de 0,20; 0,21; 0,22 y 0,23 ppm, comparado con el testigo absoluto que llego acumular 0,35 ppm, teniendo una disminución del 43, 42, 41 y 40 %. Así mismo, la aplicación de 2 L/ha silicato de potasio y 894 kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio, obtuvieron el mejor efecto en la reducción del contenido de cadmio total en hojas, al presentar concentraciones de 1,46 y 1,58 ppm, comparado con el testigo absoluto que llego acumular 4,53 ppm, teniendo una disminución del 68 y 65 %. Por último la aplicación de 3 y 2 L/ha silicato de potasio, 447 y 894 kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio y 287 kg de dispersión de ceniza de cascarilla de arroz, obtuvieron el mejor efecto en la reducción del contenido de cadmio total en las almendras, al presentar concentraciones de 0,60; 0,64; 0,68; 0,78 y 0,85 ppm, comparado con el testigo absoluto que llego acumular 2,15 ppm, teniendo una disminución del 72, 70, 68, 64 y 60 %.

Palabras Claves: Niveles; Silicato de calcio; Almendras, Silicato de potasio; Escoria siderúrgica.

ABSTRACT

With the objective of finding the best effect from the silicon sources in the absorption of cadmium from the soil, leaves, and beans of cacao crops (*Theobroma cacao*), the present research work was installed, with the location being the center of the city of La Morada en el Cholon district of the Maranhon province in the Huanuco province [of Peru], on the left bank of the Huallaga river, 100 kilometers from Tingo Maria with UTM coordinates of: 9033607 meters north, 363590 meters east, and 530 meters above sea level. A completely randomized block design was established, which was made up of eleven treatments and four repetitions, with fixed variables such as the silicon source at 144, 287, and 575 kg/ac and variants based on the rice hull ash at 224, 447, and 894 kg/ac; acres of steel slag – calcium silicate; and 1, 2, and 3 l/ac of potassium silicate; a fertilizer control; and an absolute control. For the results, it was obtained that the application of 894 kg/ac of steel slag – calcium silicate (T₆) and 144, 575, and 287 kg/ac of dispersed rice hull ash (T₁), (T₃), and (T₂), had the best effects on the reduction of the available cadmium in the soil, as concentrations of 0.20, 0.21, 0.22, and 0.23 ppm were presented, in comparison to the absolute control, which reached an accumulation of 0.35 ppm; with reductions of 43, 42, 41, and 40 %. At the same time, with the application of 2 L/ac of potassium silicate and 894 kg/ac of steel slag – calcium silicate, the best effect in the reduction of the total cadmium content in the leaves was obtained, with concentrations of 1.46 and 1.58 ppm, in comparison to the absolute control, which accumulated 4.53 ppm, with a reduction of 68 and 65 %. Finally, with the application of 3 and 2 L/ac of potassium silicate, 447 and 894 kg/ac of steel slag – calcium silicate, and the dispersion of 287 kg of rice hull ash, the best effect was obtained for the reduction of the total cadmium content in the beans, by presenting concentrations of 0.60, 0.64, 0.68, 0.78, and 0.85 ppm, in comparison to the absolute control which achieved an accumulation of 2.15 ppm, with a reduction of 72, 70, 68, 64, and 60 %.

Keywords: levels, calcium silicate, beans, potassium silicate, steel slag

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo del cacao es económicamente importante en nuestra región, pero el alto nivel de cadmio en las almendras y el suelo crea problemas para la exportación de este cultivo. Al evaluar el contenido de cadmio en granos de cacao en paquetes, se encontró que el contenido de este metal supera el valor permitido (0,5 ppm), lo que puede limitar la exportación de este producto agrícola. (Huamani et al., 2012). La Unión Europea ha publicado el Reglamento (UE) N° 488/2014, que establece el contenido máximo de cadmio en varios productos alimenticios, incluido el cacao y algunos productos derivados con un contenido total de cadmio en el rango de 0,05 a 0,8 ppm y aquellos productos alimenticios que no lo hagan cumplir con las normas anteriores, su comercio estará prohibido a partir del 1 de enero de 2019 (Unión Europea, 2014).

Debido a esta problemática se ha realizado diversos estudios con diferentes fuentes de silicio, en distintos países y diferentes cultivos, tales como el maíz, maní, arroz, fresa y trigo encontrando resultados de la disminución de cadmio en los granos, frutos y tejidos. En el Perú Estrada (2020) investigo en el cultivo de cacao aplicando ceniza de arroz (SiO_2 81%) 1 t/ha donde observo una disminución significativamente en el contenido de cadmio en suelo, hojas y almendras. Los suelos cacaoteros del distrito la Morada donde se desarrolló la investigación presentan bajo contenido de silicio asimilable (Ariza, 2019), esto podría dar respuesta al aumento de cadmio en el suelo y planta en el cultivo de cacao, tal como lo muestra el testigo absoluto de nuestra investigación quien presentó altas concentraciones en hojas y almendras, con lo manifestado en la problemática se procedió a investigar las diferentes fuentes que contienen silicio tales como la dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz, escoria siderúrgica y silicato de potasio, planteándose los siguientes objetivos, con el fin de encontrar resultados prácticos y económicos, siendo de mucha ayuda al pequeño agricultor de nuestra región.

Objetivo General

- Determinar la mejor fuente de silicio en la absorción de cadmio en el cultivo de cacao (*T. cacao*).

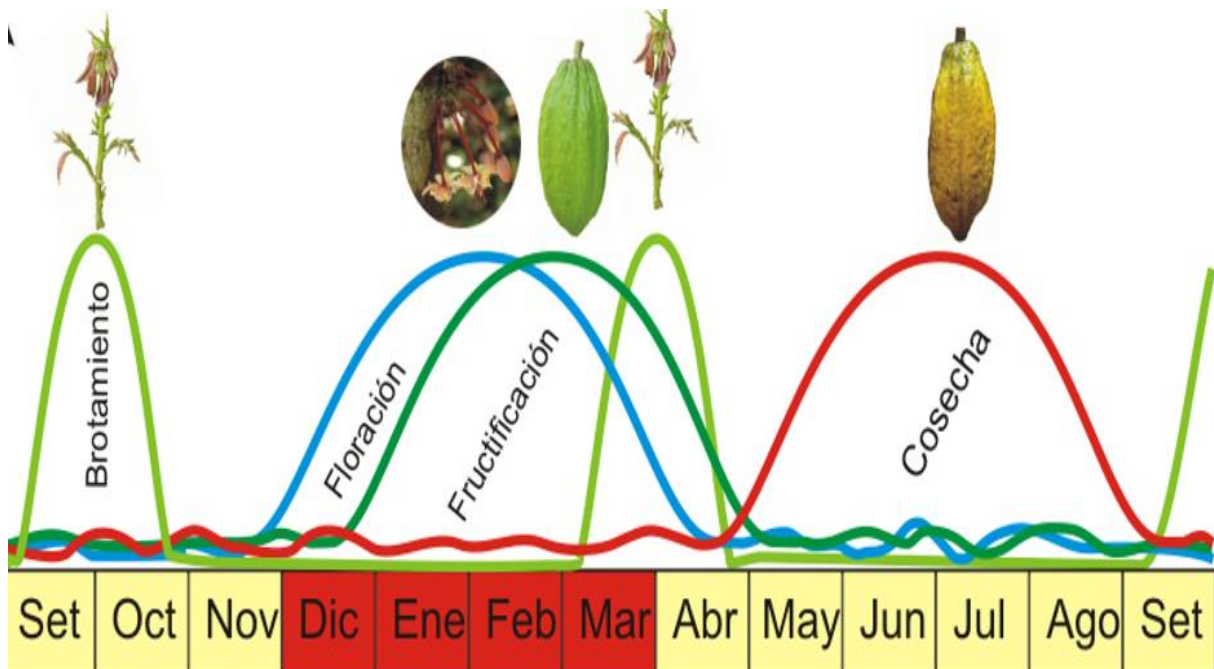
Objetivos Específicos

- Encontrar la mejor fuente de silicio que reduce la adsorción de cadmio disponible en el suelo del cultivo de cacao (*T. cacao*).
- Determinar la mejor fuente de silicio que reduce la absorción de cadmio en hojas y almendras en el cultivo de cacao (*T. cacao*).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del cultivo de cacao

Infoagro (2010), indica que el cacao es una planta originaria del trópico húmedo de América. Su centro de origen aparentemente está en la región amazónica del noroeste de América del Sur. Perteneció a la familia de las malvaceas y tiene el nombre botánico de *T. cacao*. Cabezas (2013), Mencionó que la época de floración, germinación y cosecha del cacao está regulada por el clima y por estos factores es importante la implementación de un calendario agroclimático para el óptimo desarrollo y producción del cultivo.

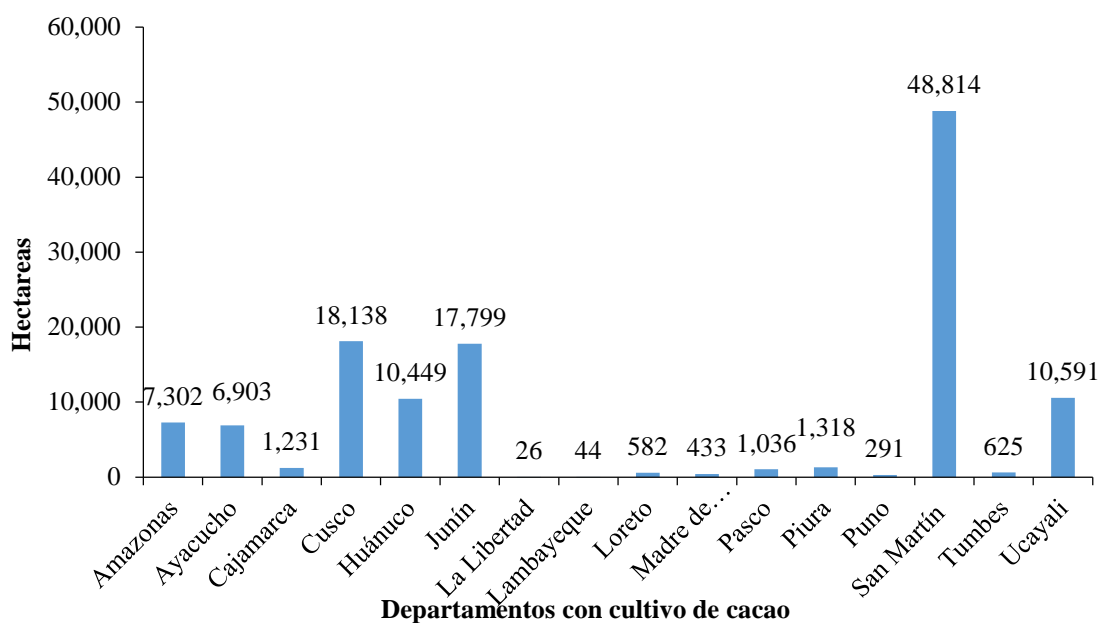


Fuente: Cabezas, 2013.

Figura 1. Fenología del cacao.

2.2. Área sembrada y su rendimiento de cacao por regiones en el Perú

Según el Anuario de campo escrito por el Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (SIEA, 2016) el cultivo de cacao está instalada en 16 departamentos, teniendo un área bastante amplia sembrada de 125 579,91 ha de las cuales el departamento de San Martín, tiene 48 813,51 ha, de esta manera siendo el departamento con más área de producción del Perú, en comparación con los demás departamentos en especial la Libertad que solo sembró hasta la actualidad 26 ha ya que el clima no es favorable (Figura 2).



Fuente: SIEA (2016).

Figura 2. Superficie sembrada de cacao en el Perú.

A nivel de nuestro país, los rendimientos (kg /ha) son bastante bajos, puesto que sin excepción luchan con un conjunto de restricciones similares en la etapa de producción, como la poca presencia de los servicios de investigación, capacitaciones, préstamos y asesoramiento técnico que deberían estar a cargo de ministerio de agricultura. En la Tabla 1, se presenta la productividad de las principales regiones productoras del cultivo cacao en el Perú (Lazo, 2013).

Tabla 1. Rendimiento (kg/ha) del cacao en los departamentos de mayor área sembrada.

Departamento	Año	
	2005	2006
Cajamarca	643	739
Amazonas	743	711
Huánuco	460	504
Junín	529	579
Ayacucho	688	673
San Martín	701	729
Ucayali	916	1540

Fuente: Ministerio de Agricultura (MINAG) y Programa para el Desarrollo de la Amazonía (PROAMAZONIA), 2008.

2.3. Generalidades del cadmio

El metal pesado cadmio es un elemento químico divalente con una masa atómica de 48 y una masa atómica de 112,41, un punto de fusión de 320,9 °C y un punto de ebullición de 767 °C. También es soluble en ácidos inorgánicos, forma sales apropiadas con ácidos inorgánicos y es insoluble en agua. Las principales emisiones naturales de cadmio suelen provenir de la actividad volcánica, el lavado de rocas y los incendios forestales. Las fuentes antropogénicas de cadmio incluyen la extracción de zinc (Zn), productos de combustión de carbón, escorias de amina, materiales de cátodo en baterías, producción de acero, fertilizantes y pesticidas. (Niño, 2015). El envenenamiento masivo se descubrió por primera vez en Japón en la década de 1970, cuando la contaminación por cadmio del cultivo de arroz entró en la cadena alimentaria y provocó una enfermedad llamada dolor que provocó insuficiencia renal grave y deformidades. hueso (Rábago, 2010).

2.4. Cadmio en el suelo

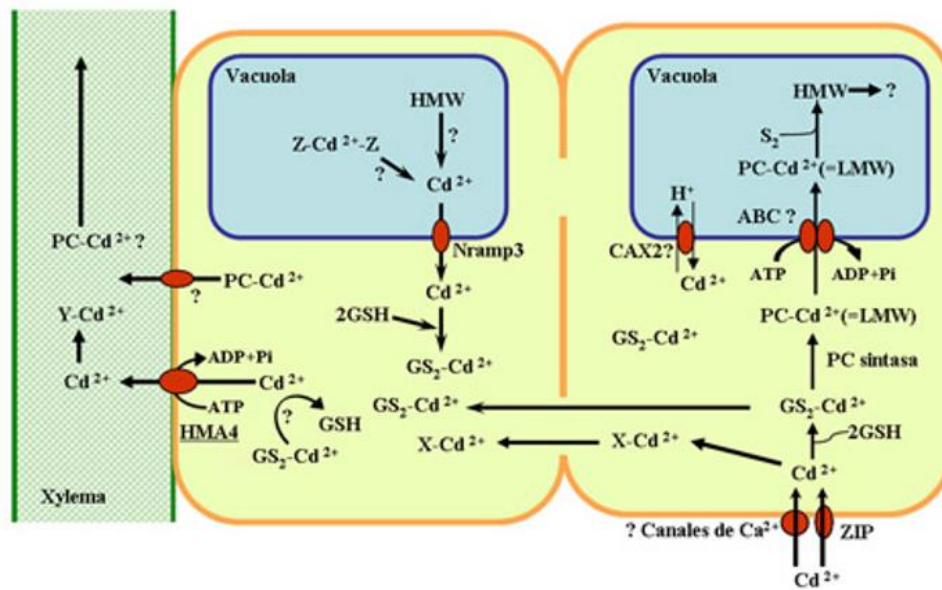
Se conoce que el factor primario que determina la concentración de cadmio en el suelo es la composición química de la roca madre. El contenido medio de cadmio en los suelos de zonas templadas del mundo, entre ellos países de Europa, Estados Unidos, Japón, Rusia, varía entre 0,06 y 1,1 ppm (Kabata-Pendias y Pendias, 2001), con un promedio mundial de 0,5 ppm (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007) sin embargo Kabata y Szeke (2015) mencionan que la concentración promedio de cadmio en el suelo para el mundo se estimó en 0,41 ppm, al parecer no incluyen suelos tropicales donde se cultivan el cacao. Ramtahal et al., (2016), analizaron muestras de suelos de 45 parcelas de cacao en Trinidad y Tobago a una profundidad de 0 a 30 cm hallando que la concentración de cadmio total fluctuó entre 0,3 y 1,7 ppm. Según Tóth et al., (2016) las concentraciones de cadmio muestran un patrón diverso en la capa aparente de uso de los suelos de la Unión Europea y la mayoría de las muestras (72,6 %) de Europa no mostraron concentraciones detectables de cadmio y sólo el 5,5 % de las muestras tienen concentraciones por encima del valor umbral. Ramírez (2002) menciona que el cadmio persiste en el suelo hasta por 300 años y el 90% permanece intacto, la vía por la cual el cadmio ingresa al suelo en áreas productivas es a través de escurrimientos (41%), fertilizantes fosforados (54%) y fertilizantes químicos (5%), y en el Perú ingresa a través de desechos líquidos y sólidos residuales de agua de tierra de la fábrica de hidrometalurgia de cadmio. Se estableció que la concentración de cadmio en el suelo contaminado era de hasta 1 mg Cd/g, mientras que la concentración de cadmio en el agua contaminada del río era de hasta 0,14 mg/L.

Se discute que las reacciones del cadmio con cada componente del suelo se verán afectado por factores tales como la textura, pH, materia orgánica, concentración y tipo de arcillas, capacidad de intercambio catiónico, carbonatos y óxidos del hierro y manganeso (Rodríguez-Serrano et al., 2008; Subero, 2013). En muchos países consideran concentración límite 2 mg/kg de cadmio total, aprobado para suelos de agricultura considerados “normales”. Además, las altas concentraciones aceptables de cadmio en suelos de producción agrícolas en los países de la Unión Europea, es de 3 mg/kg (Miranda et al., 2008).

2.5. Ingreso, traslado y almacenamiento del cadmio en la planta

Por ser un metal no esencial para las plantas se presume que no hay formas de entrada específicos. Según Clemens et al. (2002), hay algunas proteínas responsables del ingreso del cadmio a la célula, cabe señalar que es el transportador de calcio (LCT1), y la proteína IRT1, que están dentro de la familia de transportadores de Zn y Fe (ZIP) (Guerinot, 2000). La siguiente familia de transportadores encontrada es Nramp, que se encuentra en la membrana del tonoplasto, por lo que puede tener la función de mover el cadmio en lugar de transferirlo a la raíz (Thomine et al., 2000). Cuando el cadmio ingresa a las células, puede formar un complejo con ligandos S como el glutatión (GSH) o la fitoquelatina (PC) y con ácidos orgánicos como el ácido cítrico. Otras moléculas que pueden ser responsables del secuestro de cadmio son pequeñas proteínas ricas en cisteína llamadas metalotioneína (MT). De esta forma, el complejo cadmio-ligando puede transferirse al interior de la vacuola y a otras células (Shah y Nongkynrh, 2007).

En las plantas, el cadmio se encuentra principalmente enriquecido en las raíces, atrapado en las vacuolas celulares, y sólo una fracción muy pequeña se transfiere a las partes aéreas de las plantas, donde se acumula sucesivamente en tallos, hojas, frutos y semillas (Chan y Hale, 2004). El transportador de cationes ACAX, que participa en el transporte de calcio (Ca) hacia la vacuola, también transporta otros metales como el cadmio (Park et al., 2005). Una vez en la raíz, el cadmio puede trasladarse al xilema por medio del apoplasto y/o a través del simplasto produciendo complejos (Clemens et al., 2002). Se encontró que los efectos tóxicos del cadmio sobre las plantas, han sido bastante estudiados, sin embargo, la modalidad de su toxicidad aún no se sabe a ciencia cierta. Por último, el cadmio interfiere en el ingreso, traslado y empleo de elementos esenciales: Ca, magnesio (Mg), fósforo (P) y potasio (K) y del agua, generando inestabilidad nutricional e hídricos en la planta (Miranda et al., 2008).



Fuente: Clemens et al. (2002)

Figura 3. Gráfico de entrada del cadmio por medio de las células de la raíz, hasta entrar al xilema.

2.6. Contaminación de cadmio en el cultivo del cacao en el Perú

Los metales pesados como el cadmio y el plomo se encuentran naturalmente como minerales en la corteza terrestre, pueden ser absorbidos por las plantas y transportados por los consumidores, y pueden presentar riesgos para la salud. El cultivo de cacao absorbe metales pesados como el cadmio del suelo y los concentra en los granos de cacao (Huamaní-Yupanqui et al., 2012). La acumulación de metales pesados en el suelo está ligada a ciclos biológicos y geoquímicos que pueden verse alterados por actividades humanas como prácticas agrícolas, transporte, trabajo industrial, eliminación de desechos, etc. (Martínez y Palacio, 2010). Los cultivos de cacao absorben suavemente los metales pesados presentes de forma natural en el suelo y los acumulan en semillas aceitosas (Sayet, 2013). Además, se sabe que el cadmio se distribuye de manera desigual en el fruto del cacao y, en Ecuador, se encontró que los niveles más altos de cadmio se concentran en el jugo y la pulpa (mucílago) del cacao (International Plant Nutrition Institute [IPNI], 2015).

A través de la Cooperativa Agroindustrial Cabana Limitada (COOPAIN, 2011), el Informe. N° 03-2011-APS-COOPAIN, manifestó en su investigación que encontraron concentración de cadmio total en las almendras de cacao oscilo de 0,04 a 4,11 ppm con un promedio de 0,75 ppm para 71 muestras analizadas. En el suelo la concentración de cadmio disponible fluctuó de 0,089 a 3,028 ppm con un promedio de 0,55 ppm. En el informe también se muestra la concentración de cadmio (12,782 mg/kg), determinada en una muestra de roca

fosfórica que se utiliza para la fertilización de los suelos en la influencia de la COOPAIN, queda claro que este abono es una fuente de contaminación ya que estamos agregando 12,782 mg de cadmio por cada kilogramo de roca fosfórica que agregamos al suelo. El análisis del cadmio en la almendra, suelo y roca fosfórica se trabajó en el laboratorio Certificaciones del Perú S.A.(CERPER).

Technoserve Inc (TNS) y Centro de Innovación Tecnológica del Cacao (CITE CACAO, 2011) trabajaron una investigación en el cultivo de cacao donde recogieron muestras de suelos y tejidos para determinar el cadmio disponible en el suelo y cadmio total almendras. Encontrando que la concentración promedio del cadmio para los suelos del departamento de San Martín son 0,11 ppm. Mientras que la acumulación de cadmio en las almendras fue 1,33 ppm. La investigación presenta una diferencia de acumulación de cadmio para el suelo (0,11 ppm) siendo menor en comparación con el cadmio en la planta (1,33 ppm). Podría suponerse que en el suelo la concentración de cadmio debería ser mayor respecto a la planta, sin embargo, debe considerarse una exploración detallada y evaluar un supuesto de acumulación durante el tiempo en el tejido leñoso. Considerando que las muestras de almendras de cacao se tomaron del mismo lugar de donde se muestreo el suelo según la metodología de muestreo. Además, evaluaron la relación entre el contenido de cadmio del suelo y en las almendras de cacao. La ecuación de regresión lineal determinada fue: $Y = 0,4259 + 3,7406X$, en donde Y = concentración de cadmio en las almendras de cacao y X = es la concentración de cadmio en el suelo. El coeficiente de correlación (R^2) de 0,184 nos está indicando que sólo en el 18,4 % se tiene una relación dependiente entre el contenido de cadmio extraíble del suelo y el cadmio en las almendras.

Cárdenas (2012), investigó concentraciones de cadmio en 20 parcelas de cacao de producción orgánico, asociados a la COOPAIN. Las concentraciones de cadmio en hoja, almendra y cascarillas presentan una correlación baja, respecto al cadmio disponible en el suelo. Como resultado presenta concentraciones de cadmio disponible de 0,66 ppm en suelos, cadmio total en hojas 2,84 ppm, en almendras 1,55 ppm y cascarillas 2,04 ppm. Podríamos especular que la planta debería tener menor concentración de cadmio en la parte aérea respecto al contenido de cadmio en el suelo, sin embargo, en este estudio sucede lo contrario, es decir en el suelo se encontró bajo contenido de cadmio y en la planta (hoja, cascarilla, almendra sin cascarilla) fue elevada la concentración de cadmio.

Tantalean y Huauya (2017), en su estudio sobre el contenido de cadmio en el cultivo de cacao, en Jacintillo y Ramal en el departamento de San Martín. En la investigación. se encontró cadmio extraíble en el suelo residual de 1,71; 0,52 y 0,46 ppm, en los horizontes

A, AB y C; en suelo aluvial es de 1,26; 2,55; 3,68 y 1,80 ppm, horizonte A y capas AC, C1 y C2. La acumulación de cadmio en tejidos raíces, ramas, hojas, almendras y cáscaras, del suelo residual es de 1,22; 2,29; 1,44; 0,84 y 0,77 ppm y en el suelo aluvial es de 1,14; 2,97; 2,84; 1,08 y 0,75 ppm, El trabajo presenta que el suelo aluvial concentra altos niveles de cadmio disponible y la más alta concentración de cadmio total se reporta en las ramas, ya sea en suelo residual y aluvial.

2.7. Niveles de cadmio permitidos en las almendras de cacao

Subero (2013), menciona en la norma FAO/OMS (2007), la concentración máxima para almendras de cacao es de 0,5 ppm. De la misma forma la legislación Australiana y Neozelandes de metales pesados, resolvieron que la concentración máxima de cadmio para chocolates y derivados del cacao es de 0,5 ppm (Sayet, 2013). Por otro lado se enlisto concentraciones de cadmio entre 0,71 y 0,75 ppm en las almendras de cacao, viéndose que están por encima de los estándares entregados por la OMS siendo 0,50 ppm para granos de cacao (Lopes y Hoyos, 2016).

2.8. Silicio en la solución suelo

Es conocido que el ácido silícico (H_4SiO_4) es la forma como las plantas lo absorben. Se ha dado a conocer niveles de 3 a 37 mg/L de Silicio (Si) en solución en una extensa categoría de suelos normales (Azabache, 2003). Se sabe que el silicio del suelo existe en minerales como la arena, los silicatos y el ácido silícico líquido (SiA), la forma en que los organismos absorben el silicio. Por otro lado, el Si se considera asimilable y se conoce como un ion activo biológicamente activo. Reactivo, soluble o líquido. La concentración de SiAa en la naturaleza es de aprox. 50-400 ppm. Por lo tanto, la estructura del a-aluminosilicato mejora incl. agua, aire, intercambio iónico y mantiene un pH neutro. En el suelo, se liberan lentamente pequeñas cantidades de SiA del carbonato-silicato SiA producido por la respiración microbiana (Bent, 2003).

Por otro lado, el uso intensivo de la tierra afecta directamente al silicio en el suelo. El desarrollo intensivo del suelo reduce en gran medida el contenido de silicio (Quero, 2007). La falta de ácido monosilícico y la reducción del silicio amorfo provocaron la destrucción de complejos minerales orgánicos, aceleraron la descomposición de la materia orgánica del suelo y destruyeron sustancias minerales. Se recomienda el uso de fertilizantes minerales junto con el silicio para una agricultura sostenible y eficiente en todo tipo de suelos (Quero, 2008).

2.9. Silicio, absorción y distribución en la planta

Independientemente de la fuente de silicio, las plantas lo absorben a través de la reacción de monosilicatos con aluminio insoluble (Al), hierro, manganeso y calcio para formar silicatos que liberan iones ortofosfato, tal esquema ha sido documentado (Quero, 2007). Se requiere un cierto nivel de SiA (alrededor de 30-300 ppm) en el suelo para que las plantas utilicen el calcio. Por otro lado, el sistema vascular siliconizado favorece la sudoración; el agua, el calcio y otros minerales se distribuyen a aquellas partes de la planta donde la pérdida de agua es mayor. Las siliconas y los complejos de silicona aplicados sobre la cutícula y la epidermis de las hojas reducen de forma natural la pérdida de agua. Estos resultados positivos de SiA ayudan a las plantas a mantener el equilibrio hídrico de acuerdo con el medio ambiente. También produce una cutícula/cutícula más gruesa y flexible que es altamente resistente a hongos, insectos, herbívoros y estrés abiótico en el follaje (Bent, 2003).

Las fuentes que concentran en su riqueza el silicio activo, al ser depositado al suelo reaccionan con el agua convirtiéndose en ácido monosilícico, de esta forma es absorbido por las plantas, transportándose de manera rápida dentro de ella por medio del xilema. Por medio de la transpiración la planta pierde el agua absorbida por el silicio en el suelo y se inmoviliza en cristales de silicio, creando una barrera de protección, como “Resistencia mecánica” hacia las enfermedades. En el cultivo de arroz y maíz se ha corroborado que el silicio desarrolla una muy buena resistencia contra enfermedades como Rizoctonia, Pyricularia, Helmintosporium (Agromil, 2011).

2.10. Beneficios de aplicar silicio a los cultivos

Este elemento está presente en las plantas superiores en concentraciones equivalentes a los macronutrientes al igual que Ca, Mg y P de preferencia en las gramíneas el silicio se concentra en cantidades altas que cualquier otro elemento inorgánico a excepciones de algunas especies de algas (Aguirre et al. 2007).

El uso de fertilizantes minerales que contienen silicio tiene un doble efecto sobre el sistema suelo-planta. En primer lugar, aumenta la capacidad de almacenamiento y distribución de carbohidratos necesarios para el crecimiento y producción de cultivos (Quero, 2008). Una de las ventajas del silicio es que reduce el daño oxidativo de la membrana causado por el exceso de iones. Entre otras cosas, contribuye a la rigidez y flexibilidad de las paredes celulares porque forma parte de la estructura de las células y tejidos vegetales y, a menudo, se acumula para mejorar el crecimiento y la fertilidad del suelo (Quero, 2007).

Por otro lado, aumentan considerablemente la capacidad de intercambio catiónico del suelo, ayudando a bajar el pH a un nivel básico de 7,5 a 8,5. Sin embargo, el silicio no se considera un elemento esencial de las plantas, por lo que rara vez se incluye en la fertilización de cultivos, y las plantas con bajo contenido de silicio tienden a tener un crecimiento y desarrollo más débil y deficiente. . , vigor y anomalías reproductivas, más sensibles al estrés abiótico como la toxicidad por metales pesados (Aguirre et al. 2007). La aplicación materiales ricos en silicio reducen la toxicidad del aluminio en los suelos y mejor muy bien el pH, mejoran también la nutrición con P, Fe, K y Zn, conociendo que el silicio activa el intercambio catiónico y el transporte de nutrientes (Quero, 2008).

Las partes vegetativas de la planta tienen muchos beneficios al aplicar silicio, según Bent (2003), menciona que estos son los más importantes:

- Mayor crecimiento y desarrollo natural, plantas más resistentes y compactas.
- Hojas más resistentes, mayor fotosíntesis.
- Muy buena resistencia a los niveles de baja luz, estrés de agua y de temperatura.
- Defensa aumentada sobre las enfermedades, los insectos y herbívoros.
- Alta tolerancia a los metales pesados (condiciones salinas del suelo).

2.11. Funciones del silicio en la planta

Primera función del silicio es bajar de los tallos el oxígeno a la raíz arribando al parénquima oxidándolo de esta forma, la rizósfera (zona aledaña a la raíz) logran que el Fe y Mn reducido (forma en que lo absorbe la planta) se oxidada siendo esta forma poco absorbida por las plantas, lo que detiene una excesiva toma de estos nutrientes, ya que es tóxico para los cultivos. Segunda función, el silicio refuerza a la planta su suficiencia para distribuir carbohidratos pedidos para el crecimiento de sus órganos. Además al unirse con el Ca y Mg tienen acción sinérgica produciendo cosechas sanas (García y Navarro, 2003). Tercera función es que el silicio fomenta la estabilidad estructural, aumentando la resistencia a estrés abióticos y bióticos externos y la producción de biomasa vegetal (Ma, 2004; Shi et al., 2005; Epstein, 2009). Además, las moléculas de ácido monosilícico unidas se concentran en el tejido epidérmico, dando como resultado la formación de una capa de celulosa silíceas, donde el silicio se combina con la pectina y el calcio para formar una doble capa epidérmica que cubre y fortalece mecánicamente el cultivo. (Ma y Yamaji, 2006). El silicio es un componente esencial de las plantas y se distribuye de manera desigual en los diferentes órganos de las plantas, desde el 0,001 % en la pulpa hasta el 15-100 % en el tejido epidérmico. (Ma y Takahashi, 2002).

2.12. Eficiencia económica del silicio

Al estimar correctamente el ingreso bruto adicional promedio por Además del valor de no usar fungicidas artificiales, pesticidas, fertilizantes artificiales, también podemos ver los beneficios económicos generales. Reste de esto el costo de la fuente de silicio aplicable. Algunas estimaciones de productores son \$1,326/ha para zanahorias y \$890/ha para calabaza (usando zeolita y silicato de calcio duro, respectivamente). Los beneficios económicos potenciales del uso de fuentes de silicio para cultivos son significativos (Bent, 2003).

2.13. Funciones de fertilizantes a base de silicio

Las fuentes de fertilizantes a base de sílice juegan un papel doble en los sistemas suelo-planta, mejorando y aumentando la resistencia de los cultivos al estrés abiótico a largo plazo (altas y bajas temperaturas, viento, alta salinidad y acumulación de metales). hidrocarburos, aluminio). etc.) y organismos (insectos, hongos, enfermedades) controlan el desarrollo de las raíces, la absorción y distribución de nutrientes minerales esenciales a las plantas (Quero, 2007).

2.14. Efectos del silicio sobre el cadmio en diferentes cultivares.

La aplicación exógena del silicio disminuye la absorción de cadmio en tres partes de las plantas tales como raíces, tallo y hojas. Los posibles mecanismos de inhibición del transporte de metal en plantas tratadas con silicio son principalmente dos aspectos: (1) el silicio genera los depósitos de lignina en las paredes celulares e induce iones metálicos unidos a las paredes celulares, por lo tanto, reduce la translocación de los metales de las raíces a brotes. (2) La formación del complejo o co-precipitación de iones metálicos tóxicos con silicio. (Ma y Yamaji, 2006).

2.14.1. Efecto del silicio sobre cadmio en el cultivo de fresa

La aplicación de silicio en la fuente de silicato de potasio disminuyó significativamente la acumulación de cadmio en los tallos, hojas y frutos de las plantas de fresa, siendo la concentración de los tallos dos veces más al de las hojas, aunque no Influyen en la concentración de cadmio en las raíces, las plantas de suelo ligero y arenoso tienen una concentración más alta de cadmio en las raíces que las plantas cultivadas en suelo pesado y franco arenoso. Este resultado probablemente se relacionó con la menor capacidad de amortiguación de los suelos arenosos, por lo tanto, mayor disponibilidad de cadmio a las plantas (Treder y Cieslinski, 2006).

La ubicación y distribución del cadmio en raíces eran las mismas que las de silicio, esto sugiere que, si pueden desempeñar un papel importante en el metabolismo de cadmio en las plantas, especialmente en su inactivación metabólica (Treder y Cieslinski, 2006).

2.14.2. Efectos silicio sobre el cadmio en el cultivo de trigo

Greger et al. (2016), realizó estudios sobre la absorción de cadmio a nivel celular, en el cultivo de trigo, los cuales se cultivaron en presencia o ausencia de silicio con o sin cadmio, se dirigió bajo condiciones de invernadero. Los resultados indican que el silicio redujo la acumulación de cadmio en las plantas, especialmente en los brotes. El silicio redujo el transporte de cadmio en el citoplasma cuando se añadió silicio. Hallando que el gen IRT1, que se autorregula por cadmio fue regulado por silicio en la raíz y disipa facilitando el transporte de Fe en trigo. NRAMP1 se expresó de forma similar, aunque el efecto se limitó a las raíces. La suplementación de silicio junto con cadmio eliminó completamente la acumulación de cadmio en los brotes y redujo el 25 % en las raíces. Greger y Landberg (2008) menciona que el silicio, añadido como silicato y Sílice, reduce el contenido de cadmio hasta un 10% en los granos de Trigo y hasta el 50 % del contenido de cadmio se redujo en granos de trigo cultivado hidropónicamente, la razón de este efecto es que el silicio reduce la translocación de cadmio de raíces a los brotes, como se ha demostrado en el trigo y en especies de plantas.

Naeem et al., (2015) evaluó los efectos de la aplicación de silicio en el cultivo de trigo, estos fueron contaminados artificialmente con 10 mg kg-Cd y se trató con tres niveles de silicio (50, 100 y 150 mg/kg suelo), aplicado como el silicato cálcico (CaSiO_3), las plantas tratadas no mejoran la raíz ni aumenta la materia seca; sin embargo, aumentó significativamente el rendimiento de grano en la mayor tasa de aplicación de silicio (150 mg/kg suelo), además el silicio no sólo provocó una reducción lineal en el contenido del cadmio en brotes y granos, también disminuyó su translocación de las raíces a los brotes y granos.

Rizwan et al. (2012) evaluó los efectos de la aplicación de silicio amorfo en el cultivo de trigo bajo condiciones de invernadero, utilizando un suelo agrícola históricamente contaminado. Los resultados de las aplicaciones de SiA aumentaron la concentración de biomasa de plantas y redujeron el cadmio disponible en el suelo y la translocación de cadmio a los brotes, mientras que el cadmio fue más eficientemente secuestrado en raíces. Pero SiA está limitando la absorción de silicio por las plantas. Llegamos a la conclusión de que el silicio disponible en el suelo contribuye a la disminución de las concentraciones de cadmio en brotes de trigo y podría ser implementado en un esquema general con el objetivo de controlar las concentraciones de cadmio en trigo.

Greger y Landberg (2015) estudio en condiciones de campo, si la adición de silicio reduce la acumulación de cadmio en las partes comestibles de plantas de papa, zanahoria, cebolla y trigo en Noruega. Para lo cual se agregó silicio 500 kg/ha en la fuente de silicato de potasio líquido, la cual obtuvo los efectos más altos, debido a la alta disponibilidad del contenido de silicio en el suelo, reduciendo la concentración de cadmio a 91,8; 88,0; 78.7 y 93.4 % en las partes comestibles de la planta de papa, zanahoria, cebolla y trigo. Greger y Ofstedt (2004), en su investigación encontró una correlación baja entre la concentración de cadmio en el suelo y la concentración de cadmio en los granos de trigo. Esto quiere decir que el cadmio se transloca de las raíces a sus granos a diferentes grados dependiendo de los tipos de trigo.

2.14.3. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de algodón

Farooq et al. (2013) en su investigación encontró que el silicio disminuyó significativamente las concentraciones de cadmio en las tres partes de la planta de algodón, raíces, tallo y ramas, y su forma de acción del silicio es restringir la translocación de cadmio de las raíces a las partes aéreas de las plantas.

2.14.4. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de arroz

Shi et al. (2005) encontró en el cultivo de arroz que la aplicación de silicio al menos parcialmente bloquea físicamente el flujo de derivación del apoplasto a través de las raíces y frena el transporte apoplástico del cadmio. Esto reduce significativamente la concentración de cadmio en el simplasma y apoplasto en el cultivo, sin embargo, la información aún es escasa sobre las influencias del silicio en la distribución subcelular del cadmio en las plantas y su papel en la mejora de la tolerancia al cadmio.

Zhao y Masaihiko (2007) aplicó el silicato de calcio hidratado (PS) poroso es un subproducto del hormigón ligero en autoclave que se utiliza como fertilizante de silicio en Japón y se investigó su efecto sobre el cadmio en suelos aluviales, teniendo resultados que la aplicación de silicato de calcio en polvo seco en 2 % (p/p) provocó una reducción del contenido de cadmio de 86,8 % en la paja y de 81,5 % en el arroz integral. Chi et al. (2022) investigaron la aplicación de escoria de acero en el cultivo de arroz mitigaron la acumulación de cadmio en los granos y paja, se realizó una prueba de campo en cuatro temporadas del cultivo, la cual tuvo efectos positivos y sostenibles en la mitigación de la acumulación de cadmio en el grano y paja.

He et al. (2020), realizó experimentos de campo para estudiar los efectos de la escoria de acería (SS) entre 2,0 y 4,0 t/ha sobre la solubilidad de cadmio en el suelo y su acumulación por plantas de arroz cultivadas en arrozales históricamente contaminados con cadmio. Los resultados mostraron que la enmienda escoria de acería (4,0 t/ha) significativamente disminuyó las concentraciones solubles de cadmio en el agua intersticial. Además, la enmienda SS (4,0 t/ha) redujo notablemente las concentraciones de cadmio en los tejidos del arroz (raíces, paja y arroz integral) en un 48–78 % en ambas etapas, la translocación de cadmio de las raíces a las partes aéreas disminuyó significativamente. Bashir (2019), estudio la eficiencia comparativa del biocarbón derivado de la cáscara de arroz (RHB) y el estabilizador metálico de SS en la disminución de la movilidad y biodisponibilidad del cadmio en el repollo chino cultivado en suelo rojo. Los resultados indicaron que la aplicación del RHB y el estabilizador metálico SS en la porción soluble de cadmio en el suelo disminuyó significativamente en 17,6–31,2 % y 7,8–11,7 % con una tasa de aplicación de 1,5 % y 3 %, respectivamente. La incorporación de RHB al 3 % puede inmovilizar cadmio de manera efectiva, por lo tanto, reducir su fito-disponibilidad para el repollo en suelo contaminado con cadmio para mitigar los riesgos de seguridad alimentaria.

2.14.5. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de maní

Shi et al. (2010), investigó sobre los efectos beneficiosos del silicio sobre la tolerancia de las plantas al metal cadmio, estas informaciones se han ido acumulando en los últimos años, pero su mecanismo sigue sin estar claro. Nuestros resultados mostraron que la aplicación de silicio reduce significativamente la acumulación de cadmio en los brotes para los cultivares de maní. Esto implica que el silicio limita significativamente la translocación del cadmio desde las raíces hasta los brotes.

2.14.6. Efecto del silicio sobre el cadmio en el cultivo de maíz

Liang et al. (2005), realizó experimentos en macetas para estudiar los efectos paliativos del silicio exógeno sobre la fitotoxicidad del cadmio en maíz cultivado en un suelo ácido contaminado experimentalmente con cadmio. Cinco tratamientos fueron investigados, como resultados, la concentración de cadmio en la savia del xilema disminuyó significativamente en los tratamientos al aplicar silicio esto debido al aumento del pH inducido por los silicatos en los suelos, esto disminuye la concentración de cadmio en los brotes del cultivo. Caetano et al. (2016) investigo la aplicación de escoria siderúrgica en el cultivo de maíz en menos de 10 t/ha, para ver si los niveles de metales pesados en el suelo aumentan, pero permanecen por debajo de los niveles considerados críticos para la agricultura.

2.14.7. Efectos del silicio sobre el cadmio en el cultivo de cacao

Estrada (2020), demostró en su investigación que la mayor disminución del metal pesado cadmio en el suelo, se da con la aplicación de 1 t/ha de cascarilla carbonizada de arroz con una concentración del 81 % de SiO₂, reduciendo de 1,26 (sin tratamiento) a 1,12 (con tratamiento) ppm, siendo la concentración reducida de 0,14 ppm. En cuanto a la disminución del contenido del metal pesado en la hoja de la planta el efecto de la aplicación de 1 t/ha de cascarilla carbonizada de arroz con una concentración del 81 % de SiO₂, hubo una disminución de 3,46 ppm (sin tratamiento) a 2,86 ppm (con tratamiento), siendo la concentración reducida de cadmio en 0,60 ppm. De la misma manera pasa en la disminución del contenido de cadmio en las almendras por el efecto de la aplicación de 1 t/ha de cascarilla carbonizada de arroz con una concentración del 81 % de SiO₂, reduciendo de 0,61 ppm (sin tratamiento) a 0,46 ppm (con tratamiento), siendo la concentración reducida de cadmio en 0,15 ppm, respecto a los demás niveles de aplicación este fue el más sobresaliente en la reducción de cadmio en los diferentes órganos de la planta y el suelo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación se llevó a cabo en el distrito La Morada, provincia de Choló, región Huánuco, en un área de cultivo de cacao CCN – 51 con cinco años de producción, con los siguientes puntos georeferenciales de UTM: 9033607 m Norte, 363590 m Este, y a una altitud de 530 m.s.n.m. Según la taxonomía de Holdridge, la zona corresponde a la clasificación bosque húmedo, planicie sub tropical (Bh-pst). La temperatura media anual alcanza los 22 a 32 °C y una precipitación de 3000 a 3500 mm anuales, siendo las condiciones más apropiadas para desarrollarse la producción de cacao.

3.2. Material y métodos

- **Metodología**

- **Características físico – químicas del suelo**

Para el respectivo análisis se realizó un muestro de suelos de forma representativa a toda el área previo a la aplicación de los tratamientos, el mismo que se llevó al Laboratorio de Análisis de Suelo de la UNAS para su correspondiente análisis de nutrientes. La Tabla 2, muestra los resultados del análisis

Tabla 2. Análisis físico – químico del suelo experimental

Parámetro	Valor	Método empleado
Análisis físico		
Arena (%)	37,20	Hidrómetro
Arcilla (%)	20,40	Hidrómetro
Limo (%)	42,40	Hidrómetro
Clase textural	Franco	Triangulo textural
Análisis químico		
pH (1:1) en agua	5,38	Potenciómetro
M.O. (%)	1,77	Walkey y Black
N -total (%)	0,08	% M.O x 0.05
P disponible (ppm)	8,22	Olsen modificado
K disponible (ppm)	106,20	Ácido sulfúrico
Ca cambiabile (Cmol+)/kg)	7,21	EEA
Mg cambiabile (Cmol+)/kg)	1,13	EEA
Al (Cmol+)/kg)	0,06	EEA
H (Cmol+)/kg)	0,04	EEA
CICe (Cmol+)/kg)	8,98	Suma de cationes

Fuente: Laboratorio UNAS.

- **Componentes en estudio – Fuentes a base de silicio**

Son la dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz, escoria – silicato de calcio y silicato de potasio. Con tres dosis para cada fuente, más dos testigos adicionales (Tabla 5). Las dosis de la dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz (144, 287, 575 kg/ha), escoria siderúrgica – silicato de calcio (224, 447, 894 kg/ha) y silicato de potasio (1, 2, 3 L/ha), se realizó la aplicación sin restar el contenido inicial del suelo.

Dispersión a base de ceniza de cascarilla de arroz, Es una dispersión de 60% de sólidos de sílice activada a partir de ceniza de arroz con una concentración de sílice amorfa activada por procesos químicos y micronización en un rango de 1 a 5 micras (μ). Esta es la varianza llamada fórmula base. (FEEDCOR, 2012).

Tabla 3. Composición de la ceniza de arroz.

Ceniza de arroz	P/P %
SiO ₂	55,6
SiO ₄	1,43
K ₂ O	0,90
Na ₂ O	0,64
CaO	0,33
MgO	0,32
SO ₄	0,89
H ₂ O	39,89
Total	100
Silicio asimilable (SiA)	Concentración (ppm)
H ₄ SiO ₄	42 000

Fuente: FEEDCOR (2012).

Escoria siderurgica – silicato de calcio, La escoria blanca, también conocida como escoria de acero, es una mezcla no metálica formada por silicato de calcio, óxidos metálicos y ferrita. Se produce en hornos de arco durante la fase de refinado de la industria siderúrgica para reducir la concentración de oxígeno y la mayor parte del azufre en el acero. Esto se logra manteniendo una atmósfera reductora sobre la escoria, que recubre el metal fundido con polvo de carbón. Esta escoria está constituida por cal, espato fluor, coke o grafito. En esta etapa de afino se obtiene la composición química propia de cada acero que se desea fabricar, a través de la adición de ferroaleaciones y carburantes. El color blanquecino se debe a la alta concentración de cal, es pulverulenta que se desintegra al tocarla, pero que con el tiempo se hidrata y se estabiliza. Las incorporaciones en la agricultura son como fertilizante y/o nivelador de la acidez de suelos a nivel de encalado (FEEDCOR, 2012).

Tabla 4. Composición química de escoria siderúrgica – silicato de calcio.

Formula química	% Peso
SiO ₂	27,12
CaO	45,16
MgO	8,93
FeO	0,93
MnO	0,38
Silicio asimilable (SiA)	Concentración (ppm)
H ₄ SiO ₄	27 000

Fuente: FEEDCOR (2012).

Silicato de potasio, Este silicato es un fluido foliar y de suelo enriquecido en 26% SiO₂ y 13% K₂O con un SiA promedio de 140.000 ppm. Dado que se sabe que el producto se usa más en tratamientos foliares, la investigación agrícola ha revelado el uso de la técnica Drench, donde el silicato de potasio se diluye 10-20 veces más con agua o solución nutritiva e incluso se rocía sobre el suelo. parte. planta mucha agua (FEEDCOR, 2012).

– **Tratamientos de estudio**

En la presente investigación se fijaron un total de 11 tratamientos y cuatro repeticiones, siendo las variables fijas las fuentes de silicio (ver tabla 5) tales como:

- Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz (144, 287, 575 kg/ha),
- Escoria siderúrgica – Silicato de calcio (224, 447, 894 kg/ha) y
- Silicato de potasio (1, 2, 3 L/ha).

Los niveles de fertilización están contemplados y realizados en base a la extracción del cultivo de cacao para producir 2000 kg/ha, por lo tanto, los cálculos para la aplicación se realizaron de acuerdo con el análisis de suelo donde se llevará a cabo dicho trabajo experimental, teniendo la fórmula de 100 -25 - 120. Urea (46 %), Cloruro de potasio (60 %) y Fosfato diamónico (18 % - 46%), siendo estos fertilizantes sintéticos de uso común por los agricultores.

Tabla 5. Descripción de los tratamientos

Trat.	Descripción	ppm SiA(*) (mg SiA/ kg suelo)	SiO₂ (kg/ha)	g/planta (Fuente)	kg/ha (fuente)
T1	Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK.	100	80	129	144
T2	Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm) + NPK	200	160	259	287
T3	Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm) + NPK	400	320	517	575
T4	Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm) + NPK	100	60	201	224
T5	Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm) + NPK	200	121	402	447
T6	Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm) + NPK	400	241	805	894
T7	Silicato de Potasio (1 L/ha) + NPK	----	----	----	----
T8	Silicato de Potasio (2 L/ha) + NPK	----	----	---	----
T9	Silicato de Potasio (3 L/ha) + NPK	----	----	---	---
T10	Testigo con NPK	0	0	0	0
T11	Testigo absoluto	0	0	0	0

Fuente: Elaboracion propia

- Dispersión a Base de Ceniza de Cascarilla de Arroz: (Disp. Cz. Cascarilla Az.)
- Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio: (Escoria Siderúrgica – Si Ca)
- Silicato de Potasio

– **Diseño experimental**

El presente trabajo de investigación se realizó utilizando el Diseño de Bloque Completamente al Azar (DBCA), los tratamientos son tres dosis de: Dispersión a base de ceniza de cascarilla de arroz, Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio y Silicato de potasio, un testigo con fertilizante y el testigo absoluto, cuya mezcla hacen un total de 11 tratamientos, cada tratamiento tuvo 16 unidades de análisis (árboles de cacao) y cuatro repeticiones.

Las variables que se evaluaron fueron llevados al Análisis de Varianza (ANVA) y prueba de medias (Duncan $\alpha = 0.05$). Respecto al ANVA, este está constituido por las siguientes fuentes de variabilidad: bloques y tratamientos. Teniendo las siguientes variables tales: como el cadmio total y cadmio disponible en el suelo, cadmio total en almendras y cadmio total en hojas.

Tabla 6. Esquema del análisis de variancia

Fuente de variación	Formula	Grados de libertad
Bloques	$(r - 1)$	3
Tratamientos	$(t - 1)$	10
Error experimental	$(t - 1) * (r - 1)$	30
Total	$Tr - 1$	43

Modelo aditivo lineal:

Según Calzada(1986): $Y_{ij} = U + T_i + B_j + E_{ij}$

Dónde:

Y_{ij} = Respuesta obtenida de la j – ésimo bloque a la cual se le aplicó el i – ésimo tratamiento.

U = Efecto de la media general

T_i = Efecto del i - ésimo tratamiento

B_j = Efecto del j - ésimo bloque

E_{ij} = Efecto aleatorio del error experimental asociado a dicha observación Y_{ij} .

Para:

i = 1, 2, 3, ..., 11 tratamientos

j = 1, 2, 3, 4 repeticiones o bloques

– Características del campo experimental:

- Dimensiones del campo experimental

- Largo 132 m
- Ancho 48 m
- Área total del experimento 6336 m²

- **Diámetro de los bloques**
 - Número de bloques 4
 - Largo del bloque 132 m
 - Ancho del bloque 12 m
 - Área de cada bloque 1584 m²
- **Características de las parcelas**
 - Número total de parcelas 44
 - Número de parcelas por bloque 11
 - Largo de parcela 12 m
 - Ancho de la parcela 12 m
 - Área de la parcela 144 m²
 - Área neta a evaluar 36 m²

- **Procedimiento de datos**

Toda la información obtenida de los análisis de cadmio tanto en suelo y planta fueron ingresadas en una base de datos previamente elaborada en el programa Microsoft Office Excel 2007. La base de datos fue procesada en un software estadístico (INFOSTAT, 2004), con el objetivo de analizar el ANVA, contrastar los promedios (Duncan $\alpha = 0,05$) y buscar las relaciones por medio del análisis de correlación de Pearson ($\alpha = 0,05$); además para calcular la exactitud de las predicciones fueron de acuerdo con los criterios del coeficiente de determinación (R^2).

- **Ejecución del experimento**

Demarcación del área experimental y distribución de los tratamientos. De toda el área de la plantación de cacao CCN – 51 con cinco años en producción, se localizó un área homogénea donde las plantas estén en mismas condiciones de vigorosidad, después con ayuda de wincha y rafia, se dividió los cuatro bloques, de manera que cada bloque lleve 176 plantas. De la misma manera se dividió las parcelas en el interior de cada bloque, obteniendo 16 plantas por cada parcela, donde luego se aplicó los tratamientos, para ello se realizó una randomización al azar de los tratamientos, en los cuales se colocó etiquetas de identificación de bloques y etiquetas para identificar los tratamientos, de esta manera no equivocarnos al momento de tomar las muestras en campo, tanto en los muestreos de suelos y muestreos de hoja y grano del cultivo.

- **Aplicación de las fuentes de silicio**

La estimación por hectárea para cada fuente se proporciona en el Apéndice como se muestra en la Tabla 5. Después de calcular el número de fuentes, agregue agua para diluir el sistema de raíces a un volumen determinado dividiendo el volumen de raíces por 64, que es el número de plantas por tratamiento, y luego calcule el peso aparente según el tratamiento. Luego aplíquelo al suelo en el área de trabajo (dentro del follaje de las plantas). Dependiendo del estado fenológico de las plantas de cacao, se aplica en dos partes: la primera parte antes de la floración y la segunda parte durante el desarrollo del fruto (después de los tres meses). Todas las parcelas de estudio recibieron la dosis completa de NPK (100-25-120), excepto los controles absolutos sin adición de fertilizante o silicio. Aplique la fuente de silicio 20 días antes de que se complete la fertilización. Las malezas fueron removidas con motocultivador (motosierra) cada tres meses, para un total de 3 remociones durante el período experimental.

- **Muestreo de suelos**

Fue realizado en la zona del área efectiva aplicada en las cuatro plantas céntricas de cada tratamiento. Para este fin se utilizó un tubo muestreador, el cual se introdujo a unos 20 cm en el suelo, obteniendo una sub muestra por cada planta de cacao, en total cuatro sub muestras por unidad experimental, acto seguido se mezcló uniformemente y se obtuvo una sola muestra de 1 kg, de la misma manera se hizo para todas las unidades, para luego etiquetarlos con el nombre del tratamiento respectivo y secarlos bajo sombra para proceder realizar los análisis en el Laboratorio de Suelos de la (UNAS). Cabe recalcar que la toma de muestras solo se realizó al final del experimento.

- **Muestreo foliar**

Se realizó al final del experimento, para dicho procedimiento se identificó cuatro plantas de cacao, en la parte céntrica de la unidad experimental, de las plantas escogidas se tuvo que dividir en tres partes. La copa (tercio inferior, tercio medio y tercio superior), tomando cinco hojas activas fotosintéticamente del tercio medio de la copa dando un total de 20 hojas por las cuatro plantas, los cuales se etiquetaron de acuerdo con el tratamiento y luego se llevó a una estufa a una temperatura de 70 °C, eliminando así la humedad. A continuación, se procedió al triturado de las hojas y análisis de cadmio. Dicho análisis realice personalmente en el laboratorio de suelos de la (UNAS).

- **Muestreo de almendras**

Al final del estudio se identificaron cuatro plantas de cacao de la parte media de cada unidad experimental, se cosecharon los frutos maduros con tijera manual, luego se partieron los frutos con machete y se extrajo la semilla., a continuación se mezcló para la uniformización y se depositó en una bolsa debidamente rotulados 1 kg de grano fresco, para luego realizar el fermentado por cuatro días y secado por tres días, añadido a ello se llevó a la estufa por 3 horas a una temperatura de 70 °C, teniendo como resultado el grano seco, para luego con el mortero moler y proceder a realizar el análisis de cadmio.

- **Metodología para determinar cadmio disponible en el suelo**

Según Gonzales (1986), las pruebas con EDTA 0.05 M consistieron en ajustar el pH a 7 con ácido clorhídrico, luego pesar 5 g de suelo fino secado al aire (TFSA) y agregar 20 ml. El extracto de EDTA, pH 7, se agita en un agitador eléctrico durante 20 minutos, luego se filtra, se diluye si es necesario y el filtrado se mide con un espectrofotómetro de absorción atómica (SAA) Spectra 55B.

- **Metodología para determinar cadmio total en el suelo**

El cadmio total y los constituyentes fisicoquímicos se determinaron de acuerdo con el método de fermentación de sedimentos, lodos y ácidos del suelo EPA-3050B (Agencia de Protección Ambiental) (USEPA, 1996), y el filtrado se cuantificó en el modelo Varian. "Espectros 55B" SAA. Para esta variable de tamaño, se recolectaron muestras de suelo de cada tratamiento para análisis por separado. El laboratorio de análisis de suelos realizó análisis de cadmio total, cadmio disponible y su completa caracterización antes del cultivo. También se seguirá la siguiente metodología de la USEPA (1996):

- Pesa 2 gramos de suelo y tiene un tamaño de partícula de 2 mm. Añadir 10 ml de HNO₃ 1:1. Calentar a 95°C durante 5 minutos. Enfriar y agregar 5 ml de ácido nítrico concentrado. Repita una vez para reducir el volumen de la solución a 5 ml. Dejar enfriar y agregar 2 ml de agua destilada y 3 ml de H₂O₂. Cuando deje de burbujear, agregue 1 mL de H₂O₂.
- Repetir hasta no observara efervescencia. Añadir 5 ml de HCl concentrado y 10 ml de agua desionizada. Calentara por 15 min y dejar enfriar. Filtrara por gravedad. Aforar a 50 ml con agua destilada. Almacenara y mantener refrigerado. Cuantificación por oSAA.

- **Metodología para determinar cadmio total en planta por digestión húmeda**

El análisis de cadmio en hojas y almendras se determinó según Bazán (1996). Para determinar el contenido de cadmio total en tejidos (hojas) y (amigdalas), se tomaron muestras de hojas de plantas de cacao. La secuencia del análisis se describe a continuación:

- Pesar 0,5 g de tejido vegetal en un matraz resistente al calor de 50 ml.
- Añadir 5 ml de solución de ácido perclórico (1:4). Coloque en la estufa y aumente gradualmente la temperatura a 175 °C. Digerir durante 1 hora y 30 minutos o hasta que la solución se vuelva transparente.
- Retire la botella y agregue 15 ml de 0,1 NHCl. Agite la botella para disolver la ceniza mientras filtra la solución y cuantifique con SAA

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto del silicio en la reducción de cadmio total y cadmio disponible en el suelo

El ANVA se realizó a un nivel de significación estadística de 0,05 para determinar si había significación entre el tratamiento y el bloqueo. Los resultados se presentan en la Tabla 7 con un nivel de probabilidad estadística del 95%, lo que confirma que existe una diferencia significativa entre el valor promedio de reducción de cadmio total y disponible en el suelo según la fuente de silicio utilizada. Cuando se calculó de esta manera, hubo diferencias significativas entre tratamientos y bloques, lo que sugiere que las diferencias estadísticas encontradas se debieron a ambos efectos (tratamiento y bloque).

Tabla 7. Análisis de varianza para la disminución de cadmio total y disponible en el suelo.

Fuente de variación	GL	Cadmio total			Cadmio disponible		
		CM	F	Sig.	CM	F	Sig.
Bloque	3	0,09	135,00	S	0,02	14,00	S
Tratamiento	10	0,00	4,50	S	0,01	6,00	S
Error experimental	30	0,00			0,00		
Total	43						
C.V (%)		4,12			16,54		
R ²		0,93			0,75		

S: Existen diferencias estadísticas significativas.

Después de haber realizado el ANVA y haber comprobado la existencia de diferencias significativas entre los efectos de ambos (tratamientos y bloques), se realizó las pruebas de Duncan (Tabla 8) para identificar cual produce un mayor efecto; los resultados indican que, al 95% de confianza estadística, los tratamientos (T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆ y T₇) produjeron un mayor efecto de reducción de cadmio total en el suelo ya que fueron estadísticamente iguales con valores promedios de 0,65; 0,65; 0,66; 0,66; 0,66; 0,68 y 0,69 ppm respectivamente en relación a los otros tratamientos. Los T₁, T₂ y T₃ fueron a base (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz con 144, 287 y 575 kg/ha, respectivamente), asimismo el T₄, T₅ y T₆ fueron a base (Escoria siderúrgica – Silicato de Calcio 224, 447 y 894 kg/ha, respectivamente), cabe resaltar que se tuvo solo al T₇ a base de Silicato de potasio (1 L/ha).

Los resultados muestran que las fuentes de silicio (T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆ y T₇) en sus diferentes cantidades, reducen el contenido de cadmio total en el suelo, al respecto todavía no ha sido posible llegar a una conclusión sobre las causas de este efecto de reducción en la

disponibilidad de este elemento tóxico, algunos trabajos muestran que el contenido de cadmio total como sustancia tóxica no se reduce ((Faria (2010); Huang et al. (2018); Ning et al. (2016); Treder y Cieslinski (2005) y Zhao et al. (2020)).

Otras de la posibles causas de la reducción del cadmio total en el suelo, es que parte de ello haya sido absorbido por las plantas de cacao, sabiendo que el cadmio principalmente se acumula en las raíces, atrapado en las vacuolas celulares, y sólo una fracción muy pequeña se transfiere a las partes aéreas de las plantas, donde se acumula sucesivamente en tallos, hojas, frutos y semillas (Chan y Hale, 2004). Una vez en la raíz, el cadmio puede trasladarse al xilema por medio del apoplasto y/o a través del simplasto produciendo complejos (Clemens et al., 2002).

Tantalean y Huauya (2017), en su estudio sobre el contenido de cadmio en el cultivo de cacao, encontró la acumulación de cadmio en raíces de 1.22 ppm, además vemos que la aplicación exógena del silicio disminuye la absorción de cadmio en las raíces (Ma y Yamaji, 2006). Por otro lado los suelos ligeros y arenosos tienen una concentración más alta de cadmio en las raíces (Treder y Cieslinski, 2006). Se conoce que la ubicación y distribución del cadmio en raíces son las mismas que las del silicio, produciendo este su inactivación metabólica (Treder y Cieslinski, 2006). He et al. (2020), realizó experimentos de campo para estudiar los efectos de la escoria de acería (SS) a 4,0 t/ha disminuyendo la translocación del cadmio en las raíces. Farooq et al. (2013) en su investigación en algodón encontró que el silicio disminuyó la translocación de cadmio de las raíces a las partes aéreas de las plantas. Greger y Ofstedt (2004), disminuyó la translocación de cadmio de las raíces a sus granos a diferentes tipos de trigo. Naeem et al., (2015) encontró buenos efectos del silicato de cálcico (CaSiO_3) al disminuir la translocación del cadmio de las raíces a los brotes y granos.

Rizwan et al. (2012) evaluó los efectos de la aplicación de silicio amorfo en el cultivo de trigo bajo condiciones de invernadero, encontrando el eficiente secuestro de cadmio en raíces. En las siguientes bibliografías citadas podemos encontrar que el mayor control del silicio sobre el cadmio se da al nivel de raíces, y no al nivel del suelo en caso del cadmio total, pero podemos ver en nuestros resultados una ligera disminución de 0.05 ppm de cadmio total, se presume que fueron absorbidos por las raíces y luego liberadas a las partes aéreas de las plantas de cacao, ya que el control del silicio al nivel de hojas y almendra se encontró en un 70 % y el restante siguen almacenados en las raíces y con espacio de seguir absorbiendo más cadmio. Sabiendo que el cadmio total no puede disminuir ya que es la suma global de todos los tipos de cadmios del suelo reportados en el análisis de suelo, se presume en la argumentación que este metal pesado haya sido absorbido por la raíz, marcando una disminución considerable en el suelo.

En cuanto a los resultados están muy por debajo de los datos que brinda Miranda et al., (2008) sobre los máximos aceptables de 3 ppm de cadmio total en los suelos de los países de la Unión Europea. Kabata-Pendias y Pendias (2001) reporta en su investigación que el contenido promedio de cadmio en los suelos de zonas templadas del mundo, entre ellos países de Europa, Estados Unidos, Japón, Rusia, varía entre 0,06 y 1,1 ppm y Ramtahal et al., (2016) reporta análisis de 45 plantaciones de cacao en Trinidad y Tobago a una profundidad de 0 a 30 cm encontrando cadmio total en el suelo entre 0,3 y 1,7 ppm.

Tabla 8. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0,05$) para los efectos del silicio en la reducción de cadmio total en el suelo.

Tratamiento	SiO ₂ (kg/ha)	Fuente (kg/ha)	Cadmio Total (ppm)	
			Medias	Sig.
T ₁ (Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK)	80	144	0,65	a
T ₂ (Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK)	160	287	0,65	a
T ₄ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK)	60	224	0,66	a
T ₆ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK)	241	894	0,66	a
T ₃ (Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK)	320	575	0,66	a
T ₅ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK)	121	447	0,68	a
T ₇ (Silicato de Potasio (1 L/ha) + NPK)	----	----	0,69	a
T ₈ (Silicato de Potasio (2 L/ha) + NPK)	----	----	0,70	b
T ₉ (Silicato de Potasio (3 L/ha) + NPK)	----	----	0,71	b
T ₁₀ (Testigo con NPK)	----	0	0,71	b
T ₁₁ (Testigo absoluto)	----	0	0,71	b

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

- Dispersión a Base de Ceniza de Cascarilla de Arroz: (Disp. Cz. Cascarilla Az.)
- Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio: (Escoria Siderúrgica – Si Ca)
- Silicato de Potasio

En la Tabla 9 se muestra la prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para identificar cual produce un mayor efecto; los resultados indican que, al 95% de confianza estadística, los tratamientos (T₆, T₁, T₃, T₂, T₅, y T₄) que produjeron un mayor efecto de reducción de cadmio disponible en el suelo ya que fueron estadísticamente iguales con valores promedios de 0,20; 0,21; 0,22; 0,23; 0,23 y 0,23 ppm respectivamente en relación con los otros tratamientos, que representan el mayor contenido de cadmio disponible en suelo y por consecuencia el menor efecto. Los T₁, T₂, y T₃ fueron a base (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz con 144, 287 y 575 kg/ha, respectivamente), asimismo el T₄, T₅ y T₆ fueron a base (Escoria siderúrgica – Silicato de Calcio 224, 447 y 894 kg/ha, respectivamente).

Los resultados muestran que las fuentes de silicio (T₆, T₁, T₃, T₂, T₅, y T₄) en sus diferentes cantidades, reducen el contenido de cadmio disponible en el suelo, Probablemente la reducción de cadmio disponible en el suelo, a través de todos los tratamientos se debe a un posible papel del silicio en la desintoxicación de metales pesados, una característica puede ser al: *a*) formar complejos con estos elementos, lo que, en consecuencia, los hace menos solubles en la solución del suelo, esto se puede verificar en el estudio de Gu et al. (2011) , al investigar a nivel de campo e invernadero, el uso de cenizas y escorias de acero, los autores concluyeron que ambas fuentes de silicio utilizadas tienen potencial para atenuar la disponibilidad de estos metales pesados en el suelo y este efecto puede ser relacionado con el potencial del silicio, pues el gradiente de difusión mostró que los flujos de difusión de metales pesados del suelo a la solución disminuyeron en más del 84 % después de la remediación; la característica *b*) puede ser que el silicio altera la distribución de cadmio en las fracciones del suelo, disminuyendo las reservas más biodisponibles y aumentando la asignación de metales en fracciones más estables, del mismo modo, Da cunha et al. (2008), han observado este efecto, donde la aplicación de silicio aceleró la formación de fracciones más estables de cadmio, como la materia orgánica y los óxidos de hierro cristalinos al evaluar como el silicio alivia la toxicidad del cadmio y el zinc en el cultivo de *Zea mays* (maíz) cultivado en un suelo contaminado; esta apreciación puede ser corroborada por Liang et al. (2005), al manifestar que el silicio cambia la especiación de los metales de forma tóxica a no tóxica mediante la formación de complejos de silicato en la solución del suelo, ya que en sus investigación observaron que la mayor parte del cadmio se encontró en forma de óxidos o adsorbido por óxidos de Fe-Mn.

Podemos ver que el mayor efecto en las disminuciones de cadmio se da con la aplicación de dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz y escoria siderúrgica – silicato de calcio, pues la literatura reveló sobre la inmovilización y secuestro de metales pesados en el suelo que se relacionan directamente con el pH deba a que estas fuentes y proporciones de silicio, marcan una diferencia en los estados químicos, que en consecuencia reduce la disponibilidad de cadmio y otros metales pesados, esto fue corroborado por (Rizwan et al.,

2012); Ning et al. (2016), manifestado que el efecto de reducción de la disponibilidad ocurre, porque se genera cambios en el pH del suelo. Verificado por Gu et al. (2011), que al investigar los mecanismos de estabilización mediante enmiendas ricas en silicio (cenizas volantes y escoria de acero) en un suelo ácido contaminado con múltiples metales (cadmio, zinc, cobre y plomo), aumentaron el pH del suelo de 4,0 a 5,0–6,4, esto disminuyó la fito-disponibilidad de metales pesados en 60 % y suprimió la absorción de metales. Asimismo, el aumento del pH facilita la adsorción de silicio a los coloides del suelo y aumenta la disponibilidad de silicio soluble (Haynes, 2014).

Por lo contrario, algunos investigadores informaron que el silicio en forma de silicatos de calcio no tiene un impacto significativo en el pH del suelo, sin embargo, puede reducir la biodisponibilidad de cadmio en el suelo, así como su transporte en las plantas sin afectar (aumentar o disminuir) el pH del suelo (Naeem et al., 2015). El silicio tiene la capacidad de convertir la especiación de metales pesados en el suelo mediante la producción de complejos de silicio, lo que disminuye la biodisponibilidad de cadmio. Además, la superficie del mineral-Si contiene una gran cantidad de grupos silanol (Si-OH). Los grupos que contienen silicio, debido a la capacidad de intercambio iónico combinaron el cadmio y lo inmovilizaron fuertemente en el suelo. Rehman et al. (2019) evaluaron la aplicación fraccionada de silicio en forma de silicato de potasio en la mitigación de cadmio en el suelo y en las plantas de arroz, resultando mayor disponibilidad reducida de cadmio en el suelo que en la planta.

Los resultados de esta tesis concuerdan con Bashir (2019), quien estudio la eficiencia comparativa del biocarbón o ceniza de la cáscara de arroz y la escoria de acero o escoria siderurgica en la disminución de la movilidad y biodisponibilidad del cadmio en el repollo chino, encontrando una disminución de cadmio disponible en el suelo de 17,6-31,2 % y 7,8-11,7 % con una tasa de aplicación de 1,5 % y 3 %. En el Perú Estrada (2020) encontró en el cultivo de cacao, que la mayor disminución de cadmio disponible en el suelo se da con la aplicación de 1 t/ha de cascarilla carbonizada de arroz a un 81 % de SiO₂, reduciendo de 1,26 a 1,12 ppm, cabe recalcar que Estrada no profundiza en su discusión de como el silicio actúa sobre el cadmio en la solución suelo. al respecto Restrepo y Gutiérrez (2021) muestran en su investigación la siguiente ecuación química $Cd^{+2} + 2H_4SiO_4 = CdSi_2O_4 + 2H^+ + 3H_2O$, como un postulado para dar respuesta como se produce el efecto de silicio sobre el cadmio en el solución suelo, lo mismo que sucede con el aluminio, arsénico y plomo, siendo también estos elementos tóxicos para las plantas, este proceso de reacción da como resultado la unión del cadmio con dos moléculas de silicio y cuatro moléculas de oxígeno y liberación de 4 hidrógenos, dando como consecuencia la formación de compuestos insolubles o llamados silicatos de metales pesados de baja solubilidad poco absorbibles por las raíces de las plantas.

Tabla 9. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0,05$) para los efectos del silicio en la reducción de cadmio disponible en el suelo.

Tratamiento	SiO ₂	Fuente	Cadmio disponible (ppm)	
	kg/ha	(kg/ha)	Medias	Sig.
T ₆ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK)	241	894	0,20	a
T ₁ (Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK)	80	144	0,21	a
T ₃ (Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK)	320	575	0,22	a
T ₂ (Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK)	160	287	0,23	a
T ₅ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK)	121	447	0,23	a
T ₄ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK)	60	224	0,23	a
T ₁₀ (Testigo con NPK)	----	0	0,29	B
T ₈ (Silicato de Potasio (2 L/ha) + NPK)	----	----	0,29	B
T ₇ (Silicato de Potasio (1 L/ha) + NPK)	----	----	0,29	B
T ₉ (Silicato de Potasio (3 L/ha) + NPK)	----	----	0,32	B
T ₁₁ (Testigo absoluto)	----	0	0,35	B

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

- Dispersión a Base de Ceniza de Cascarilla de Arroz: (Disp. Cz. Cascarilla Az.)
- Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio: (Escoria Siderúrgica – Si Ca)
- Silicato de Potasio

4.1.1. Regresión lineal entre el cadmio disponible y cadmio total en el suelo

En la Figura 4, se observa que la ecuación de regresión estimada fue: $Cadmio\ disponible = -0,9794 + 1,8226\ cadmio\ total\ en\ el\ suelo$. Esta ecuación muestra que, por cada incremento en una unidad de cadmio total en el suelo, la concentración de cadmio disponible se incrementa en 1, 8226 ppm. Esto indica que el cacao puede absorber cadmio del suelo contaminado y a la vez almacenarlo, la ecuación indica que ciertamente el contenido de cadmio disponible está en función al contenido de cadmio total, con un coeficiente de

determinación (R^2) de 0.8305. Esto es corroborado por Zavala et al, (2022) quien investigo el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas (biol y carbón liquido) para reducir cadmio en suelo y planta de cacao, encontrando un coeficiente de determinación sobre el 0.8103 entre el cadmio disponible y cadmio total en el suelo, similar a nuestros resultados.

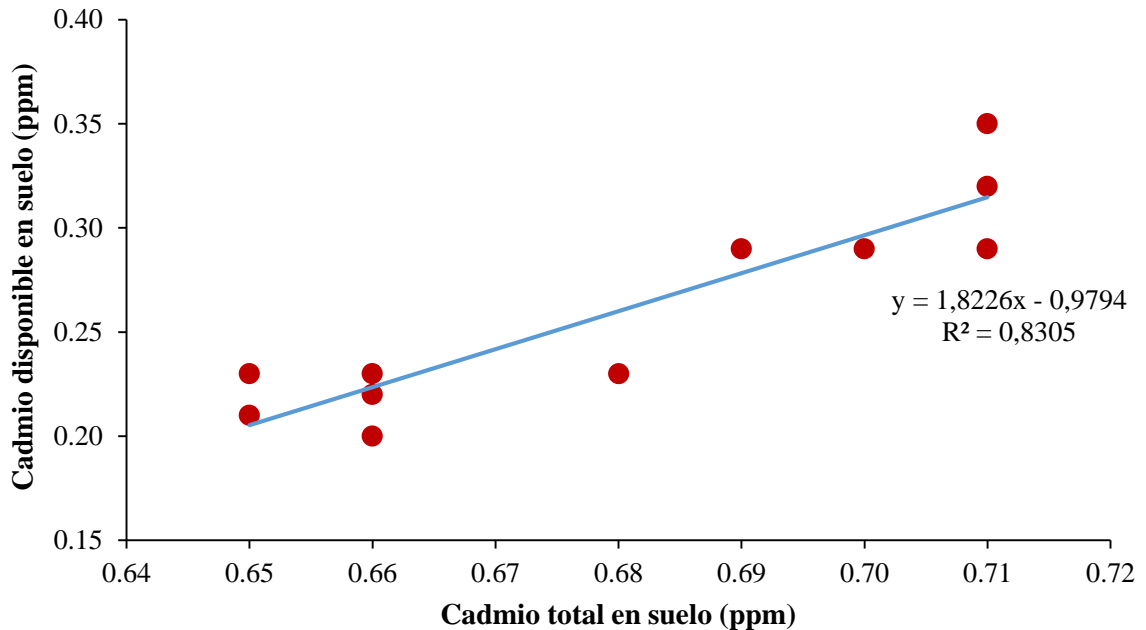


Figura 4. Regresión lineal entre el contenido de cadmio disponible y cadmio total en el suelo.

4.2. Efecto del silicio en la reducción de cadmio en hojas y cadmio en almendras

En la Tabla 10 se muestra los cuadrados medios del análisis de varianza ($\alpha=0,05$) para cadmio en hojas y cadmio en almendras de cacao con aplicación de diferentes fuentes de silicio, testigo con fertilizante y más testigo absoluto, se observa que no hay diferencias estadísticas respecto a los bloques, debido que el valor de probabilidad planteado es mayor ($p>0,05$), significa que todos los bloques son iguales y estarían influyendo en los resultados. Respecto a los tratamientos si se observa diferencias estadísticas, por lo cual al menos uno de los tratamientos será diferente estadísticamente.

Probablemente esta diferencia de resultados se deba a lo que manifiesta Khan et al. (2021), ya que diferentes factores del suelo influyen en la biodisponibilidad del silicio en el sistema suelo-planta. El silicio implica la mitigación de varios estreses bióticos (plagas de insectos y enfermedades patógenas) y abióticos (sal, sequía, calor y metales pesados, etc.) al mejorar el mecanismo de tolerancia de las plantas en varios niveles. Sin embargo, las restricciones mediadas por silicio en la absorción y translocación de metales pesados del suelo

a las plantas y dentro de las plantas requieren una comprensión profunda. Otra estimación podría deberse a que el cadmio es móvil y se transfiere fácilmente a las partes superiores de las plantas (Inés, 2011), lo que dependerá de cómo se absorba el cadmio en los tejidos foliares en relación con el tiempo fisiológico de su crecimiento, ya que las plantas tienen diferentes rutas metabólicas (Miranda et al., 2008).

Tabla 10. Análisis de varianza para cadmio en hojas y cadmio en almendras de cacao.

Fuente de variación	GL	Cadmio en hojas			Cadmio en almendras		
		CM	F	Sig.	CM	F	Sig.
Bloque	3	0,04	0,45	NS	0,06	1,03	NS
Tratamiento	10	3,54	36,58	S	1,08	19,55	S
Error experimental	30	0,10			0,06		
Total	43						
C.V (%)		10,94			19,71		
R ²		0,92			0,87		

NS: No existen diferencias estadísticas significativas.

S: Existen diferencias estadísticas significativas.

En el Tabla 11 se muestra la prueba de Duncan ($\alpha=0,05$), y se determinó menor contenido de cadmio en hojas en el cultivo de cacao, por efecto de los tratamientos T₈ (Silicato de potasio 2 L/ha) y T₆ (Escoria siderúrgica – Silicato de Calcio 894 kg/ha) con valores promedios de 1,46 y 1,58 ppm de cadmio, estadísticamente son iguales, pero diferentes a los demás tratamientos. En segundo lugar se observa los tratamientos T₇ (Silicato de potasio 1 L/ha), T₂ (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz 287 kg/ha), T₉ (Silicato de potasio 3 L/ha) y T₁ (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz 144 kg/ha) con valores promedios de 2,15; 2,43; 2,59 y 2,61 ppm de cadmio, estadísticamente son iguales, pero diferentes a los tratamientos T₄, T₅, T₁₀, T₃ y T₁₁; en tercer lugar se observa a los tratamientos T₄ (Escoria siderúrgica – Silicato de Calcio 224 kg/ha), T₅ (Escoria siderúrgica – Silicato de Calcio 447 kg/ha), T₁₀ (Testigo con fertilizante) y T₃ (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz 575 kg/ha) con valores promedios de 3,30; 3,48; 3,53 y 3,65 ppm de cadmio, estadísticamente son iguales pero diferentes al tratamiento T₁₁ (Testigo absoluto) quien muestra un valor promedio de 4,53 ppm de cadmio en hojas, el testigo está representado por el mayor

contendió de cadmio total; mostrando que la aplicación de las fuentes de silicato de potasio y escoria siderúrgica tienen el mejor efecto sobre el contenido de cadmio en las hojas, esto se evidenció al aplicar el silicato de potasio a nivel foliar, pues se necesita menor cantidad para los efectos sobre el cadmio total, al compararse con la escoria siderúrgica.

Por lo tanto, es necesario desarrollar soluciones que contengan silicio, silicatos de sodio o potasio o ácido silícico particularmente para la mejora de cultivos y el control de enfermedades o plagas (pesticidas o fungicidas amigables con el medio ambiente) a través de aplicaciones foliares. Varios informes han demostrado que la aplicación foliar de silicio es muy eficaz para aumentar el crecimiento de los cultivos y la protección contra el estrés biótico en diferentes especies de plantas como calabacín, uva, melón, pepino, soja y cilantro (Hussain et al., 2021, Menzies et al., 1992).

Al respecto Greger et al., (2016) realizó estudios sobre la absorción de cadmio a nivel celular, en el cultivo de trigo en invernadero, los cuales se cultivaron en presencia o ausencia de silicio con o sin cadmio. Los resultados muestran que el silicio redujo la acumulación de cadmio especialmente en los brotes, al reducir el transporte de cadmio en el citoplasma, hallando que el gen *IRT1*, que se autorregula por cadmio para su transporte fue regulado por silicio en la raíz, disipándolo y así facilitó el transporte de Fe en trigo. Según Khan et al. (2021) la aplicación de silicio reduce la expresión del gen transportador de cadmio *Nramp5*. Shahid et al., (2019) menciona que el silicio afecta a los genes (*NRAMP*) mejorando su codificación de proteínas de macrófagos asociadas a la resistencia natural que transportan particularmente el Mn (II), pero también participan en la absorción y transferencia de cadmio en las plantas.

Para validar nuestra investigación mostramos que Treder y Cieslinski (2006) también aplicó silicio en la fuente de silicato de potasio, disminuyendo significativamente la concentración de cadmio en hojas de fresa. Zhao y Masahiko (2007) también probó el silicato de calcio hidratado poroso (PS), utilizado como fertilizante de silicio en Japón investigando su efecto en una dosis de 2 % (p/p) provocando una reducción de cadmio en 86,8 % en las hojas de arroz, cultivo de alta demanda por las personas en todo el mundo.

Por último Chi et al. (2022) también muestra sus resultados al aplicar escoria de acero (escoria siderúrgica) en el cultivo de arroz mitigando la acumulación de cadmio en las hojas en cuatro temporadas del cultivo, mostrando efectos positivos y sostenibles, en Perú de manera pionera, Estrada (2020) encontró en cacao que la disminución del contenido de cadmio en las hojas de 3,46 a 2,86 ppm, se da por efecto de la aplicación de 1 t/ha de cascarilla carbonizada de arroz al 81 % de SiO₂. En todos los casos presentados respaldan nuestros resultados, que el silicio en sus diferentes fuentes reduce el cadmio en hojas de diversas plantas.

Tabla 11. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0,05$) para los efectos de silicio en la reducción de cadmio en hojas de cacao.

Tratamiento	SiO ₂ (kg/ha)	Fuente (kg/ha)	Cadmio total (ppm)	
			Medias	Sig.
T ₈ (Silicato de Potasio (2 L/ha) + NPK)	----	----	1,46	a
T ₆ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK)	241	894	1,58	a
T ₇ (Silicato de Potasio (1 L/ha) + NPK)	----	----	2,15	b
T ₂ (Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK)	160	287	2,43	b
T ₉ (Silicato de Potasio (3 L/ha) + NPK)	----	----	2,59	b
T ₁ (Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK)	80	144	2,61	b
T ₄ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK)	60	224	3,30	c
T ₅ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK)	121	447	3,48	c
T ₁₀ (Testigo con NPK)	----	0	3,53	c
T ₃ (Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK)	320	575	3,65	c
T ₁₁ (Testigo absoluto)	----	0	4,53	d

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

- Dispersión a Base de Ceniza de Cascarilla de Arroz: (Disp. Cz. Cascarilla Az.)
- Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio: (Escoria Siderúrgica – Si Ca)
- Silicato de Potasio

En la Tabla 12 se muestra la prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) y se observa el efecto del silicio sobre la reducción del contenido de cadmio en almendras del cultivo de cacao, se determinó menor contenido de cadmio con los tratamientos T₉ (Silicato de Potasio 3 L/ha), T₈ (Silicato de Potasio 2 L/ha), T₅ (Escoria siderúrgica – Silicato de calcio 447 kg/ha), T₆ (Escoria Siderúrgica– Silicato de calcio a 894 kg/ha) y T₂ (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz 287 kg/ha). Con valores promedios de 0,60; 0,64; 0,68; 0,78 y 0,85 ppm de cadmio, estadísticamente son iguales, pero diferentes a los demás tratamientos. En segundo lugar se

muestra al tratamiento T₁ (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz 144 kg/ha) con valor promedio de 1,18 ppm de cadmio, estadísticamente es diferente a los tratamientos T₇, T₁₀, T₄, T₃ y T₁₁; en tercer lugar se observa a los tratamientos T₇ (Silicato de potasio (1 L/ha), T₁₀ (Testigo con fertilizante), T₄ (Escoria siderúrgica – Silicato de Calcio 224 kg/ha) y T₃ (Dispersión de ceniza a base de cascarilla de arroz 575 kg/ha), con valores promedios de 1,45; 1,50; 1,58 y 1,69 ppm de cadmio, estadísticamente son iguales, pero diferentes al tratamiento T₁₁ (Testigo absoluto) quien obtuvo un valor promedio de 2,15 ppm, y está representado por contener mayor contenido de cadmio en almendras de cacao, también se observó que las fuentes a base de silicio y fertilizante, tuvieron un efecto positivo en la disminución del contenido de cadmio en almendras de cacao comparado con el tratamiento testigo.

En cuanto a la forma de acción del silicio para la reducción del contenido de cadmio en los granos es parecido a lo mostrado en la discusión de la reducción de cadmio en hojas, pero existe más postulados que definen una posible acción que tiene el silicio sobre el cadmio, Ma y Yamaji (2006) encontraron que la aplicación de silicio genera depósitos de lignina en las paredes celulares produciendo cargas negativas mediante ello captura iones metálicos para luego unirlos a las paredes celulares, reduciendo así la translocación de los metales de raíces a las partes comestibles de las plantas y la otra postulación del mismo autor es la posible formación del complejo o co-precipitación de iones metálicos tóxicos con silicio, inmovilizándolo de esta manera en los tejidos leñosos.

Esta explicación también lo menciona Restrepo y Gutiérrez (2021) quienes sostienen que existe una asociación de ácido monosilícico en la pared celular que produce enlaces Si – O – C, produciendo mayor densidad de carga negativa, atrapando los iones metálicos libres, aliviando así la toxicidad en los órganos comestibles de las plantas. Según Meena et al. (2014) la aplicación de estas fuentes no solo reduce la toxicidad del cadmio, sino que también incrementa el rendimiento del cultivo, tal como podemos visualizar el beneficio costo de nuestra investigación en la aplicación de silicato de potasio y escoria siderúrgica, con beneficio costo de 3, 10 y 3,11 respectivamente.

El mayor contenido de cadmio en las almendras está relacionado con las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el pH, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de arcilla (Florida et al., 2018). Por lo tanto, es necesario indicar que las diferentes condiciones del suelo afectan de manera diferente la capacidad del silicio para reducir la disponibilidad y el transporte de metales pesados en los suelos. La meteorización y la lixiviación provocan la alitización y la desilicación del suelo en las regiones subtropicales con un clima cálido y lluvioso intenso y que dan como resultado una disponibilidad de silicio relativamente baja para las plantas (Cai, 2005).

Tabla 12. Comparación de medias de Duncan ($\alpha=0,05$) para los efectos de silicio en la reducción de cadmio en almendras de cacao.

Tratamiento	SiO ₂ (kg/ha)	Fuente (kg/ha)	Cadmio total (ppm)	
			Medias	Sig.
T ₉ (Silicato de Potasio (3 L/ha) + NPK)	----	----	0,60	a
T ₈ (Silicato de Potasio (2 L/ha) + NPK)	----	----	0,64	a
T ₅ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK)	121	447	0,68	a
T ₆ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK)	241	894	0,78	a
T ₂ (Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK)	160	287	0,85	a
T ₁ (Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK)	80	144	1,18	b
T ₇ (Silicato de Potasio (1 L/ha) + NPK)	----	----	1,45	c
T ₁₀ (Testigo con NPK)	----	0	1,50	c
T ₄ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK)	60	224	1,58	c
T ₃ (Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK)	320	575	1,69	c
T ₁₁ (Testigo absoluto)	----	0	2,15	d

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

- Dispersión a Base de Ceniza de Cascarilla de Arroz: (Disp. Cz. Cascarilla Az.)
- Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio: (Escoria Siderúrgica – Si Ca)
- Silicato de Potasio

4.2.1. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y cadmio en hojas

En la Figura 5, se observa la ecuación de regresión estimada fue: *Cadmio en almendras* = $0,3927x + 0,0731$ *cadmio en hojas*. Esta ecuación muestra que, a mayor contenido de cadmio en hojas, el contenido de cadmio en almendras se incrementa. La ecuación indica un coeficiente de determinación (R^2) de $0,5095$. Probablemente los niveles de cadmio en hojas y almendras guardan una correlación positiva, esto quiere decir que, a mayor contenido de cadmio en el tejido foliar, se tendrá un alto contenido de cadmio en almendras.

Este tipo de correlación positiva también fue observado por Tantalean y Huauya (2017) entre el contenido de cadmio en hojas y el contenido de cadmio en almendras. Esto puede interpretarse a que si se tiene un buen control de cadmio en las hojas por efecto de los tratamientos, también se tendrá un buen control de cadmio en las almendras.

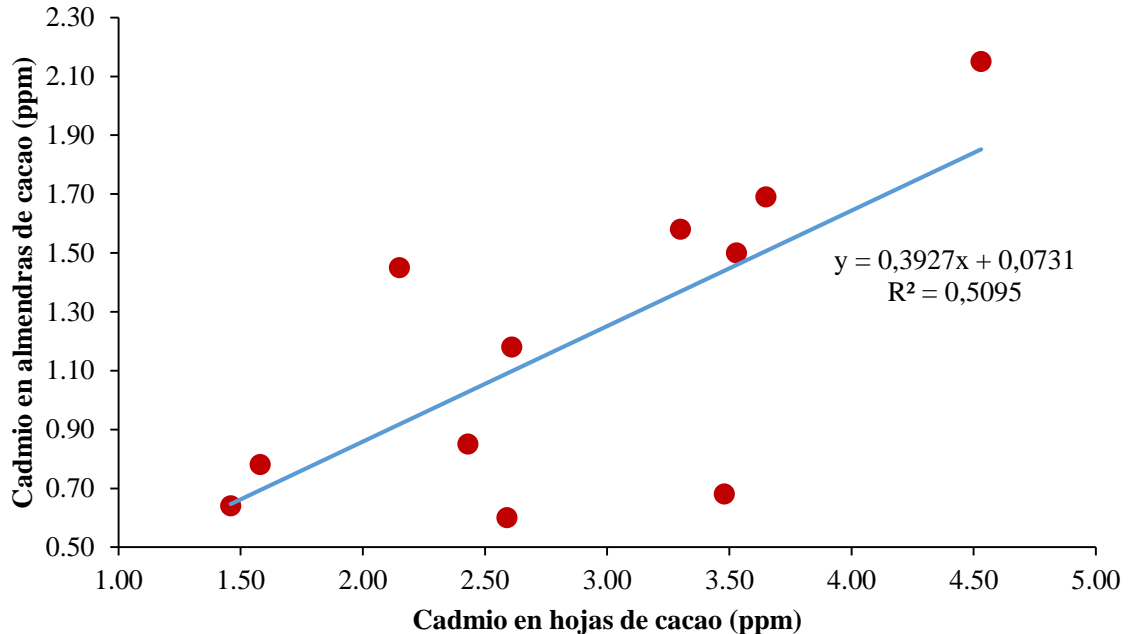


Figura 5. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y cadmio en hojas

4.2.2. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y cadmio disponible en el suelo

En la Figura 6 se observa que a mayor contenido de cadmio disponible en el suelo, mayor contenido de cadmio en almendras de cacao, pero con una diferencia de concentración inversa, donde se supone que la concentración de cadmio en el suelo debería ser mayor, respecto a la planta, y esto presenta un coeficiente de determinación (R^2) de 0,0747, esto indica que solo el 7,47% tiene una relación dependiente entre el contenido de cadmio disponible en el suelo y el contenido de cadmio en las almendras de cacao.

TNS y CITE CACAO (2011) muestra resultados de cadmio disponible en el suelo 0,11 ppm y cadmio total en almendras 1,33 ppm. Suponiendo que en el suelo la concentración de cadmio debería ser mayor respecto a la planta. Además, presenta un coeficiente de correlación (R^2) de 0,184, esto indica que sólo el 18,4% tiene una relación dependiente entre el contenido de cadmio disponible en el suelo y el contenido de cadmio en las almendras de cacao. Greger y Ofstedt (2004), también encontró una correlación baja entre la concentración de cadmio en el suelo y cadmio en los granos de trigo, concluyendo que el cadmio se trasloca de las raíces a sus granos.

Tantalean y Huauya (2017) muestran una diferencia de concentración positiva entre el contenido de cadmio en raíces 1,14 ppm, versus el contenido de cadmio en almendras de 1,08 ppm. Por otro lado, Huamani et al. (2012), menciona que cuando se realiza los análisis de suelo y planta por separado y sin mezclar con las demás plantas en estudio se obtiene una correlación sobre el 80 % en cuanto a las cantidades de cadmio en el suelo respecto al cadmio total en las almendras, esto explica por qué nuestros resultados muestran una regresión lineal bastante baja, ya que en nuestra investigación mezclamos la muestra de las 4 plantas por tratamiento tanto en suelo, hoja y almendra. Vale recalcar que es una postura obtenida por sus resultados, como también otros autores mostrados coinciden con nuestra investigación en cuanto a la regresión lineal mostrada.

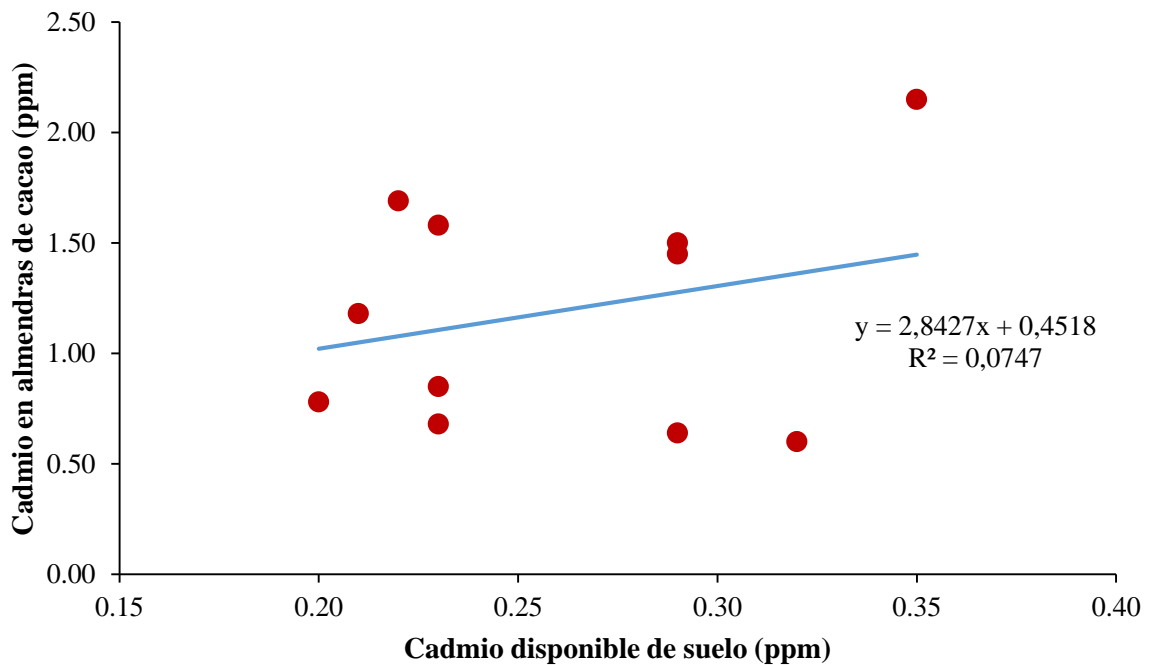


Figura 6. Regresión lineal entre el contenido de cadmio en almendras y cadmio disponible en suelo.

4.3. Análisis de rentabilidad para la aplicación de los tratamientos

De acuerdo con la Tabla 13 se puede visualizar que el uso de Escoria siderúrgica – silicato de calcio 224 Kg/ha (T₄) y 3 L/ha de Silicato de potasio (T₉) presentan la mejor relación de beneficio/costo, siendo 3,11 y 3,10 nuevos soles de ganancia por cada sol invertido en estos dos tratamientos, contrastando con el T₁₁ (testigo absoluto) quien presenta la más baja relación beneficio/costo, de tan solo 1,54. Al respecto Bergue (2003) indica que al utilizar fuentes de silicio se reduce el costo de producción ya que disminuye la saturación de aluminio y concentraciones de cadmio, incremento de la disponibilidad de fósforo, control de la incidencia de enfermedades y aumento de la producción.

Tabla 13. Análisis de rentabilidad en la aplicación de fuentes de silicio.

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Valor de la Producción (Soles/ha)	Costo de producción (Soles/ha)	Utilidad neta (Soles/ha)	Índice de Rentabilidad	B/C
T ₁ (Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK)	1825	12773	4525	8248	1,82	2,82
T ₂ (Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK)	1929	13501	4815	8686	1,80	2,80
T ₃ (Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK)	1982	13875	5390	8485	1,57	2,57
T ₄ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK)	2082	14576	4690	9886	2,11	3,11
T ₅ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK)	2169	15182	5130	10052	1,96	2,96
T ₆ (Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK)	2221	15549	6025	9524	1,58	2,58
T ₇ (Silicato de Potasio (1 L/ha) + NPK)	1500	10500	4290	6210	1,45	2,45
T ₈ (Silicato de Potasio (2 L/ha) + NPK)	1525	10677	4340	6337	1,46	2,46
T ₉ (Silicato de Potasio (3 L/ha) + NPK)	1942	13596	4390	9206	2,10	3,10
T ₁₀ (Testigo con NPK)	1450	10153	4240	5913	1,39	2,39
T ₁₁ (Testigo absoluto)	700	4900	3190	1710	0,54	1,54

FUENTE: Elaboración propio

Valor de producción : Rendimiento (kg/ha) x Precio
 Utilidad neta : Valor de producción – Costos de producción
 Relación beneficio/costo : Costo de ventas / Costo de producción
 Índice de rentabilidad : Utilidad neta/ Costo de producción
 Precio de 1 kg de cacao seco : S/. 7,00

V. CONCLUSIONES

1. La aplicación de 894 kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio (T₆) y 144, 575 y 287 kg/ha de dispersión de ceniza de cascarilla de arroz (T₁), (T₃) y (T₂), obtuvieron el mejor efecto sobre la reducción del cadmio disponible en el suelo, al presentar concentraciones de 0,20; 0,21; 0,22 y 0,23 ppm, comparado con el testigo absoluto que llego acumular 0,35 ppm, teniendo una disminución del 43, 42, 41 y 40 %.
2. La aplicación de 2 L/ha silicato de potasio (T₈) y 894 Kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio (T₆), obtuvieron el mejor efecto en la reducción del contenido de cadmio total en hojas, al presentar concentraciones de 1,46 y 1,58 ppm, comparado con el testigo absoluto que llego acumular 4,53 ppm, teniendo una disminución del 68 y 65 %.
3. La aplicación de 3 y 2 L/ha silicato de potasio (T₉) y (T₈), 447 y 894 kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio (T₅) y (T₆) y 287 kg de dispersión de ceniza de cascarilla de arroz (T₂) obtuvieron el mejor efecto en la reducción del contenido de cadmio total en las almendras, al presentar concentraciones de 0,60; 0,64; 0,68; 0,78 y 0,85 ppm, comparado con el testigo absoluto que llego acumular 2,15 ppm, teniendo una disminución del 72, 70, 68, 64 y 60 %.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Se recomienda usar 894 kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio (T₆) y 144, 575 y 287 kg/ha de dispersión de ceniza de cascarilla de arroz (T₁), (T₃) y (T₂), ya que obtuvieron el mejor efecto sobre la reducción del cadmio disponible en el suelo, al presentar concentraciones de 0,20; 0,21; 0,22 y 0,23 ppm, comparado con el testigo absoluto que llego acumular 0,35 ppm, teniendo una disminución del 43, 42, 41 y 40 %.
1. Se recomienda usar 3 y 2 L/ha de silicato de potasio (T₉) y (T₈), 447 y 894 kg/ha de escoria siderúrgica – silicato de calcio (T₅) y (T₆) y 287 kg de dispersión de ceniza de cascarilla de arroz (T₂) ya que obtuvieron el mejor efecto en la reducción del contenido de cadmio total en las almendras.
2. Se recomienda hacer tres aplicaciones para obtener un mejor efecto de las fuentes de silicio en la reducción de cadmio disponible en el suelo y cadmio total en almendras del cultivo de cacao.

VII. REFERENCIAS

- Agromil (2011, agosto 23). Productos a base de silicio. AGROMIL. <http://www.silicioagromil.com>.
- Aguirre, C., Chávez, T., García, P., y Raya, J.C. (2007). El Silicio en los organismos vivos. *Interciencia*, 32(8), 504–509 http://script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000800004.
- Ariza, J. Fuentes y niveles de silicio en el incremento del rendimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) y reducción de la incidencia de moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif y Par). Repositorio institucional [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1599>.
- Azabache, L. (2003). Fertilidad de suelo para una agricultura sostenible. Editorial Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Bashir, S., Salam, A., Chhajro, M. A., Fu, Q., Khan, M. J., Zhu, J., Shaaban, M., Kubar, K. A., Ali, U., y Hu, H. (2019). Comparative efficiency of rice husk-derived biochar (RHB) and steel slag (SS) on cadmium (Cd) mobility and its uptake by Chinese cabbage in highly contaminated soil. *International journal of phytoremediation*, 20(12), 1221–1228. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1448364>
- Bazán, R. (1996). Manual para el análisis químico de suelos plantas y aguas. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA, Editorial Fundación Perú.
- Bent, E. (2003, junio 6). Ácido silícico, al devolverlo a la cadena alimenticia. https://www.academia.edu/10001879/%C3%81CIDO_SILICICO_A_devolverlo_a_la_cadena_alimenticia.
- Berghe, E. 2003. Ácido silícico, al devolverlo a la cadena alimenticia. Resumen de la Junta Consultiva compilado por la University of California en el Programa de Investigación y Educación de la Agricultura Orgánica (UCSAREP) para El Programa Orgánico Nacional del (USDA). Italia. 15 p.
- Bhat, J., Shivaraj, S., Singh, P., Navadagi, D., Tripathi, D., Dash, P. y Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8, 71.
- Bowman, J. P., y Nichols, D. S. (2005). Novel members of the family Flavobacteriaceae from Antarctic maritime habitats including *Subsaximicrobium wynnwilliamsii* gen. Nov., sp. Nov., *Subsaximicrobium saxinquilinus* sp. Nov., *Subsaxibacter broadyi* gen. Nov., sp. Nov., *Lacinutrix copepodicola* gen. Nov., sp. Nov., and novel species of the genera *Bizionia*, *Gelidibacter* and *Gillisia*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 55(Pt 4), 1471-1486. <https://doi.org/10.1099/ij.s.0.63527-0>.

- Cabezas, O. 2013. Manejo del cultivo de cacao. Guía técnica para el control de enfermedades en la localidad de Nuevo Progreso. Perú. 46 p.
- Cárdenas, A. (2012). Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico de la cooperativa agraria industrial Naranjillo, Tingo María, Perú. Repositorio institucional [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/153>.
- Cai, D. (2005). Study on silicon nutrition in China and silicon application. Yellow River Conservancy Press. Zhengzhou, China.
- Caetano, L., Prezotti, L., Pacheco, B. y Guarconi, R. (2016). Características químicas do solo, produção de biomassa e teores de nutrientes e metais pesados em plantas de milho em função de doses de escória e de calcário. *Revista Ceres*, 63:879-886.
- Chan, D. y Hale, B. (2004). Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and translocation as sources of variation. *Journal of Botany*, 55:2571-2579.
- Chi, Y., Peng, L., Tam, N. F.-Y., Lin, Q., Liang, H., Li, W. C., y Ye, Z. (2022). Effects of fly ash and steel slag on cadmium and arsenic accumulation in rice grains and soil health: A field study over four crop seasons in Guangdong, China. *Geoderma*, (4):115879. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115879>.
- Comisión Europea, 2014. Diario Oficial de la Unión Europea. Europa. 5 p.
- Clemens, S., Palmgren, M. y Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science* 7:309-315.
- COOPAIN (2011). Informe N° 03. Evaluación preliminar de Cadmio en suelos Tropicales y Almendras de Cacao en la Influencia de la Coopain.
- Da cunha Ma, J. (2008). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50:1, 11-18, DOI: 10.1080/00380768.2004.10408447.
- Epstein, E. (2009). Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, 155: 155-160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>
- Estrada, L. (2020). Aplicación de niveles de sílice al suelo, como cascarilla carbonizada de arroz, sobre la disminución de cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Von Humboldt. Repositorio institucional [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4374>.
- FEEDCOR. (2012). Ficha técnica de silicato de potasio, escoria siderúrgica silicato de calcio y dispersión de ceniza de cascarilla de arroz.
- Farooq, M. A., Ali, S., Hameed, A., Ishaque, W., Mahmood, K., y Iqbal, Z. (2013). Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant

- enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. *Ecotoxicology and environmental safety*, 96, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.07.006>.
- García, N. y Navarro, B. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. (2ª ed.). Editorial Paraninfo.
- González, S. (1986). Contenido natural de metales pesados extraíbles con EDTA en suelos del Valle Aconcagua. *Agricultura Técnica*, 46(3), 323-327. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/33806>.
- Greger, M. y Löfstedt, M. (2004), Comparison of Uptake and Distribution of Cadmium in Different Cultivars of Bread and Durum Wheat. *Crop Science*, 44:501-507. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.5010>.
- Greger, M., y Landberg, T. (2008). Influence of silicon on cadmium in wheat. In *Proceedings of the 4th International Conference on Silicon in Agriculture*, ed. M. Laing (Durban: Aim Print) (Vol. 25).
- Greger, M., Kabir, H., Landberg, T., Maity, J., y Lindberg, S. (2016). Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat. *Environmental pollution*, 211, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.027>.
- Greger M. y Landberg T. (2015). Silicon reduces cadmium and arsenic in field grown crops. *Silicon*, 1:1–5. doi: 10.1007/s12633-015-9338-z.
- Guerinot, M. (2000) The ZIP Family of Metal Transporters. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1465, 190-198. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(00\)00138-3](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(00)00138-3).
- Gu, H.; Qiu, H.; Tian, T.; Zhan, S.; Deng, T.; Chaney, R.L.; Wang, S.; Tang, Y.; Morel, J.; Qiu, R. (2011). Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. *Chemosphere*, 83, 1234–1240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.014>.
- Haynes, R. J. (2014). A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(6), 831-844. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400202>.
- He, H., Xiao, Q., Yuan, M., Huang, R., Sun, X., Wang, X., & Zhao, H. (2020). Effects of steel slag amendments on accumulation of cadmium and arsenic by rice (*Oryza sativa*) in a historically contaminated paddy field. *Environmental science and pollution research international*, 27(32), 40001–40008. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10028-3>.
- Huamaní-Yupanqui, H., Huauya-Rojas, Á., Mansilla-Minaya, L., Florida-Rofner, N., y Neira-Trujillo, G. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 61 (4), 339-344.

- Hussain, S., Shuxian, L., Mumtaz, M., Shafiq, I., Iqbal, N., Brestic, M., Shoaib, M., Sisi, Q., Li, W., Mei, X., Bing, C., Zivcak, M., Rastogi, A., Skalicky, M., Hejnak, V., Weiguo, L., y Wenyu, Y. (2021). Foliar application of silicon improves stem strength under low light stress by regulating lignin biosynthesis genes in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123256>.
- Informativo Agropecuario. (2010). El cultivo del cacao. INFOAGRO <https://www.infoagro.com/herbaceos/industriales/cacao.htm>, Revisado el 18 de mayo del 2022.
- Inés, O. (2011). Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género *Pelargonium*: suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad. [Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio institucional https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/FAUBA_4ba911b0daa8ed156613fc3ab78895f3.
- IPNI. (2015). Metales pesados en cacao, perspectiva y posible manejo. <http://nla.ipni.net/article/NLA-3112>.
- Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants. 3rd ed., (pp. 1-432). CRC Press, Boca Raton New York, Washington, D.C.
- Kabata-Pendias, A. y Mukherjee, A. (2007). Trace elements from soil to human. (pp. 1-550). Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- Kabata, P. A y Szteke. (2015). Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments. Boca Raton, <https://doi.org/10.1201/b18198>.
- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Ali, S., Hassan, M. J., Brestic, M., Zhang, X., y Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 222, 112510. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112510>.
- Lazo, A. 2013. Principales factores limitantes de la productividad de los cultivos de cacao y café de la pequeña agricultura de la provincia de Leoncio Prado. Tesis de Maestría en planificación y gestión de la Universidad Nacional de Trujillo. 69 p.
- Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., y Liang, Y. (2021). Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil*, 354, 407–419. doi: 10.1007/s11104-011-1076-4.
- Liang, W. 2005. Poultry manure compost alleviates the phytotoxicity of soil cadmium: influence on growth of pakchoi (*Zea mays* L.). *Pedosphere* 20 (1), 63–70.
- López, A. y Hoyos, J. 2016. Determinación del contenido de cadmio (Cd) en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) cultivado bajo tres sistemas de manejo en San Alejandro,

- región Ucayali. Artículo científico. Revista Universitaria. Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa. Perú. 12 p.
- Ma, J. y Takahashi, E., 2002. Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands. (pp. 281). <https://doi.org/10.1016/B978-044451166-9/50009-9>.
- Ma, J. F., y Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in plant science*, 11(8), 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>.
- Ma, J. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr.* 50. Pp. 11-18.
- Martínez, G. y Palacio, C. (2010). Determinación de metales pesados cadmio y plomo en suelos y granos de cacao fresco y fermentado mediante espectroscopia de absorción atómica de llama. [Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio institucional. <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/3703/1/136115.pdf>.
- Menzies, J., Bowen, P., Ehret, D., y Glass, A. D. M. (1992). Foliar Applications of Potassium Silicate Reduce Severity of Powdery Mildew on Cucumber, Muskmelon, and Zucchini Squash. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(6), 902-905. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.6.902>.
- Meena, V.D., Dotaniya, M.L., Coumar, V., Rajendiran, S., Ajay, Kundu, S. y Subba Rao, A. (2014) A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*. 84 (3), 505–518. doi:10.1007/s40011-013-0270-y.
- MINAG y PROAMAZONÍA. (2008). Caracterización de las zonas productoras de cacao en el Perú y su competitividad. Programa para el Desarrollo de la Amazonía. Ministerio de Agricultura. [Informe final]. http://www.proamazonia.gob.pe/estudios/caracterizacion_cacao.pdf.
- Miranda, D; Carranza, C; Rojas, C; Jerez, C; Fischer, G y Zurita, J. (2008). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del Río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(2), 180-191. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/1186.
- Naeem, A., Saifullah, Ghafoor, A., y Farooq, M. (2015). Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating abilities of cultivars. *Journal of the science of food and agriculture*, 95(12), 2467–2472. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6976>.
- Niño, B. I. (2015). Cuantificación de cadmio en cacao proveniente del occidente de Boyacá por la técnica analítica de voltamperometría. [Tesis de pregrado, Universidad Pedagógico y

- Tecnológica de Colombia]. Repositorio institucional. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1425>.
- Quero, G. E. (2007, abril 1). 12 virtudes del silicio. *Biotecnología. 2000Agro, Revista Industrial del Campo*. <http://www.2000agro.com.mx/biotecnologia/12-virtudes-del-silicio/>.
- Quero, G. E. (2008). La Biosilicificación: Proceso Biológico fundamental en la Productividad Vegetal. *Agricultura/Artículos técnicos*. <https://com/agricultura/articulos/biosilicificacion-proceso-biologico-t31973.htm>.
- Rábago, I. (2011). Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la comunidad de Madrid. [Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid]. <https://eprints.ucm.es/12511/1/T32805.pdf>.
- Ramírez A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales De La Facultad De Medicina*, 63(1), 51–64. <https://doi.org/10.15381/anales.v63i1.1477>.
- Ramtahal, G., Yen, I., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K. y Harrynanan, L. (2016) Relationships between Cadmium in Tissues of Cacao Trees and Soils in Plantations of Trinidad and Tobago. *Food and Nutrition Sciences*, 7,37-43. Doi: 10.4236/fns.2016.71005.
- Restrepo H, F y Gutiérrez T, N. (2021, febrero 10). Efecto del Silicio y el Magnesio en el alivio del estrés causado por metales pesados. *Agrosilicium*. <https://www.agrosilicium.com/efecto-del-silicio-y-el-magnesio-en-el-alivio-del-estres-causado-por-metales-pesados/>.
- Rehman, M. Z. ur, Rizwan, M., Rauf, A., Ayub, M. A., Ali, S., Qayyum, M. F., Waris, A. A., Naeem, A., y Sanaullah, M. (2019). Split application of silicon in cadmium (Cd) spiked alkaline soil plays a vital role in decreasing Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Chemosphere*, 226, 454-462. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.182>.
- Rizwan, M., Meunier, J. D., Miche, H., & Keller, C. (2012). Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination. *Journal of hazardous materials*, 209-210, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.033>.
- Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la Casa, N., Romero-Puertas, M., del Río, L., y Sandalio, L. (2008). Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas*, 17(3). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/409>.
- Sayet, R. (2013). Guía de métodos de detección y análisis de Cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). <https://es.slideshare.net/RIICCHPeru/guia-de-metodos-de-deteccion-y-analisis-decadmio-en-cacao>.

- Shah, K. y Nongkynrih, J. M. (2007). Hiperacumulación de metales y biorremediación. *Biologia plantarum*, 51 (4), 618-634. doi: 10.1007/s10535-007-0134-5.
- Shi, X., Zhang, C., Wang, H. y Zhang, F. (2005). Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings. *Plant Soil*, 272, 53–60. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-3920-2>.
- Shi, G., Cai, Q., Liu, C., y Wu L. (2010). Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes. *Plant growth regulation*, 61(1), 45-52. <https://doi.org/10.1007/s10725-010-9447-z>.
- SIEA. (2016). Anuario estadístico de producción agrícola y ganadera. <http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/anuarioagricolaganadera20162109170.pdf>.
- Subero, N. (2013). Evaluación de las fracciones de fósforo y del contenido de cadmio en suelos ácidos fertilizados con fosfatos por largos periodos y su absorción por el arroz. [Tesis de Grado, Universidad Central de Venezuela]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/10872/4550>.
- Shahid, M., Javed, M. T., Mushtaq, A., Akram, M. S., Mahmood, F., Ahmed, T., Noman, M., y Azeem, M. (2019). Chapter 17—Microbe-Mediated Mitigation of Cadmium Toxicity in Plants. En M. Hasanuzzaman, M. N. V. Prasad, y M. Fujita (Eds.), *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants* (pp. 427-449). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00017-6>,
- Singh, B. K., Quince, C., Macdonald, C. A., Khachane, A., Thomas, N., Al-Soud, W. A., Sørensen, S. J., He, Z., White, D., Sinclair, A., Crooks, B., Zhou, J., y Campbell, C. D. (2014). Loss of microbial diversity in soils is coincident with reductions in some specialized functions. *Environmental Microbiology*, 16(8), 2408-2420. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12353>.
- Tantalean, E. y Huauya, M. (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de investigación agroproducción sustentable*, 1(2), 69-78. DOI:10.25127/aps.20172.365.
- TNS y CITE CACAO – USAID PDA. (2011). “Contenido de cadmio y plomo en la producción de cacao en San Martín”. [Estudio]. Consultores: Huamani, H y Huauya, M. Tarapoto, San Martín, Perú. (pp. 74).
- Tóth, G., Hermann, T., da Silva, M.R., y Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment international*, 88, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>.
- Thomine, S., Wang, R., Ward, J. M., Crawford, N. M., y Schroeder, J. I. (2000). Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with

- homology to Nramp genes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 97(9), 4991–4996. <https://doi.org/10.1073/pnas.97.9.4991>.
- Treder, W., y Cieslinski, G.B. (2005). Effect of Silicon Application on Cadmium Uptake and Distribution in Strawberry Plants Grown on Contaminated Soils. *Journal of Plant Nutrition*, 28, 917 - 929. <https://doi.org/10.1081/PLN-200058877>.
- Treder, W y Cieslinski, G. 2006. Effect of Silicon Application on Cadmium Uptake and Distribution in Strawberry Plants Grown on Contaminated Soils. *Rev. Journal of Plant Nutrition*.pp. 87-93. <https://doi.org/10.1081/PLN-200058877US>
- Environmental Protection Agency. (1996). Soil screening guidance: technical background document. USEPA Rep.540/R-95/128. US Gov. Print. Office, Washington, DC.
- USEPA (1996). Soil screening guidance: technical background document. USEPA “US Environmental Protection Agency.” Rep.540/R-95/128. US Gov. Print. Office, Washington, DC. <https://www.osti.gov/biblio/270219>.
- Wang, B., Chu, C., Wei, H., Zhang, L., Ahmad, Z., Wu, S., y Xie, B. (2020). Ameliorative effects of silicon fertilizer on soil bacterial community and pakchoi (*Brassica chinensis* L.) grown on soil contaminated with multiple heavy metals. *Environmental Pollution*, 267, 115411. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115411>.
- Wang, L., Cai, K., Chen, Y., y Wang, G. (2013). Silicon-mediated tomato resistance against *Ralstonia solanacearum* is associated with modification of soil microbial community structure and activity. *Biological Trace Element Research*, 152(2), 275-283. <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9611-1>.
- Yan, J., Wang, L., Hu, Y., Tsang, Y. F., Zhang, Y., Wu, J., Fu, X., y Sun, Y. (2018). Plant litter composition selects different soil microbial structures and in turn drives different litter decomposition pattern and soil carbon sequestration capability. *Geoderma*, 319, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.009>.
- Zavala, S; Repoma R ; Lao, O; Aguilar, G. 2022. Enmiendas líquidas orgánicas en la reducción de cadmio en suelo, hojas y almendras de cacao. *Rev. Agroind. sci.* 12(2): 199 – 205.
- Zhao, X., y Masaihiko, S. (2007). Amelioration of Cadmium Polluted Paddy Soils by Porous Hydrated Calcium Silicate. *Water, Air, Soil Pollution*, 183(4), 309-315. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9379-z>.
- Zhao, F; Chang, D; Huang, S; Yamaji H, Zhang y W; Ma,F. 2020. OsNRAMP1 transporter contributes to cadmium and manganese uptake in rice. *Plant, Cell y Enviroment*. Vol. 43. Pp. 2476-249. <https://doi.org/10.1111/pce.13843>.

ANEXOS

Tabla 14. Datos del análisis de cadmio total y disponible en suelos (ppm).

Trat./Blq.	Cadmio total en suelo (ppm)				Cadmio disponible en suelo (ppm)			
	I	II	III	VI	I	II	III	VI
T1	0,55	0,60	0,70	0,75	0,13	0,25	0,20	0,24
T2	0,55	0,65	0,65	0,75	0,19	0,27	0,21	0,25
T3	0,55	0,65	0,70	0,75	0,18	0,24	0,20	0,24
T4	0,55	0,60	0,70	0,80	0,18	0,25	0,18	0,32
T5	0,55	0,65	0,75	0,75	0,20	0,20	0,24	0,28
T6	0,55	0,65	0,70	0,75	0,18	0,18	0,18	0,25
T7	0,55	0,70	0,70	0,80	0,25	0,35	0,18	0,38
T8	0,60	0,65	0,75	0,80	0,28	0,25	0,23	0,38
T9	0,55	0,70	0,80	0,80	0,27	0,30	0,25	0,46
T10	0,60	0,70	0,75	0,80	0,27	0,28	0,21	0,38
T11	0,60	0,75	0,70	0,80	0,35	0,37	0,36	0,31

Tabla 15. Datos del análisis de cadmio en hojas y almendras del cultivo de cacao (ppm)

Trat/Bloq.	Cadmio en hojas (ppm)				Cadmio en almendras (ppm)			
	I	II	III	VI	I	II	III	VI
T1	2,85	2,80	2,35	2,45	1,25	0,90	1,40	1,15
T2	2,25	2,30	2,75	2,40	0,55	1,00	1,10	0,75
T3	3,90	3,40	3,30	4,00	1,50	1,55	1,75	1,95
T4	3,10	3,20	3,90	3,00	1,90	1,50	1,30	1,60
T5	3,55	3,25	3,75	3,35	0,60	0,65	0,75	0,70
T6	1,70	1,35	1,50	1,75	1,00	0,95	0,65	0,50
T7	2,30	1,80	2,35	2,15	1,55	1,15	1,60	1,50
T8	1,55	1,65	1,50	1,15	0,40	0,85	0,50	0,80
T9	2,40	2,25	2,75	2,95	0,55	0,55	0,70	0,60
T10	3,45	3,50	3,05	4,10	1,65	1,00	1,75	1,60
T11	4,25	4,90	4,20	4,75	2,60	1,90	2,25	1,85

Tabla 16. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio total en suelo.

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Bloque	0,27	3	0,09	135,00	<0,0001
tratamiento	0,03	10	0,00	4,50	0,0062
Error experimental	0,02	30	0,00		
Total	0,32	43			
C.V (%)	4,12				
R ²	0,93				

Tabla 17. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio disponible en suelo.

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Bloque	0,07	3	0,02	14,00	<0,0001
tratamiento	0,10	10	0,01	6,00	0,0001
Error experimental	0,05	30	0,00		
Total	0,22	43			
C.V (%)	16,54				
R ²	0,75				

Tabla 18. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio en hojas del cultivo de cacao.

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Bloque	0,13	3	0,04	0,45	0,7310
tratamiento	35,36	10	3,54	36,58	<0,0001
Error experimental	2,90	30	0,10		
Total	38,39	43			
C.V (%)	10,94				
R ²	0,92				

Tabla 19. Análisis de varianza ($\alpha=0,05$) de cadmio en almendras del cultivo de cacao.

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	p-valor
Bloque	0,17	3	0,06	1,03	0,3987
tratamiento	10,75	10	1,08	19,55	<0,0001
Error experimental	1,65	30	0,06		
Total	12,57	43			
C.V (%)	19,71				
R ²	0,87				

Tabla 20. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio total en suelo.

	Tratamiento	Cadmio total en suelo (ppm)			
		Media		E.E	Sig.
T1	(Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK)	0,65	±	0,01	a
T2	Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK	0,65	±	0,01	a
T4	Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK	0,66	±	0,01	a
T6	Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK	0,66	±	0,01	a
T3	Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK	0,66	±	0,01	a
T5	Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK	0,68	±	0,01	a
T7	Silicato de Potasio (1 L/ha) +NPK)	0,69	±	0,01	a
T8	Silicato de Potasio (2 L/ha) +NPK)	0,70	±	0,01	b
T9	Silicato de Potasio (3 L/ha) +NPK)	0,71	±	0,01	b
T10	Testigo con NPK	0,71	±	0,01	b
T11	Testigo absoluto	0,71	±	0,01	b

Tabla 21. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio disponible en suelo.

	Tratamiento	Cadmio disponible en suelo (ppm)			
		Media		E.E	Sig.
T6	Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK	0,20	±	0,02	a
T1	(Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK	0,21	±	0,02	a
T3	Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK	0,22	±	0,02	a
T2	Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK	0,23	±	0,02	a
T5	Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK	0,23	±	0,02	a
T4	Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK	0,23	±	0,02	a
T10	Testigo con NPK)	0,29	±	0,02	b
T8	Silicato de Potasio (2 L/ha) +NPK)	0,29	±	0,02	b
T7	Silicato de Potasio (1 L/ha) +NPK)	0,29	±	0,02	b
T9	Silicato de Potasio (3 L/ha) +NPK)	0,32	±	0,02	b
T11	Testigo absoluto	0,35	±	0,02	b

Tabla 22. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio en hojas del cultivo de cacao.

Tratamiento		Cadmio en hojas de cacao (ppm)			
		Media		E.E	Sig.
T8	Silicato de Potasio (2 L/ha) +NPK	1,46	±	0,16	a
T6	Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK	1,58	±	0,16	a
T7	Silicato de Potasio (1 L/ha) +NPK	2,15	±	0,16	b
T2	Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK	2,43	±	0,16	b
T9	Silicato de Potasio (3 L/ha) +NPK	2,59	±	0,16	b
T1	Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK	2,61	±	0,16	b
T4	Escoria Siderúrgica – Si Ca(100 ppm SiA) + NPK	3,30	±	0,16	c
T5	Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK	3,48	±	0,16	c
T10	Testigo con NPK	3,53	±	0,16	c
T3	Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK	3,65	±	0,16	c
T11	Testigo absoluto	4,53	±	0,16	d

Tabla 23. Análisis de Duncan ($\alpha=0,05$) para cadmio en almendras del cultivo de cacao.

Tratamiento		Cadmio en almendras de cacao (ppm)			
		Media		E.E	Sig.
T9	Silicato de Potasio (3 L/ha) +NPK	0,60	±	0,12	a
T8	Silicato de Potasio (2 L/ha) +NPK	0,64	±	0,12	a
T5	Escoria Siderúrgica – Si Ca (200 ppm SiA) + NPK	0,68	±	0,12	a
T6	Escoria Siderúrgica – Si Ca (400 ppm SiA) + NPK	0,78	±	0,12	a
T2	Disp Cz Cascarilla de Az (200 ppm SiA) + NPK	0,85	±	0,12	a
T1	Disp Cz Cascarilla de Az (100 ppm SiA) + NPK	1,18	±	0,12	b
T7	Silicato de Potasio (1 L/ha) +NPK	1,45	±	0,12	c
T10	Testigo con NPK	1,50	±	0,12	c
T4	Escoria Siderúrgica – Si Ca (100 ppm SiA) + NPK	1,58	±	0,12	c
T3	Disp Cz Cascarilla de Az (400 ppm SiA) + NPK	1,69	±	0,12	c
T11	Testigo absoluto	2,15	±	0,12	d

Tabla 24. Detalles del costo de producción del experimento

GASTOS DE CULTIVO	U.M	Cantidad	Costo Unit.	Sub Total
Control de malezas	Jornal	1	25	25
Poda principal o general	Jornal	6	25	150
Deschuponado	Jornal	6	25	150
Control fitosanitario	Jornal	5	25	125
Remoción de enfermedades	Jornal	12	25	300
				750
INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO				
Preparación y abonamiento	Jornal	5	25	125
Preparación y aplicar abono foliar	Jornal	5	25	125
				250
INSUMOS Y MATERIALES				
Urea	Saco (50 kg)	2	75	150
Cloruro de Potasio	Saco (50 kg)	2	95	190
Superfosfato triple	Saco (50 kg)	2	110	220
Guano de Isla	Saco (50 kg)	4	60	240
Dispersión a base de cascarilla de arroz	Saco (25 kg)	11,5	50	575
Escoria silicato de calcio	Saco (25 kg)		50	0
Silicato de potasio	Litros		50	0
				1375
COSECHA Y BENEFICIO				
Cosecha	Jornal	35	25	875
Quiebra	Jornal	55	25	1375
Venta	Jornal	4	25	100
				2350
HERRAMIENTAS				
Machete	Unidad	1	10	10
Tijera de podar	Unidad	1	50	50
Tijera grande de poda	Unidad	1	30	30
				90
Total				4815

Cálculos del área efectiva para la fertilización.

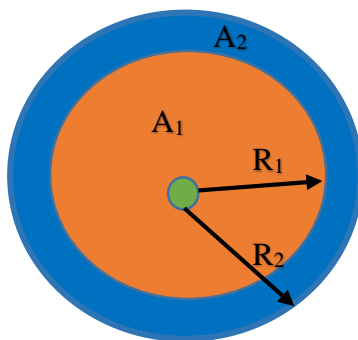
Textura: Franco Densidad aparente = 1,40 g/cm³ = 1400 kg/m³

Profundidad efectiva (PE) = 0,15 m

Volumen (1hectarea) = 100 m x 100 m x 0.15 m = 1500 m³

Peso de suelo = (Densidad x Volumen) = 875000 kg = 2100 Tn

- **Volumen, peso y área efectiva para una planta según el grafico.**



Donde: $R_1 = 0,527$ m

$R_2 = 0,60$ m

A_1 = Superficie que no se fertilizara

A_2 = Superficie que se fertilizara

Área = πr^2

Área total = $3,1416 \times (R_2)^2 = 3,1416 \times (0.60 \text{ m})^2 = 1,13097600 \text{ m}^2$

Área 1 = $3,1416 \times (R_1)^2 = 3,1416 \times (0.527 \text{ m})^2 = 0,872513 \text{ m}^2$

$A_2 = AT - A_1 = 0,25846257 \text{ m}^2$

Área efectiva = $0,25846257 \text{ m}^2$

Volumen efectivo = $0,25846257 \text{ m}^2 \times 0,15 \text{ m} = 0,03876939 \text{ m}^3$

Peso del Área efectiva = Densidad x Volumen = 54,28 kg

- **Cálculo de SiA para una planta según peso de área efectiva**

100 ppm = 100 mg/kg se suelo = 0,1 g/kg de suelo = 5,428 g

200 ppm = 200 mg/kg se suelo = 0,2 g/kg de suelo = 10,856 g

400 ppm = 400 mg/kg se suelo = 0,4 g/kg de suelo = 21,712 g

Figura 7. Cálculo de peso efectivo de suelo para la aplicación de las fuentes por planta.

Dispersión a base de ceniza cascarilla de arroz = 42000 ppm SiA

1 ppm ----- 1 mg/kg
 42000 ppm ----- X

X = 42000 mg/kg de Disp Cz CAz

1 g ----- 1000 mg
 X ----- 42000 mg/kg de Disp Cz CAz

X = 42 g/kg de Disp Cz CAz

▪ **Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio = 27000 ppm SiA**

1 ppm ----- 1 mg/kg
 27000 ppm ----- X

X = 27000 mg/kg ES-SiCa

1 g ----- 1000 mg
 X ----- 27000 mg/kg ES-SiCa

X = 27 g/kg ES-SiCa

Figura 8. Cálculo del requerimiento de las fuentes según su concentración de SiA.

▪ **Nivel 100 ppm**

1 kg de Disp Cz CAz ----- 42 g SiA
 X ----- 5,428 g SiA

X = 0,2012 kg de Disp Cz CAz para una planta
 X = 8,3 kg de Disp Cz CAz para T₁ (64 plantas)

▪ **Nivel 200 ppm**

1 kg de Disp Cz CAz ----- 42 g SiA
 X ----- 10,856 g SiA

X = 0,2585 kg de Disp Cz CAz para una planta
 X = 16,5 kg de Disp Cz CAz para T₂ (64 plantas)

▪ **Nivel 400 ppm**

1 kg de Disp Cz CAz ----- 42 g SiA
 X ----- 21,712 g SiA

X = 0,5172 kg de Disp Cz CAz para una planta
 X = 33,1 kg de Disp Cz CAz para T₃ (64 plantas)

Figura 9. Cálculo para dispersión a base de ceniza de cascarilla de arroz, según las concentraciones a aplicar para cada tratamiento.

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nivel 100 ppm 	
1 kg de ES-SiCa -----	27 g SiA
X -----	5,428 g SiA
X = 0,2012 kg de ES-SiCa para una planta	
X = 12,8 kg de ES-SiCa para T ₄ (64 plantas)	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nivel 200 ppm 	
1 kg de ES-SiCa -----	27 g SiA
X -----	10,856 g SiA
X = 0,4021 kg de ES-SiCa para una planta	
X = 25,7 kg de ES-SiCa para T ₅ (64 plantas)	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nivel 400 ppm 	
1 kg de ES-SiCa -----	27 g SiA
X -----	21,712 g SiA
X = 0,8050 kg de ES-SiCa para una planta	
X = 51,5 kg de ES-SiCa para T ₆ (64 plantas)	

Figura 10. Cálculo para escoria siderúrgica – silicato de calcio, según las concentraciones a aplicar para cada tratamiento.

<ul style="list-style-type: none"> ▪ T₁ = 10 % 	
10 kg de Disp Cz CAz -----	100 L de agua
4,15 kg de Disp Cz CAz -----	X
X = 41,50 L a este volumen será enraizado	
X = 648,44 ml/planta	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ T₂ = 20 % 	
20 kg de Disp Cz CAz -----	100 L de agua
8,25 kg de Disp Cz CAz -----	X
X = 41,25 L será enraizado	
X = 644,53 ml/planta	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ T₃ = 50 % 	
50 kg de Disp Cz CAz -----	100 L de agua
16,55 kg de Disp Cz CAz -----	X
X = 33,10 L será enraizado	
X = 517,19 ml/planta	

Figura 11. Dilución y la cantidad para cada planta según los tratamientos en las dos aplicaciones de dispersión a base de ceniza de cascarilla de arroz.

<ul style="list-style-type: none"> ▪ T₄ = 20 %
20 kg de ES-SiCa ----- 100 L de agua
6,40 kg de ES-SiCa ----- X
X = 32,00 L será enraizado
X = 500,00 ml/planta
<ul style="list-style-type: none"> ▪ T₅ = 30 %
30 kg de ES-SiCa ----- 100 L de agua
12,85 kg de ES-SiCa ----- X
X = 42,83 L será enraizado
X = 669,22 ml/planta
<ul style="list-style-type: none"> ▪ T₆ = 60 %
60 kg de ES-SiCa ----- 100 L de agua
25,75 kg de ES-SiCa ----- X
X = 42,92 L será enraizado
X = 670,63 ml/planta

Figura 12. Dilución y la cantidad para cada planta según los tratamientos en las dos aplicaciones de Escoria Siderúrgica – Silicato de Calcio

<ul style="list-style-type: none"> ▪ T₁₀ = Cálculos de las fuentes en la fertilización con N-P-K (120-25-120) 	
Urea (46% N); Fosfato diamonico (18 % N - 46 % P ₂ O ₅); Cloruro de potasio (60 % K ₂ O)	
60 kg de K ₂ O----- 100 kg de Cloruro de potasio	
120 kg de K ₂ O ----- X	
X = 200 kg de Cloruro de potasio	
46 kg de P ₂ O ₅ ----- 100 kg de Fosfato diamonico	
25 kg de P ₂ O ₅ ----- X	
X = 54,3 kg de Fosfato diamonico	
X = 18% de N en 54.3 kg de Fosfato diamonico = 9,8 kg de N	
46 kg de N----- 100 kg de Urea	
90,2 kg de N----- X	
X = 196 kg de Urea	
Mezcla de las fuentes	
200 kg de Cloruro de potasio } = 450,3 kg/ha dividido en dos aplicaciones	
54,3 kg de Fosfato diamonico } = 225,2 kg/ha dividido en 1111 plantas de cacao	
196 kg de Urea } = 202 gr/planta	
	12,9 kg/tratamiento

Figura 13. Cálculos de las cantidades usadas en la fertilización con N-P-K (120-25-120)

▪ **T7 = 1 L de Silicato de Potasio diluido en 500 L de agua**

1 L de SiK ----- 1111 plantas

X----- 64 plantas

X = 57,61 ml producto / tratamiento

1 L de SiK -----500 L de agua

28,81 ml ----- X

X = 14,40 L será enraizado

X = 225,07 ml/planta

▪ **T8 = 2L de Silicato de Potasio diluido en 500 L de agua**

2 L de SiK ----- 1111 plantas

X----- 64 plantas

X = 115,21 ml producto / tratamiento

2 L de SiK -----500 L de agua

57,61 ml ----- X

X = 14,05 L será enraizado

X = 225,07 ml/planta

▪ **T9 = 3L de Silicato de Potasio diluido en 500 L de agua**

3 L de SiK ----- 1111 plantas

X----- 64 plantas

X = 172,82 ml producto / tratamiento

3 L de SiK -----500 L de agua

86.41 ml ----- X

X = 14,05 L será enraizado

X = 225,07 ml/planta

Figura 14. Dilución y la cantidad para cada planta según los tratamientos en las dos aplicaciones de silicato de potasio



Figura 15. Selección del terreno y demarcación de los bloques y tratamientos



Figura 16. Preparación de las fuentes de silicio para su aplicación en campo



Figura 17. Muestreo de los frutos por tratamiento y bloque de forma ordenada y se utilizó un machete para realizar el quiebre de la mazorca.



Figura 18. Extracción de los granos y su posterior empaque, para luego fermentarlo y secarlo.



Figura 19. Secado de los granos de cacao y molienda con el mortero



Figura 20. Secado de las muestras de suelo y enraizamiento con agua destilada a 50 ml en las fiolas.



Figura 21. Agregando acido a las muestras para la determinación de cadmio total.



Figura 22. Diferentes etapas de los análisis de cadmio total, en almendras, hojas y suelo.