



ESCUELA DE DOCTORADO
INTERNACIONAL DE LA USC

Jhon Alexander
Villalaz Pérez

Tesis doctoral

Influencia del abono orgánico
sobre el desarrollo y calidad del
cacao producido en Almirante,
Bocas del Toro-Panamá

Santiago de Compostela, 2023

Programa de doctorado en Ciencias Agrícolas y Medioambientales

TESIS DE DOCTORADO

**INFLUENCIA DEL ABONO
ORGÁNICO SOBRE EL
DESARROLLO Y CALIDAD DEL
CACAO PRODUCIDO EN
ALMIRANTE, BOCAS DEL TORO-
PANAMÁ**

Jhon Alexander Villalaz Pérez

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE
COMPOSTELA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y MEDIOAMBIENTALES

SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO (ESPAÑA)

AÑO 2023



DECLARACIÓN DEL AUTOR DE LA TEISS

D. Jhon Alexander Villalaz Pérez

Título de la tesis: Influencia del abono orgánico sobre el desarrollo y calidad del cacao producido en Almirante, Bocas del Toro-Panamá

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento y declaro que:

- 1) La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.
- 2) De ser el caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.
- 3) Confirmo que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.
- 4) La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide la versión impresa con la presentada en formato electrónico.

Y me comprometo a presentar el Compromiso Documental de Supervisión en el caso que el original no esté depositado en la Escuela.

Panamá, 2 de junio del 2023

Firma electrónica



AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR / TUTOR DE LA TESIS

D.. **AGUSTÍN MERINO GARCÍA**

CATEDRÁTICO DE LA ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA, ESPAÑA.

En Condición de: Director y Tutor

Título de la tesis: **Influencia del abono orgánico sobre el desarrollo y calidad del cacao producido en Almirante, Bocas del Toro-Panamá.**

INFORMA:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D. **JHON ALEXANDER VILLALAZ PÉREZ**, bajo nuestra dirección/tutorización, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

En Lugo, España de 2 junio de 2023

Firma electrónica



AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR / TUTOR DE LA TESIS

D. JOSÉ EZEQUIEL VILLARREAL NÚÑEZ

INVESTIGADOR AGRÍCOLA. DEPARTAMENTO DE SUELOS Y AGUA, DEL INSTITUTO DE INNOVACIÓN AGROPECUARIA DE PANAMÁ.

En Condición de: Director

Título de la tesis: **Influencia del abono orgánico sobre el desarrollo y calidad del cacao producido en Almirante, Bocas del Toro-Panamá.**

INFORMA:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D/D^a. **JHON ALEXANDER VILLALAZ PÉREZ**, bajo nuestra dirección/tutorización, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

En Panamá, de 2 junio de 2023

Firma electrónica

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a DIOS todo poderoso, porque gracias a la Fe que siempre mantengo hacia él, me mantuvo firme con ganas de continuar a superarme.

A mis dos hijos Jhon Alexander y Johan Alexander, para que siempre puedan ver en mí un ejemplo de superación, sin importar las piedras que se puedan encontrar en el camino.

De igual forma dedico esta tesis a mi madre Catalina y padre José, que han sido pilares de apoyo en toda mi trayectoria de la vida, aunque mi madre en este momento de escribir estas líneas enfrenta un duro problema de salud.

A mis hermanos Isqueira y José, que siempre mantuvieron una firme convicción de que yo pudiera superarme convirtiéndose mi hermana mayor (Isqueira) en una voz de aliento.

AGRADECIMIENTO

Agradezco la culminación de mi carrera a entidades como la Universidad Santiago de Compostela; la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología e Innovación (SENACYT) y al Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) por ayudarme a formar parte de las filas de Doctores en Ciencias, para poder continuar ayudando a las investigaciones dirigidas a solucionar problemas que acarrea el sector agropecuario en Panamá.

Un valioso agradecimiento a mis amigos y directores de tesis los Doctores en Ciencias, José Ezequiel Villarreal Núñez y Agustín Merino García, por transmitir sus experiencias profesionales en el arte de escribir y su gran paciencia que mantuvieron hacia mi persona, en esta travesía muy difícil que sirvió para convertirme en un profesional de mayor perfil.

A mis compañeros de trabajo, los Ingenieros Osvaldo Cerrud, Adolfo Santo, Abiel Gutiérrez e Iván Ramos, un grupo de grandes amigos por darme también una voz de aliento.

A todo el personal del Laboratorio de Fertilidad de suelos y Agua (Yaira Mavel, Virginia Pérez, y Fabio Ortega) y del Centro de Investigación Agropecuaria de Bocas del Toro del (IDIAP) por su apoyo en la toma, recolección y análisis de las muestras de suelo y tejido foliar.

A un valioso productor Pedro Ibáñez (q.e.p.d) que siempre creyó en nosotros los colaboradores del IDIAP al prestar su finca para realizar los trabajos de investigación en este cultivo de cacao, fuente de recurso económico para toda su familia.

RESUMEN

La planta de cacao (*Theobroma cacao* L) es originaria de América específicamente de las Amazonía. Es cultivado en algunas regiones de la República de Panamá, pero su mayor producción se encuentra en la provincia de Bocas del Toro, representando para los productores del área una alternativa socioeconómica y cultural. El estudio se concentra en el área de Almirante, distrito perteneciente a la provincia de Bocas del Toro. Este a su vez presenta importantes limitaciones, como son la baja producción debido a la reducida fertilidad del suelo, concentraciones elevadas de Cd en el suelo, hojas, frutos y principalmente en el grano de cacao utilizado como materia prima en la elaboración del chocolate y otros derivados (aceites, cosméticos, etc), genotipos de cacao envejecidos de edades mayores a 30 años, y sequías que merman la producción.

Esta investigación de Tesis Doctoral con título, **Influencia del abono orgánico sobre el desarrollo y calidad del cacao producido en Almirante, Bocas del Toro-Panamá**, servirá como referencia para resolver las limitaciones señaladas en el párrafo anterior.

El objetivo principal de la tesis fue en la aplicación de la línea base para mejorar la producción de cacao en la región de Almirante. Al mismo tiempo hacer una primera exploración sobre otros actores que potencialmente podría afectar la producción y calidad del cultivo, como el Cd o el efecto de la sequía temporal.

El estudio se estructura en 4 capítulos. El primer capítulo, Efecto del estiércol de pollo compostado sobre la nutrición del cultivo de cacao en sistemas agroforestales en Bocas del Toro, Panamá, donde se concluyó que el efecto de estiércol de pollo compostado mejora las propiedades de los suelos y la nutrición de cultivos de cacao en sistemas agroforestales en Bocas del Toro, Panamá.

El segundo capítulo, Concentración de cadmio en cacao producido en sistemas agroforestales de pequeños productores de Panamá, se conoció las concentraciones de metales pesados en los suelos y se identificaron los principales factores que explican su variabilidad tóxicas en las hojas, frutos y principalmente en el grano de cacao, encontrando en este último una concentración por debajo de las normas establecidas por la Unión Europea (0.6 a 0.8 mg kg⁻¹) en la elaboración del chocolate con contenido de materia seca total ≥ 50 % del CODEX Alimentarius.

El tercer capítulo, Efectos de la aplicación de cadmio al suelo en plantas de cacao Clon AS-CP 2661, se conoció la concentración máxima de Cd en las hojas, tallos y raíces de este Clon mejorado, que sirvió para identificar en qué medida este metal pesado puede ser retenido o transferido desde el suelo hacia la planta.

Por último, el cuarto capítulo, Efecto del índice de estrés hídrico sobre el estado vegetativo de la planta de cacao, se pudo conocer el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) utilizando como herramienta el sensor portátil GreenSeekerTM que sirvió para relacionar el porcentaje de humedad del cultivo con el estrés hídrico en el cultivo de cacao.

Los capítulos de esta Tesis Doctoral, arrojaron resultados muy valiosos e importantes en la mejora del suelo utilizado con cultivo de cacao utilizando estiércol de pollo compostado, sirviendo como base en el aumento de la materia orgánica del suelo ayudando a solucionar el problema de la acidez por medio el pH del suelo, incrementando la biodisponibilidad de elementos esenciales y absorción de nutrientes para la planta de cacao, repercutiendo en el crecimiento vegetativo por medio de la biomasa.

Palabras claves: Cacao, cadmio, sistemas agroforestales, estiércol de pollo compostado, estrés hídrico, índice de vegetación, nutrición en la planta.

RESUMO

A planta de cacao (*Theobroma cacao* L) é orixinaria de América especificamente das Amazonía. É cultivado nalgunhas rexións da República de Panamá, pero a súa maior produción atópase na provincia de Bocas do Toro, representando para os produtores da área unha alternativa socioeconómica e cultural. O estudo concéntrase na área de Almirante, distrito pertencente á provincia de Bocas do Touro. Este pola súa vez presenta importantes limitacións, como son a baixa produción debido á reducida fertilidade do solo, concentracións elevadas de Cd no solo, follas, froitos e principalmente no gran de cacao utilizado como materia prima na elaboración do chocolate e outros derivados (aceites, cosméticos, etc), xenotipos de cacao avellentados de idades maiores a 30 anos, e secas que minguen a produción.

Esta investigación de Tesis Doutoral con título, **Influencia do aboamento orgánico sobre o desenvolvemento e calidade do cacao producido en Almirante, Bocas do Toro-Panamá**, servirá como referencia para resolver as limitacións sinaladas no parágrafo anterior.

O obxectivo principal da tesis foi na aplicación da liña base para mellorar a produción de cacao na rexión de Almirante. Ao mesmo tempo facer unha primeira exploración sobre outros actores que potencialmente podería afectar a produción e calidade do cultivo, como o Cd ou o efecto da seca temporal.

O estudo estrutúrase en 4 capítulos. O primeiro capítulo, Efecto do estércol de pollo compostaxe sobre a nutrición do cultivo de cacao en sistemas agroforestais en Bocas do Touro, Panamá, onde se concluíu que o efecto de estércol de pollo compostaxe mellora as propiedades dos solos e a nutrición de cultivos de cacao en sistemas agroforestais en Bocas do Toro, Panamá.

O segundo capítulo, Concentración de cadmio en cacao producido en sistemas agroforestais de pequenos produtores de Panamá, coñeceuse as concentracións de metais pesados nos solos e identificáronse os principais factores que explican a súa variabilidade toxicas nas follas, froitos e principalmente no gran de cacao, atopando neste último unha concentración por debaixo das normas establecidas pola Unión Europea (0.6 a 0.8 mg kg⁻¹ na elaboración do chocolate con contido de materia seca total ≥ 50 % do CODEX Alimentarius.

O terceiro capítulo, Efectos da aplicación de cadmio ao solo en plantas de cacao Clon AS-CP 2661, coñeceuse a concentración máxima de Cd nas follas, tales e raíces deste Clon mellorado, que serviu para identificar en que medida este metal pesado pode ser retido ou transferido desde o solo cara á planta.

Por último, o cuarto capítulo, Efecto do índice de estrés hídrico sobre o estado vexetativo da planta de cacao, púidose coñecer o índice de vexetación de diferenza normalizada (NDVI) utilizando como ferramenta o sensor portátil GreenSeekerTM que serviu para relacionar a porcentaxe de humidade do cultivo co estrés hídrico no cultivo de cacao.

Os capítulos desta Tesis Doutoral, reflectaron resultados moi valiosos e importantes na mellora do solo utilizado con cultivo de cacao utilizando esterco de pollo compostado, servindo como base no aumento da materia orgánica do solo axudando a solucionar o problema da acidez por medio o pH do solo, incrementando a biodisponibilidade de elementos esenciais e absorción de nutrientes para a planta de cacao, repercutindo no crecemento vexetativo por medio da biomasa.

Palabras claves: Cacao, cadmio, sistemas agroforestais, estércol de pollo compostaxe, estrés hídrico, índice de vexetación, nutrición na planta.

ABSTRACT

The cacao plant (*Theobroma cacao* L) is native to America specifically from the Amazon. It is cultivated in some regions of the Republic of Panama, but its largest production is in the province of Bocas del Toro, representing for the producers of the area a socioeconomic and cultural alternative. The study focuses on the area of Almirante, a district belonging to the province of Bocas del Toro. This in turn presents important limitations, such as low production due to reduced soil fertility, high concentrations of Cd in the soil, leaves, fruits and mainly in the cocoa bean used as raw material in the production of chocolate and other derivatives (oils, cosmetics, etc.), aged cocoa genotypes over 30 years, and droughts that reduce production.

This research of Doctoral Thesis with title, **Influence of organic fertilizer on the development and quality of cocoa produced in Almirante, Bocas del Toro-Panama**, will serve as a reference to resolve the limitations indicated in the previous paragraph.

The main objective of the thesis was in the application of the baseline to improve cocoa production in the Almirante region. At the same time, make a first exploration of other actors that could potentially affect the production and quality of the crop, such as Cd or the effect of temporary drought.

The study is structured in 4 chapters. The first chapter, Effect of composted chicken manure on cocoa crop nutrition in agroforestry systems in Bocas del Toro, Panama, where it was concluded that the effect of composted chicken manure improves soil properties and cocoa crop nutrition in agroforestry systems in Bocas del Toro, Panama.

The second chapter, Concentration of cadmium in cocoa produced in agroforestry systems of small producers in Panama, the concentrations of heavy metals in the soils were known and the main factors that explain their toxic variability in the leaves, fruits and mainly in the cocoa bean were identified, finding in the latter a concentration below the standards established by the European Union (0.6 to 0.8 mg kg^{-1}) in the manufacture of chocolate with a total dry matter content $\geq 50 \%$ of the CODEX Alimentarius.

The third chapter, Effects of the application of cadmium to the soil in cocoa plants Clone AS-CP 2661, was known the maximum concentration of Cd in the leaves, stems and roots of this improved clone, which served to identify to what extent this heavy metal can be retained or transferred from the soil to the plant.

Finally, the fourth chapter, Effect of the index of water stress on the vegetative state of the cocoa plant, it was possible to know the normalized difference vegetation index (NDVI) using as a tool the portable sensor GreenSeekerTM that served to relate the percentage of moisture of the crop with water stress in the cocoa crop.

The chapters of this Doctoral Thesis, yielded very valuable and important results in the improvement of the soil used with cocoa cultivation using composted chicken manure, serving as a basis in the increase of soil organic matter helping to solve the problem of acidity through soil pH, increasing the bioavailability of essential elements and absorption of nutrients for the cocoa plant, impacting on vegetative growth through biomass.

Key words: Cocoa, cadmium, agroforestry systems, composted chicken manure, water stress, vegetation index, plant nutrition.

INDICE

LISTAS DE TABLAS.....	IV
LISTAS DE FIGURAS	VI
RESUMEN GENERAL	1
RESUMEN GENERAL	2
INTRODUCCIÓN GENERAL	7
INTRODUCCIÓN GENERAL	8
JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO GENERAL	13
Objetivos específicos	14
3. CAPÍTULO I.....	16
EFFECTO DEL ESTIERCOL DE POLLO COMPOSTADO SOBRE LA NUTRICIÓN DEL CULTIVO DE CACAO EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN BOCAS DEL TORO, PANAMÁ.....	16
3.1 RESUMEN.....	16
3.2 INTRODUCCIÓN.....	17
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.3.1 Ubicación geográfica y características edafoclimáticas del sitio estudiado	19
3.3.2 Diseño experimental.....	20
3.3.3 Muestreo de suelos y plantas.....	21
3.3.4 Análisis de suelos y plantas.....	21
3.3.5 Análisis estadístico.....	22
3.4 RESULTADOS	23
3.4.1 Efecto de los aportes de estiércol de pollo compostado sobre las propiedades del suelo.	23
3.4.2 Evolución de la nutrición de la planta de cacao según los aportes de estiércol de pollo compostado	28
3.5 DISCUSIÓN.....	32
3.6 CONCLUSIONES.....	35
4. CAPÍTULO II. CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN CACAO PRODUCIDO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE PEQUEÑOS PRODUCTORES DE PANAMÁ	37
4.1 RESUMEN	37

4.2 INTRODUCCIÓN.....	38
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
4.3.1 Ubicación y características generales del sitio del estudio.....	40
4.3.2 Metodología de muestreo y preparación de muestras en el laboratorio	41
4.3.3 Determinación de variables en el suelo y plantas de cacao	42
4.3.4 Análisis estadísticos	44
4.4 RESULTADOS	45
4.4.1 Características generales de los suelos.....	45
4.4.3 Concentraciones de Cd en planta	48
4.4.4 Correlación lineal de Pearson para la concentración de Cd en el grano de cacao y propiedades del suelo en las 21 parcelas muestreadas.	48
4.4.5 Correlación de Pearson para las variables de concentración de Cd (biodisponible, hojas, frutos y granos de cacao) de las 21 parcelas evaluadas.....	49
4.4.6 Modelos predictivos para variables de Cd en el suelo, hojas, frutos y granos	50
4.5 DISCUSIÓN.....	53
4.5.1 Características generales de los suelos.....	53
4.5.2 Concentración de Cd total y biodisponible en fincas productoras de cacao	55
4.5.3 Concentraciones de Cd en la planta	55
4.6 CONCLUSIONES.....	56
5. CAPÍTULO III. EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE CADMIO AL SUELO EN PLANTAS DE CACAO DEL CLON AS-CP 2661	59
5.1 RESUMEN	59
5.2 INTRODUCCIÓN.....	60
5.2.1 Importancia económica del cultivo de cacao	60
5.2.2 Factor de Bioacumulación (BCF) y translocación de la planta (TF).....	61
5.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	62
5.3.1 Ubicación del sitio del estudio	62
5.3.2 Diseño Experimental del estudio.....	63
5.3.4 Análisis estadísticos.....	66
5.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
5.4.1 Concentraciones de Cd total y biodisponible en el suelo	67
5.4.2 Niveles de concentraciones de Cd en hojas, tallos y raíces de cacao	68
5.4.3 Relación de la concentración de Cd en la planta con el suelo.....	69

5.4.4 Factores de bioacumulación (BCF) y translocación de la planta (TF)	71
5.5 CONCLUSIONES	72
6. CAPÍTULO IV. EFECTO DEL ÍNDICE DE ESTRES HÍDRICO SOBRE EL ESTADO VEGETATIVO DE LA PLANTA DE CACAO	74
6.1 RESUMEN	74
6.2 INTRODUCCIÓN	75
6.2.1 Consecuencias suscitadas en el cultivo de cacao por falta de lluvia en el momento adecuado.....	76
6.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	76
6.3.3 Descripción general de la zona de estudio	76
6.3.2 Diseño experimental de los ensayos de investigación.....	77
6.3.3 Metodología de muestreo y análisis de las muestras de suelo, plantas y medidas atmosférica	79
6.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	82
6.5 CONCLUSIONES.....	85
CONCLUSIONES GENERALES	88
8 REFERENCIAS	92

LISTAS DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1. Composición de estiércol de pollo compostado y cantidad de nutrientes aplicados al suelo para cada tratamiento	20
Tabla 2. Capacidad de intercambio catiónico y elementos intercambiables en el suelo un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Todos los valores son medias de 3 réplicas y diferentes letras en las barras son significativamente diferentes a $p \leq 0,05$ según la prueba de LSD Fisher	26
Tabla 3. Microelementos en el suelo un año después de la aplicación de diferentes dosis de gallinaza compostada. Las diferentes letras están significativamente en $p \leq 0,05$ según la prueba LSD de Fisher	27
Tabla 4. . Concentraciones foliares de microelementos en el cultivo de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de gallinaza compostada. Todos los valores son medias de 3 repeticiones y diferentes letras en las barras son significativamente diferentes en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD Fisher	28
Tabla 5. Cantidades de microelementos acumulados en la parte aérea de las plantas de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Todos los valores son medias de 3 repeticiones y diferentes letras en las barras son significativamente diferentes en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD Fisher	32

CAPÍTULO II

Tabla 1 Determinación de los límites de detección (LD), cuantificación (LC) y R^2 ajustado del espectrofotómetro de absorción atómica y porcentaje de recuperación de elementos extraíbles e intercambiables en el suelo y Cd total en suelo y plantas, evaluados en las 21 parcelas ...	44
Tabla 2. Comparación de medias de las propiedades generales del suelo (0 a 30 cm de profundidad) evaluadas en 8 fincas cultivadas con cacao. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá	46
Tabla 3 Correlación de Pearson para la variable de concentración de Cd granos de cacao de las 21 parcelas evaluadas. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá	49
Tabla 4. Correlación lineal de Pearson para las variables de concentración de Cd hojas, frutos, granos de cacao y el contenido de Cd biodisponible de las 21 parcelas evaluadas	50
Tabla 5. Modelos predictivos seleccionados paso a paso (<i>backward</i>) con regresión múltiple para Cd biodisponible, hojas, frutos y granos de cacao	50

Tabla 6. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd biodisponible en el suelo y las propiedades físicas y químicas en el suelo	51
Tabla 7. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd en hojas (Cd hojas) de cacao y las propiedades físicas y químicas en el suelo	52
Tabla 8. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd en frutos de cacao y las propiedades físicas y químicas en el suelo.....	52
Tabla 9. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd en granos de cacao y las propiedades físicas y químicas en el suelo.....	53

CAPÍTULO III

Tabla 1. Características del suelo utilizados en las macetas o pots.....	64
Tabla 2. Determinación de los límites de detección (LD), límite de cuantificación (LQ) y R^2 ajustado del espectrofotómetro de absorción atómica del Laboratorio de fertilidad de suelos y agua del IDIAP, República de Panamá.....	65
Tabla 3. Índices de Correlación de Pearson para Cd total y biodisponible en el suelo (0-15 cm) y su efecto en las partes de la planta.....	70
Tabla 4. Índice de Pearson para Cd Total y Biodisponible en el suelo y su efecto en las partes de la planta en la profundidad de 15 a 30 cm.....	71
Tabla 5. Factores de bioacumulación (BCF) y translocación (TF) de la planta de cacao y partes de ella (hojas, tallos y raíces) aplicado al genotipo mejorado AS-CP-2661.....	72

CAPÍTULO IV

Tabla 1. Característica del suelo utilizado en los dos ensayos.....	79
---	----

LISTAS DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Niveles de pH, COS, relación N total, C: N y P, densidad aparente en el suelo al año de aplicar las dosis de estiércol de pollo compostado. Las diferentes letras no están significativamente en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD de Fisher.....24

Figura 2. Concentraciones foliares de N, P, K, Ca y Mg en el cultivo de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Las diferentes letras no están significativamente en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD de Fisher.....29

Figura 3. Biomasa y cantidades de N, P, K, Ca y Mg acumuladas en la parte aérea de plantas de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).....31

CAPÍTULO II

Figura 1. Localización de parcelas de muestreos en 8 fincas cultivadas con cacao en el distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá.....41

Figura 2. Concentraciones de Cd total y biodisponible en suelo (0 a 30 cm de profundidad) evaluadas en 8 fincas cultivadas con cacao. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).....47

Figura 3. Concentraciones de Cd en hojas, frutos y granos de cacao evaluadas en 8 fincas cultivadas con cacao. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).....48

CAPITULO III

Figura 1. Concentraciones de Cd total y biodisponible en el suelo determinadas a dos profundidades del suelo (0-15 cm y 15 a 30 cm) con incrementos de dosis de Cd aplicadas al suelo.....68

Figura 2. Concentraciones de Cd en hojas, tallos y raíces de cacao del genotipo AS-CP-2661 al incrementar dosis de Cd aplicadas al suelo. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).....69

CAPITULO IV

Figura 1. Ensayo en ambiente semi controlado, utilizando plantas de cacao del Clon AS-CP-2661.....78

Figura 2. Ensayo en ambiente natural o campo abierto, utilizando plantas de cacao del Clon AS-CP-2661 ubicado en Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá.....78

Figura 3. Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) y porcentaje de humedad del cultivo (Hc %), considerando los dos ambientes seleccionados para el cultivo de cacao Clon genotipo AS-CP- 2661.....82

Figura 4. Comportamiento del índice hídrico para la temperatura del suelo y el cultivo en el ambiente natural o campo abierto en el cultivo de cacao del Clon genotipo AS-CP-2661.....84

Figura 5. Comparación de la biomasa aérea inicial y final en planta de cacao cuando es sometida a distintos regímenes de humedad del suelo en ambiente semi controlado identificado con un (*) y el ambiente natural. Ambos ensayos se realizaron con el mismo tipo y edad de planta y el mismo período. CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).....85

RESUMEN GENERAL

RESUMEN GENERAL

La extensión de terreno dedicado a cacao y su producción en Panamá es pequeña en comparación con otros países cercanos. Sin embargo, en algunas provincias, como Bocas del Toro, Herrera, Colón y Comarcas, este cultivo representa una alternativa económica, social, cultural y sostenible con el medioambiente. Es destacable mencionar que, el cacao tiene clasificaciones dependiendo de la calidad organoléptica del grano, y se clasifica por categorías (corrientes o convencional y finos). El 95 % de las exportaciones que se dan a nivel mundial, América Latina y el Caribe, tiene una producción mayoritaria del cacao categorizado como fino. El 5 % restante pertenecen a cacao fino y de aroma en donde países como Ecuador, Perú, Guatemala, Honduras, y Panamá representan el 50 % y 75 % del cacao exportado a nivel mundial. Los mercados de mayor consumo del grano de cacao que se produce en la región se destinan a la elaboración de chocolate en Estados Unidos de América, Canadá y la Unión Europea, por lo cual es necesario cumplir las exigencias del mercado de calidad del grano (p. e., la pureza y sabor, trazabilidad en los metales pesados).

Limitaciones para la producción

La media del rendimiento del grano de cacao en América Latina y el Caribe está en 0.39 Mg ha⁻¹ y a nivel mundial se encuentra en 0.44 Mg ha⁻¹. A pesar del importante potencial para el cultivo en la provincia de Bocas del Toro (región de Almirante), la producción media anual es muy baja, alrededor de 0.11 Mg ha⁻¹. La producción de cacao que es considerado como rentable debe estar arriba de 0.77 Mg ha⁻¹.

Entre las limitaciones más importantes que presentan los productores de cacao en esta provincia, son las de tipo culturales y de fertilidad de suelo. Las limitaciones culturales son la heterogeneidad de los genotipos empleados, puesto que en la mayor parte de las plantaciones se utilizan materiales criollos, sin selección, así como el envejecimiento de las plantaciones, que en muchos casos las edades superan los 30 años.

Otras de las posibles causas de la baja producción en esta zona es la falta de aplicación de fertilizantes a pesar de la baja fertilidad del suelo. En este sentido, la acidez y los bajos contenidos de MO determinan una escasa provisión de nutrientes esenciales a la planta.

Por otro lado, en los últimos años existe la sospecha de la ocurrencia de mayores periodos sin lluvias y altas temperaturas mermando el rendimiento del grano de cacao en la región de Almirante debido al estrés hídrico por efectos de la evapotranspiración.

Teniendo en cuenta las limitaciones anteriores, el estudio tiene como objetivo general aportar línea base para mejorar la producción de cacao en la región de Almirante. Al mismo tiempo hacer una primera exploración sobre otros actores que potencialmente podría afectar la producción y calidad del cultivo, como el Cd o el efecto de la sequía temporal. Este objetivo general, se desarrolló a lo largo de 4 estrategias, organizadas en 4 capítulos diferentes.

Capítulo I, Efecto del estiércol de pollo compostado sobre la nutrición de cultivos de cacao en sistemas agroforestales en Bocas del Toro, Panamá. El objetivo de este capítulo fue conocer si la fertilización orgánica puede reducir las limitaciones más importantes de fertilidad para la producción. En este capítulo se comprueba el efecto del estiércol de pollo compostado para mejorar la nutrición del cultivo de cacao y con ello, un buen desarrollo vegetativo. Para este estudio se seleccionó un sistema agroforestal de 2000 m², de 2 años de edad, en el que se incluían 126 plantas de cacao de genotipo seleccionado, fino de aroma. El diseño experimental fue completamente aleatorizado en bloques con 7 dosis diferentes de estiércol de pollo compostado (entre 5 y 30 Mg ha⁻¹) y 3 repeticiones. El estiércol de pollo compostado se incorporó al suelo, a una distancia de 15 cm del árbol. Las muestras de hojas, plantas y suelo se tomaron un año después de la aplicación de las dosis. El estudio mostró que el uso del estiércol de pollo compostado en el cultivo de cacao ayudó a aumentar la MOS, que al mineralizarse pudo incrementar la biodisponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo, y así las plantas absorberlos para un mejor desarrollo vegetativo, aumentando la biomasa en un 30 % de su valor inicial. Se puede concluir para el que estiércol de pollo compostado en un sistema agroforestal ayudó a aumentar la MOS en el suelo, que al mineralizarse pudo incrementar la biodisponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo, y así las plantas absorberlos para un mejor desarrollo vegetativo, aumentando la biomasa en un 30 % de su valor inicial.

Capítulo II, Concentración de Cd en suelos y planta de cacao producido en sistemas agroforestales de pequeños productores de Panamá. El objetivo fue obtener información básica del contenido de Cd en el suelo, hojas, frutos y granos que ayuden a mejorar los sistemas de producción de cacao que no excedan los límites permitidos para cacao procesado. En concreto, se prestó especial atención a las concentraciones de este elemento en el grano, puesto que es uno de los factores que limita la comercialización del cacao para la elaboración del chocolate y otros derivados del cacao. El estudio fue realizado en 21 parcelas de ocho fincas de productores dedicadas al cultivo de cacao. Se realizaron estadísticas descriptivas y análisis de correlaciones entre el Cd en el suelo con las propiedades del suelo; así como con el Cd biodisponible y presente en la planta. Se evaluó la relación entre Cd biodisponible con variables físico químicas del suelo y las relaciones entre las variables del suelo y el Cd en la planta. Para esto se usaron análisis de regresión lineal múltiple, seleccionando las variables con el método *Backward*. Estas parcelas estudiadas, presentaron alto acidez en el suelo a una profundidad muestreada de 30 cm, encontrando un valor de pH muy ácido con valores en sus medias de 5.1 siendo este nivel no favorable para el cultivo de cacao. El contenido medio de MOS fue de 5.1 % l cual pudo haber ayudado a que la relación C: N presentara un valor de 10. El Al intercambiable en el suelo presentó un valor mínimo de $0.6 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ y una concentración máxima de $13.9 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$. La concentración de Cd total y biodisponible en el suelo, encontrando en las 21 parcelas presentaron medias de 0.10 y 0.02 mg kg^{-1} respectivamente.

En cuanto a las concentraciones de Cd en las partes de la planta (hojas, frutos y granos), presentaron los resultados de 1.04, 0.34 y 0.25 mg kg^{-1} respectivamente. Al evaluar el contenido de Cd total y biodisponible en las 8 fincas, estos se encuentran por debajo de los límites de contaminación en suelos agrícolas. Al realizar modelaciones predictoras por medio del método de selección *backward* para las variables Cd biodisponible, hojas, frutos y granos. En estos modelos la variable predictora de mayor intervención fue el Cd biodisponible (Cd_{bd}).

Como conclusiones relevantes se tiene que las fincas evaluadas, presentan un nivel de pH muy ácido, no siendo muy favorable en el cultivo de cacao, debido a que da lugar a que otros metales pesados (p.e., Al intercambiable) interfieran en la disponibilidad de

elementos esenciales para la planta. Los niveles de Cd biodisponible evaluados no superaron los límites considerados como suelos contaminados por la Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA). Los modelos elaborados para el Cd biodisponible, Cd en hojas, frutos y granos de cacao pueden utilizarse para corregir algunas propiedades químicas y biológicas del suelo que pueden ser manejadas a nivel de fincas.

Capítulo III. Concentraciones de cadmio aplicados al suelo con plantas de cacao del clon AS-CP 2661. El objetivo de evaluar la bioacumulación y traslocación de la concentración de Cd en la planta de cacao del clon AS-CP 26-61, al aplicar diferentes concentraciones de Cd en el suelo. El ensayo fue establecido en una casa de vegetación, donde se determinó la dinámica del Cd aplicar cantidades crecientes de Cd al suelo (0 mg kg⁻¹; 4 mg kg⁻¹; 8 mg kg⁻¹; 12 mg kg⁻¹; 16 mg kg⁻¹ y 20 mg kg⁻¹). El estudio reveló que la planta de cacao se comporta como fito acumuladora del Cd, no translocando este metal de la raíz hacia la planta cuando las concentración son menores los 12 mg kg⁻¹.

Se pudo llegar a la conclusión que con concentración de Cd total en el suelo mayores de 4 mg kg⁻¹ se comporta como una planta fito acumuladora o fito extractora, absorbiendo el contaminante (Cd) por las raíces con concentraciones de Cd menores o iguales a 4 mg kg⁻¹, y acumuladoras con dosis mayores o iguales a 8 mg kg⁻¹, capaz de remover, reducir o translocar a los diferentes órganos vegetativos el Cd por la acumulación en las raíces.

Capítulo IV. Efecto del índice de estrés hídrico sobre el estado vegetativo de la planta de cacao. El objetivo es evaluar de forma preliminar el índice de estrés hídrico como indicativo de la absorción del agua por la planta y su efecto en el crecimiento vegetativo del cultivo de cacao. Este capítulo presenta la problemática que se tiene con el estrés hídrico en el cultivo de cacao, debido a altas temperaturas que se atribuyen en muchos casos al cambio climático que ha afectado la cantidad y distribución de la lluvia considerablemente en esta región del país. Es necesario conocer si la absorción de agua por el cultivo es suficiente para evitar el estrés en los árboles. Consistió en un estudio en dos ambientes (casa de vegetación y en campo), durante el 2020 y 2021, realizados en el distrito de Almirante, Bocas del Toro (Panamá). En la casa de vegetación se evaluaron cuatro tratamientos y cinco repeticiones (20 plantones) en un diseño completamente al azar. Los tratamientos consistieron en distintos regímenes de riego, donde el T1= Testigo;

T2 = 60 % de humedad; T3= capacidad de campo; T4= punto de marchitez permanente. El segundo se realizó en una plantación de cacao donde se monitorearon 24 plántones. En ambos ambientes se midieron índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), temperatura del suelo y planta (hojas) utilizando plántones de tres meses de edad del genotipo de cacao AS-CP 26-61, mejorado. El otro ambiente se evaluó en un periodo de nueve meses haciendo coincidir los meses de mayor y menor lluvias. Entre los resultados relevantes, se relaciona el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) con el porcentaje de humedad (Hc %) en las hojas de cacao, se puede observar que valores menores de 20 % de Hc, pueden presentar un NDVI inferior al 0.40, considerados como plantas que presentan estrés hídrico, pudiendo inferir directamente en la biomasa aérea en la planta de cacao reduciendo el crecimiento vegetativo. Se concluye que utilizar estas herramientas ayudó a detectar en qué momento el cultivo de cacao puede llegar a sufrir estrés hídrico que pudiera afectar la respuesta fisiológica en las plantas. Esto demostró que la planta de cacao es hidro periódica, que casos extremos de sequía y altas temperaturas pueden tener un efecto irreversible en el crecimiento vegetativo, derivando a una baja producción afectando a la economía de los productores de estas áreas rurales de escasos recursos.

INTRODUCCIÓN GENERAL

INTRODUCCIÓN GENERAL

Generalidades del árbol de cacao a nivel tropical

El árbol cacao “*Theobroma cacao* L, es una planta que es cultivada en el trópico húmedo en cuatro continentes (África, América, Asia y Oceanía). Esta especie pertenece a la familia de las Malváceas, descrita por Linneo en el 1753 (Alverson et al., 1999; Avendaño et al. 2011).

En las regiones tropicales de América es cultivado en sistemas agroforestales (árboles maderables y frutales; Asitoakor et al., 2022) siendo un cultivo que puede llevar una buena sinergia con el ambiente, por ser considerados como fuentes de recursos potenciales para el secuestro de carbono orgánico, reducción del estrés hídrico y aumento de la biodiversidad (Tscharntke et al., 2011), por la cual es considerado como una alternativa en la conservación del suelo (p. e., producción de hojarascas) y recursos hídricos (Leakey et al., 2005; Lehmann et al., 2014).

En la producción del cultivo de cacao, su materia prima (granos) se emplea en la elaboración de diversos productos, incluyendo licor, cacao en polvo, chocolate, aceites y medicamentos (Bertoldi et al., 2016).

Por otro lado, las investigaciones realizadas con fertilización y nutrición del cultivo de cacao recomiendan evaluar cada material de cacao de cada país, en función del tipo de suelo y zona agroecológica donde se cultive (Romero, 2016); con fines de conocer la distribución de los nutrimentos y plantear estrategias de muestreo para estudiar la nutrición del cultivo (Carvalho et al., 2013).

Por esta razón, es oportuno realizar estudios foliares y de suelos para corregir limitaciones nutricionales del cultivo, que servirían para determinar las concentraciones apropiadas de nutrientes en una determinada época del ciclo del cultivo, asegurando un mayor rendimiento del grano (Etchevers, 1999).

Producción de cacao a nivel mundial

La mayor cantidad de cacao que se produce en el mundo es producida por el continente africano. El mayor productor es, Costa de Marfil, seguido de Ghana, Nigeria y Camerún, por la cual juntos obtienen una producción de 3, 479, 000 Mg por año. El segundo continente de mayor producción fue el americano, encabezando países como Ecuador, Brasil y Perú, los de mayor producción con 375, 180 y 160 mil Mg respectivamente. El tercer continente que presentó mayor producción en los años 2021 y 2022 fue el asiático, siendo Indonesia el país de mayor producción con 180, 000 Mg (ICCO, 2021).

Cabe mencionar que, la rentabilidad del cultivo se mide con producciones de grano seco, y este debe ser superior a 0.77 Mg ha^{-1} (Espinosa-García et al., 2015). En algunas regiones de Panamá con mayor potencial para el cultivo del cacao, como Bocas del Toro, este rendimiento es inferior a 0.20 Mg ha^{-1} , lo que reduce considerablemente las posibilidades de sostenibilidad y desarrollo de algunas regiones del país (PANAMÁ-MIDA, 2020).

El cultivo de cacao en Panamá

Entre 1920 y 1940 la United Fruit Company (UFC) introdujo en los valles de Sixaola y Changuinola, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá el cultivo del cacao de variedad Matina. Para 1940 unas 9,600 hectáreas estaban cultivadas con cacao y se exportaban entre 3 y 4 millones de kilos anuales al mercado de Estado Unido y Europa. Esta expansión cacaotera convirtió a Bocas del Toro en una de las zonas cacaotera más grande del mundo (LaBARGE, 1959).

Con la llegada de la enfermedad conocida como Monilia (*Moniliophthora roreri*) en los años ochenta (Phillips-Mora et al., 2007) y la baja de los precios en los mercados internacionales, provocaron que muchos productores abandonaran o cambiaran de actividad, lo que llevó a que los esfuerzos institucionales se dirigieran a fortalecer el sector productivo del cacao (comendatarios de productores rurales de cacao).

Durante los años 1982 y 1987 se insertaron híbridos de cacao proveniente del Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica, resistentes al hongo Monilia (Miranda, 1992). En los años noventa, los pequeños productores del área (Bocas

del Toro), se organizan e inician la producción orgánica en el cultivo de cacao seguido de una certificación en el comercio internacional.

La Cooperativa de Cacao Bocatoreño R. L. (COCABO) fundada por productores en 1952, se convirtió en el ente gestor y el medio por el cual cientos de pequeños productores adquieren año con año su certificación y la posibilidad de obtener mejores precios en los mercados internacionales.

En Bocas del Toro, la actividad de cacao en su gran mayoría se desarrolla por pequeños productores y productoras provenientes de pueblos originarios, y campesinos de áreas vecinas, cultivando un área aproximadamente de 3.5 hectáreas, con cacao híbrido, criollo o una mezcla de ambos, existen pocas parcelas con plantas clónales, y en su mayoría en sistemas agroforestales y de agricultura orgánica; poco en sistemas convencionales.

El cultivo de cacao en la República de Panamá presenta limitaciones que da como resultado la merma o bajos rendimientos del grano producto de algunos factores (p.e., plantas longevas, suelos con baja fertilidad o suelos sobreexplotados y desgastados, incompatibilidad genética entre plantas cultivadas).

Principales limitaciones que afectan a la producción y calidad cultivo del cacao

Limitación de fertilidad de suelo

Existen diversos problemas o limitaciones que pueden afectar la producción y calidad del grano de cacao, por la cual nos enfocaremos en los de mayor importancia.

El bajo contenido de materia orgánica en el suelo (menor al 3 %) puede ser un factor muy limitante en la producción del cultivo de cacao (Torres et al., 2021), ya que los microorganismos juegan un papel crucial en la disponibilidad de nutrientes, debido a la mineralización de la materia orgánica derivando al aumento del pH de suelo. El bajo contenido de MOS puede también inferir en el agotamiento de nutrientes, acidificación y aumentos de metales pesados no esenciales para las plantas (Hartemink, 2006, Porta, 2014, Vliet et al., 2015).

De igual manera, la baja disponibilidad de macronutrientes como N, P y K en el suelo puede afectar al metabolismo y crecimiento de la planta de cacao. El N forma parte de diversos compuestos de carbono y está incluido en la clorofila, por la cual, aumenta la

eficiencia de interceptación de la luz (Niinemets, 2007; Taíz et al., 2015). La deficiencia del P afecta a las plantas de cacao en el almacenamiento de energía.

El P en muchos casos puede tener altas limitaciones en el suelo debido al nivel del pH que contenga el suelo (p.e menores a 5.5; Miheretu, 2020). Seguido del K, puede afectar la regulación del potencial osmótico y la activación de las enzimas que ayudan a la respiración y la fotosíntesis (Taíz et al., 2015).

Por otra parte, elementos secundarios como el Ca y el Mg escasos en el suelo pueden tener efectos adversos ya que ellos forman parte de las bases intercambiables que ayudan a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) pudiendo afectar al cultivo de cacao si sus valores en el suelo son menores de 12 cmol (+) kg⁻¹ (Snoeck et al., 2016) por la razón que elementos como el Ca y Mg interactúan con otros elementos de gran importancia en la fertilidad del suelo (Long et al., 2017).

Por otro lado, altas concentración de elementos como el aluminio y el manganeso, producen retrasos en el crecimiento de brotes y raíces, reduciendo la tasa de crecimiento en el árbol de cacao (Miheretu, 2020).

Altas concentraciones de cadmio (Cd) en el suelo y plantas de cacao

El Cd es un metal pesado muy peligroso para la salud humana (Casteblanco, 2018), produciendo además efectos tóxicos en suelos (Bravo et al. 2014). Su tasa de transferencia desde el suelo a la planta está influenciada por el tipo de suelo, la acidez, contenido de materia orgánica, fertilización, la mineralogía, y la presencia de otros elementos, como el zinc (PNUMA, 2008).

El contenido de MOS representa un factor importante en la acumulación y liberación de los metales pesados (entre ellos el Cd) debido a la alta capacidad de acumulación del metal, al liberarse de la MO entran en contacto con la planta transportándose por las raíces hacia las otras partes de las plantas (Gamiz et al., 2010; Spalding et al., 2010).

El pH en el suelo interviene en la movilidad y disponibilidad del metal pesado Cd aumentando cuando el pH se hace mayormente ácido debido a la solubilidad del metal siendo absorbido por las raíces (Pedraza y Rojas, 2017).

Las concentraciones de Cd de origen geogénico en el suelo generalmente no superan 1 mg kg⁻¹ (Kabata- Pendias, 2010) pudiéndose encontrar niveles de Cd superiores a 16.3

mg kg⁻¹, que se le puede asociar a procesos de meteorización y tipo de material parental, entre ellas las derivadas de las rocas sedimentarias, como las lutitas (S. H et al. 2010).

Por otro lado, es importante anotar que los contenidos totales en suelos superiores a 3 mg kg⁻¹ para Cd son considerados como suelos fitotóxicos (Insuasty et al., 2006).

En general, los valores de concentración de Cd en los granos de cacao reportados a través de América Latina y El Caribe (ALC) y otras partes del mundo, que se dedican a cultivar el cacao indican que el nuevo reglamento 488/2014 de la Unión Europea (UE) afectará a los productores de cacao en la región (Meter et al. 2019). Este fija un límite tolerable máximo de 0.8 mg kg⁻¹ a chocolates con sólidos de cacao superiores o iguales al 50 %; según este criterio, el 70.59 % de los reportes corresponden a niveles altos de cadmio y solo 29.4 % estarían dentro de los límites exigidos por la UE (EU, 2014).

Selección de genotipos mejorados

Otros de los problemas que explicaría los bajos rendimientos y la baja calidad en las plantaciones de cacao en Panamá se atribuye al uso de materiales genéticos no adecuados, en muchos casos introducidos de otros países (Carranza et al., 2020). Y en otros casos por el desconocimiento técnico silvicultural y agronómico (p.e., podas de formación, sanitarias y fertilización deficiente). Esta situación también ocurre en otros países dedicados a la producción de cacao como Ecuador, Perú y Nicaragua (Argüello et al., 2019; Barraza et al., 2019; Hebbert Siles, 2022).

Para hacer frente a este problema, el equipo de Gutiérrez (2020), en la región de Bocas del Toro, en la República de Panamá, seleccionó genotipos criollos, adaptadas al medio concreto, que presentaban mejores rendimientos y calidad del grano. Estos genotipos criollos se registraron en el Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá (MIDA). Los genotipos criollos seleccionados fueron AS-CP 26-59 de granos de color blanco, AS-CP 26-60 de granos de color morado y la AS-CP 26- 61 mulato.

La variedad criolla AS-CP 26-61 fue la que se seleccionó en este estudio porque puede ser de interés para los productores a nivel de Panamá, ya que es un genotipo muy interesante por sus altos rendimientos y alta calidad (Gutiérrez, 2020).

Esta variedad puede alcanzar una altura de 2.5 m, con ramas de color marrón, presentan hojas de 34.5 cm de largo de color verde claro con una ausencia de antocianinas, para la semilla húmeda expresa una coloración blanca y una pigmentación de color blanca

para la flor. La semilla presenta una forma elíptica, mientras el fruto es rugoso, con pesos mayores a 627 gramos, encontrando más de 33 semillas por frutos (Gutiérrez, 2020).

Sequía en regiones del Caribe donde se produce el cacao

Los productores de las regiones cacaoteras, detectan mermas de la producción que atribuyen a crecientes períodos de sequía (FAO, 2015) aunadas a altas temperaturas que incrementan las plagas y enfermedades afectando a la producción (Medina y Laliberte, 2017). En relación con esto, algunos autores muestran anomalía en la producción debido a la sequía, observada en muchas regiones caribeñas, atribuidas al calentamiento global (Herrera et al., 2018).

Ante las condiciones climáticas variables en zonas caribeñas, donde cada vez se presentan temporadas largas sin lluvias (Samaniego, 2021), es necesario conocer si la menor disponibilidad de agua causa estrés en los árboles.

JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO GENERAL

Como se ha comentado en párrafos anteriores, en la República de Panamá específicamente en el distrito de Almirante, el cacao es cultivado de forma orgánica siendo este uno de los principales sustentos en la economía de pequeños agricultores en esta región. A pesar de ello, existen importantes limitaciones de producción que se atribuyen a la baja fertilidad de los suelos y al empleo de variedades no seleccionadas genéticamente. Además, se desconocen otros aspectos que influyen sobre la producción y calidad del grano, como son las concentraciones de Cd, o el efecto de la sequía en periodos sensitivos para el cultivo, que reducen las producciones y la calidad del fruto.

Para todo esto la investigación de la presente tesis tiene como objetivo general aportar línea base para mejorar la producción de cacao en la región de Almirante. Al mismo tiempo hacer una primera exploración sobre otros actores que potencialmente podría afectar la producción y calidad del cultivo, como el Cd o el efecto de la sequía temporal. Por la cual, se plantearon cuatro objetivos específicos, desarrollados por capítulos en este trabajo de investigación.

Objetivos específicos

1. Establecer el efecto del estiércol de pollo compostado para mejorar la nutrición del cultivo de cacao y con ello, un buen desarrollo vegetativo.
2. Obtener información básica del contenido de Cd en el suelo, hojas, frutos y granos que ayuden a mejorar los sistemas de producción de cacao que no excedan los límites permitidos para cacao procesado.
3. Evaluar la bioacumulación y traslocación de la concentración de Cd en la planta de cacao del clon AS-CP 26-61, al aplicar diferentes concentraciones de Cd en el suelo.
4. Evaluar de forma preliminar el índice de estrés hídrico como indicativo de la absorción del agua por la planta y su efecto en el crecimiento vegetativo del cultivo de cacao.

3. CAPÍTULO I
EFFECTO DEL ESTIERCOL DE POLLO
COMPOSTADO SOBRE LA
NUTRICIÓN DEL CULTIVO DE
CACAO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES EN BOCAS DEL
TORO, PANAMÁ

Artículo sometido a Acta Agronómica

3. CAPÍTULO I

EFFECTO DEL ESTIERCOL DE POLLO COMPOSTADO SOBRE LA NUTRICIÓN DEL CULTIVO DE CACAO EN SISTEMAS AGROFORESTALES EN BOCAS DEL TORO, PANAMÁ

3.1 RESUMEN

En la República de Panamá, el cultivo del cacao se establece en sistemas agroforestales, sin fertilizantes orgánicos o sintéticos. Los rendimientos son bajos debido a la falta de material genético adecuado, manejo agronómico deficiente y suelos ácidos con bajo contenido de carbono orgánico, por mencionar algunas razones. El objetivo fue establecer el efecto del estiércol de pollo compostado para mejorar la nutrición del cultivo de cacao y con ello, un buen desarrollo vegetativo. El estudio se realizó en una finca de 2000 m² localizada en Almirante (Bocas del Toro-Panamá), gestionada como sistema agroforestal, que incluía 126 plantas de cacao fino de aroma. El diseño experimental fue completamente aleatorizado en bloques con 7 dosis diferentes de estiércol de pollo compostado (0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 Mg ha⁻¹) y 3 repeticiones. El estiércol de pollo compostado se incorporó al suelo a 15 cm del árbol. Las muestras de hojas, plantas y suelo se tomaron un año después de la aplicación de las dosis, a profundidades de 0 a 5, 5 a 15 y 15 a 30 cm. Se demostró que la aplicación de estiércol de pollo compostado aumentó la concentración de COS, el pH y la biodisponibilidad de N, P, K y otros elementos esenciales, disminuyendo la concentración de aluminio en el suelo. Esto condujo a una mayor concentración de elementos a nivel foliar (N, P y K), repercutiendo al incremento de biomasa de árboles. Concluimos que el estiércol de pollo compostado con dosis superiores a 20 Mg ha⁻¹ contribuyó a la nutrición y crecimiento del cultivo de cacao, mejorando su desarrollo arbóreo en una mayor capacidad productiva.

Palabras clave. Estiércol de gallina compostado, cacao, nutrición de plantas, suelos ácidos, agroforestería.

3.2 INTRODUCCIÓN

3.2.1 La importancia del cacao en los países de clima tropical

El árbol de cacao, *Theobroma cacao L.*, se cultiva en cuatro continentes en países tropicales con variadas condiciones agroecológicas y climáticas (Franzen y Mulder, 2007). Sus granos son considerados de importancia económica en la elaboración de diversos productos, incluyendo licor, cacao en polvo, chocolate, aceites y medicamentos (Bertoldi et al., 2016).

La mayor parte del cultivo de cacao se realiza en sistemas agroforestales (Asitoakor et al., 2022). El setenta por ciento del cultivo de cacao se produce en países con un clima tropical en América Latina y puede considerarse como una fuente potencial de recursos para diferentes beneficios ecosistémicos, incluido el secuestro de carbono orgánico y el aumento de la biodiversidad (Tscharntke et al., 2011).

La producción total de granos de cacao a nivel mundial es liderada por los países africanos con el 70 % de la producción (Costa de Marfil, Ghana, Nigeria y Camerún) seguidos de América con el 18 % (Ecuador, Brasil, República Dominicana, Colombia y México), Asia (Indonesia) y Oceanía (Nueva Guinea) con el 6 % (ICCO, 2021).

Se considera que la rentabilidad del cultivo se produce con producciones de grano seco superiores a 0.77 Mg ha^{-1} (Espinosa-García et al., 2015). En algunas regiones de Panamá con mayor potencial para el cultivo del cacao, como Bocas del Toro, es inferior a 0.18 Mg ha^{-1} , lo que reduce considerablemente las posibilidades de sostenibilidad y desarrollo de algunas regiones del país (PANAMÁ-MIDA, 2020).

3.2.2 Cultivo de cacao en Panamá

El área dedicada al cultivo de cacao en Panamá se estima en 5140 ha (PANAMÁ-MIDA, 2020). La mayor parte de esta área (5006 ha) se encuentra en la provincia de Bocas del Toro, en el noroeste del país. El cacao también se cultiva en sistemas

agroforestales, acompañado de árboles de *Cedrela odorata*, *Coffea arabica* y algunas especies de la familia Musaceae, como *Musa x paradisiaca* L (banano) generando un ambiente de gran importancia para la biodiversidad, la captura de carbono y la conservación del suelo (Agudelo-Castañeda et al., 2018). Además, el cultivo del cacao se centra en la parte socioeconómica de la agricultura en las zonas rurales, cultivada principalmente por pequeños productores que se encuentran en extrema pobreza (PANAMÁ-MIDA, 2020).

Múltiples factores limitantes están presentes en el cultivo del cacao en regiones productoras de cacao (Almirante, provincia de Bocas del Toro). Los contenidos de materia orgánica en el suelo (MOS) cultivados con cacao en Panamá están en su mayoría por debajo del nivel del 3 %, lo que puede ser considerado inadecuado para este cultivo por algunos investigadores de otros países como Perú (Calle et al., 2021). Otros factores limitantes son el pH ácido o el drenaje reducido, así como los aspectos culturales, como los genotipos inadecuados y la edad de las plantas mayores de 20 años (PANAMÁ-MIDA, 2020).

En otros países como Perú, estas limitaciones edáficas llevaron a estudios de la contribución de fertilizantes orgánicos en el suelo, lo que puede mejorar las condiciones nutricionales del cultivo de cacao, lo que resulta en un aumento de la producción de granos (Florida et al., 2020).

En el distrito de Almirante en la provincia de Bocas del Toro, el material genético criollo de aroma fino codificado como AS-CP 26-61 en la colección panameña, puede ser de interés para los productores panameños por sus altos rendimientos y alta calidad (Gutiérrez, 2020). Esta variedad puede alcanzar una altura de 2.5 m, con ramas marrones, tiene hojas de 34.5 cm de largo de color verde claro con ausencia de antocianinas (Gutiérrez, 2020).

El uso de estiércol de pollo compostado (un residuo orgánico obtenido del estiércol de pollo) como fertilizante ayuda a aumentar la concentración de MOS y la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC), favoreciendo una mayor actividad microbiana en el suelo haciendo que los nutrientes esenciales estén disponibles para el cultivo (Tahboub et al., 2008). Este fertilizante puede ser obtenido por pequeños productores de las galeras de producción de pollos, cosechando cuando alcanza una maduración óptima y pH de 8.0 a 8.5.

UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

Se ha encontrado poca información científica en niveles críticos utilizados con cultivos de cacao y de forma orgánica en suelo y plantas asociados a sistemas agroforestales donde la productividad del cacao necesita ser mejorada (Puentes-Paramo et al., 2016).

La necesidad de mejorar la nutrición de la planta, junto con otros aspectos (por ejemplo, selección de genotipos) que dan como resultado la calidad del grano, ha llevado a la presente investigación, cuyo objetivo era establecer el efecto del estiércol de pollo compostado para mejorar la nutrición del cultivo de cacao y con ello, un buen desarrollo vegetativo. De esta misma manera, el estudio servirá de referencia en otras regiones con condiciones y limitaciones similares.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 Ubicación geográfica y características edafoclimáticas del sitio estudiado

El ensayo de investigación se llevó a cabo en los años 2019-2020 en una finca de 10 ha, ubicada en la provincia de Bocas del Toro (distrito de Almirante) República de Panamá, cuyas coordenadas geográficas son 9° 16' 33" latitud norte y 82° 25' 6" longitud oeste.

El clima de la provincia de Bocas del Toro se clasifica como tropical muy húmedo con una precipitación media anual de 2735 mm y una temperatura media anual de 24.3 ° Celsius según Köppen (1936), actualizado por Peel et al. (2007).

La descripción de cada horizonte del suelo del distrito de Almirante en Bocas del Toro se realizó a una profundidad efectiva de 1.80 m y se clasificó taxonómicamente con el orden de Inceptisol (USDA, 2014). La textura de los suelos es franco y franco arenoso, y su estructura, son bloques angulares y subangulares. El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) varía de bajo a alto (0.7 % a 7.8 %), mientras que el nivel de pH evaluado varía de 4.2 a 5.9, de muy ácido a ácido (Villalaz-Pérez et al., 2021).

Las características químicas y biológicas del sitio evaluado a profundidad de 0 a 30 cm, presentaron el nivel de pH con un valor promedio de 4.9, su contenido de COS de 0.55 %, la concentración de P extraído en solución de Mehlich 1 de 0.001 mg kg⁻¹ y K intercambiable de 0.18 cmol (+) kg⁻¹.

El material genético de la planta utilizada para este estudio fue el Clon mejorado AS-CP-26-61 desarrollado por el IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá) por sus siglas en español (Gutiérrez, 2020), considerado como cacao fino de aroma.

3.3.2 Diseño experimental

Las plántulas, de 3 meses de edad, fueron trasladadas de un vivero propiedad del productor y después de 3 meses fueron trasplantadas a la tierra de la finca en estudio. La finca seleccionada es un sistema agroforestal acompañado de árboles de *Cedrela odorata*, *Coffea arabica* y algunas especies de la familia Musaceae, como *Musa x paradisiaca* L (banano) sin programas de fertilización.

Después de un año, se seleccionó un área de terreno con 2000 m², con 126 plantas con una topología de 3 m x 3 m (plantas y calles). En el estudio se evaluaron 7 diferentes dosis para lo que se usó un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones.

Las dosis de estiércol de pollo compostado que se aplicaron fueron: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 Mg ha⁻¹ (0, 350, 720, 1050, 1400, 1750, 2100 g por árbol). El material fue obtenido del comercio local. La unidad experimental fue de 18 m², que contenía 6 plantas de cacao.

Las características químicas del fertilizante y las cantidades de nutrientes aplicadas al suelo se muestran en la Tabla 1.

Siguiendo las recomendaciones de Dávila et al. (2019), el fertilizante se aplicó a las plantas de cacao a una distancia de 15 cm de la base del tronco del árbol en forma de círculos concéntricos y se incorporó al suelo.

Tabla 1. Composición del estiércol de pollo compostado empleada en este estudio y cantidades de nutrientes aplicados al suelo para cada tratamiento

Concentración		Cantidades de nutrientes aplicadas (kg ha ⁻¹)						
		0	5	10	15	20	25	30
pH	8.3	--	--	--	--	--	--	--
C (%)	37.5	--	--	--	--	--	--	--
N (%)	1.92	0	96	192	288	384	480	576
C: N	19.53	--	--	--	--	--	--	--
P ₂ O ₅ (%)	3.9	0	195	390	585	780	975	1170
K ₂ O (%)	2.1	0	105	210	315	420	525	630
CaO (%)	9.5	0	475	950	1425	1900	2375	2850
MgO (%)	1.1	0	55	110	165	220	275	330
Cu (mg kg ⁻¹)	98	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.9
Zn (mg kg ⁻¹)	783	0	3.9	7.8	11.7	15.7	19.6	23.5
Fe (mg kg ⁻¹)	3850	0	19.3	38.5	57.8	77.0	96.3	115.5
Mn (mg kg ⁻¹)	986	0	4.9	9.9	14.8	19.7	24.7	29.6

3.3.3 Muestreo de suelos y plantas

Las muestras de suelo y plantas se tomaron en el segundo año de trasplante y un año después de que se aplicaron los diferentes tratamientos. Se tomaron muestras de suelo a profundidades de 0 a 5 cm, 5 a 15 cm y 15 a 30 cm, dentro del área específica donde se practicó la fertilización vegetal. Para cada unidad experimental, se tomó una submuestra de suelo de cada árbol del conjunto que contenía las 6 plantas de cacao, agrupándolas para formar una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg.

Las muestras fueron transferidas al laboratorio, donde fueron secadas al aire y tamizadas, antes de determinar el análisis de COS, N total, pH, P extraíble, cationes intercambiables (K, Ca, Mg, Al), micronutrientes (Cu, Zn, Fe, Mn) extraíbles y textura. Para la densidad aparente, se tomaron muestras no perturbadas extraídas con anillos metálicos Uhland de volumen conocido (Vance, 1990).

Para evaluar el efecto de la fertilización en la nutrición de las plantas de cacao, se recolectó la cuarta hoja de la parte media de cada árbol haciendo un total de 24 hojas sanas de cada unidad experimental, siguiendo la metodología de Puentes-Páramo et al. (2016).

Las hojas fueron trasladadas al laboratorio donde fueron lavadas con agua ultrapura (tipo 2) y secadas en la estufa a 60° Celsius durante 48 horas, para posteriormente determinar las concentraciones de nutrientes de N, P, K, Ca y Mg y micronutrientes (Cu, Zn, Fe, Mn). Además, para conocer el efecto de los tratamientos sobre la biomasa y las extracciones totales de elementos por parte de las plantas, se retiraron tres plantas por cada unidad experimental, realizando el mismo procedimiento de limpieza utilizado en las muestras foliares.

Se procedió a tomar el peso húmedo, luego se secó en la estufa a una temperatura de 60 ° Celsius durante varios días para tomar el peso seco y así calcular la producción de biomasa seca total (kg ha^{-1}).

3.3.4 Análisis de suelos y plantas

Este estudio ha seguido el procedimiento de medición de la concentración de la capacidad efectiva de intercambio catiónico (CICE) seguido por los laboratorios oficiales de Costa Rica, Panamá, Brasil, con excepción del estado de Sao Paulo, y Paraguay (Tomita, 2020). El CICE se determinó mediante la suma de Ca, Mg y Al extraídos por KCl 1M y K

extraídos por Mehlich 1. En estos protocolos oficiales, el Na intercambiable no se considera para suelos ácidos.

En el suelo, el nivel de pH se determinó con agua, en una relación suelo : agua (1:2.5), la concentración del contenido de COS se determinó por el método de calcinación y el N total se llevó a cabo por digestión Kjeldahl, según la metodología de Teixeira et al. (2017). Los elementos biodisponibles de P, Cu, Fe, Zn, Mn y K intercambiable se extrajeron con la solución extractora Mehlich 1, según el método descrito por Tedesco et al. (1995).

El P biodisponible se extrajo con la solución de Mehlich 1 y el extracto se midió por el método del azul de molibdeno que consiste en una reducción del fosfomolibdato por vitamina C y se determinó mediante un espectrofotómetro de luz UV/Vis a una longitud de onda de 680 nm. El resto de los elementos se determinaron con un espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnica de llama.

Las concentraciones intercambiables (Ca, Mg y Al) se extrajeron con una solución extractora de KCl 1 M, según Díaz-Romeu y Hunter (1978) y se cuantificaron mediante espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnica de llama. La concentración de CICE se determinó como la suma de los cationes intercambiables (K, Ca, Mg y Al). La textura del suelo se midió por hidrometría, según las metodologías de Bouyoucos (1962).

En la planta, el N total se determinó de manera similar a la del suelo. Las concentraciones en las hojas y cantidades totales en la planta (P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe y Mn) se obtuvieron mediante extracción asistida por microondas utilizando reactivos con concentraciones puras de HNO₃ y HCl en una relación 3:1 y posteriormente se analizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnica de llama, según metodologías EPA 3051A (USEPA, 2007).

3.3.5 Análisis estadístico

Para verificar las diferencias entre tratamientos, los datos fueron evaluados por análisis de varianza y las medias de sus tratamientos fueron comparadas por la prueba LSD Fisher $p \leq 0.05$. Para estudiar el cambio de una variable dependiente (por ejemplo, concentraciones de nutrientes en hojas y suelos) en función de la dosis de estiércol de pollo compostado, se realizaron regresiones lineales. Posteriormente, se realizaron gráficos de barras para representar los valores promedio de los niveles mínimo y máximo

de las variables de clasificación. Para todo este cálculo, se utilizó el paquete estadístico del programa Infostat, versión 2008 (Di Rienzo et al., 2015).

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Efecto de los aportes de estiércol de pollo compostado sobre las propiedades del suelo.

La Figura 2 muestra los niveles de pH, COS, N total, relación C:N, P extraído y densidad aparente del suelo (a tres profundidades, 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm) dependiendo de las dosis de estiércol de pollo compostado aplicado. La acidez presentada por el suelo original sin tratamiento (pH 5.2-5.4) fue parcialmente neutralizada por los aportes de estiércol de pollo compostado. Los niveles de pH (Fig. 1a) aumentaron con el aumento de las dosis de estiércol de pollo compostado, alcanzando valores de 5.6-5.9 con la dosis más alta (30 Mg ha⁻¹).

La concentración del contenido de COS (Fig. 1b) en su valor inicial recomendado para suelos cultivados con cacao fue baja (entre 0.5 y 1.74 %, dependiendo de la profundidad del suelo). El aporte de abono de estiércol de pollo compostado resultó en aumentos de COS en las tres profundidades del suelo evaluadas, pero especialmente en las más superficiales. Las concentraciones alcanzadas con las dosis más altas de estiércol de pollo compostado fueron de 1.3-2.5 %. Los aportes de estiércol de pollo compostado también condujeron a aumentos en los niveles totales de N en el suelo (Fig. 1c). En la Figura 1d, la relación C:N (11 a una profundidad de 0 a 5 cm) aumentó ligeramente con los tratamientos.

En la Figura 1e, los bajos niveles de P extraído con Mehlich 1 en el suelo (1.3 mg kg⁻¹) se corrigieron parcialmente con la aplicación de estiércol de pollo compostado. Los niveles más altos (3.3-5.3 mg kg⁻¹) se alcanzaron con dosis superiores a 20 Mg ha⁻¹. Aunque el efecto fue más notable en la capa de 0-5 cm, las capas inferiores también vieron aumentar los niveles de P disponibles. Por otro lado, la densidad aparente (Fig. 1f) evaluada en las tres profundidades del suelo mostró una disminución sustancial a medida que aumentaban las dosis de estiércol de pollo compostado en el suelo.

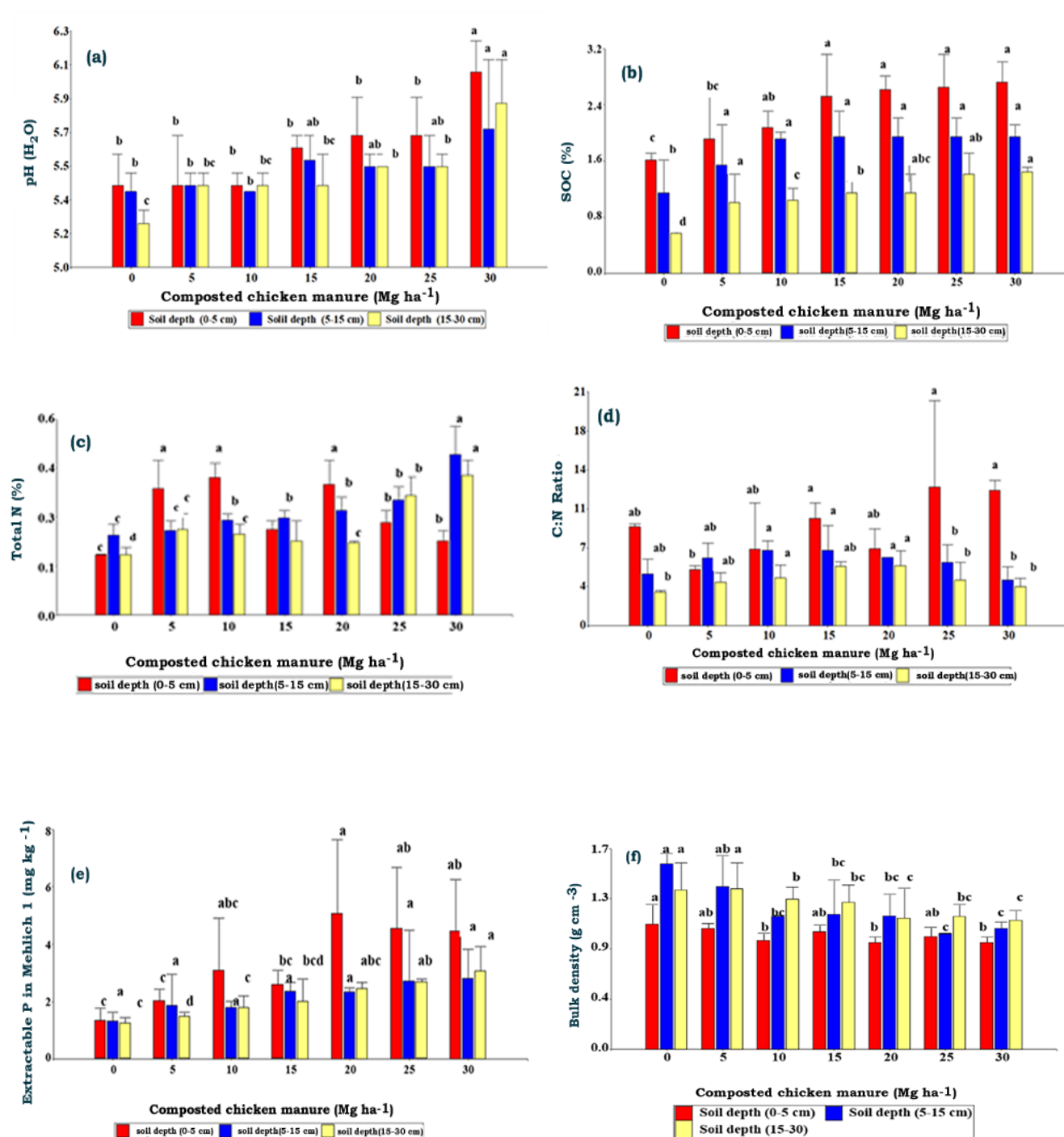


Figura 1. Niveles de pH, COS, relación N total, C: N y P, densidad aparente en el suelo al año de aplicar las dosis de estiércol de pollo compostado. Las diferentes letras no están significativamente en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD de Fisher.

La tabla 2 muestra la CICE y las concentraciones de los principales elementos intercambiables (K, Ca, Mg y Al). El valor de CICE fue muy baja, con un valor original en el suelo de $8 \text{ cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$. En relación a esto y a los niveles de acidez fuerte, los cationes intercambiables de K, Ca y Mg fueron bajas. El aporte del estiércol de pollo compostado resultó en aumentos significativos en CICE y cationes intercambiables de K, Ca y Mg en las tres profundidades. Los niveles máximos de CICE fueron de $13 \text{ cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$. El Al de intercambiable siguió una tendencia opuesta, de forma paralela al pH, este elemento (Al intercambiable) disminuyó con el aporte de estiércol de pollo compostado.

Además, la Tabla 3 muestra los micronutrientes (Cu, Zn, Fe y Mn) extraídos en el suelo con Mehlich 1. Todos estos micronutrientes presentaron altas concentraciones evaluadas en las tres profundidades. La contribución del estiércol de pollo compostado puede haber ayudado al equilibrio nutricional de algunos de los micronutrientes que regulan las concentraciones del suelo al aumentar las dosis.

Tabla 2. Capacidad de intercambio catiónico y elementos intercambiables en el suelo un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Todos los valores son medias de 3 repeticiones y diferentes letras en las barras son significativamente diferentes en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD Fisher.

Composted chicken manure	ECEC			K			Ca			Mg			Al		
	Soil depth (cm)														
	0 a 5	5 a 15	15 a 30	0 a 5	5 a 15	15 a 30	0 a 5	5 a 15	15 a 30	0 a 5	5 a 15	15 a 30	0 a 5	5 a 15	15 a 30
Doce (Mg ha ⁻¹)	Medium concentration (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)														
0	8.0 ^{cd}	6.9 ^{cd}	6.4 ^{bc}	0.15 ^c	0.14 ^c	0.16 ^c	3.4 ^c	3.6 ^c	2.8 ^c	2.6 ^{bc}	1.8 ^c	1.4 ^d	1.80 ^a	1.4 ^a	2.0 ^a
5	6.6 ^d	5.0 ^e	6.0 ^c	0.27 ^{ab}	0.12 ^c	0.13 ^c	3.9 ^c	2.6 ^d	3.8 ^b	1.8 ^d	1.9 ^{bc}	1.5 ^{cd}	0.6 ^b	0.4 ^b	0.6 ^b
10	7.2 ^{cd}	7.9 ^{cd}	6.6 ^{bc}	0.20 ^{bc}	0.32 ^a	0.35 ^a	3.8 ^c	4.8 ^b	4.0 ^{ab}	2.6 ^{bc}	2.4 ^{abc}	1.8 ^{bcd}	0.6 ^b	0.3 ^b	0.5 ^b
15	6.3 ^d	6.3 ^d	6.7 ^{bc}	0.25 ^{ab}	0.17 ^c	0.29 ^{ab}	3.2 ^c	3.3 ^c	4.0 ^{ab}	2.4 ^{bc}	2.5 ^{ab}	1.5 ^{bc}	0.4 ^{bc}	0.3 ^b	0.4 ^{bc}
20	11.2 ^{ab}	8.1 ^b	8.3 ^a	0.34 ^a	0.24 ^b	0.30 ^{ab}	8.0 ^{ab}	4.6 ^b	4.4 ^{ab}	2.7 ^b	2.9 ^a	3.1 ^a	0.2 ^c	0.3 ^b	0.4 ^b
25	9.5 ^{bc}	6.6 ^d	7.0 ^b	0.32 ^a	0.23 ^b	0.29 ^{ab}	6.8 ^b	3.6 ^c	4.1 ^{ab}	2.2 ^{cd}	2.5 ^{ab}	2.3 ^b	0.2 ^c	0.2 ^b	0.3 ^{bc}
30	13.1 ^a	9.4 ^a	8.4 ^a	0.28 ^{ab}	0.26 ^{ab}	0.23 ^{bc}	9.4 ^a	6.6 ^a	4.5 ^a	3.2 ^a	2.4 ^{abc}	3.4 ^a	0.1 ^c	0.1 ^b	0.2 ^c
R ²	0.85	0.89	0.90	0.70	0.88	0.76	0.84	0.95	0.80	0.81	0.62	0.93	0.96	0.78	0.97
p≤0.05	0.0004	<0.0001	0.0001	0.01	0.0001	0.004	0.001	<0.0001	0.001	0.001	0.05	<0.0001	<0.0001	<0.003	<0.0001

Tabla 3. Microelementos en el suelo un año después de la aplicación de diferentes dosis de gallinaza compostada. Las diferentes letras están significativamente en $p \leq 0,05$ según la prueba LSD de Fisher.

Composted chicken manure	Cu			Zn			Fe			Mn		
	Soil depth (cm)											
	0 a 5	5 a 15	15 a 30	0 a 5	5 a 15	15 a 30	0 a 5	5 a 15	15 a 30	0 a 5	5 a 15	15 a 30
	Average concentrations (mg kg ⁻¹)											
Dose (Mg ha ⁻¹)												
0	2.5 ^{ab}	2.0 ^a	2.2 ^a	6.0 ^b	9.2 ^a	3.9 ^c	16.2 ^a	7.3 ^{bc}	14.2 ^{ab}	117 ^{bcd}	90.1 ^a	85.7 ^a
5	2.3 ^{ab}	2.2 ^{ab}	2.4 ^a	7.3 ^b	5.4 ^{bc}	2.7 ^c	11.6 ^c	14.3 ^b	17.3 ^a	80 ^d	81.0 ^a	64.9 ^b
10	2.3 ^{ab}	2.5 ^a	2.4 ^a	6.8 ^b	6.1 ^{bc}	5.8 ^b	6.8 ^d	7.9 ^{bc}	12.5 ^b	239 ^a	58.8 ^b	23.8 ^c
15	2.8 ^a	2.6 ^a	2.4 ^a	13.2 ^a	4.3 ^c	9.5 ^a	25.3 ^a	44.0 ^a	12.8 ^b	118 ^{bcd}	93.4 ^a	89.9 ^a
20	2.2 ^{ab}	1.9 ^b	2.1 ^a	14.4 ^a	7.7 ^{ab}	2.5 ^c	11.9 ^c	5.3 ^c	12.1 ^b	166 ^b	75.8 ^{ab}	60.0 ^b
25	2.2 ^{ab}	2.5 ^a	2.5 ^a	13.7 ^a	5.8 ^{bc}	8.1 ^a	4.6 ^d	9.8 ^{bc}	15.3 ^{ab}	92 ^{cd}	87.2 ^a	54.9 ^b
30	2.0 ^b	2.3 ^{ab}	2.2 ^a	17.7 ^a	9.3 ^a	5.8 ^b	8.7 ^{cd}	10.6 ^{bc}	7.5 ^c	144 ^{bc}	76.0 ^{ab}	63.0 ^a
R ²	0.52	0.53	0.32	0.77	0.71	0.92	0.92	0.94	0.81	0.81	0.65	0.87
p≤0.05	>0.05	>0.05	>0.05	0.03	0.01	<0.0001	0.001	<0.0001	0.003	0.001	0.05	0.0002

3.4.2 Evolución de la nutrición de la planta de cacao según los aportes de estiércol de pollo compostado

3.4.2.1 Concentraciones foliares del cultivo

Las concentraciones foliares de N, P, Ca y Mg se muestran en la Figura 2 y los micronutrientes Cu, Zn Fe y Mn se presentan en la Tabla 4. Las crecientes contribuciones de fertilizante resultaron en aumentos significativos en las concentraciones de N, P, Ca (Fig. 2a, 2b, 2d) y Mg (Fig. 2e) en las hojas. En el caso del N (Fig. 2a), estos aumentos ocurrieron solo a las dosis más altas. Las concentraciones de K (Fig. 2c), Cu, Zn, Fe y Mn (Tabla 4) en estas hojas no experimentaron cambios significativos con los tratamientos.

Tabla 4. Concentraciones foliares de microelementos en el cultivo de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de gallinaza compostada. Todos los valores son medias de 3 repeticiones y diferentes letras en las barras son significativamente diferentes en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD Fisher

Composted chicken manure	Cu	Zn	Fe	Mn
Average foliar concentration				
Dose (Mg ha ⁻¹)	mg kg ⁻¹			
0	53 ^a	205 ^b	105 ^{ab}	973 ^{ab}
5	79 ^a	242 ^b	122 ^{ab}	1179 ^{ab}
10	73 ^a	245 ^b	136 ^a	1405 ^a
15	83 ^a	475 ^a	50 ^b	1300 ^{ab}
20	65 ^a	398 ^{ab}	42 ^b	1344 ^a
25	58 ^a	408 ^{ab}	94 ^{ab}	993 ^{ab}
30	43 ^a	312 ^{ab}	89 ^{ab}	748 ^b
R ²	0.27	0.68	0.51	0.48
p≤0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05

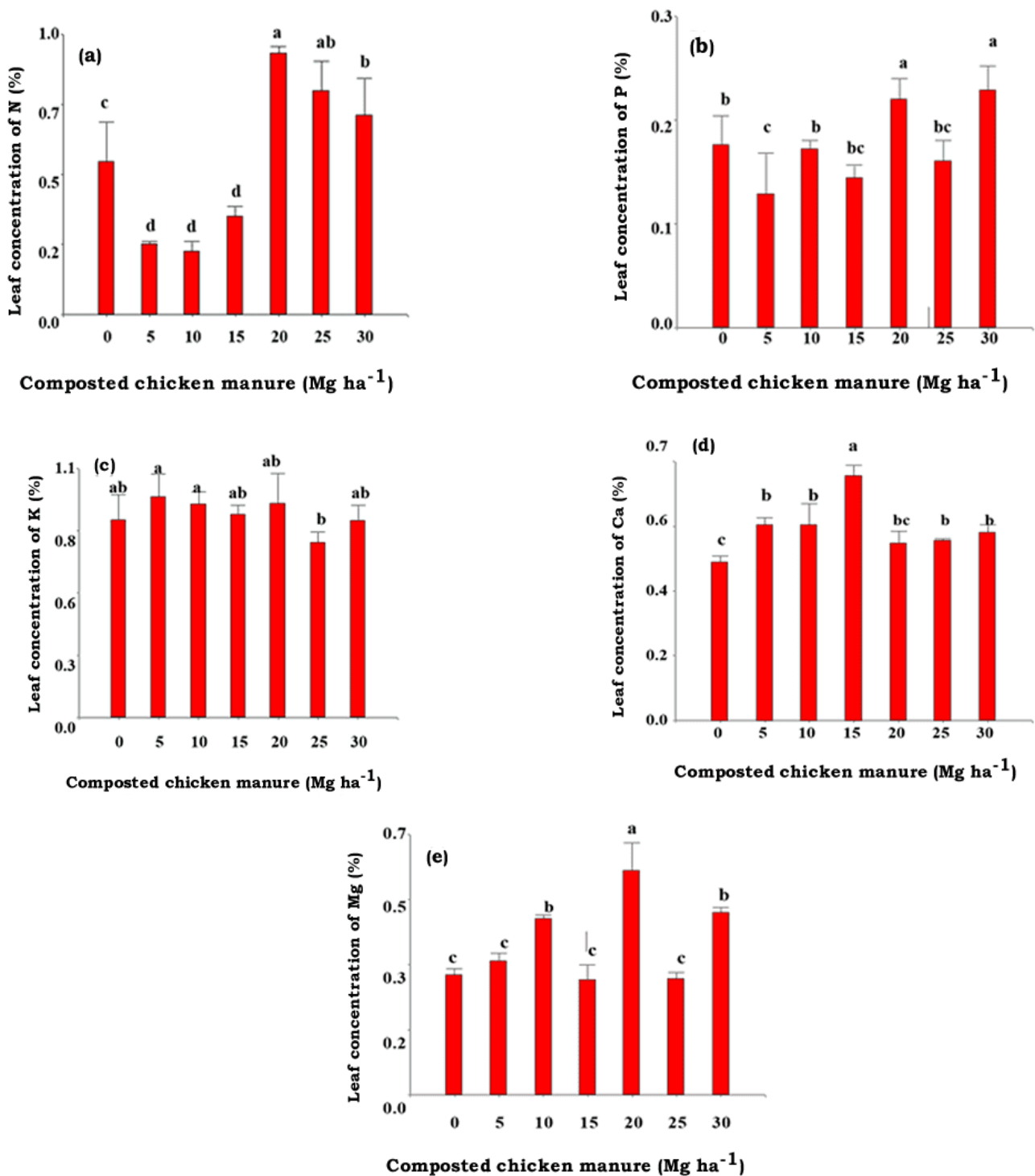


Figura 2. Concentraciones foliares de N, P, K, Ca y Mg en el cultivo de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Las diferentes letras no están significativamente en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD de Fisher.

3.4.2.2 Biomasa y cantidades de nutrientes asimilados por la planta

El impacto de los tratamientos en el crecimiento de las plantas se evaluó mediante la determinación de la biomasa aérea (Fig. 3a). La contribución del estiércol de pollo compostado resultó en aumentos significativos en la biomasa de la planta. Las cantidades de N, K, Ca, Mg (Fig. 3) y micronutrientes (Cu, Zn, Fe y Mn) acumuladas en la planta (Tabla 5) aumentaron proporcionalmente al aporte de fertilizante orgánico.

En todos estos parámetros mencionados en el párrafo anterior presentan significación para la prueba de LSD de Fisher ($p \leq 0.05$) al aplicar dosis de estiércol de pollo compostado.

La biomasa total más alta (Fig. 3a) del árbol de cacao de dos años se obtuvo a la dosis aplicada de 25 Mg ha⁻¹ de estiércol de pollo compostado con un valor de 14 Mg ha⁻¹. Del mismo modo, en la Figura 3b la cantidad máxima de N extraído por la planta fue de 145 kg ha⁻¹ coincidiendo con la dosis más alta obtenida de la biomasa total (25 Mg ha⁻¹). Además, la cantidad total máxima de P extraído por la planta (Fig. 3c) se presentó mediante las dosis de 20 y 30 Mg ha⁻¹ de pollo compostado. Mientras que para K (Fig. 3e), se puede observar un aumento de dosis de 15 Mg ha⁻¹. En cuanto al Ca (Fig. 3e) y Mg (Figure 3f), las mayores cantidades se obtuvieron a la dosis de 20 Mg ha⁻¹, con valores de 217 kg ha⁻¹ y 198 kg ha⁻¹ respectivamente.

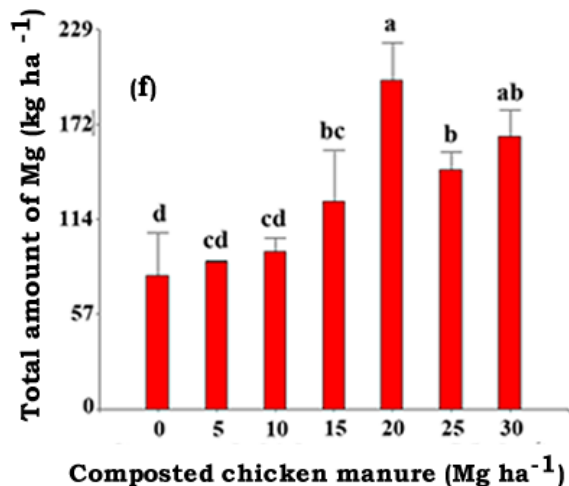
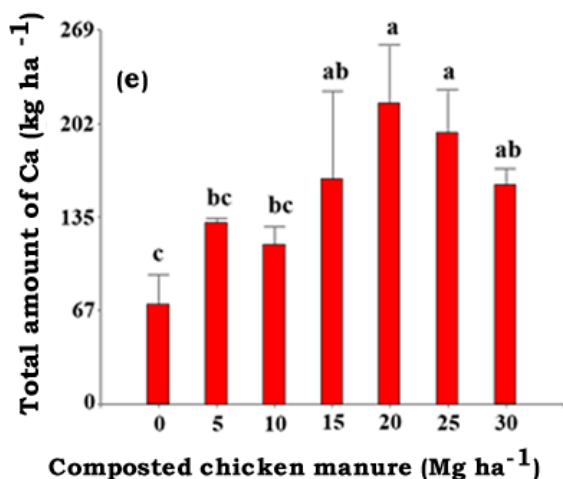
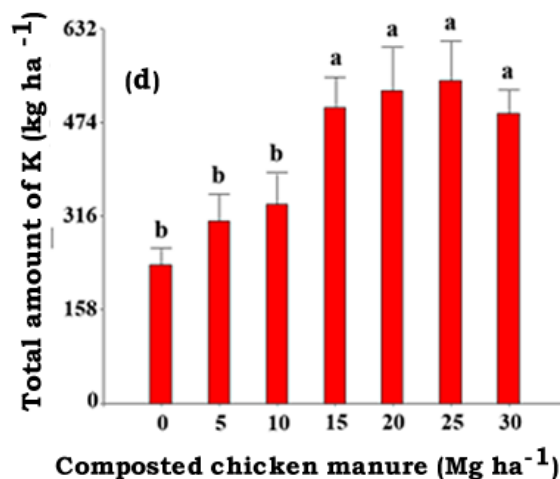
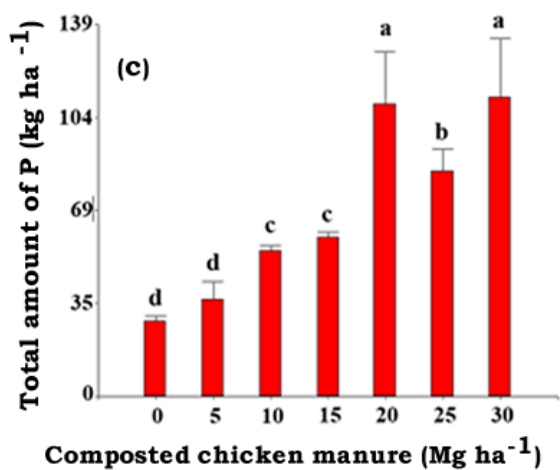
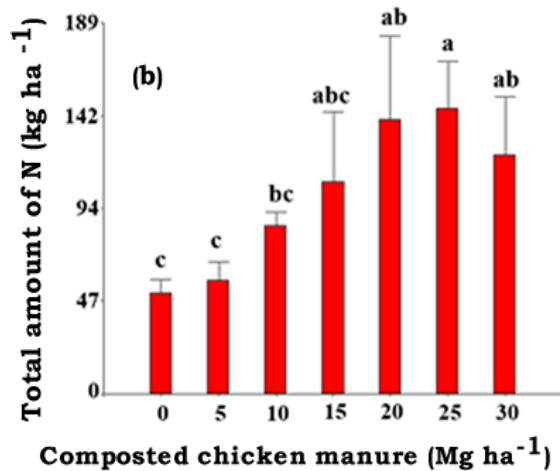
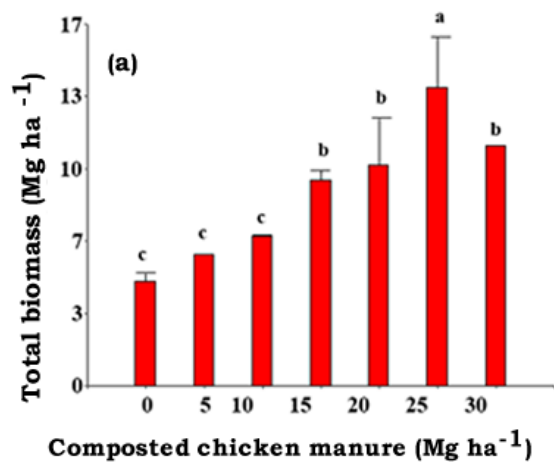


Figura 3. Biomasa y cantidades de N, P, K, Ca y Mg acumuladas en la parte aérea de plantas de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).

En cuanto a los elementos menores analizados (Cu, Zn, Fe y Mn), las cantidades acumuladas en la planta de cacao aumentaron progresivamente con el aporte de gallinaza hasta alcanzar valores máximo en la dosis de 15 Mg ha⁻¹.

Tabla 5. Cantidades de microelementos acumulados en la parte aérea de las plantas de cacao un año después de la aplicación de diferentes dosis de estiércol de pollo compostado. Todos los valores son medias de 3 repeticiones y diferentes letras en las barras son significativamente diferentes en $p \leq 0.05$ según la prueba LSD Fisher

Composted chicken manure	Cu	Zn	Fe	Mn
Total, medium amoun				
Dose (Mg ha ⁻¹)	kg ha ⁻¹			
0	0.6 ^d	5.5 ^{bc}	4.9 ^a	11 ^c
5	0.8 ^{cd}	4.6 ^{bc}	3.6 ^a	15 ^{bc}
10	0.9 ^{bcd}	4.2 ^c	5.7 ^a	13 ^c
15	1.4 ^a	7.6 ^a	4.1 ^a	21 ^b
20	1.2 ^{ab}	7.5 ^{ab}	6.1 ^a	20 ^b
25	1.2 ^{ab}	8.0 ^a	6.2 ^a	25 ^a
30	1.1 ^{abc}	7.5 ^a	5.2 ^a	20 ^b
R ²	0.69	0.59	0.31	0.85
p≤0.05	0.01	>0.05	>0.05	0.0004

3.5 DISCUSIÓN

A pesar del importante potencial para el cultivo del cacao, los suelos del distrito de Almirante (Boca del Toro-Panamá) muestran limitaciones edáficas que afectan la nutrición y la producción. El presente estudio muestra que la aplicación de estiércol de pollo compostado conduce al aumento de la concentración de MOS, disminuyendo gradualmente la fuerte acidez y aumentando la concentración de la CIC, siendo el fertilizante orgánico un producto asequible para los pequeños productores, junto con otras estrategias culturales (principalmente la selección de genotipos) que ayuda a superar estas limitaciones.

El suelo original presentaba niveles de pH excesivamente ácidos, por debajo de 5.5, (Fig. 2a) para una producción óptima de cacao (Snoeck et al., 2016). Este factor limita la biodisponibilidad de nutrientes en el suelo y la toxicidad potencial por Al intercambiable

(Quinteiro et al., 2013), que afecta la producción de cacao (Arévalo-Hernández et al., 2022). La aplicación de cantidades progresivas de estiércol de pollo compostado resolvió parcialmente esta limitación, aumentando el valor del pH y al mismo tiempo reduciendo el Al intercambiable (Tabla 2). En estudios realizados en el oeste de África, con suelos de propiedades similares a los de este estudio, se demostró la actividad del aporte del fertilizante orgánico para corregir la acidez y el mal manejo de los suelos cultivados con cacao (Gockowski, et al., 2012).

En cuanto al COS (Fig. 2b) y las concentraciones totales de N en el suelo original (Fig. 2c), por debajo del 1.7 % y 0.2 %, respectivamente, se consideran bajas para el cultivo de cacao (Snoeck et al. 2016), que es característico de los suelos tropicales. Valores similares se encontraron en los cultivos de cacao en Perú (Osorio, 2015). Estos bajos niveles de COS y N total están asociados con la rápida mineralización de la materia orgánica debido a las altas temperaturas y la humedad. El aporte de estiércol de pollo compostado mejoró esta situación, aunque fueron necesarios aportes de hasta 20 Mg ha⁻¹ para alcanzar niveles de COS considerados adecuados (Snoeck et al., 2016). El aumento de materia orgánica es uno de los factores más importantes que se buscan cuando se agrega estiércol de pollo compostado al suelo, aumentando el carbono orgánico (González-Gordon et al., 2018). Esto a su vez, vinculado al pH, es esencial para la actividad biológica al aumentar los microorganismos del suelo que estimulan la mineralización de nutrientes (van Vliet y Giller, 2017).

Los aportes de estiércol de pollo compostado mejoraron la asimilación de N por el cultivo, como se muestra en el aumento de las concentraciones foliares de N (Fig. 3a) y en la cantidad de N asimilado por la planta (Fig. 4b). Aunque la planta asimiló una parte importante del N aportado en los tratamientos, las concentraciones foliares no alcanzaron los niveles en las hojas considerados óptimos (1,8-2,5 %, Snoeck et al., 2016; Calvo Romero, 2018). Esto puede deberse a un efecto de dilución como resultado de un crecimiento vegetativo significativo (Fig. 4a). La alta liberación de N mineral debido a la descomposición de MO fue un factor importante que pudo haber influido en este proceso fisiológico en la planta (Navarro y Navarro, 2003).

El nivel de P extraído (Fig. 2e) en el suelo original (5,3 mg kg⁻¹) está por debajo del óptimo para el cultivo del cacao (Snoeck et al., 2016). Algunos factores limitantes en los cultivos de cacao que son comunes en los suelos tropicales son la baja disponibilidad de

P en los suelos debido a la baja concentración de COS y la acidez excesiva (Snoeck et al., 2016; van Vliet y Giller, 2017). El aporte de estiércol de pollo compostado mejoró considerablemente la asimilación de P por la planta, como lo demuestra la cantidad de P acumulada por las hojas (Fig. 2c). Con aportes de estiércol de pollo compostado superiores a 20 Mg ha⁻¹ la planta alcanzó concentraciones foliares adecuadas de P (entre 0.17-0.25 %, según Sodré et al. , 2012; Snoeck et al., 2016 y Calvo Romero, 2018). Otros estudios han evaluado las contribuciones de los fertilizantes orgánicos sobre la nutrición P en el cacao (Afrifa y Dogbatse, 2018; Amponsah-Doku et al., 2022), donde se utilizó en forma orgánica el estiércol de aves de corral, mejorando el COS para optimizar la absorción de P disponible en el suelo.

La mayor porosidad (Fig. 2f) debido a la ganancia de COS (Fig. 2b) favoreció también la absorción de nutrientes por la planta, aumentando el crecimiento vegetativo (Figure 4a) del cultivo de cacao (Gama Rodríguez y Zeballos, 1991).

Los niveles de CICE y las concentraciones de K, Ca y Mg intercambiables (Tabla 2) fueron extraordinariamente bajos (Snoeck et al., 2016) como corresponde a suelos tropicales, caracterizados por bajos niveles de MOS y minerales de baja carga (Sikiric et al., 2011).

Del mismo modo, la concentración de K en las hojas (Fig. 3c) puede explicarse en el lugar donde se informaron niveles bajos, que varía con la concentración de este elemento en el suelo (Aikpokpodion, 2010). Uno de los beneficios del aporte de abono orgánico es precisamente la mejora de este parámetro, que determina la reserva de diferentes nutrientes. Al igual que en el presente estudio, otros ensayos (por ejemplo, Colombia) muestran cómo el aporte de fertilizantes orgánicos mejora la CIC y los cationes intercambiables en suelos tropicales (León-Moreno et al., 2019).

Estas mejoras resultaron en aumentos en la asimilación de Ca y Mg por la planta (Sodré et al., 2012 y Puente-Paramo et al., 2016) como se muestra en concentraciones foliares (Fig. 3d y Fig. 3e) y cantidades asimiladas (Fig. 4).

Además, los micronutrientes (Tabla 3) presentaron valores excesivamente altos reportados por Snoeck et al. (2016). Esto puede ser debido a la reserva mineral natural del suelo con altas concentraciones de micronutrientes debido al sistema agroforestal.

El sistema agroforestal permite el reciclaje de hojarasca en la superficie del suelo donde el nivel de pH y MOS son bajos debido a la alta mineralización favoreciendo la solubilidad, provocando la no complejidad entre ellas.

La aplicación del estiércol de pollo compostado no afectó las concentraciones de micronutrientes en las hojas (Tabla 4) ya que la planta utiliza lo necesario para su crecimiento vegetativo demostrado en la Tabla 5, donde se produjo la mayor acumulación de estos elementos o con dosis superiores a 20 Mg ha⁻¹.

Se han desarrollado varias investigaciones para conocer los niveles de concentraciones de micronutrientes en la hoja de cacao para saber si presenta o no síntomas de toxicidad (Marruecos et al., 2020; Chinnappan, 2022).

3.6 CONCLUSIONES

El estiércol de pollo compostado es un producto asequible para los productores de áreas rurales de escasos recursos. El estudio identificó en limitaciones de fertilidad en el suelo que derivan en deficiencias de elementos esenciales en la planta de cacao en el área de Almirante, provincia de Bocas del Toro.

Este estudio mostró que en un sistema agroforestal el uso de estiércol de pollo compostado ayuda a mejorar la biodisponibilidad de nutrientes (N, P y K) en el suelo y a disminuir las concentraciones de Al intercambiable.

Se puede aplicar a suelos de orden Inceptisol cultivados con genotipos mejorados de cacao de dos años, con fuerte acidez, concentraciones bajas a moderadas de COS y bajos niveles de N, P y K.

Además, el estiércol de pollo compostado ayudó a aumentar la absorción de nutrientes esenciales en la planta afectado en el desarrollo vegetativo, incrementando su biomasa al 30 % del valor inicial.

En las condiciones del suelo estudiadas, se necesitan dosis de 20 a 25 Mg ha⁻¹ de estiércol de pollo compostado para aumentar los nutrientes en el suelo ayudando a mejorar en el tiempo las concentraciones deficientes de N, P y K en la hoja y manteniendo niveles óptimos de Ca y Mg.

4. CAPÍTULO II
CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN CACAO
PRODUCIDO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES DE PEQUEÑOS
PRODUCTORES DE PANAMÁ

***Artículo sometido a Spanish Journal of
Agricultural Research***

4. CAPÍTULO II. CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN CACAO PRODUCIDO EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE PEQUEÑOS PRODUCTORES DE PANAMÁ

4.1 RESUMEN

El cultivo de cacao representa para los productores de áreas rurales de Panamá en donde se cultiva el cacao, una alternativa económica, social y cultural. La elevada concentración de Cd limita la comercialización del grano de cacao mundialmente, y en particular en esta región. El objetivo fue obtener información básica del contenido de Cd en el suelo, hojas, frutos y granos que ayuden a mejorar los sistemas de producción de cacao que no excedan los límites permitidos para cacao procesado. El estudio fue realizado en el 2020-2021 en Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá, en 21 parcelas de 8 fincas de productores de cacao. El área total muestreada en cada parcela fue 300 m², donde se tomaron muestras de suelos a profundidades de 0 a 30 cm, hojas y frutos de cacao. Se realizaron estadísticas descriptivas, comparación de medias y análisis de correlaciones entre las variables de suelo y Cd en suelo y planta. Se evaluó la relación entre el Cd biodisponible con variables fisicoquímicas del suelo y las relaciones entre las variables del suelo y Cd en plantas. Se realizó regresión lineal múltiple, seleccionando las variables con el método *Backward*. La mayor parte de las parcelas presentaban pH muy ácido (5.1) y contenido de MOS entre 1.80 a 10.1 %. Todos los casos, el Cd total y biodisponible se encontraron por debajo de los límites de contaminación. Los niveles de Cd en las hojas de cacao en todas las fincas evaluadas sobrepasaron los niveles de 0.5 mg kg⁻¹, recomendados por otros autores. La concentración de Cd en grano fue baja, normalmente inferiores a 0.25 mg kg⁻¹, y por tanto por debajo del límite (0.6 a 0.8 mg kg⁻¹) que se toma como referencia al chocolate con contenido de materia seca total ≥ 50 % del CODEX Alimentarius. El estudio predictivo estima que el pH, MOS y los contenidos de arcilla y limo pueden afectar la biodisponibilidad del Cd en el suelo. Y que la concentración de Cd en el grano puede ser influenciada mayormente por el Cd biodisponible y el contenido de arcilla en el suelo. La concentración de Cd en el grano puede disminuirse aumentando el pH y el contenido de MOS.

Palabras claves. carbono orgánico del suelo, Inceptisol, acidez del suelo, saturación de aluminio, toxicidad.

4.2 INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo que proviene de América del Sur y fue traído a América Central en la época precolombina (Montemayor et al., 2002). A nivel mundial, se estima que hay entre 6 y 7 millones de productores de cacao en todo el mundo, y entre el 80 y 90 % del total antes mencionados, son productores con pequeñas fincas, con áreas de producción entre 2 a 4 ha, principalmente de regiones tropicales de África, Asia, Indonesia y América Central y del Sur (Voorra et al., 2019).

Uno de los aspectos que repercute en la comercialización del cultivo de cacao es la presencia de concentraciones altas de metales pesados (entre ellos el Cd). Esto perjudica notablemente la calidad de los derivados del cacao, afectando las exportaciones (Huamaní-Yupanqui et al., 2012, Arvelo et al., 2017).

El Cd generalmente es adsorbido por los componentes del suelo e ingresa a las plantas a través de transportadores de metales esenciales, entre ellos Ca, Fe y Zn (Antosiewicz et al., 2008). Las concentraciones altas de Cd en el grano suponen una limitante para la comercialización de productos agrícolas (Bravo Realpe et al., 2014).

El Cd es un metal pesado que se encuentra naturalmente distribuidas en los tres tipos de rocas de la siguiente forma: rocas ígneas (0.07 a 0.25 mg kg⁻¹), rocas metamórficas (0.11-1.0 mg kg⁻¹) y rocas sedimentarias (de 0.01 a 2.60 mg kg⁻¹) según Traina (1999). Sin embargo, en rocas carbonatadas se han encontrado niveles con valores medios de 4.58 mg kg⁻¹ y hasta 16.3 mg kg⁻¹ de Cd, según Quesada et al., (2015). En los suelos las concentraciones oscilan en 0.1 a 1 mg kg⁻¹, según la Unión Europea, legislación de la directiva 86/278/CEE de 1986. con un nivel base natural que no excedería de 0.5 mg kg⁻¹ (Kabata- Pendias, 2010).

Existen muchos factores que pueden influir sobre la concentración del Cd en la planta. El material de parental del suelo, así como las propiedades del suelo, como son el contenido y composición de materia orgánica del suelo (MOS), pH, contenidos de carbonatos, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, mineralogía de las arcillas, salinidad,

contaminación antropogénica y el genotipo de la planta, afectan a la bioacumulación y transferencia del metal pesado al grano de cacao (Ogunlade et al., 2011; Alloway, 2013). A su vez estos factores pueden permitir la disolución, lixiviación y solubilidad del metal pesado (Huertos y Baena, 2008). Sin embargo, la bioacumulación del Cd en la planta varía según el tipo de suelo donde se produce el cacao (Aikpokpodion et al., 2012).

La concentración del Cd total en el suelo no siempre es un buen indicador para predecir la concentración del Cd en el grano del cacao, ya que solo una porción de este elemento es biodisponible a la planta (Shahid et al., 2016; Gramlich et al., 2018). Por otra parte, el Cd y el Zn en el suelo presentan sinergia en la disponibilidad de ambos elementos cuando las cantidades de ambos metales son elevadas, sin embargo, si uno de ellos presenta una concentración muy superior a la del otro, inhibe la retención de alguno de ellos (Estévez et al., 2000). éstos a su vez pueden ser translocados a la planta si el pH del suelo es muy ácido o la MOS es baja (Rábago y Aracil, 2011). El Cd en la planta es movilizado y transferido a las hojas y frutos, concentrándose luego en el grano, pudiendo comprobarse la correlación entre el Cd biodisponible en el suelo y Cd en el grano (Engbersen et al., 2019; Arguello et al., 2019).

El Cd es capaz de acumularse en el cuerpo por lo que un consumo excesivo de granos de cacao con concentraciones máximas a lo permitido por el Codex Alimentarius (WHO, 2010) en los derivados del grano de cacao, pueden favorecer su acumulación. Esto puede provocar graves problemas llegando a los tejidos susceptibles y órganos, entre ellos los riñones y el hígado (Tchounwou et al., 2012; Casteblanco, 2018).

Furcal-Beriguete y Torres (2020) informan que la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (por sus siglas en inglés, EFSA) no ha establecido un límite en la concentración del Cd en el grano no fermentado o crudo, pero hay estudios que demuestran que las concentraciones de Cd en el grano de cacao fermentado y secado alcanzan niveles superiores a lo establecido. El límite máximo para el chocolate y otros productos con contenido de cacao entre el 50 y el 70 % es de 0.6 mg kg^{-1} , mientras que en chocolates y productos con contenido declarado de cacao superior al 70 % el nivel máximo es de 0.8 mg kg^{-1} (EU, 2014).

La alta concentración de Cd en el grano es uno de los problemas que presenta el cultivo de cacao en Panamá, reduciendo su calidad, precio y posibilidades de comercialización. A diferencia de otros países como Perú (Huamaní y Huauya, 2021;

Vallejos-Torres et al., 2022), Costa Rica (Florida, 2021) y Ecuador (Barraza et al., 2019), en Panamá no existen estudios sobre las relaciones entre el Cd del suelo y su presencia en los granos de cacao, a pesar de que habitualmente se detectan concentraciones moderadas del metal (comunicación personal con miembros de la Cooperativa de Servicios Múltiples Cacao Bocatoreño R.L).

Es importante destacar que determinados manejos agronómicos como la aplicación de abonos orgánicos, biochar, microorganismos benéficos y encalados también puede reducir la absorción de Cd y otros metales pesados en el cacao (Bravo et al., 2018; Dávila-Zamora et al., 2020; Ramos, 2021). Pero las zonas dedicadas al cultivo de cacao en Panamá no mantienen un adecuado programa de fertilización.

En este trabajo se realiza una primera evaluación de las concentraciones de Cd en la planta de cacao, especialmente en el grano, y su relación con el Cd disponible y otras propiedades del suelo de los pequeños productores del distrito de Almirante en la provincia de Bocas del Toro. El propósito fue obtener información básica de los contenidos de Cd en el suelo, hojas, frutos y granos y de los factores que los determinan. Esta información ayudará a que los sistemas de producción de cacao que no excedan los límites permitidos para cacao procesado.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1 Ubicación y características generales del sitio del estudio

La investigación fue realizada en el distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá, en 21 parcelas dentro de 8 fincas cultivadas con cacao de diversos genotipos dentro de sistemas agroforestal (Figura 1).

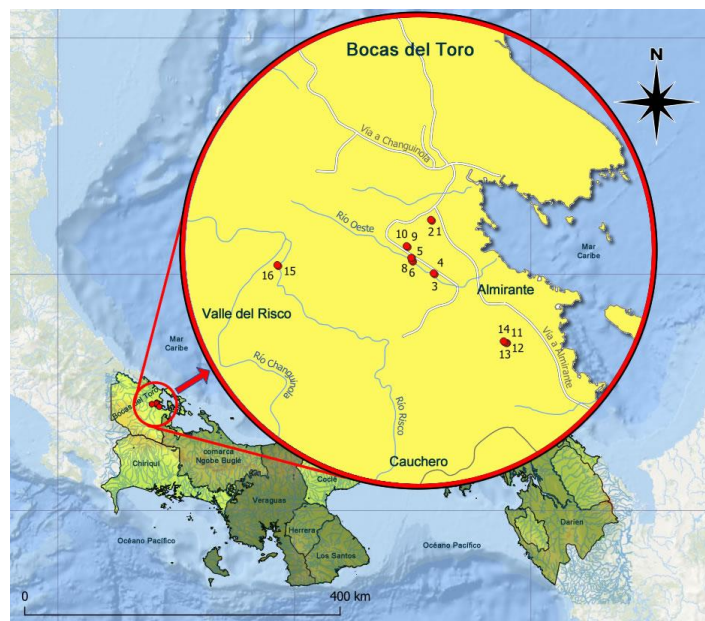


Figura 1. Localización de parcelas de muestreo en fincas cultivadas con cacao en el distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá.

En la provincia de Bocas del Toro predominan las rocas sedimentarias con minerales compuestos de rocas calizas, lutitas, areniscas, cenizas volcánicas, tobas, lavas y andesíticas intercaladas, donde resaltan las dos primeras formaciones por ser las de mayor porcentaje de composición sedimentaria (ANAM, 2010). El clima de la provincia de Bocas del Toro está clasificado como tropical muy húmedo según Köppen (1936), actualizado por Peel et al. (2007). La precipitación media anual se encuentra en 2735 mm con una temperatura media anual de 24.3 °C (IGNTG, 2007).

Los suelos del distrito de Almirante son clasificados taxonómicamente dentro del orden de Inceptisol (USDA, 2014). El contenido de carbón orgánico del suelo (COS) varía de bajo a alto (0.7 a 7.8 %), el nivel del pH varía de 4.2 a 5.9, de muy ácido a ácido, y presenta textura franca y franco arenoso con estructuras de bloques angulares y subangulares, y drenaje que van desde muy lentos a moderados (Name y Cordero, 1987; Villalaz-Pérez et al., 2021).

4.3.2 Metodología de muestreo y preparación de muestras en el laboratorio

El estudio se realizó en los años 2020-2021 en 8 fincas productoras del distrito de Almirante. Dentro de cada finca se seleccionaron 2 o 3 parcelas de muestreo dependiendo del área de la plantación o por afijación proporcional hasta completar un total de 21

parcelas (López, 2010). Cada parcela de 300 m² (10 × 30 m) fue ubicada en sitios representativos de la plantación (SEMARNAT, 2010).

En cada una de estas parcelas se tomaron 15 submuestras de suelo en forma sistemática de zig – zag equidistantes una de otra. Las muestras de suelo se tomaron a profundidad de 0 a 30 cm, y con las 15 submuestras se realizó una muestra compuesta homogenizada de aproximadamente 2 kg.

En el laboratorio se retiraron raicillas, piedras o cualquier material que pudiera alterar el análisis del suelo. Luego, las muestras de suelo se secaron al aire y se trituraron en un mortero de agatha y pasaron a través de un tamiz de malla de nylon de 2 mm en donde se determinaron elementos biodisponibles e intercambiables, sin incluir el Cd. Para este metal pesado, se tomó el suelo que pasó la malla de 2 mm y se procedió a utilizar otro tamiz de 0.063 mm según la guía de muestreo de suelos MINAM (2014).

Los muestreos de hojas y frutos se realizaron dentro de los 300 m² de cada parcela, la cual contenían 17 árboles de cacao. En cada parcela de muestreo, se colectaron 51 hojas sanas, tres por cada árbol, ubicadas cada una de ellas (hojas) en la parte media del árbol de cacao, tomando la cuarta hoja desde el ápice de la rama seleccionada siguiendo la metodología de Puentes et al. (2016). De igual forma, se colectaron 6 frutos de tamaño uniforme y saludable dentro del área seleccionada (300 m²) de plantas seleccionadas de forma sistemática (1 fruto de cada 3 árboles).

Por otro lado, las hojas y frutos fueron lavados con agua bidestilada (tipo 2) eliminando las partículas de tierra adheridas a ellas. Las hojas fueron llevadas a la estufa para el secado a una temperatura de 60 °C hasta mantener un peso constante. Los frutos de cacao son aquellos que crecen en el tronco y en las ramas, que generalmente tienen forma de baya o figura geométrica de elipse la cual pueden ser de color rojo, amarillos o marrón. Dentro de los frutos se encuentran las semillas o granos que aproximadamente pueden haber de 20 a 40 granos de color blanco o morado (Enríquez, 2010).

Se procedió a separar los granos de cacao del resto del fruto, llevando ambas partes al secado, siguiendo el mismo procedimiento de las hojas. Finalmente se trituraron las hojas, frutos y granos.

4.3.3 Determinación de variables en el suelo y plantas de cacao

El pH del suelo se determinó por potenciometría con la relación 1:2.5 (suelo-agua) utilizando técnicas descritas por Teixeira et al. (2017). El carbono orgánico del suelo

(COS) se analizó mediante el método de Walkley y Black (1934). El N total se determinó por digestión Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1983). Para la extracción de elementos biodisponibles (Cu, Fe, Zn, Mn, Cd) y los cationes como Ca, Mg y K se utilizó la solución extractora Mehlich 3 (Mehlich, 1984) tomando una relación suelo: agua 1:10 peso en volumen, y se realizó posteriormente el análisis por espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnica por llama (FAAS).

El Al intercambiable se extrajo con solución extractora KCl 1 M, según Díaz-Romeu y Hunter (1978). La capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) se determinó mediante la sumatoria de cationes intercambiables (Ca, Mg, K) + Al. El porcentaje de saturación de aluminio se determinó como: $\text{Sat. Al (\%)} = \text{Al (cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}) / \text{CICE} * 100$. El análisis físico granulométrico de textura del suelo se realizó usando la metodología de Bouyoucos (1962).

Las concentraciones totales de Cd en suelo, hojas, frutos y granos de cacao se evaluaron por extracción asistida con microondas utilizando HNO₃ y HCl concentrado, en una relación 3:1 y posteriormente analizadas por espectrofotometría de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnica por llama, según metodologías EPA 3051A (USEPA, 2007). Con esta metodología se calcularon los límites de detección (LD), los límites de cuantificación (LC) y el R² ajustado para los elementos evaluados y porcentaje de recuperación (Tabla 1).

Tabla 1. Determinación de los límites de detección (LD), cuantificación (LC) y R^2 ajustado del espectrofotómetro de absorción atómica y porcentaje de recuperación de elementos extraíbles e intercambiables en el suelo y Cd total en suelo y plantas, evaluados en las 21 parcelas.

No	Elemento	Unidades	LD	LC	R^2 (ajustado)	Recuperación (%)	Referencia (WHO, 1982) Recovery (%)
1	K intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.037	0.112	0.996	100.6	
2	Ca intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.004	0.012	0.969	121.6	
3	Mg intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.128	0.383	0.992	109.4	
4	Cu extraíble	mg kg ⁻¹	0.0031	0.093	0.999	99.0	97 - 110
5	Zn extraíble	mg kg ⁻¹	0.001	0.002	0.996	101.5	
6	Fe extraíble	mg kg ⁻¹	0.007	0.022	0.994	90.9	
7	Mn extraíble	mg kg ⁻¹	0.003	0.008	0.984	90.9	
8	Cd total y extraíble	mg kg ⁻¹	0.001	0.003	0.999	98.1	80 - 110

4.3.4 Análisis estadísticos

Para la descripción de los datos se utilizaron estadísticas resumen e intervalos de confianza para los estimadores. Por otro lado, se realizó comparación de medias entre las 8 fincas estudiadas con la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$). Se realizaron análisis de correlación lineal de Pearson en las 21 parcelas de las 8 fincas, para determinar la asociación entre las variables del suelo y el Cd en la planta.

Para tener en cuenta el efecto conjunto de los variables fisicoquímicas del suelo sobre las concentraciones de Cd disponible se realizó un análisis de regresión lineal múltiple. Este mismo análisis se realizó para evaluar cómo el Cd biodisponible y las demás variables fisicoquímicas del suelo se relacionan con el Cd en la planta (hojas, frutos y granos). En las regresiones múltiples se usó el método de selección de variables *Backward*, y para evitar multicolinealidad se consideraron valores de inflación de varianza (VIF) menores a 5 (Balzarini et al., 2008). Los supuestos del modelo fueron evaluados mediante inspección gráfica de los residuos. Los análisis fueron realizados usando el software estadístico InfoStat versión 2022 (Di Rienzo et al., 2022).

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Características generales de los suelos

Se presenta en la tabla 2 el estudio de comparación de medias para los contenidos de minerales del suelo y textura del suelo extraídas a una profundidad de 0 a 30 cm para las 8 fincas cultivadas con cacao en un sistema agroforestal evaluadas en un suelo de orden Inceptisol .

Los suelos de las 8 fincas mostraron alta acidez con un pH en H₂O medio de 4.9. El contenido de MOS mostró un nivel medio de 5.2 %. Ambos parámetros (pH y MOS) al compararlos entre las fincas, no presentan significancias estadísticas con la prueba de LDS de Fisher (p-valor a 0.05). Seguido la concentración del N total que posee un valor medio de 0.34 %, presentando significancia entre fincas de p-valor (0.0001). La relación C: N media de las fincas presentó un valor en el suelo de 10.1.

Se observa un valor en la media de la CICE de 19.1 cmol₍₊₎ kg⁻¹ (Tabla 2), siendo este nivel de valor alto en suelos Inceptisol. De la misma forma, los elementos que forman parte del complejo de cambio (CICE) como los cationes intercambiables K, Ca y Mg, obtuvieron concentraciones altas. con medias de 0.20, 13.5 y 4.8 cmol₍₊₎ kg⁻¹, respectivamente. La concentración media del Al intercambiable fue moderada, de 0.63 cmol₍₊₎ kg⁻¹, con un nivel bajo de Sat. Al de 3.7 %, pudiendo encontrar en estas fincas diferencias significativas entre cada una de ellas.

Los micronutrientes en el suelo presentaron, para la concentración de Cu, Zn, Fe y Mn extraídos por Mehlich 3, valores de 2.58, 3.74, 98.8 y 186 mg kg⁻¹, respectivamente.

Con respecto a la textura del suelo la mayor fracción corresponde a partículas de arena (54 %), seguida por el limo (29 %) y la arcilla (13 %), igualmente comparados con las demás variables mencionadas en el párrafo anterior, presentan valores estadísticamente significativos entre las 8 fincas estudiadas.

Table 2. Comparación de medias de las propiedades generales del suelo (0 a 30 cm de profundidad) evaluadas en 8 fincas cultivadas con cacao. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá.

	Elementos intercambiables										Microelementos				Textura		
	pH (H ₂ O)	MOS	N	C: N	CICE	K	Ca	Mg	Al	Sat. Al	Cu	Zn	Fe	Mn	Arena	Limo	Arcilla
Fincas																	
		-----%-----				-----cmol (+) Kg ⁻¹ -----				%		-----mg kg ⁻¹ -----				-----%-----	
1	5.4	4.4	0.25	11.3	11.0	0.24	8.3	2.3	0.20	1.9	1.6	5.7	92.8	348.7	40	47	13
2	4.9	5.4	0.27	14.3	15.9	0.14	10.2	5.0	0.53	3.3	2.6	3.8	60.4	124.4	69	17	15
3	3.5	4.7	0.34	8.3	31.1	0.41	22.3	8.0	0.42	1.7	3.0	5.6	105.4	164.2	70	25	5
4	5.0	5.6	0.42	7.9	23.8	0.35	16.4	6.4	0.58	2.7	1.9	3.1	74.2	203.1	67	27	7
5	5.0	6.8	0.44	8.9	13.5	0.12	10.0	3.0	0.45	3.4	5.2	4.0	78.7	267.9	60	26	14
6	5.0	4.5	0.46	5.6	14.1	0.08	10.5	2.4	1.15	7.4	4.4	4.6	83.5	98.8	57	23	19
7	5.0	6.1	0.32	11.7	20.7	0.10	15.0	4.2	1.45	7.6	1.7	1.6	131.9	181.3	47	36	18
8	5.3	4.0	0.19	12.7	22.7	0.13	15.3	7.1	0.25	1.4	0.4	1.6	164.2	98.2	21	32	17
Media	4.9	5.2	0.34	10.1	19.1	0.20	13.5	4.8	0.63	3.7	2.6	3.7	98.9	186	54	29	13
Error	0.12	2.3	0.01	11.6	41.4	0.01	24.2	3.0	0.27	8.6	0.94	5.0	2107	6468	93.2	73.0	20.5
CV	6.9	29.2	26.5	34.5	32.3	35.2	35.0	34.5	79.0	77.6	38.7	61.4	45.0	45.4	16.7	29.5	33.8
p-valor	0.058	0.08	0.0001	0.004	0.0002	<0.0001	0.001	<0.0001	0.003	0.002	<0.0001	0.02	0.01	0.0004	0.0001	0.001	<0.0001
Significancia	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Valores con (ns) se evalúan como no significativos. Valores con asteriscos (*) se evalúa como significativos.

4.4.2 Concentraciones de Cd total y biodisponible en los suelos de las fincas productoras de cacao

En la figura 2 se presenta los resultados de los contenidos de Cd total y biodisponible en el suelo en 8 fincas productoras de cacao. El Cd total y biodisponible en el suelo arrojaron valores en sus medias de 0.10 mg kg^{-1} y 0.02 mg kg^{-1} , respectivamente. Los intervalos de valores encontrando para Cd total fueron de 0.06 a 0.16 mg kg^{-1} y para el Cd biodisponible su intervalo fue de 0.01 a 0.03 mg kg^{-1} . El Cd total presentó diferencias estadísticas significativas con la prueba LSD de Fisher (p-valor 0.05) entre las fincas estudiadas. Contrario a la variable Cd biodisponible, la cual no presentó significancias estadísticas entre las fincas.

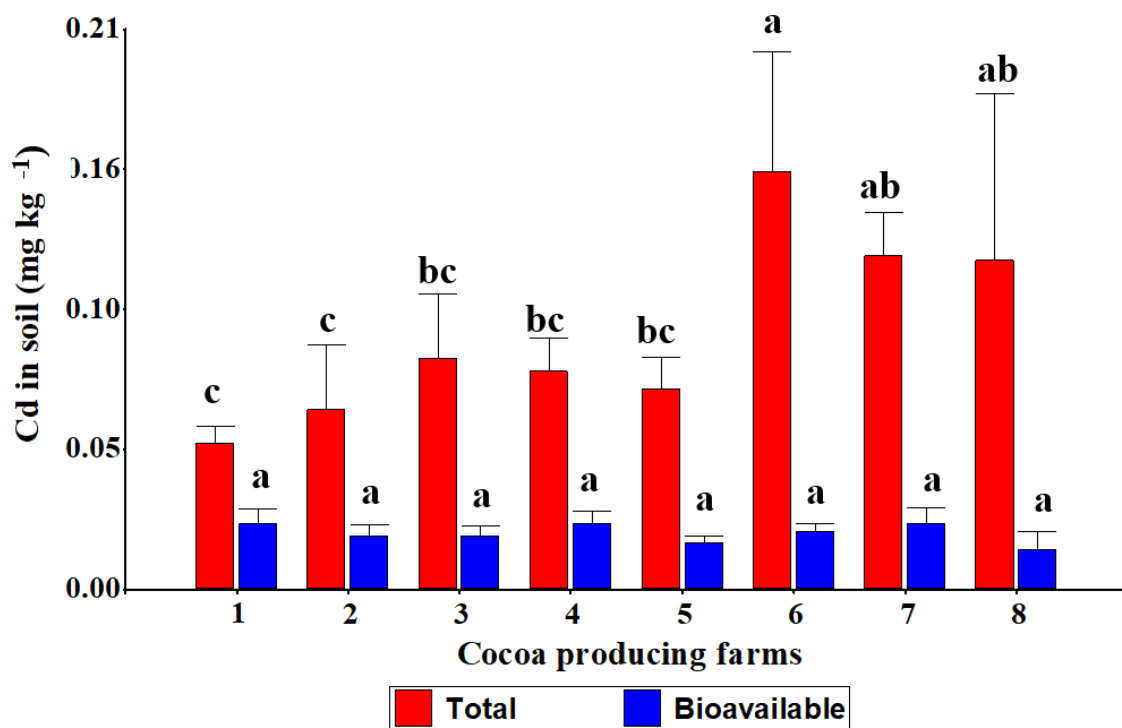


Figura 2. Concentraciones de Cd total y biodisponible en suelo (0 a 30 cm de profundidad) evaluadas en 8 fincas cultivadas con cacao. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).

4.4.3 Concentraciones de Cd en planta

En la figura 3 se presentan las concentraciones de Cd en hojas, frutos y granos de cacao y comparación de medias entre las fincas evaluadas cultivadas con cacao en el distrito de Almirante. Las concentraciones de Cd en hojas, frutos y granos de cacao presentaron diferencias estadísticas con la prueba LSD de Fisher (p-valor de 0.05) entre las 8 fincas evaluadas.

Los niveles medios en la concentración del Cd en hojas (Cd_{hojas}) se encuentra con intervalo de 0.6 a 1.8 $mg\ kg^{-1}$. De igual forma, en la concentración de Cd en frutos (Cd_{frutos}) su intervalo de valores medios fue de 0.2 a 0.5 $mg\ kg^{-1}$. La concentración de Cd en granos de cacao (Cd_{granos}) que se utiliza para el procesamiento de chocolate y otros derivados, el intervalo fue de 0.1 a 0.5 $mg\ kg^{-1}$.

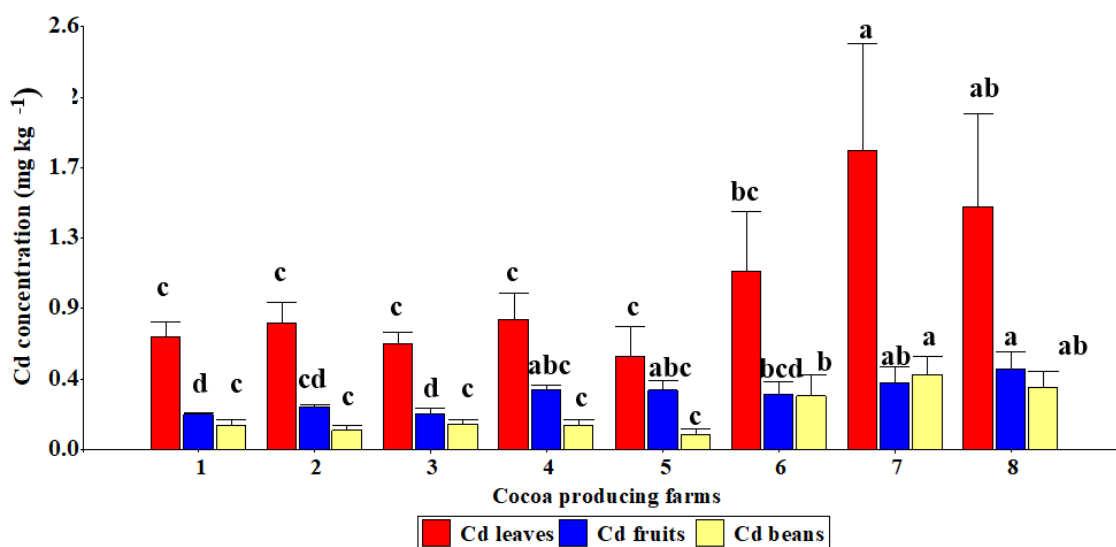


Figura 3. Concentraciones de Cd en hojas, frutos y granos de cacao evaluadas en 8 fincas cultivadas con cacao. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).

4.4.4 Correlación lineal de Pearson para la concentración de Cd en el grano de cacao y propiedades del suelo en las 21 parcelas muestreadas.

Se presentan en la tabla 3, las correlaciones de Pearson calculadas para las 21 parcelas utilizadas para el muestreo, donde se evaluó la relación entre la concentración de Cd_{granos}

con las variables de suelo. De igual forma, se calcularon las correlaciones de Pearson entre las variables de Cd_{bd} , Cd_{hojas} y Cd_{frutos} en las 21 parcelas utilizadas para el muestreo (Tabla 4).

La concentración de Cd en grano se relacionó positivamente con el Cd_{total} y el Cd_{bd} ($r=0.66$ y $r=0.50$ respectivamente, $P < 0.05$). También se correlacionó positivamente con los porcentajes de limo ($r= 0.47$), arcilla ($r= 0.37$) y con las concentraciones de Fe extraíble ($r= 0.47$). Se encontró una relación negativa con el Zn extraíble, aunque no fue significativa.

Tabla 3. Correlación de Pearson para la variable de concentración de Cdgranos de cacao de las 21 parcelas evaluadas. Distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá.

	Variables	R	p-valor
Cd_{granos}	pH (H_2O)	-0.04	0.8773
Cd_{granos}	MOS (%)	-0.50	0.0207
Cd_{granos}	C: N	0.05	0.8432
Cd_{granos}	CICE	-0.05	0.8138
Cd_{granos}	K intercambiable	-0.23	0.3052
Cd_{granos}	Ca intercambiable	-0.06	0.8114
Cd_{granos}	Mg intercambiable	-0.12	0.5947
Cd_{granos}	Al intercambiable	0.36	0.1138
Cd_{granos}	Cu extraíble	-0.17	0.4634
Cd_{granos}	Zn extraíble	-0.38	0.0929
Cd_{granos}	Fe extraíble	0.47	0.0317
Cd_{granos}	Mn extraíble	-0.14	0.5391
Cd_{granos}	Cd_{total}	0.66	0.0010
Cd_{granos}	Cd_{bd}	0.50	0.0243
Cd_{granos}	Limo (%)	0.47	0.0316
Cd_{granos}	Arcilla (%)	0.37	0.1005

Probabilidades en negrilla indican correlación significativa ($p < 0.05$).

4.4.5 Correlación de Pearson para las variables de concentración de Cd (biodisponible, hojas, frutos y granos de cacao) de las 21 parcelas evaluadas.

En la tabla 4 se presentan las correlaciones lineales de Pearson con variables de Cd en hojas, frutos, granos y biodisponibles. A diferencia del Cd en frutos, no se encontraron correlaciones significativas del Cd foliar con el Cd biodisponible.

Se puede mencionar que en la tabla 4, la concentración del Cd_{hojas} presenta una correlación positiva con el Cd_{grano} ($r= 0.84$, $p<0.0001$) y con el Cd_{frutos} ($r= 0.57$, $p=0.0075$). A su vez, el Cd_{frutos} se correlaciona positivamente con el Cd_{grano} ($r= 0.64$, $p=0.0016$).

Tabla 4. Correlación lineal de Pearson para las variables de concentración de Cd hojas, frutos, granos de cacao y el contenido de Cd biodisponible de las 21 parcelas evaluadas.

Variables		R	p-valor
Cd_{hojas}	Cd_{bd}	0.35	0.1169
Cd_{frutos}	Cd_{bd}	0.49	0.0234
Cd_{hojas}	Cd_{frutos}	0.57	0.0075
Cd_{hojas}	Cd_{granos}	0.84	<0.0001
Cd_{frutos}	Cd_{granos}	0.64	0.0016

Probabilidades en negrilla indican correlación significativa ($p<0.05$).

4.4.6 Modelos predictivos para variables de Cd en el suelo, hojas, frutos y granos

En la tabla 5, se presentan los modelos resultantes predictivos determinados con el método de selección paso a paso (*backward*) con regresión múltiple para variables de Cd biodisponible, Cd en hojas, frutos y granos de cacao.

Tabla 5. Modelos predictivos seleccionados paso a paso (*backward*) con regresión múltiple para Cd biodisponible, hojas, frutos y granos de cacao.

Modelos predictivos
$Cd_{bd} = 0.16 + 5.4 \times 10^{-4} \text{ limo (\%)} - 8.9 \times 10^{-4} \text{ arcilla (\%)} - 0.03 \text{ pH} + 1.9 \times 10^{-3} \text{ Zn extraíble} + 1.2 \times 10^{-4} \text{ Fe extraíble}$
$Cd_{hojas} = -0.26 + 0.50 \text{ Al intercambiable} + 0.02 \text{ limo (\%)} + 0.04 \text{ arcilla (\%)} - 0.15 \text{ MOS (\%)} + 22.37 \text{ Cd}_{bd}$
$Cd_{frutos} = 0.36 + 11.40 \text{ Cd}_{bd} - 0.09 \text{ Al intercambiable} - 0.47 \text{ K intercambiable} - 0.03 \text{ Zn extraíble}$
$Cd_{granos} = -0.64 + 20.44 \text{ Cd}_{bd} - 0.03 \text{ Zn extraíble} + 0.03 \text{ arcilla (\%)} + 0.04 \text{ Mg intercambiable}$

Cadmio biodisponible (Cd_{bd}); Materia orgánica del suelo (MOS).

La relación entre la concentración de Cd biodisponible (Cd_{bd}) y las características fisicoquímicas del suelo pudo modelarse con cinco variables según el método de selección *backward* (Tabla 6) donde el R^2 ajustado del modelo de regresión múltiple fue de 0.54.

La concentración de Cd_{bd} es mayormente influenciada por el pH del suelo, debido al alto coeficiente predictivo (Cp) de Mallows (24.53); con una estimación negativa para la variable pH (a menor pH del suelo hay más contenido de Cd_{bd}). El contenido porcentual de arcilla le sigue en valor predictivo al pH; se estima que a menor porcentaje de arcilla puede afectar el contenido de Cd_{bd} .

Contrario a lo ocurrido con el porcentaje de limo, se estima que, a mayor porcentaje de limo, puede afectar el contenido de Cd_{bd} . El Zn extraíble y el Fe extraíble completan el conjunto de variables significativas para explicar el Cd_{bd} ; en este caso estimación positiva de Fe y Zn, mayor contenido de Cd_{bd} .

Este resultado ayuda a afirmar que el Fe extraíble generalmente se asocia con suelos ácidos ya que es un microelemento que está disponible en pH bajo y el caso de Zn actúa en forma sinérgica con el Cd.

Tabla 6. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd biodisponible en el suelo y las propiedades físicas y químicas en el suelo.

propiedades físicas y químicas en el suelo.									
Coeficiente				LI	LS				
Regresión	Unidad	Estimación	EE	95 %		T	p-valor	CP Mallows	VIF
Constante	--	0.16	0.03	0.09	0.22	4.97	0.0002		
Limo	%	5.4x10 ⁻⁴	1.60x10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁴	8.8x10 ⁻⁴	3.35	0.0044	15.24	1.64
Arcilla	%	-8.9x10 ⁻⁴	2.60x10 ⁻⁴	-1.4x10 ⁻³	-3.4x10 ⁻⁴	-3.44	0.0036	15.84	1.44
pH (H ₂ O)	--	-0.03	0.01	-0.05	-0.02	-4.53	0.0004	24.53	3.56
Zn extraíble	mg kg ⁻¹	1.9x10 ⁻³	6.7x10 ⁻⁴	4.7x10 ⁻⁴	3.3x10 ⁻⁴	2.84	0.0124	12.06	1.64
Fe extraíble	mg kg ⁻¹	1.2x10 ⁻⁴	4.3x10 ⁻⁵	3x10 ⁻⁴	2.1x10 ⁻⁴	2.83	0.0126	12.02	2.81

EE: Error estándar; LI: Límite inferior; LS: Límite superior; T: Estadístico -T; CP: Coeficiente predictivo; FIV: Valor de inflación de varianza.

La relación entre Cd en hojas (Cd_{hojas}) y las características fisicoquímicas del suelo pudo modelarse con 5 variables según el método *backward* (Tabla 7). El R^2 ajustado del modelo fue de 0.47, pudiendo interpretarse que la variable de mayor predicción según el Cp de Mallows fue Al intercambiable (11.74) y el contenido de limo (9.40). Tomando en cuenta el factor (22.37) de estimación del contenido de Cd biodisponible la cual puede interferir en la absorción de Cd en las hojas de cacao. Lo antes expuesto, pudiera ocurrir si los contenidos de MOS disminuyesen, observándose en la tabla 7 una estimación de – 0.15 para esta variable predictora.

Tabla 7. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd en hojas (Cd_{hojas}) de cacao y las propiedades físicas y químicas en el suelo.

Propiedades físicas y químicas en el suelo:									
Coeficiente				LI	LS				
Regresión	Unidad	Estimación	E.E	95 %		T	p-valor	CP Mallows	VIF
Constante	--	-0.26	0.62	-1.51	1.00	-0.41	0.6810		
Al intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.50	0.18	0.13	0.86	2.78	0.0085	11.74	1.15
Limo	%	0.02	0.01	3.2x10 ⁻³	0.05	2.32	0.0259	9.40	1.25
Arcilla	%	0.04	0.02	3.2x10 ⁻³	0.07	2.21	0.0337	8.87	1.17
MOS	%	-0.15	0.07	-0.29	-2.7x10 ⁻³	-2.07	0.0461	8.27	1.15
Cd _{bd}	mg kg ⁻¹	22.37	10.62	0.82	43.91	2.11	0.0423	8.43	1.11

EE: Error estándar; LI: Límite inferior; LS: Límite superior; T: Estadístico -T; CP: Coeficiente predictivo; FIV: Valor de inflación de varianza; Al: Aluminio; MOS: Materia orgánica del suelo; Cd_{bd}: Cadmio biodisponible.

La relación entre cadmio en frutos (Cd_{frutos}) y las características fisicoquímicas del suelo pudo modelarse con 4 variables según el método *backward* (Tabla 8). El R² ajustado del modelo fue de 0.44.

Según el Cp de Mallows las variables que predicen la concentración de Cd en frutos son el Cd_{bd} (15.75) y el Zn (8.97). Salvo por el Cd_{bd}, que tiene una relación positiva con el Cd_{frutos}, las demás variables lo afectan negativamente.

Tabla 8. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd en frutos de cacao y las propiedades físicas y químicas en el suelo.

propiedades físicas y químicas en el suelo.									
Coeficiente				LI	LS			CP	Mallows
Regresión	Unidad	Estimación	E.E	95 %		T	p-valor		VIF
Constante	--	0.36	0.10	0.15	0.57	3.67	0.0021		
Cd _{bd}	mg kg ⁻¹	11.4	3.19	4.63	18.2	3.57	0.0026	15.75	1.06
Al intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	-0.09	0.05	-0.20	0.01	-1.97	0.0669	6.86	1.27
K intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	-0.47	0.21	0.92	-0.02	-2.21	0.0423	7.87	1.17
Zn extraíble	mg kg ⁻¹	-0.03	0.01	-0.05	-3.8x10 ⁻³	-2.44	0.0265	8.97	1.17

EE: Error estándar; LI: Límite inferior; LS: Límite superior; T: Estadístico -T; CP: Coeficiente predictivo; FIV: Valor de inflación de varianza; Cd_{bd}: Cadmio biodisponible; Al: Aluminio; K: potasio intercambiable.

La relación entre la concentración del cadmio en el grano de cacao (Cd_{granos}) y las características fisicoquímicas del suelo se modeló con 4 variables según el método *backward* (Tabla 9). El R² ajustado del modelo fue de 0.68.

Al igual que en el caso de Cd en fruto, la variable de mayor intervención para la concentración del Cd_{granos} fue el Cd_{bd} con un Cp de Mallows de 35.23 y con una

asociación positiva, al igual que Mg y Arcilla. La única variable afectando negativamente la cantidad de Cd_{granos} fue el contenido de Zn.

Tabla 9. Coeficientes de regresión múltiple para la relación entre Cd en granos de cacao y las propiedades físicas y químicas en el suelo.

Coeficiente Regresión	Unidad	Estimación	E.E	LI	LS	T	p-valor	CP Mallows	VIF
				95 %					
constante	--	-0.64	0.2	-1.06	-0.21	-3.19	0.0057		
Cd _{bd}	mg kg ⁻¹	20.44	3.6	12.81	28.07	5.68	>0.0001	35.23	1.39
Zn extraíble	mg kg ⁻¹	-0.03	0.01	-0.05	-2.7×10 ⁻³	-2.36	0.0313	8.57	1.11
Arcilla	%	0.03	0.01	0.01	0.04	4.45	0.0006	21.01	1.87
Mg intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.04	0.01	0.01	0.07	2.91	0.0103	11.46	1.89

EE: Error estándar; LI: Límite inferior; LS: Límite superior; T: Estadístico -T; CP: Coeficiente predictivo; FIV: Valor de inflación de varianza; Cd_{bd} : Cadmio biodisponible; Zn: Zinc extraíble; Mg: potasio intercambiable.

4.5 DISCUSIÓN

4.5.1 Características generales de los suelos

El valor del pH (5.1) encontrado en estas fincas se considera muy ácido de acuerdo con los valores de niveles críticos establecidos para suelos de Panamá (Name & Cordero, 1987) y se encuentra dentro del intervalo de valores medios reportados por Snoeck et al. (2016), que son 5.1 a 7.0. Este valor de pH encontrado en las 8 fincas evaluadas en las 21 parcelas pudiera favorecer la liberación de metal pesado Cd según la directiva Kelley CE 86/278 formulada por la Unión Europea en donde dictaminan que el valor del pH puede estar en intervalo de 5.0 a 6.0 (Norma Kelly CE 86/278 y USEPA, 1993).

Los valores muy ácidos del pH permiten la mayor solubilidad de los elementos tóxicos como el Al intercambiable (que en promedio en este estudio fue de $0.7\ cmol\ (+)\ kg^{-1}$) y el Cd. Esto es importante en el cultivo de cacao ya que los procesos de absorción del Cd son favorecidos cuando los pH son muy ácidos (Kirkham, 2006; Rieuwerts et al., 2015). De la misma forma al aumentar el pH en el suelo el Cd es adsorbido por los coloides (humus) bloqueando su biodisponibilidad (Liu et al., 2020).

Esto se pudo comprobar en el modelo de regresión (Tabla 6) donde se presentó el pH del suelo con un p-valor < 0.05 y un alto valor predictivo, indicando que el pH es la variable que mayormente interviene en el contenido de Cd_{bd} . Arévalo-Gardini et al. (2016) y Florida (2021) afirman que la biodisponibilidad de Cd está estrechamente relacionada con valores del pH.

Los contenidos medios de la MOS son mayores de 3 % (Tabla 2), siendo adecuados para el cultivo de cacao (Snoeck et al., 2016) ayudando a la vez a la nutrición del cultivo, mejorando la disponibilidad, por ejemplo, de N y P. Estos valores también contribuyen en la reducción de del Cd biodisponible en el suelo (Nieto y González, 2018). ((esa información es obvia)

Por otro lado, la CICE ($19.9 \text{ cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$) está considerada como de nivel alto (Bertsch et al., 2005), mientras que el K intercambiable (extraído con Mehlich 3) se encuentra dentro del nivel crítico y los cationes intercambiables Ca y Mg son suficientes en un suelo clasificado Inceptisol (Cabalceta y Molina, 2006). Los microelementos (Cu, Zn, Fe y Mn) extraídos con solución extractora Mehlich 3, presentaron concentraciones altas superando los niveles críticos descritos para cada uno de ellos por Cabalceta y Molina (2006).

El contenido de Zn en el suelo puede afectar la adsorción y absorción del Cd debido a su similar comportamiento biogeoquímico (Sikora y Wolt, 1986), ya que son elementos que compiten y por lo tanto el contenido de Zn afecta negativamente a la absorción de Cd biodisponible por parte de la planta. Pudo comprobarse en este trabajo (Tabla 6) donde el Cp de Mallows mostró que el Zn está dentro de las variables que puede predecir la biodisponibilidad del Cd del suelo (Alloway, 2013; Rojas-Cifuentes et al., 2012; Huamaní et al., 2012).

Las parcelas evaluadas mostraron texturas franco arenoso, franco y franco arcillo arenosa (USDA, 2014). Los suelos francos (mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla) pudiera tener un alto contenido de Cd total y biodisponible (Kabata-Pendias 2010) pero según estudios realizados por investigadores (Huamaní-Yupanquí et al., 2012; Chávez et al., 2015; Gramlich et al., 2018) en países como Perú, Ecuador, Honduras y Bolivia, informaron que puede haber una inconsistencia al correlacionarse con el contenido de arcilla debido a que todo depende de la estructura del mineral de la arcilla (p.e., 1:1

caolinitas y 2:1 esmécticas), siendo la más dominante en el trópico la arcilla 1:1 (Rieuwerts, 2007).

Se puede destacar los elevados porcentajes de arena en algunos suelos, lo que puede favorecer la movilidad de Cd. Los suelos no presentan altos porcentaje de arcillas, pero sí alto contenido en arena, similar a los encontrados en estudios realizados en Ecuador por Moreno et al. (2016), representando un factor muy desfavorable debido a que puede haber una alta movilización del Cd desplazándose por lixiviación a superficies subyacentes a la profundidad de 30 cm (Kabata-Pendias, 2010; Kruszewska et al., 2018; Gramlich, et al., 2018).

4.5.2 Concentración de Cd total y biodisponible en fincas productoras de cacao

Las medias presentadas en la Tabla 2, para el Cd total y biodisponible en el suelo en las 8 fincas estudiadas, se encuentran por debajo de 0.43 para suelos agrícolas descritos por la Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), USEPA (2002) y de 1 mg kg^{-1} considerado como suelos no contaminados (Irfan et al., 2013).

La concentración de los metales pesados (p.e., Cd) está ligada estrechamente al contenido de la MOS, la cual forma complejos organometálicos, inmovilizando la absorción de éstos por las plantas (Arévalo-Gardini et al., 2016). Investigadores como Cameselle y Gouveia (2019) mencionan que el Cd biodisponible en el suelo también puede variar debido a interacciones con otros metales. A su vez, la concentración de Cd en el suelo depende de la profundidad a la que es tomada la muestra (Goebes et al., 2019) y no siempre el Cd total en el suelo esta biodisponible (Rieuwerts, 2007).

4.5.3 Concentraciones de Cd en la planta

La concentración de Cd_{hojas} (Tabla 3) presentó niveles tolerantes para las plantas según Kabata-Pendias (2001) y Alloway (2013), quienes recomiendan que la concentración de Cd en la hoja debe estar entre $(0.05 - 0.5 \text{ mg kg}^{-1})$. Los contenidos medios de Cd_{total} en el suelo evaluados en las 8 fincas, presentaron diferencias estadísticas significativas al correlacionarse con el $\text{Cd}_{\text{granos}}$ (Tabla 4). Resultados similares fueron reportados por Ramtahal et al. (2016) en Trinidad y Tobago en plantaciones de cacao.

En Cd_{hojas} no presentó una correlación significativa con el Cd_{bd} en el suelo, pero cuando se estudió esta relación junto a otras variables ésta fue significativa (Tabla 7). Esto puede deberse a que otros metales, como el Al, pueden interactuar con la absorción de este metal hacia la planta (Basta et al., 2005). Asimismo, los minerales del suelo están formados por óxidos como los de titanio, silicio, hierro, manganeso y aluminio, siendo los tres últimos los más importantes en la retención de metales pesados. Otros autores, como Huaraca- Fernández et al. (2020) se refieren a que el Cd_{bd} en el suelo es asociado a iones (p. e., Carboxilos), y estos están relacionados con la MOS, que al aumentar su contenido disminuye la concentración de Cd biodisponible y afecta el Cd_{hojas} (Tabla 7).

Por otra parte, estudios realizados por Meter et al. (2017) mencionaron que el contenido Cd total en el suelo es un factor potencial para la absorción del metal hacia la planta. Podemos predecir entonces que la concentración de Cd en frutos (Tabla 8) y granos (Tabla 9) pudiera estar influenciada por el contenido de Cd biodisponible

Cabe mencionar que según la Unión Europea no se cuenta todavía con niveles de tolerancia para Cd en granos de cacao (Barraza et al., 2017; Furcal et al., 2020) por lo que se toma como referencia el nivel de Cd para el chocolate con contenido de materia seca total ≥ 50 % del CODEX Alimentarius. Éste no debe sobrepasar de 0.80 mg kg^{-1} (FAO/WHO, 2017). Según Unión Europea en su reglamento No 488 (UE, 2014) este nivel también puede ser aplicable al fruto de cacao. En este estudio el Cd grano estuvo muy por debajo de este límite, con una media de 0.25 mg kg^{-1}

4.6 CONCLUSIONES

Las concentraciones de Cd biodisponible en las 21 parcelas de suelos Inceptisol son relativamente bajas a pesar de que el nivel medio del pH es ácido, no siendo este, el único factor que puede interferir en el contenido biodisponible de Cd en el suelo.

El contenido de la materia orgánica del suelo presentó niveles medios, favoreciendo a la baja solubilidad de Al intercambiable.

Los niveles de Cd biodisponible evaluados en las 8 fincas cultivados con cacao del distrito no superan los límites considerados como suelos contaminados por la Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA).

Los modelos elaborados para el Cd biodisponible, Cd en hojas, frutos y granos de cacao pueden usarse para corregir algunas propiedades químicas y biológicas del suelo que pueden ser manejadas a nivel de parcelas, pudiendo realizar manejos edáficos como el encalado o uso de enmiendas orgánicas. Esto pudiera ayudar a incrementar el contenido de MOS en algunas fincas si la MOS fuera menor al 3 %, ya que se considera como nivel apto valores mayores al 3 % para el cultivo de cacao.

En el caso de usar las enmiendas orgánicas (estiércol de pollo compostado) para disminuir el contenido de Al intercambiable en el tiempo y corregir los niveles muy ácidos del pH, ayudaría de forma simultánea a la inmovilización del Cd en el suelo para que no pudiera ser absorbida por las raíces y transferida a las otras partes de la planta.

**5. CAPÍTULO III.
EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE
CADMIO AL SUELO EN PLANTAS DE
CACAO DEL CLON AS-CP 2661**

Artículo sometido a Ciencia Agropecuaria

5. CAPÍTULO III. EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE CADMIO AL SUELO EN PLANTAS DE CACAO DEL CLON AS-CP 2661

5.1 RESUMEN

En este estudio, realizado en condiciones de casa de campo, se evaluó la absorción máxima de Cd en diferentes órganos de las plantas de cacao, así como la bioacumulación y traslocación que presenta el clon AS-CP 26-61, al aplicar diferentes concentraciones de Cd en el suelo. El suelo utilizado en las macetas fue de un área representativa del distrito de Almirante extraído a una profundidad de 0 a 30 cm, donde se cultiva cacao. Se utilizó un diseño completamente al azar, con 6 tratamientos y 3 repeticiones. El suelo fue tratado con CdSO₄ diluido y aplicado en la superficie en dosis de 0 mg kg⁻¹; 4 mg kg⁻¹; 8 mg kg⁻¹; 12 mg kg⁻¹; 16 mg kg⁻¹ y 20 mg kg⁻¹. Pasados los seis meses, se tomaron muestras de suelos a dos profundidades (0 a 15 cm y 15 a 30 cm), así como de raíces, tallos y hojas, para conocer las concentraciones de Cd. Se analizaron los factores de bioacumulación y traslocación para conocer si el genotipo evaluado es hiperacumulador del Cd. Se pudo comprobar que a medida que se incrementaban las dosis de Cd aplicado aumentaron las concentraciones de Cd biodisponible en el suelo. Las hojas presentaron mayor concentración de Cd, seguido por las raíces y los tallos. El comportamiento de la planta de cacao con factores de bioacumulación del Cd mayor de 1 y de traslocación menor a 1, se comporta como una planta fitoacumuladora. Se concluye que el clon evaluado AS-CP-2661 no transfiere el metal de la raíz hacia el tallo y las hojas, en dosis aplicada en el suelo menores de 8 mg kg⁻¹.

Palabras claves: Acumulación de cadmio, disponibilidad Cadmio, Inceptisol, traslocación, suelos ácidos.

5.2 INTRODUCCIÓN

5.2.1 Importancia económica del cultivo de cacao

La planta de “cacao”, *Theobroma cacao* L., pertenece a la familia de las Malváceas, especie descrita por Linneo en el 1753 (Avendaño et al. 2011). La especie, originaria de la Amazonía, se cultiva en más de 50 países de regiones tropicales de 4 continentes (África, América, Asia y Oceanía), 23 de ellos en América.

En todos estos países donde se cultiva el cacao, tiene gran importancia económica, social, ambiental y particularmente cultural, e impulsa las economías (FAO/OMG, 2014; Arvelo et al. 2017). Es destacable que en muchas partes del mundo es cultivado por pequeños agricultores, contribuyendo de esta manera al desarrollo rural (Lehmann et al. 2014). Siendo así, su producción representa una de las principales fuentes de ingreso para más de 50 millones de personas, contribuyendo al incremento del PIB de estos países (López, 2020).

La comercialización del grano de cacao es afectada por la presencia de concentraciones altas de metales pesados (entre ellos el Cd), lo que perjudica a los productores de países que cultivan el grano de cacao, entre estos Panamá. En general, los valores de contenido de Cd en los granos de cacao reportados a través de América Latina y el Caribe (ALC) y otras partes del mundo, superan las regulaciones presentadas en el reglamento de la Unión Europea (UE) aplicados en enero del 2019 por la cual afectará a los productores de cacao en la región (Meter et al. 2019; Engbersen et al., 2019).

Para lo antes expuesto, la UE 488/2014 incluye para niveles máximos de Cd los derivados del chocolate que se presentan a continuación: chocolate de leche con sólidos de cacao inferiores a 30 % una concentración de Cd de 0.1 mg kg^{-1} ; chocolate con sólidos de cacao inferiores al 50 % y chocolates con leche con sólidos de cacao superiores o iguales al 30 %, una concentración de Cd de 0.3 mg kg^{-1} . Chocolates con sólidos de cacao superiores o iguales al 50 %, 0.8 mg kg^{-1} ; cacao en polvo un nivel de concentración de Cd de 0.6 mg kg^{-1} .

Los factores edafoclimáticos y fisiológicos que influyen en la disponibilidad de los metales pesados, provocados por la toxicidad de ellos, se clasifican químicamente en leves, medios y altamente toxico, entre estos últimos está Cd, Pb y Hg por la cual no lo modifica ni el suelo ni la genética de la planta.

De igual manera, estas pueden influir sobre el impacto ambiental que pueden tener los metales, regulando su disponibilidad en la fase residual o unido a la materia orgánica, lo que los hace reducir su impacto al tener menor posibilidad de ser absorbidos por las plantas (Bravo et al. 2014; Casteblanco, 2018).

Entre las principales propiedades que se relacionan con la movilidad y disponibilidad de los metales pesados en el suelo se encuentran el pH, la materia orgánica del suelo (MOS), el contenido de arcilla, los óxidos, los carbonatos y el potencial redox (Alloway, 2013; Barraza et al., 2017; Argüello et al., 2019). Por otra parte, Alloway (2013) menciona que las concentraciones en el suelo de Cd de origen geológico generalmente no superan $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$. Los niveles elevados, alrededor de 16.3 mg kg^{-1} , generalmente se asocian a procesos de meteorización y tipo de materia parental.

Dos factores principales son considerados en este estudio que ayudarán a determinar la acumulación y traslocación del metal pesado (Cd) en la planta (Factor de bioacumulación con siglas en inglés (BCF) y traslocación de la planta (TF).

5.2.2 Factor de Bioacumulación (BCF) y translocación de la planta (TF)

La absorción de metales pesados por la planta puede depender de diversos factores tanto químicos como físicos (p.e., textura superficial de la hoja, clima, temperaturas) que pueden llevar a una bioacumulación o translocación del metal (Cd) dentro de la planta (Shahid et al., 2019) y el ingreso del Cd se puede dar por absorción foliar y/o radical (Song et al., 2017). Además, el mayor problema en la planta de cacao es su capacidad de fitoacumular el Cd (Antoine et al., 2017).

El cálculo del factor de bioacumulación (BCF) estima la relación entre los metales pesado-absorbidos en las plantas y las concentraciones medidas en el medio donde viven (suelo). Se utiliza como indicador de la capacidad de captación que presenta una planta a un metal pesado (Cd) presente en el sistema (Sut-lohmann et al., 2020). Si el BCF es mayor a 10 se considera potencialmente hiperacumulador. Si es mayor a 1 se considerada

como acumuladora del Cd, en cambio si éste es menor a 1 este factor es considerado como exclusora (Verbruggen et al., 2009).

Por otro lado, el factor de translocación (TF), es la capacidad de transportar los metales pesados desde las raíces hasta la parte aérea de la planta (Dinu et al., 2020). Este factor TF si es mayor a 1 la planta de cacao presenta una gran capacidad para movilizar el Cd desde la raíz a la hoja o al tallo (Dinu et al., 2020).

Algunos estudios muestran que la absorción y acumulación de metales pesados por la planta puede estar influenciada por el genotipo (Lewis et al., 2018). Por esta razón, él estudió del material genético mejorado codificado como colección Panamá (AS-CP 26-61) fino de aroma, puede ser de gran interés para los productores de Panamá, por sus altos rendimientos y alta calidad (Gutiérrez, 2020).

Estudio similar al nuestro se realizó en Perú, por investigadores como Arévalo-Hernández et al. (2021) en donde se determinó las altas concentraciones de Cd en diferentes genotipos de plantas de cacao (ICT-1292, PH-17, CCN-51, ICS-39 y TSH-565).

Del mismo modo, Arévalo-Gardini et al. (2017) investigaron la distribución y acumulación de metales pesados en hojas y granos de cacao concluyendo que las plantaciones con diversidad de clones de cacao muestran diferencias en la acumulación de Cd tanto en hojas como en granos.

Lo anteriormente expuesto sugiere que utilizar material de cacao genéticamente mejorado puede ser una estrategia para disminuir las concentraciones de Cd en la planta, derivando a la calidad del grano que puede ayudar a los pequeños productores a mejorar la economía en esa región de Bocas del Toro. Es por eso por lo que se propuso evaluar la bioacumulación y traslocación de la concentración de Cd en la planta de cacao del clon AS-CP 26-61, al aplicar diferentes concentraciones de Cd en el suelo.

5.3 MATERIALES Y MÉTODOS

5.3.1 Ubicación del sitio del estudio

El ensayo de investigación fue realizado durante el año 2020 y 2021 en una casa de vegetación semi controlada, donde se utilizó suelos provenientes de un área representativa

cultivados con cacao del distrito de Almirante, provincia de Bocas del Toro y cuyas características físicoquímicas y biológicas se presentan en la tabla 1.

En la provincia de Bocas del Toro predominan las rocas sedimentarias con minerales compuestos de rocas calizas, lutitas, areniscas, cenizas volcánicas, tobas, lavas y andesíticas intercaladas, donde resaltan las dos primeras formaciones por ser las de mayor porcentaje de composición sedimentaria (ANAM, 2010). El clima de la provincia de Bocas del Toro está clasificado como tropical muy húmedo según Köppen (1936), actualizado por Peel et al. (2007). La precipitación media anual se encuentra en 2735 mm con una temperatura media anual de 24.3 °C (IGNTG, 2007).

Los suelos del distrito de Almirante son clasificados taxonómicamente dentro del orden de Inceptisol (USDA, 2014). El contenido de carbón orgánico del suelo (COS) varía de bajo a alto (0.7 a 7.8 %), el nivel del pH varía de 4.2 a 5.9, de muy ácido a ácido, y presenta textura franca y franco arenoso con estructuras de bloques angulares y subangulares, y drenaje que van desde muy lentos a moderados (Name y Cordero, 1987; Villalaz-Pérez et al., 2021).

5.3.2 Diseño Experimental del estudio

Después de una homogeneización del suelo, fue colocado en macetas cilíndricas con dimensiones de 35 cm de altura y 28 cm de diámetro y capacidad de 15 kg de suelo seco. Se utilizaron plantas del Clon criollo AS-CP- 2661 de un año de edad y registrado en la República de Panamá por el Ministerio de Desarrollo Agropecuario.

El diseño estadístico experimental utilizado fue completamente al azar, con seis tratamientos y tres repeticiones por tratamientos.

Para cada tratamiento se utilizó CdSO_4 diluido con agua tipo II y aplicado en la superficie con diferentes dosis (T1: 0 mg de Cd kg^{-1} de suelo; T2: 4 mg de Cd kg^{-1} de suelo; T3: 8 mg de Cd kg^{-1} de suelo; T4: 12 mg de Cd kg^{-1} de suelo; T5: 16 mg de Cd kg^{-1} de suelo; T6: 20 mg de Cd kg^{-1} de suelo).

Tabla 1. Características del suelo utilizados en las macetas o pots

pH															Cd		Textura		
H ₂ O	N	MOS	COS	C: N	P	CICE	K	Ca	Mg	Al	Cu	Zn	Fe	Mn	total	bd	A	L	Arc
-----%-----				mg kg ⁻¹			-----cmol (+) kg ⁻¹ -----				-----mg kg ⁻¹ -----					----- %----			
-----Profundidad (0-15 cm) -----																			
6.6	0.3	1.4	2.41	8.04	24	26	0.3	19	6	0	3	6	58	46	0.3	0.01	55	29	16
-----Profundidad (15-30 cm) -----																			
6.6	0.4	1.4	2.41	6.03	24	25	0.3	19	6	0	3	6	58	48	0.1	0.01	53	30	17
Parámetros evaluados en el suelo: pH (H ₂ O) relación 1:10																			

Parámetros evaluados en el suelo: pH (H₂O) relación 1:10

5.3.3 Metodología de muestreo de suelo, planta y preparación de muestras en el laboratorio

A los seis meses de aplicados cada tratamiento, se tomaron muestras de suelos a dos profundidades (0 a 15 cm y 15 a 30 cm). En ellas se eliminaron las raicillas, piedras o cualquier material que podía alterar los análisis. Las mismas fueron secadas al aire y trituradas en un mortero de ágata y pasadas a través de un tamiz de malla de nylon de diámetro de 2 mm. Este suelo fue utilizado para conocer los elementos biodisponibles e intercambiables mencionados posteriormente en la sección (5.3.3), sin incluir el Cd. Para este metal se tomó el suelo retenido en el tamiz de diámetro de 2 mm y separado en otra malla con diámetro de 0.063 mm tomando en cuenta la guía de muestreo de suelos del MINAM (2014).

Para el muestreo de las hojas se utilizaron 5 hojas sanas de cada una de ellas próxima al ápice por cada tratamiento y repetición, utilizando metodologías de Puentes y Paramo et al. (2016). Las hojas, tallos y raíces fueron lavadas con agua ultrapura (tipo 2) y secadas en la estufa a 60° Celsius durante 48 horas, para posteriormente determinar la concentración de Cd a cada parte de la planta.

5.3.3.1 Determinación de pH, materia orgánica, variables químicas y textura en el suelo

En las muestras obtenidas del suelo, se realizó la determinación del pH por potenciometría con la relación 1:2.5 (suelo-agua) utilizando técnicas descritas por Teixeira et al. (2017).

La materia orgánica del suelo (MOS), se realizó mediante metodología del carbono del suelo a través del método propuesto por Walkley and Black (1934). El N total se

realizó por digestión Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1983). Para la extracción de elementos biodisponibles (Cu, Fe, Zn, Mn, Cd) y los cationes como Ca, Mg y K se utilizó la solución extractora Mehlich 3 tomando una relación suelo-agua 1:10 (Mehlich, 1984).

Las concentraciones de elementos en la disolución extractora fue cuantificada por espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnica por llama (FAAS). El Al intercambiable se extrajo con solución extractora KCl 1M, según Díaz-Romeu & Hunter (1978). La capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) se realizó mediante la sumatoria de elementos intercambiables de Ca, Mg, K +Al.

Por otro lado, el porcentaje de saturación de aluminio (Sat. Al %) se determinó mediante el cociente de $(Al \text{ (cmol } (+) \text{ kg}^{-1} / CICE * 100)$. El análisis físico granulométrico de textura del suelo se determinó mediante la metodología de Bouyoucos (1962).

La concentración total de Cd en suelo, hojas, tallos y raíces de cacao se evaluó por extracción asistida con microondas utilizando reactivos con concentraciones puras de HNO₃ y HCl en una relación 3:1 y posteriormente analizadas por espectrofotometría de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnica por llama, según metodologías EPA 3051A (USEPA, 2007).

Se puede observar en la tabla 2, los límites de detección (LD) los límites de determinación (LQ) y el R² ajustado del espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnicas por llama, para los elementos evaluados.

Tabla 2. Determinación de los límites de detección (LD), cuantificación (LQ) y R² ajustado del espectrofotómetro de absorción atómica del Laboratorio de fertilidad de suelos y agua del IDIAP. República de Panamá.

No	Elemento	Unidades	LD	LC	R ² (ajustado)	Recuperación (%)	Referencia (WHO, 1982) Recovery (%)
1	K intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.037	0.112	0.996	100.6	
2	Ca intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.004	0.012	0.969	121.6	
3	Mg intercambiable	cmol (+) kg ⁻¹	0.128	0.383	0.992	109.4	
4	Cu extraíble	mg kg ⁻¹	0.0031	0.093	0.999	99	97 - 110
5	Zn extraíble	mg kg ⁻¹	0.001	0.002	0.996	101.5	

6	Fe extraíble	mg kg ⁻¹	0.007	0.022	0.994	90.9	
7	Mn extraíble	mg kg ⁻¹	0.003	0.008	0.984	90.9	
8	Cd total y extraíble	mg kg ⁻¹	0.001	0.003	0.999	98.1	80 - 110

LD: límite de detección; LQ: límite de cuantificación.

El factor bioacumulador (BCF) se determinó como la relación de la concentración del Cd en la planta y la concentración del Cd biodisponible en el suelo (Sut-lohmann et al., 2018; Amin et al., 2018).

$$BCF = \frac{CC \text{ (elemento en la plana)}}{CC \text{ (elemento en el suelo)}}$$

Donde: BCF es el factor de bioacumulación; CC es la concentración del elemento (Cd) en la planta y en el suelo biodisponible (mg kg⁻¹). Si BCF>10 indica que la planta es hiperacumulador. Si BCF>1 se considera acumuladora, y si el factor BCF<1 se considera exclusora.

El factor de translocación (TF) en la planta se determinó de la siguiente forma: El cociente de la concentración del metal (Cd) hoja o tallo (fuste) del árbol de cacao y la concentración del Cd de la raíz (Dinu et al., 2020).

$$TF = \frac{CC \text{ (en la hoja o tallo)}}{CC \text{ (elemento en la raíz)}}$$

Donde: TF es el factor de translocación; CC es el elemento (Cd) en las hojas, tallo y raíz en (mg kg⁻¹). Si TF >1 indica que la planta presenta una gran capacidad para movilizar el Cd desde la raíz hacia el tallo y hojas|.

5.3.4 Análisis estadísticos

Para verificar las diferencias entre tratamientos, los datos fueron evaluados por análisis de varianza y las medias de sus tratamientos fueron comparadas por la prueba LSD Fisher $p < 0.05$. estadísticas descriptivas (medias, coeficientes de variación). Por otra parte, se realizaron correlaciones de Pearson en variables de suelo y partes de la planta (hojas, tallos y raíces), con el propósito de conocer el efecto del incremento de las dosis en estas variables.

Se realizaron gráficos de barras para el Cd extraído en suelo (Total y biodisponible) por cada profundidad y concentración de Cd en la planta (hojas, tallos y raíces). Los análisis fueron realizados usando el software estadístico InfoStat versión 2022 (Di Rienzo et al., 2022).

5.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.4.1 Concentraciones de Cd total y biodisponible en el suelo

En la figura 1 se muestra cómo las concentraciones totales y biodisponibles de Cd aumentan con las dosis crecientes de Cd aplicado al suelo. El nivel de Cd en el suelo sin tratar fue inferior al valor promedio de 0.50 mg kg^{-1} para suelos agrícolas, señalado por Kabata-Pendias (2010) y de 0.43 mg kg^{-1} establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2002). Estudios realizados por otros autores, Bowie y Thornton (1985) en suelos agrícolas, encontraron en suelos sin tratar concentraciones de Cd en el suelo de $1 - 2 \text{ mg kg}^{-1}$.

A pesar de que las aplicaciones de Cd fueron realizadas en la superficie, la capa más profunda de suelo mostró aumentos importantes. Las concentraciones de Cd biodisponibles siguieron una tendencia similar a la del Cd total.

El aumento del Cd total aplicado en la superficie pudo haber afectado en las capas más profundas p debido a que el suelo utilizado en este estudio (Tabla 1) mantuvo un bajo contenido de MOS (1.4 % Snoeck et al., 2016) lo cual pudo haber afectado la biodisponibilidad de la concentración del Cd ya que la movilidad del metal pesado depende de varios factores p.e., el pH y la MOS; (Kabata – Pendias, 2004; Huertos y Baena, 2008; Kabata-Pendias, 2011; Rosa-Patiño et al., 2017).

El Cd está ligado estrechamente al contenido de la MOS, la cual forma complejos organometálicos, inmovilizando la absorción de éstos por las plantas (Arévalo-Gardini et al., 2016).

En algunos países donde se realizaron estudios de Cd en el suelo, se pudo demostrar que niveles elevados de Cd que superan las concentraciones máximas adicionadas en este estudio, pueden ser de origen antrópicas y otras naturales (p.e Inglaterra y Gales ($0.7-41 \text{ mg kg}^{-1}$ McGrath y Loverland, 1992); USA ($0.16-41 \text{ mg kg}^{-1}$ Burt et al., 2003). La

USEPA (1992) contemplando un rango de 3-10 mg kg⁻¹ de Cd en suelo superficial, considerando sitios excesivamente fitotóxicos aquellos que lo rebasan.

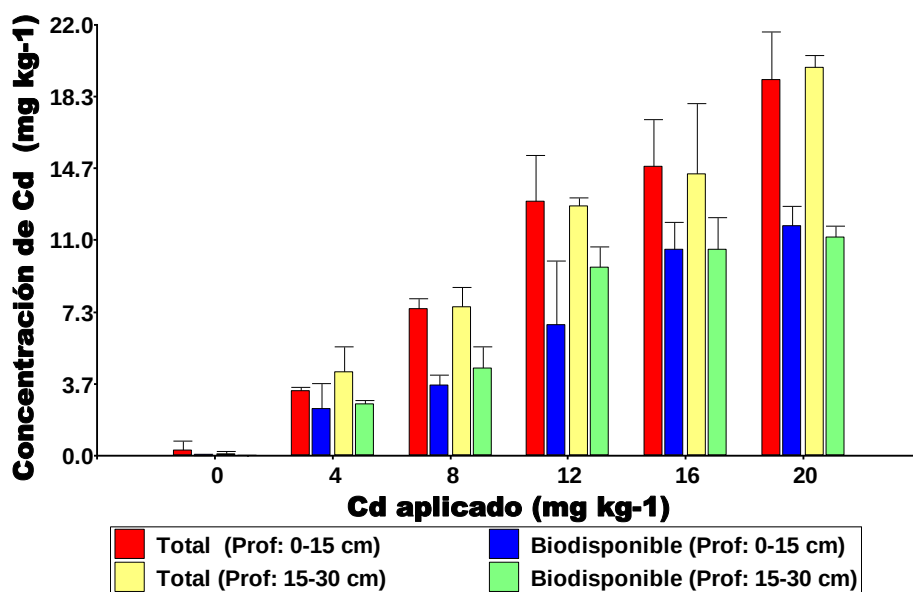


Figura 1. Concentraciones de Cd total y biodisponible en el suelo determinadas a dos profundidades del suelo (0-15 cm y 15 a 30 cm) con incrementos de dosis de Cd aplicadas al suelo.

5.4.2 Niveles de concentraciones de Cd en hojas, tallos y raíces de cacao

A pesar de que el Cd no es un elemento esencial para la planta, este estudio ayuda a comprender la importancia que tiene este metal en la absorción y acumulación en las partes de la planta (hojas, tallos y raíces de cacao).

Las concentraciones de Cd en las partes de la planta en estudio aumentaron a medida que se incrementaban las dosis aplicadas en hojas>raíces<tallos. Las máximas concentraciones en hojas, raíces y tallo fueron en torno a 12.0, 9.0 y 6.0 mg kg⁻¹, respectivamente, en dosis aplicada de Cd en el suelo de 16 mg kg⁻¹.

Otro estudio señala que la mayor concentración de Cd total lo tiene las raíces>tallos>hojas (Llatance et al., 2018). Estudios realizados por Torres and Otiniano, (2021) en 5 diferentes genotipos de cacao informaron que la mayor acumulación de Cd lo presentaron las raíces de cacao. Por otro lado, la absorción del Cd por la planta se debe a la biodisponibilidad del metal y no por el contenido total del Cd en el suelo (Lyubka et al., 2008).

El Cd y el Zn son algunos de los elementos que las plantas absorben en mayor cantidad a través de las hojas por ser metales muy móviles en el suelo (Intawongse & Dean, 2006) Este metal es transportado por la xilema directamente hacia las hojas (Sêkara et al. 2005).

Algunos autores, como Engbersen et al. (2019), demostraron que el orden de absorción del Cd varía con el genotipo cultivado. Esto mismo fue divulgado por Song et al. (2016), quienes mencionan que la menor o mayor concentración de Cd en la planta de cacao, está influenciado material genético utilizado. Por esta razón, se debe tomar en cuenta el portainjerto para los estudios, ya que juegan un factor muy importante en la absorción de los metales pesados (Albacete et al., 2015; Lewis et al., 2018) aunque hace falta realizar comparaciones con otros tipos de clones de cacao.

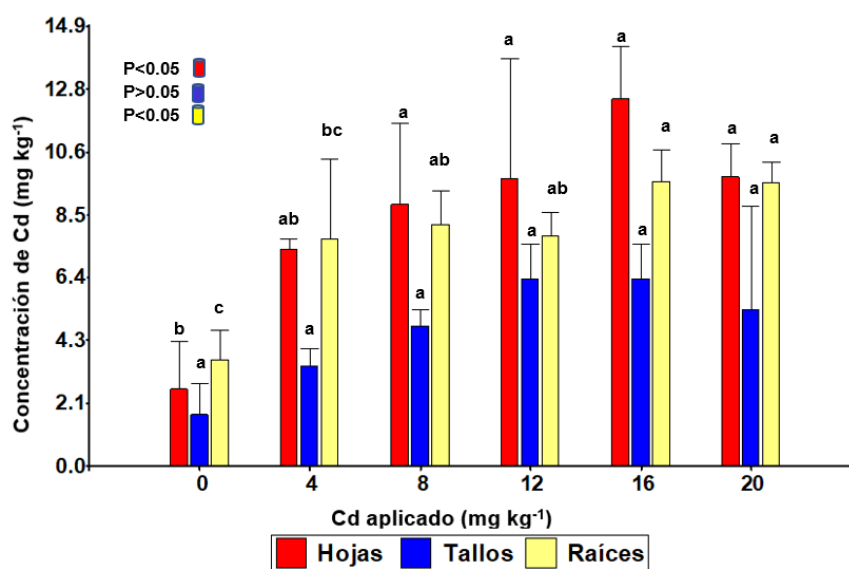


Figura 2. Concentraciones de Cd en hojas, tallos y raíces de cacao del genotipo AS-CP-2661 al incrementar dosis de Cd aplicadas al suelo. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).

5.4.3 Relación de la concentración de Cd en la planta con el suelo

En esta sección se relacionan las concentraciones de Cd total y disponibles en el suelo con los niveles en la planta, para lo que se aplicaron correlaciones de Pearson, cuyos resultados se muestran en las tablas 3 y 4.

Las concentraciones de Cd en hojas, tallos y, en menor medida, raíces, se relacionaron con los niveles de Cd total y biodisponible en el suelo. Se observaron

similares resultados para las dos profundidades, con valores positivos para las hojas ($r=0.789$ y 0.624), tallos ($r=0.696$ y 0.565) respectivamente (Tabla 3). Y correlaciones positivas en hojas ($r=0.754$ y 0.657) y tallos ($r=0.696$ y 0.679) respectivamente (Tabla 4).

Las dosis aplicadas e incrementadas de Cd en el suelo, pudo transferir muy rápido la concentración del Cd de las raíces, translocando el metal por medio del xilema y floema la concentración de Cd en el tallo y hojas (Serrano et al., 2008).

Estudios realizados en Perú por Borjas-Ventura et al. (2022), donde se utilizaron cuatro dosis crecientes de Cd aplicados al suelo (0, 50, 100 y 150 mg kg^{-1}), encontraron tendencias similares a las de este estudio, en donde el contenido de Cd en la planta aumentaba a medida que se incrementaban las dosis aplicadas en el suelo. Estos mismos autores señalaron al comparar los dos genotipos estudiados (POUND-7 y el CCN-51) que la mayor acumulación de Cd la obtuvieron las raíces en el genotipo (POUND-7) y en el CCN-51 la mayor acumulación la obtuvo la parte aérea. El Cd puede ser absorbido por la raíz utilizado como transportadores el Ca, Fe y Zn (Pernía et al., 2008).

Esto fue comprobado por el mismo autor Pernía et al. (2008) al medir la cantidad de exudados que presentaban las raíces, modificados por la actividad de la enzima $\text{H}^+ \text{ATP}$ por medio de la producción de exudados carboxilatos haciendo biodisponibles los metales presentes en el suelo y almacenándolos en los diferentes partes de la planta (tallos y hojas).

Tabla 3. Índices de Correlación de Pearson para Cd total y biodisponible en el suelo (0-15 cm) y su efecto en las partes de la planta.

		Profundidad (0 a 15 cm)			
		Cd Total	p-valor	Cd Biodisponible	p-valor
Unidades					
Cd hojas	mg kg^{-1}	0.789	0.0001**	0.624	0.006**
Cd tallos	mg kg^{-1}	0.696	0.0001**	0.565	0.015**
Cd raíces	mg kg^{-1}	0.427	0.077	0.185	0.461

**** Altamente significativo (p- valor 0.01)**

Tabla 4. Correlación de Pearson para Cd Total y Biodisponible en el suelo y su efecto en las partes de la planta en la profundidad de 15 a 30 cm.

		Profundidad (15 a 30 cm)			
		Cd Total	p-valor	Cd Biodisponible	p-valor
Unidades					
Cd hojas	mg kg ⁻¹	0.754	0.0001**	0.657	0.003**
Cd tallos	mg kg ⁻¹	0.696	0.001**	0.679	0.002**
Cd raíces	mg kg ⁻¹	0.391	0.109	0.21	0.403

**** Altamente significativo (p- valor 0.01)**

5.4.4 Factores de bioacumulación (BCF) y translocación de la planta (TF)

El factor de bioacumulación (FBC) y factor de translocación (FT) son indicadores críticos para evaluar la capacidad de una planta para acumular metales (Ahmadreza et al., 2020).

Los factores de bioacumulación (BCF) y translocación de la planta (TF) se presentan en la tabla 5, para las partes de la planta del genotipo mejorado AS-CP 2661 con dosis crecientes de Cd aplicado al suelo en dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm).

En ambas profundidades estudiadas, el BCF llega a decrecer a medida que aumentan las dosis aplicadas en el suelo, manteniendo luego una tendencia cuando sobrepasa la dosis de Cd de 8 mg kg⁻¹.

Esto pudo deberse al proceso de hormé시스 (refiriéndose al proceso en que la exposición a una dosis baja de un agente químico que es dañino en dosis más altas induce un beneficio sobre la célula o el organismo; Calabrese et al., 2007).

Por otro lado, en la tabla 5, se presenta el factor de translocación en las hojas y tallos de cacao. Este factor (TF) presentó valores muy interesantes, ya que, al aumentar las dosis de Cd aplicadas al suelo, el factor de translocación en las hojas se incrementó hasta llegar a la dosis de 12 mg kg⁻¹. Mientras que, en los tallos, el factor de translocación se incrementó a medida que se aumentaban las dosis de Cd aplicadas al suelo.

Tomando la dosis aplicada de Cd 12 mg kg⁻¹ en ambas profundidades y los factores evaluados, podemos interpretar en este estudio que el BCF es mayor a 1 y el TF es menor a 1. Este genotipo evaluado se comporta como una planta fitoacumuladora o fitoextractora

(Baker, 1981; Clemente et al., 2021) y no transfiere la concentración de Cd absorbido en las raíces hacia su parte aérea (Alvarado et al. 2011).

Tabla 5. Factores de bioacumulación (BCF) y translocación (TF) de la planta de cacao y partes de ella (hojas, tallos y raíces) aplicado al genotipo mejorado AS-CP-2661.

Dosis	BCF	BCF	TF	TF
Aplicadas	Planta	Planta	Hojas	Tallos
mg kg ⁻¹	PROFUNDIDAD			
	0-15	15-30		
FACTORES				
4	7	9	0.7	0.51
8	5	4	0.98	0.61
12	3	3	1.68	0.84
16	3	3	1.48	1.14
20	3	3	1.18	1.75

BCF: Factor de bioacumulación; TF: Factor de translocación

5.5 CONCLUSIONES

Al aplicar dosis crecientes de Cd en el suelo, ayudó a comprobar la movilidad del metal pesado desde la dosis más baja a la más alta.

La mayor acumulación de Cd que obtuvo la planta de cacao la presentó en las hojas, seguido de las raíces y tallos.

Tomando como referencia el factor de bioacumulador en la planta (mayor a 1), el Clon mejorado AS-CP 2661 se considera como una planta fitoacumuladora o fitoextractora, absorbiendo el contaminante (Cd) por las raíces, pero no logra movilizarlo hacia el tallo y hojas ya que el factor de transferencia o traslocación es menor a 1.

Altos contenidos de Cd en el suelo (mayores de 12 mg kg⁻¹) pueden provocar la alta transferencia del metal hacia las partes aéreas de la planta (hojas y tallos).

Se debe realizar ensayos similares, utilizando otros tipos de genotipos mejorados y evaluando otros patrones de injertos para conocer si aumentando las dosis de concentraciones del Cd u otro metal pesado puede afectar el comportamiento de absorción de la planta.

CAPÍTULO IV. EFECTO DEL ÍNDICE DE ESTRES HÍDRICO SOBRE EL ESTADO VEGETATIVO DE LA PLANTA DE CACAO

Artículo sometido a Ciencia Agropecuaria

6. CAPÍTULO IV. EFECTO DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO SOBRE EL ESTADO VEGETATIVO DE LA PLANTA DE CACAO

6.1 RESUMEN

En este estudio se evaluó de forma preliminar el índice de estrés hídrico como indicativo de la absorción del agua por la planta y su efecto en el crecimiento vegetativo del cultivo de cacao. Consistió en un estudio en dos ambientes (casa de vegetación y en campo), durante el 2020 y 2021, realizados en el distrito de Almirante, Bocas del Toro (Panamá). En la casa de vegetación se evaluaron 4 tratamientos con 5 repeticiones (20 plantones) en un diseño completamente al azar. Los tratamientos consistieron en distintos regímenes de riego, donde el T1= Testigo (agua ocasional); T2 = 60 % de humedad; T3= capacidad de campo; T4= punto de marchitez permanente. El segundo ensayo se realizó en una plantación de cacao donde se monitorearon 24 plantones. En ambos ambientes se utilizaron plantones de tres meses de edad del genotipo de cacao AS-CP 26-61, mejorado. En ellos se midieron el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la temperatura del suelo y de la planta (hojas). Los datos en el primer estudio se monitorearon hasta que las plantas del T 4 murieran. El otro ambiente se evaluó en un periodo de nueve meses haciendo coincidir los meses de mayor y menor precipitación. Se encontró que con un intervalo de humedad en las hojas de 20 a 62 % el cultivo presentará un NDVI de 0.40 a 0.80, siendo mayormente favorable valores próximos a 1. Por otro lado, para el período estudiado el cultivo mostró estrés hídrico en los meses de marzo y mayo. Se concluye que la planta presentó un buen vigor vegetal según el NDVI, aunque estuvo afectada con un índice de estrés hídrico por temperatura en dos meses no consecutivos lo que podría afectar las distintas fases fenológicas repercutiendo en la baja producción.

Palabras claves: Humedad, medio ambiente natural, temperatura, índice vegetación de diferencia normalizada.

6.2 INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico afecta a la planta de cacao en el crecimiento inicial, retrasando el desarrollo vegetativo y provocando, en muchos casos, efectos desventajosos en el metabolismo y fotosíntesis (García, 2014; Janani et al., 2019). El estrés hídrico de la vegetación es causado principalmente por déficit de humedad en la zona de la raíz debido a la baja humedad en el suelo, haciendo que las hojas de las plantas cierren sus estomas para minimizar la pérdida de agua por transpiración (Girolimetto, 2014).

La especie *Theobroma cacao* L es considerada como una planta hidro periódica, siendo la humedad del suelo un factor ambiental principal que induce los brotes vegetativos y estimula la floración. La sequía puede afectar negativamente a los procesos fisiológicos del cultivo (García y Moreno, 2016), como la fructificación y madurez del fruto de cacao (Sosa y Ramírez, 2020).

Los cambios ambientales (altas temperaturas, bajas frecuencias de lluvias) activados por la sequía para el cultivo de cacao han sido estudiados por varios investigadores, entre estos Daymond and Hadley (2004) y Balasimha et al. (2013). Cuando los árboles evapotranspiran durante las temperaturas altas, la humedad resultante acumulada en el suelo en meses húmedos no es suficiente para satisfacer la demanda de agua en la planta (Medina and Laliberte, 2017).

La diferencia que existe entre la temperatura del cultivo y la temperatura del aire y del suelo han sido empleados como índices asociados al estado hídrico de la vegetación (Nicols et al., 2010). En general, el cacao necesita precipitaciones uniformes repartidas en todo el año con precipitaciones promedios que oscilan entre 1500 y 2800 mm por año con un mínimo mensual de 100 mm (ICCO, 2018).

El potencial hídrico en el tejido foliar y el crecimiento de la planta de cacao se pueden describir como variables fisiológicas muy sensibles al exceso o déficit de agua (García Lozano y Moreno, 2016).

Por otra parte, el cambio climático ha afectado las fases vegetativas del cultivo de cacao lo que ha hecho que tomen mayor importancia los estudios de variación de régimen de lluvia y temperatura (suelo y planta) que pueden interferir en el excesos o déficit de humedad (Lau et al 2011).

El uso de instrumentos aplicados a la agricultura que ayuden a determinar el NDVI, como es el caso del GreenSeekerTM, ayudan a diagnosticar diferentes tipos de estrés y estados fisiológicos, como deficiencias o excesos de nitrógeno (amarillamiento o verdor en la planta), estado fisiológico y diversos tipos de estrés hídricos. Varios investigadores lo han utilizado con éxito en estudios con otros cultivos (Samborski et al., 2009; Gutiérrez-Soto et al., 2011; Barahona- Amores et al. 2018; Núñez-Cano et al., 2018).

6.2.1 Consecuencias suscitadas en el cultivo de cacao por falta de lluvia en el momento adecuado.

Los productores de algunas regiones de América (p.e., República Dominicana, Costa Rica, Ecuador y Panamá) detectan mermas de la producción, atribuidos a la aparición de plagas y enfermedades, en muchos casos debido a la poca precipitación en algunas de las fases fisiológicas del cacao afectando la producción (Medina y Laliberte, 2017; Herrera et al., 2018; Sosa y Ramírez, 2020).

Ante las condiciones climáticas variables en el Caribe, donde cada vez se presentan temporadas largas sin lluvias (Samaniego, 2021), es necesario conocer si la absorción de agua por el cultivo es suficiente para evitar el estrés en los árboles. Se hace necesario buscar herramientas que nos ayuden a conocer si las plantas de cacao pueden presentar un estrés hídrico que afecte a largo plazo los rendimientos del cultivo. El objetivo de este ensayo es evaluar de forma preliminar el índice de estrés hídrico como indicativo de la absorción del agua por la planta y su efecto en el crecimiento vegetativo del cultivo de cacao.

6.3 MATERIALES Y MÉTODOS

6.3.3 Descripción general de la zona de estudio

El estudio se realizó en el distrito de Almirante, Bocas del Toro (Panamá).

El Clima de Bocas del Toro según Köppen (1936), actualizado por Peel et al. (2007), se clasifica como clima tropical muy húmedo. La precipitación media anual es 2735 mm.

La temperatura media anual se encuentra en 24.3 °C (IGNTG, 2007). Esto ha variado mucho ya que la temperatura media entre 1901 y 2012 en las regiones de América Latina y el Caribe ha aumentado de 0.5 °C a 3 °C, disminuyendo de las precipitaciones, debido a la influencia del cambio climático, provocando como consecuencia la reducción de lluvias al norte de la República de Panamá y Centroamérica (Bofill, 2022).

Por otro lado, el material genéticamente mejorado como el Clon colección Panamá (AS-CP 26-61) fino de aroma se utilizó en este por sus altos rendimientos y alta calidad (Gutiérrez, 2020) pudiendo ser de gran interés para los productores de Panamá, aunque se cuentan con otros más que no fueron evaluados en este estudio.

6.3.2 Diseño experimental de los ensayos de investigación

El estudio consistió en evaluar en dos ambientes distintos el índice de estrés hídrico por efecto de la temperatura del suelo y cultivo, tomando en cuenta el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la humedad del cultivo, durante el 2020 y 2021.

La primera investigación se realizó en ambiente semi controlado (Figura 1), en una casa de vegetación. El segundo estudio se realizó en ambiente natural o campo abierto (Figura 2) para lo que se seleccionó un cultivo comercial de cacao, colindante a la casa de vegetación en el distrito de Almirante, Bocas del Toro (Panamá), cuyas coordenadas geográficas son 9° 16' 33'' de latitud Norte y 82° 25' 6'' de longitud Oeste

En ambos ambientes se utilizaron plantones de tres meses de edad de un genotipo de cacao criollo mejorado y codificado en Panamá AS-CP 26-61.



Figura 1. Ensayo en ambiente semi controlado, utilizando plantas de cacao del Clon AS-CP-2661.



Figura 2. Ensayo en ambiente natural o campo abierto, utilizando plantas de cacao del Clon AS-CP-2661 ubicado en Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá.

Para el ambiente semi controlado, se establecieron cuatro tratamientos y cinco repeticiones (20 plantones) en un diseño completamente al azar. Con la ayuda de un tensiómetro (herramienta que sirve para monitorear las distintas condiciones de humedad del suelo en la agricultura) los tratamientos contaron con distintos regímenes de riego para generar diferentes porcentajes de humedad de suelo: T1= Testigo (agua aplicada al cultivo ocasionalmente por lluvias pluvial o riego artificial); T2 = 60% de humedad (suelo

sometido a un nivel freático alto o suelo saturado con todos los espacios porosos llenos de agua); T3= 1/3 de atmósfera (capacidad de campo); T4= 15 atmósfera (punto de marchitez permanente).

Tabla 1. Característica del suelo utilizado en los dos ensayos.

pH	N	MOS	P	CICE	K	Ca	Mg	Al	Cu	Zn	Fe	Mn	A	L	Arc
H ₂ O	-----%-----		mg kg ⁻¹		-----cmol (+) kg ⁻¹ -----				-----mg kg ⁻¹ -----				-----%-----		
	Total		Extraíble		Intercambiables					Extraíbles				Textura	
6.6	0.3	1.4	24.0	26.0	0.3	19.0	6.0	0.0	3.0	6.0	58.0	46.0	55.0	29.0	16.0

El pH es en agua con una relación 1:2.5; P extraído en Mehlich 1; Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Agua del IDIAP.

6.3.3 Metodología de muestreo y análisis de las muestras de suelo, plantas y medidas atmosférica

6.3.3.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El NDVI permite determinar el contenido de clorofila en la hoja, nutrición o estado nutricional de la planta, el estado hídrico del cultivo, estimación de biomasa y abundancia vegetal (Kross et al., 2015; Kumar et al., 2018).

Este índice se basa en la diferencia de reflectividad entre el rojo y el infrarrojo cercano cuyas siglas en inglés (NIR) (Meneses-Tovar, 2011), la cual relaciona la información adquirida en las regiones del Rojo y NIR con el estado y características de las cubiertas vegetales, por medio de la diferencia normalizada de las dos bandas, cuyo rango de variación se encuentra entre -1 y 1 (Gilabert et al., 1997) siendo los valores más altos (0.7-0.8) indicadores de plantas con mejores condiciones o las hojas verdes y saludables (Monteith y Unsworth, 2008).

La aplicación con el GreenSeekerTM ha sido evaluada en la agricultura de precisión (Lawton, 2008) y es calculada por medio de la ecuación 1, descrita por Jones et al. (2007).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde: RED ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación roja incidente sobre la superficie vegetal y NIR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación infrarroja cercana reflejada por ella. El GreenSeekerTM

utiliza diodos que emiten la luz con base en la cual se calcula el NDVI. La luz incidente natural es separada de la producida por el instrumento electrónicamente.

En ambiente semi controlado para cada tratamiento descrito anteriormente se tomaron datos de temperatura en el suelo, cultivo y NDVI (cuarta hoja según metodología de muestreo de Puentes et al., 2016). El NDVI fue realizado una vez por día (12 h, coincidiendo con el momento de mayor evapotranspiración en la plana). El suelo utilizado para el tratamiento T4 (punto de marchitez permanente) fue primero llevado a capacidad de campo. Después de las seis semanas se tomaron los datos de temperaturas y NDVI hasta morir las plantas.

Estos datos del ambiente semi controlado, sirvieron para construir un modelo predictivo que ayudaría a ubicar los datos (NDVI y humedad del cultivo) tomados en ambiente natural (campo).

En el ensayo realizado en ambiente natural se monitorizaron la temperatura de suelo y cultivo, NDVI, una vez por mes, durante nueve meses desde septiembre 2020 hasta mayo de 2021, coincidiendo con los meses de mayor y menos cantidad de lluvias. Las mediciones en suelo y planta se realizaron siguiendo el mismo procedimiento que en el ensayo bajo condiciones semi controladas.

La temperatura del suelo y cultivo se verificaron con un termómetro infrarrojo (López-López et al., 2009). La temperatura del aire utilizada en los datos del segundo ensayo a campo abierto fue determinada utilizando una estación meteorológica automatizada Tipo A perteneciente al IDIAP.

6.3.3.2 Índice hídrico por temperatura del cultivo y suelo.

Los índices hídricos por temperatura para el cultivo ($T_c - T_a$) y el suelo ($T_s - T_a$) se determinó por medio de la diferencia entre la temperatura del cultivo (T_c) y suelo (T_s) con la temperatura del aire (T_a) obtenida con una estación meteorológica ubicada en la cercanía del área estudiada.

El índice de vegetación normalizada (NDVI) fue medido con un sensor portátil (GreenSeekerTM) por metodologías descritas por Manrique (1999). El contenido de humedad en las hojas (H_c) o humedad gravimétrica fue realizado por métodos descritos por Martínez (1971).

6.3.3.3 Interpretación de los índices hídricos

La interpretación de los índices hídricos por temperatura tanto para el cultivo ($T_c - T_a$) como del suelo ($T_s - T_a$) consistieron en que los valores registrados con signo positivos presentan estrés hídrico.

Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 a 4 °C menor que la temperatura ambiental, siendo en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo ($T_c - T_a$) un valor a 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo, el índice de estrés hídrico es 1 (Idson, 1982).

6.3.3.4 Muestreos foliares, determinación de la humedad en las hojas mediante análisis gravimétrico y biomasa en la planta de cacao.

Las hojas de las plantas se colectaron dos por cada árbol tomando la cuarta hoja próxima al ápice que está ubicada en la parte media del árbol de cacao, siguiendo metodologías recomendadas por Puentes et al. (2016). Las hojas, fueron llevadas a la estufa para secado a una temperatura de 60 °C hasta mantener un peso constante, que sirvió para el cálculo de la humedad gravimétrica del cultivo.

La biomasa aérea antes y después de cada ensayo en la planta de cacao se determinó mediante ecuación alométrica descrita por Andrade et al. (2008):

$$B = 10^{(-1.625 + 2.63 * \log(d30))}$$

donde: B: biomasa arriba del suelo o aérea (kg árbol⁻¹) y la d30: diámetro del tronco a 30 cm de altura.

Para conocer si la planta de cacao fue sometida a un estrés hídrico, se realizaron regresión lineal y gráficas de barras y comparación de medias para biomasa en los tratamientos en el ambiente semi controlado y el ambiente natural mediante la prueba LSD Fisher ($p < 0.05$). Los análisis fueron realizados usando el software estadístico InfoStat versión 2022 (Di Rienzo et al., 2022).

6.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3 se relaciona el índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) con el porcentaje de humedad del cultivo (Hc %), medidos a plantas de cacao en etapa de crecimiento para los dos estudios realizados (casa de vegetación y ambiente natural o campo abierto).

Se puede observar que los valores menores de 20 % de humedad del cultivo (Hc) presenta un NDVI inferior de 0.40 valor que indicaría que las plantas han sufrido estrés hídrico. Contrario a los observados en la misma figura, donde la curva presenta una inflexión con valores de 0.80 en NDVI y valores mayores de 62 % de humedad del cultivo, la cual son consideradas como plantas con un buen desarrollo vegetativo o sin estrés hídrico (Monteith y Unsworth, 2008).

Investigadores como Aguilar et al. (2010) y Palacio – Vélez et al. (2011), confirman que los valores de NDVI disminuyen drásticamente con el estrés hídrico del cultivo. Por otro lado, Meyer et al. (1993), Xavier (2004) y Fern et al. (2018) encontraron que este índice se puede utilizar para evaluar el estrés hídrico de un cultivo, lo cual sirve como herramienta de apoyo para las investigaciones.

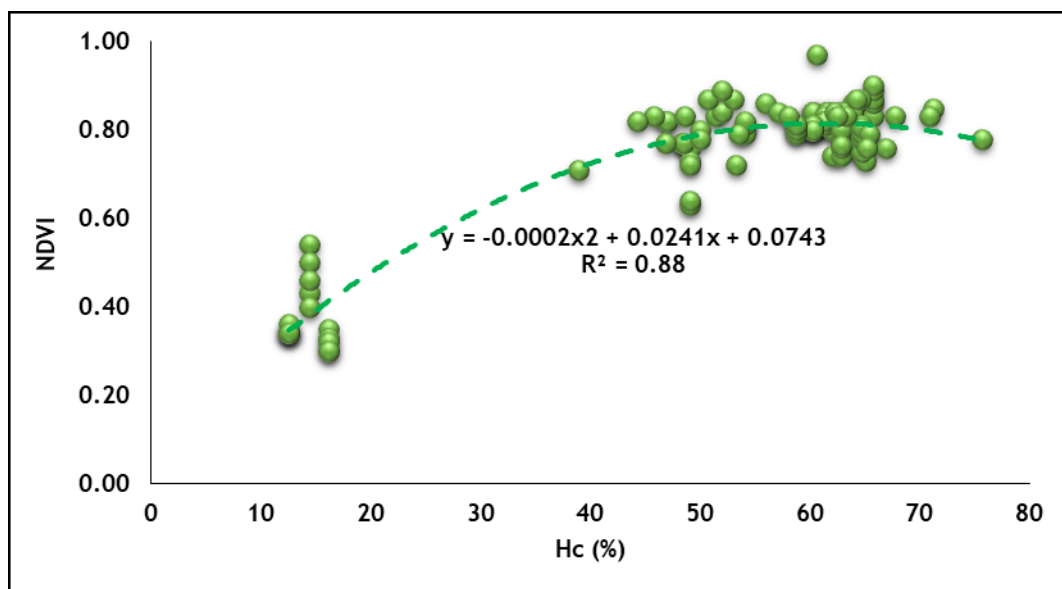


Figura 3. Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) y porcentaje de humedad del cultivo (Hc %), considerando los dos ambientes seleccionados para el cultivo de cacao Clon genotipo AS-CP- 2661

U
SC
En el estudio de campo, para conocer en qué período del año el cultivo de cacao presenta estrés hídrico para el período de estudio, en la figura 4, son descritos los índices

hídricos tanto para temperatura del suelo, como del cultivo en un periodo de tiempo estudiado de nueve meses.

Los índices de estrés hídrico en temperatura del suelo ($T_s - T_a$) y del cultivo ($T_c - T_a$), pueden establecer con mayor claridad que las plantas de cacao fueron sometidas a un estrés hídrico por temperatura durante los meses de marzo y mayo según metodología de interpretación de Idson (1982). A pesar de que la lluvia en esta región alcanza un promedio anual de 2700 mm. Esto puede indicar que la lluvia no estuvo bien distribuida durante todo el año afectando el crecimiento aéreo de la planta causado por el cierre de estomas reduciendo la eficiencia fotosintética del cultivo (Azcón-Bieto y Talon, 2008; Skirycz e Inzé, 2010).

En el resto de los meses evaluados (septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y abril) las plantas de cacao no presentaron estrés hídrico, asumiendo entonces que las plantas mantuvieron mayor transpiración (Idson, 1982). En comparación con otros cultivos arbóreos, el cacao no tolera periodos prolongados de sequías, lo que afecta las fases vegetativas del cultivo (Raja-Harun y Hardwick, 1988; Afoakwa 2014; Kardiman y Raebild 2018).

García Lozano (2014) en estudios realizados en Colombia con tres clones de cacao, reportó diferencia en la fotosíntesis, transpiración y resistencia estomática durante la disminución gradual de los contenidos de humedad del suelo y de la hoja, encontrando correlaciones positivas altas entre el potencial hídrico foliar y fotosíntesis.

Existen estudios que demostraron la resistencia al déficit de agua de genotipos de cacao, los cuales han desarrollado un mecanismo eficiente de regulación estomática que limitan la transpiración, afectando la fotosíntesis (De Almeida y Valle, 2010).

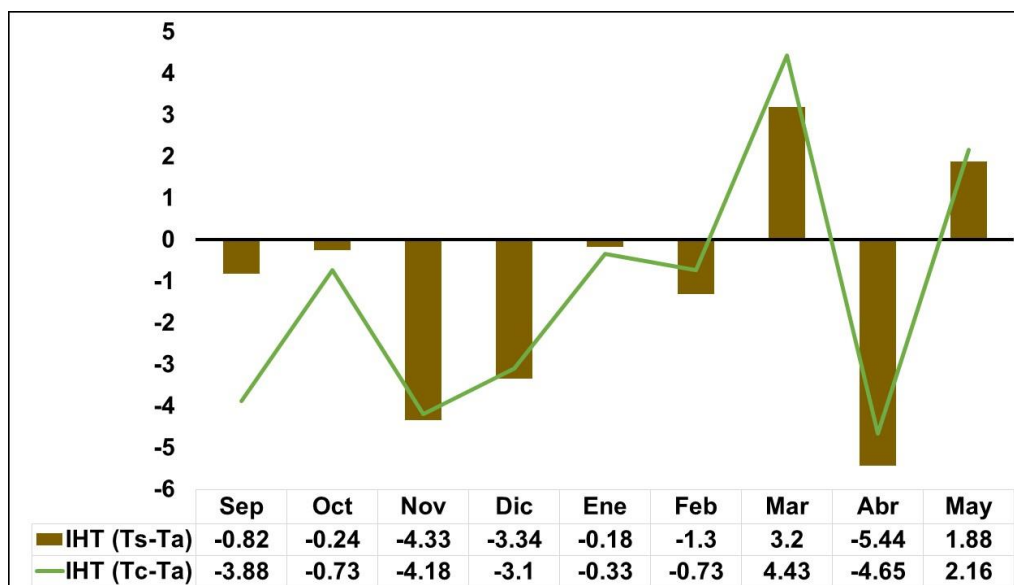


Figura 4. Comportamiento del índice hídrico para la temperatura del suelo y el cultivo en el ambiente natural o campo abierto en el cultivo de cacao del Clon genotipo AS-CP-2661.

Se puede observar en la figura 5, la biomasa aérea inicial y final en la planta de cacao cuando es sometida a distintos regímenes de humedad del suelo en el ensayo de ambiente semi controlado y a su vez en el ambiente natural.

Los valores obtenidos en el testigo en la biomasa aérea inicial y final fueron mayores a los valores presentados en el ambiente natural. Esto pudo deberse a que al testigo (ubicado en la casa de vegetación) se le suministró agua ocasionalmente (precipitación pluvial o riego artificial) y el del ambiente natural fue interrumpido por periodos largos sin precipitación pluvial.

El tratamiento de 60 % de humedad en el suelo, fue el que mayor biomasa aérea inicial y final obtuvo al compararse con los demás tratamientos evaluados.

Los valores de la biomasa aérea fina observada en el ensayo del ambiente natural fueron menores a las demás evaluadas comparada con el tratamiento con 60 % de humedad del suelo y que mayor significancia estadística obtuvo. Esto pudo deberse a que, en los meses de marzo y mayo en el ensayo realizado en ambiente natural, las plantas de cacao presentaron un estrés hídrico en temperatura observada en la figura 4.

El estrés hídrico influye directamente en la biomasa de los árboles reduciendo el crecimiento vegetativo (Singh y Singh, 2006; Pedrero et al., 2014; García Lozano y Moreno Fonseca, 2016), que en muchos casos se debe al desarrollo del sistema radicular

la cual son limitados ante condiciones bajas de humedad (Lüttge, 2007; Chen et al., 2016; Drechsler et al., 2019).

De igual manera, según Osorio et al. (2017) en investigaciones realizadas en Colombia en plantas híbridas de cacao IMC 67, encontraron una relación directa entre la temperatura del suelo y la temperatura de las hojas e indirecta con la humedad del suelo, concluyendo en que las hojas de cacao regularon la temperatura a 25 °C, con un límite mínimo de humedad del suelo de 27 %.

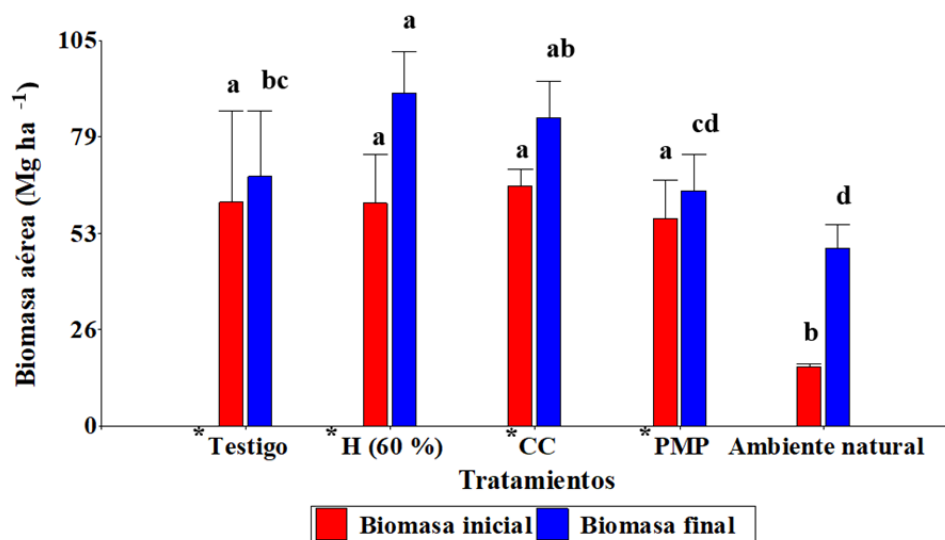


Figura 5. Comparación de la biomasa aérea inicial y final en planta de cacao cuando es sometida a distintos regímenes de humedad del suelo en ambiente semi controlado identificado con un (*) y el ambiente natural. Ambos ensayos se realizaron con el mismo tipo y edad de planta y el mismo período. CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente. Letras diferentes representan no significancias estadísticas en la prueba LSD de Fisher ($p < 0.05$).

6.5 CONCLUSIONES

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), basado en diagnosticar los diferentes tipos de estrés y estados fisiológicos en la planta de cacao, ayudó a relacionar el porcentaje de humedad del cultivo con el estrés hídrico que presentan las plantas de cacao en un período de crecimiento durante sus fases vegetativas.

El uso de esta herramienta (GreenSeeker™) en el monitoreo de las plantas utilizando puede ayudar a detectar el estrés hídrico y a predecir la respuesta fisiológica que las

plantas de cacao pueden presentar ante un evento de sequías, y luego realizar correctivos a corto, mediano y largo plazo.

La disponibilidad de agua deriva en un efecto directo en la biomasa aérea de la planta de cacao, ayudando a demostrar que es una planta hidrófila, siendo los periodos lluviosos el principal factor en la inducción de brotes vegetativos, que en casos contrarios o extremas sequía y altas temperaturas puede tener un efecto irreversible en la producción.

El asoció agroforestal en forma equilibrada en el ambiente natural pudo haber ayudado al almacenamiento de agua en el suelo, evitando la excesiva transpiración de la planta de cacao.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

Durante este estudio, que tuvo como finalidad aportar una línea base para mejorar la producción de cacao y hacer una primera exploración sobre los diferentes actores que potencialmente podría afectar la producción y calidad del cultivo, como el Cd o el efecto de la sequía temporal en la región de Almirante, en Bocas del Toro, República de Panamá, se llegaron a las siguientes conclusiones organizadas en los cuatro capítulos de esta tesis.

Capítulo I.

Conclusión general: El efecto del estiércol de pollo compostado mejora las propiedades de los suelos y la nutrición de cultivos de cacao en sistemas agroforestales en Bocas del Toro, Panamá.

Conclusiones parciales: El estudio identificó limitaciones de fertilidad en el suelo que derivan en deficiencias de elementos esenciales en la planta de cacao y que explican, al menos en parte las bajas producciones del cultivo.

La enmienda con estiércol de pollo compostado ayuda a mejorar la biodisponibilidad de nutrientes en el suelo los niveles de elementos (N, P y K) en el suelo y a disminuir las concentraciones de Al intercambiable.

Los tratamientos mejoraron la nutrición de la planta en cuanto al N, P y K, manteniendo niveles óptimos de Ca y Mg, mejorando a su vez el desarrollo vegetativo en el cultivo de cacao. La biomasa vegetal del cultivo de cacao aumentó en un 30 % del valor inicial.

En las condiciones del suelo estudiadas se necesitan dosis de 20 a 25 Mg ha⁻¹ de estiércol de pollo compostado para aumentar los elementos esenciales en el mejoran la nutrición de la planta y promueve el crecimiento del cultivo.

Capítulo II.

Conclusión general: Se conoció las concentraciones de metales pesados en los suelos y se identificaron los principales factores que explican su variabilidad donde se produce cacao de forma orgánica en la región de Almirante en Bocas del Toro. La concentración de Cd en el grano de cacao en las 8 fincas estudiadas, se encuentra por debajo de las normas establecidas por la Unión Europea (0.6 a 0.8 mg kg⁻¹) en la elaboración del chocolate con contenido de materia seca total ≥ 50 % del CODEX Alimentarius.

Conclusiones parciales:

Las concentraciones de Cd biodisponible en fincas de productores del área del distrito de Almirante se encuentran relativamente bajas tomando los niveles de referencia publicados por la Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA).

El contenido de MOS del suelo presentó contenidos mayores al 3.0 %, considerado como satisfactorio para el crecimiento y desarrollo de la planta de cacao. Este contenido ayudaría a que el Al intercambiable y Cd biodisponible no sea soluble en el suelo, transfiriendo las concentraciones tóxicas hacia las plantas.

El uso de modelos predictivos elaborados para el Cd en el suelo, hojas, frutos y granos de cacao, ayudaran a conocer a nivel de fincas el uso de algunas enmiendas orgánicas que ayudaran a corregir algunas propiedades químicas y biológicas del suelo.

Capítulo III.

Conclusión general: Se pudo conocer la concentración máxima de Cd en hojas, tallos y raíces del Clon AS-CP-26-61 que sirvió para identificar la toxicidad de este metal pesado que puede ser retenido o transferido desde el suelo a la planta.

Conclusiones parciales:

Al aumentar la dosis de Cd en el suelo en este estudio, ayudo a comprobar la movilidad del Cd en el suelo, derivando a la mayor acumulación del metal en la planta estudiada en el genotipo mejorado (AS-CP 2661) de cacao. Las hojas es el órgano de la planta con mayor acumulación de la concentración del Cd, seguido de las raíces y por último el tallo. Se Comprobó que en el factor de bioacumulación en la planta con valores mayores a 1 el genotipo estudiado puede ser fitoacumuladora. A la vez este genotipo puede inmovilizar

la mayor parte de la concentración de Cd por las raíces, hacia la parte aérea de la planta si la concentración de este metal no excede a los niveles de 12 mg kg^{-1} .

Se debe realizar ensayos similares, utilizando otros tipos de genotipos mejorados y evaluando otros patrones de injertos para conocer si aumentando las dosis de concentraciones del Cd u otro metal pesado puede afectar el comportamiento de absorción de la planta.

Capítulo IV.

Conclusión general: El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) utilizando como herramienta el sensor portátil GreenSeekerTM sirvió para relacionar el porcentaje de humedad del cultivo con el estrés hídrico en el cultivo de cacao.

Conclusiones parciales:

El empleo de herramientas sirvió como ayuda para detectar el estrés hídrico, en el momento en que la planta de cacao pueda presentar un estrés hídrico debido a eventos (falta de lluvia y altas temperaturas) en etapas fisiológica (floración) que pudieran repercutir a mermas del grano de cacao, ayudando a realizar correctivos a corto, mediano y largo plazo.

El estudio en el ambiente semi controlado sirvió para determinar la disponibilidad de agua, por la cual sostuvo un efecto directo en la biomasa aérea de la planta de cacao, ayudando a demostrar que es una planta hidro periódica (necesidad de agua en cualquiera etapa fisiológica).

8 REFERENCIAS GENERALES

8 REFERENCIAS

- AbuShady, M., Fathy, H., Fathy, G., A., Abd El Fatah, S., Ali, A., Abbas, M. (2017). Blood lead levels in a group of children: the potential risk factors and health problems. *Journal de Pediatria* , 93(6), 619–624.
<https://doi.org/10.1016/j.jpmed.2016.12.006>
- Afrifa, A. A. A. A., Dogbatse, J. A. (2018). Assessment of the soil fertility status of cocoa farms around Ankasa National Park in the Jomoro District of the Western Region of Ghana. *International Cocoa Research Symposium (ISCR)*, Lima, Peru, pp13-17.
- Afoakwa, E. O. (2014). *Tecnología de producción y procesamiento de cacao* (1ª edición.). Prensa CRC, Boca Ratón. <https://doi.org/10.1201/b16546>
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). (1992). *Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization*. Vol. 1: metals.
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). (2002). *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) Orientación complementaria para desarrollar niveles de detección de suelos para sitios de superfondos*.
- Agudelo-Castañeda, G. A., Cadena-Torres, J., Almanza-Merchan, P. J., Pinzon-Sandoval, E. H. (2018). Physiological performance of nine genotypes of cocoa (*Theobroma cacao* L.) under the shadow of three forest species in Santander, Colombia. *Colombian Journal of Horticultural Sciences* 12(1), 223-232.
<http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7341>
- Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Universidad de Colima. Avances en Investigación Agropecuaria*, 14(2), 49-65.
- Aikpokpodion, P. (2012). Evaluación de la movilidad de metales pesados en suelos de cacao contaminados seleccionados en el estado de Ondo, Nigeria. *Revista Global de Investigación Ambiental* 6, 30-35.

- Albacete, A., Martínez-Andújar, C., Martínez-Pérez, A., Thompson, A. J., Dodd, I. C., Pérez-Alfocea, F. (2015). Unravelling rootstock×scion interactions to improve food security. *Journal of experimental botany*, 66(8), 2211-2226. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv027>
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes., M. Smith. (1998). Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 300 p. ISBN 92-5-104219-5.
- Yazdanbakhsh, A., Alavi, S. N, Valadabadi, S. A, Karimi, F., Karimi, Z. (2020). Absorción de metales pesados de suelos salinos por girasol ornamental, utilizando estiércol de vaca y biosólidos: un estudio de caso en la ciudad de Alborz, Irán. *Investigación de aire, suelo y agua*, 13, 1178622119898460.
- Alloway, B. J. (1995). Cap. 3. The origin of the heavy metals in soil. In: Alloway, B. J. (ed). *Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Professional, London, 2da. Edition. pp. 38-57.
- Alloway, B. J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy metals in soils*. Springer Netherlands. pp.11-50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
- Alvarado, C. J., Dasgupta-Schubert, N., Ambriz, E., Sánchez-Yañez, J. M., Villegas, J. (2011). Hongos micorrízicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 357-364.
- Amponsah-Doku, B., Daymond, A., Robinson, S., Atuah, L., Sizmur, T. (2022). Improving soil health and closing the yield gap of cocoa production in Ghana – A review. *Scientific African* 15, e01075. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01075>
- ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente. Atlas Ambiental de la República de Panamá). (2010). 1ª Edición. Panamá, Panamá, ANAM, p190. <http://hdl.handle.net/1834/7995>
- Andrade, H. J., Segura, M., Somarriba, E., Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 46, 45-50.

Antosiewicz, D. M., Sirko, A., Sowinski, P. (2008). 17 Trace Element Transport in Plants. Trace elements as contaminants and nutrients: consequences in ecosystems and human health, p 413.

Antoine, J., Hoo Fung, L., Grant, CH. (2017). Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica. *Toxicology Reports*, 4, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.03.006>

Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C.O., Baligar, V. C., and He, Z. L. (2016). Heavy metals in soils of cocoa plantations (*Theobroma cacao* L.) in three regions of Peru. *Applied Ecology* 15(2), 81-89. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>

Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of the Total Environment*, 605, 792-800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>

Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Barraza, F., Farfán, A., He, Z., Baligar, V. C. (2021). Growth and nutritional responses of wild and domesticated cacao genotypes to soil Cd stress. *Science of the Total Environment*, 763, 144021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144021>

Arevalo-Hernandez, C. O., Arevalo-Gardini, E., Farfan, A., Amaringo-Gomez, M., Daymond, A., Zhang, D., Baligar, V. C. (2022). Growth and Nutritional Responses of Juvenile Wild and Domesticated Cacao Genotypes to Soil Acidity. *Agronomy* 12(12), 3124. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123124>

Argüello, D., Chavez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the total environment*, 649, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>

Arvelo Sánchez, M. A., González León, D., Maroto Arce, S., Delgado López, T., Montoya Rodríguez, P. (2017). Manual técnico del cultivo de cacao: prácticas latinoamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, C.R.: IICA. 165 p.

Asitoakor, B. K., Asare, R., Raebild, A., Ravn, H. P., Eziah, V. Y., Owusu, K., Vaast, P. (2022). Influences of climate variability on cocoa health and productivity in agroforestry systems in Ghana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109199>

- Avendaño, A. C. H., Mendoza, L. A., Hernández, G. E., López, G. G., Martínez, B. M., Caballero, P. J. F., Guillen, D. S., Espinosa, Z. S. (2013). Mejoramiento genético participativo en cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agroproductividad* 6(5), 71-80.
- Azcón-Bieto, J., Talon, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal*, segunda Edición. Mc Graw Hill/Interamericana de España.
- Balasimha, D., Apshara, S.E., Jose, C.T. (2013). Genotypic variations in chlorophyll fluorescence and stomatal conductance of cocoa in relation to drought tolerance, *Journal of Plantation Crops*, 41(1), 40–45
- Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A., Robledo, C. W. (2008). *Infostat. User Manual*, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina. 331pp.
- Barahona-Amores, L. A., Gordón-Mendoza, R., Samaniego-Sánchez, R., Castillo-Vega, G. (2018). Índice hídrico en arroz bajo condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas. *Ciencia Agropecuaria*, (29), 112-127.
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: a field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 29, 950–963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Basta, N. T., Ryan, J. A., Chaney, R. L. (2005). Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability. *Journal of environmental quality*, 34(1), 49-63. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0049dup>
- Bertsch, F., Bejarano, J. A., Corrales, M. (2005). Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 137-142. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43626961016>
- Baker, J. M. (1981). Accumulators and Excluders Strategies in Response of Plants to Heavy Metals. *Journal of Plant Nutrition*. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643-654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>.
- Bofill, P. (2022). Aumento de la ambición en la adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe, Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/7), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Differentiated cadmium uptake and its effect on the physiology of six cacao genotypes (*Theobroma cacao* L.) in San Ramón, Central Peruvian Jungle. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 25(3).

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. Agronomy Journal, 54, 464-465.
<http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

Bowie, S. H. U., Thornton, I. (1985). Environmental geochemistry and health. D. Reidel Publishing Company, Lancaster, PA.

Bravo, D., Diaz, S., Benavides-Erazo, J., Rengifo-Estrada, G., Braissant, O., Leon-Moreno, C. (2018). Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. Journal of Applied Microbiology, 124, 1175–1194.
<https://doi.org/10.1111/jam.13698>

Bravo, Realpe, I. D. S., Arboleda Pardo, C. A., Martín Peinado, F. J. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. Acta Agronómica, 63(2), 164-174. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v63n2.39569>

Bremner, J. M., Mulvaney C. S. (1982). Nitrogen total. In: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). Methods of Soil Analysis. Part II. American Society of Agronomy. No 9 in Agronomy Series. Madison, Wisconsin. USA. pp. 595-624.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>

Burt, R., Wilson, M. A., Keck, T. J., Dougherty, B. D., Strom, D. E., Lindahl, J. A. (2003). Trace Element Speciation in Selected Smelter-Contaminated Soils in Anaconda and Deer Lodge Valley, Montana, USA. Advances in Environmental Research, 8, 51-67. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00140-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00140-5)

Cabalceta, G., Molina, E. (2006). Niveles críticos de nutrientes en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. Agronomía Costarricense, 30(2), 31-44.

Calabrese, E. J., Bachmann, K. A., Bailer, A. J., Bolger, P. M., Borak, J., Cai, L., Cedergreen, N., Cherian, M. G., Chiueh, Ch. C., Clarkson, T. W., Cook, R. R., Diamond, D. M., Doolittle, D. J., Dorato, M. A., Duke, S. O., Feinendegen, L., Gardner, D. E., Hart, R. W., Hastings, K. L., Hayes, A. W., Mattson, M. P. (2007). Biological stress response terminology: integrating the concepts of adaptive response and preconditioning stress within a hormetic dose–response framework. Toxicology and applied pharmacology, 222(1), 122-128.

- Calle, P. J. L., Mendoza, A., M., Miranda, C. R. (2021). Aptitud de uso de suelos para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la localidad de Tumupasa, municipio de San Buenaventura - La Paz. Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales 8(3), 45–58. <https://doi.org/10.53287/burl9765fo12r>
- Calvo Romero, F. (2018). Biomass and nutrient distribution in cacao trees (*Theobroma cacao*): A case study in Côte d'Ivoire. MSc Thesis Wageningen University and Research. s.l.:s.n.
- Castebianco, J. A. (2018). Heavy metal remediation techniques with potential application in cocoa cultivation. THE FARM. Journal of Life Sciences, 27(1): 21-35. <http://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>
- Chávez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. Science of the Total Environment, 533, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- Chinnappan, S. (2022). DRIS standards to identify yield-limiting micronutrients in cocoa under coconut intercropping systems. Journal of Plant Nutrition, 45(8), 1214-1222. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1994592>
- Clemente Huachen, J. P., Medina Contreras, J., Pfuño, J. D. L., Pariona Aguilar, L. A., Gutiérrez Vélchez, P. P. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). Acta Agronómica, 70(2), 163-170. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.94208>
- Council of the European Communities, (1986). Council Directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture 86/278 EEC. Official Journal of the European Communities, 4.7.86 No L181/6-12.
- Dávila-Zamora, E. C., Reyes-Evangelista, L. A., Aldoradin-Puza, E., Londoño-Bailon, P., Aleman-Polo, M. (2020). Cd and Pb reduction in cocoa (*Theobroma cacao*) nib using two organic amendments. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales, 7(1), 20-29. <https://doi.org/10.23850/24220582.2776>
- Daymond, A. J., Hadley, P. (2004). The effects of temperature and light integral on early vegetative growth and chlorophyll fluorescence of four contrasting genotypes of

cacao (*Theobroma cacao*). *Annals of Applied Biology*, 145(3), 257-262.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2004.tb00381.x>

De Almeida, A. A. F., Brito, R. C. T., Aguilar, M. A. G., Valle, R. R. (2000, October). Some water relations aspects of *Theobroma cacao* clones. In *Proceedings of the 13th International Cocoa Research Conference*, Kota Kinabalu, Malaysia. pp 8-14.

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini – Italy, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C. W. (2015). *InfoStat Version (2008)*. Transfer Center InoStat, FCA, National University of Cordoba, Argentina.

Díaz-Romeu, R., Hunter, A. (1978). *Metodologías de Muestreo de suelos. Análisis químico de suelos y tejido vegetal y de Investigaciones en invernadero*. Turrialba, Costa Rica. C.R. pp70. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A4008e/A4008e.pdf>

Diez, J. (2008). *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. Tesis Doctor en Química. Santiago de Compostela, España. Universidad de Santiago de Compostela. 344 p.

Dinu, C., Vasile, G. G., Buleandra, M., Popa, D. E., Gheorghe, S., Ungureanu, E. M. (2020). Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in mining-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 2141-2154. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02550-w>

Drechsler, K., Kisekkaa, I., Upadhyaya, S. (2019). A comprehensive stress indicator for evaluating plant water status in almondtrees. *Agricultural Water Management*, 216, 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.003>

Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O., Schulin, R. (2019). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of The Total Environment*, 678, 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>

Enríquez, G. (2010). *Cacao Orgánico. Guía para productores ecuatorianos (2a ed.)*. Quito, Ecuador: INIAP. pp 54-55

Estévez, J., Andrade, L., Marcet, P., Montero, J. (2000). Fijación y movilidad del cadmio y zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. *Ciencia del suelo*, 18 (1), 28-35.

EU (European Union), 2014. Regulation (EC) No 488/2014 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards the maximum level for cadmium in foodstuffs. European Community Regulation, Belgium, 138/78.

Fageria, V. D. (2001). Nutrient interactions in crop plants, *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1269-1290, <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>

FAO. (2016). El estado mundial de la agricultura y la alimentación: Cambio climático agricultura y seguridad alimentaria.

FAO/OMS, (2014). Comisión del Códex Alimentarius. Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias CX/CF 15/9/6. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Organización Mundial de la Salud (OMS). Diciembre de 2014.
ftp://ftp.fao.org/codex/meetings/cccf/cccf9/cf09_06s.pdf

FAO/WHO. Joint FAO/WHO, 2017. Report of the 11th meeting of the Codex Committee on Food Contaminants.

Fern, R. R, Foxley, E. A, Bruno, A., Morrison, M. L. (2018). Idoneidad de NDVI y OSAVI como estimadores de biomasa verde y cobertura en un pastizal semiárido. *Indicadores Ecológicos*, 94, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.029>

Florida Rofner N. (2021). Review of maximum limits for cadmium in cocoa (*Theobroma cacao* L.). *THE FARM. Journal of Life Sciences*, 34(2), 117-130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>

Furcal-Beriguete, P., Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica¹. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(1), 122-137. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>

García Lozano, J. (2014). Caracterización de las respuestas fisiológicas y bioquímicas en tres clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) sometidos a diferentes niveles de déficit hídrico. Bogotá, Colombia. 56, 45. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52256>

García Lozano, J., Moreno Fonseca. L. P. (2016). Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. En etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica* 65(1), 44-50. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n1.48161>.

- Gamiz, B., Celis, R., Hermosin, M. C., Cornejo, J. (2010). Organoclays as soil amendments to increase the efficacy and reduce the environmental impact of the herbicide fluometuron in agricultural soils. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(13), 7893-7901.
- Girolimetto, D. T. (2014). Evaluación del estrés hídrico y de los factores que lo afectan usando información teledetectada. Universidad Nacional del Litoral, Southern Great Plains, Estados Unidos. <http://hdl.handle.net/11185/567>
- Gockowski, J., Bhattacharjee, R., Asare, R., Muilerman, S. A. (2012). ‘Green Revolution’ in the West African cocoa belt. In International Institute for Tropical Agriculture (IITA) 4RD.
- Goebes, P., Schmidt, K., Seitz, S., Both, S., Bruelheide, H., Erfmeier, A., Scholten, T., Kühn, P. (2019). The strength of soil-plant interactions under forest is related to a critical soil depth. *Scientific Reports*, (9): 1–12.
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of The Total Environment*, 612, 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>
- Gutierrez, A. (2020). Morphological characterization of three promising Creole genotypes of *Theobroma cacao* L. *Agricultural Science* 30, 150-169.
- Gutiérrez-Soto, Marco V, Cadet-Piedra, Eduardo, Rodríguez-Montero, Werner, Araya-Alfaro, José Miguel. (2011). El GreenSeeker™ y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana* , 22 (2), 397-403.
- He, S., Yang, X., He, Z., Baligar, V. C. (2017). Morphological and Physiological Responses of Plants to Cadmium Toxicity: A Review. *Pedosphere*, 27(3), 421–438. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60339-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60339-4)
- Herrera, D. A., Ault, T. R., Fasullo, J. T., Coats, S. J., Carrillo, C. M., Cook, B. I., Williams, A. P. (2018). Exacerbation of the 2013–2016 pan-Caribbean drought by anthropogenic warming. *Geophysical research letters*. 45(19), 10-619. <https://doi.org/10.1029/2018GL079408>
- Hidalgo, N. (2014). Algunos métodos de propagación del cultivo de cacao *Theobroma cacao* L. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección Regional Brunca. INFOAGRO.

- Huamaní-Yupanqui, H. A., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta agronómica*, 61(4), 339-344.
- Huaraca-Fernández, J., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L., Pampa-Quispe, N. (2020). Organic amendments on the immobilization of cadmium in contaminated agricultural soils: a review. *Technology Information*, 31(4), 139-152.
- Huertos, E. G., Baena, A. R. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *MACLA, revista de la Sociedad Española de Mineralogía* (10), 48-60.
- ICCO (International Cocoa Organization) - The International Cocoa Organization (2021). <https://www.icco.org/>
- Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines, a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*. 27, 59-70. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(82\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90020-6)
- ING (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia). (2007). Atlas Nacional de la República de Panamá. Editora Novo Art., Bogotá, COL.
- Intawongse, M., Dean, J. R. (2006). Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. *Food Additives and Contaminants*, 23(1), 36-46. <https://doi.org/10.1080/02652030500387554>
- International cocoa organization (ICCO). (2021). Mercado mundial del cacao.
- Insuasty, L., Burbano, H., Menjivar, J. C. (2008). Dinámica del cadmio en suelos cultivados con papa en Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 57(1), 51-54.
- IPCC. (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse gas Inventories. IGES, Kyoto.
- Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A., Alyemeni, M. N. (2013). Soil cadmium enrichment: Allocation and plant physiological manifestations. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.11.004>
- Janani, P., Kumar, N., Jegadeeswari, V. (2019). Dinámica del intercambio gaseoso y parámetros de fluorescencia de clorofila de genotipos de cacao en respuesta al déficit hídrico. *Revista de Farmacognosia y Fitoquímica*. 8 (6), 415-419.

Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants. 3rd ed. CRC Press. Boca Raton, London New York, Washington, D.C.USA, 403 p.

Kabata-Pendias, A. (2004). Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*, 122(2), 143-149.

Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants. (4th ed). CRC PRESS, 548 pp.

Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). Taylor and Francis Group. CRC Press. Michigan, USA. 505 p.

Kardiman, R., Raebild, A. (2018). Relationship between stomatal density, size and speed of opening in Sumatran rainforest species. *Tree physiology*, 38(5), 696-705.

Köppen, W. (1936). Das Geographische System der Klimate en Handbuch der Klimatologie, R. Geiger. Berlín, Borntraeger, t. I, fasc. C. 44 p.

Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., Champagne, C. (2015). Evaluación de índices de vegetación RapidEye para la estimación del índice de área foliar y biomasa en cultivos de maíz y soja. *Revista Internacional de Observación Aplicada de la Tierra y Geoinformación* , 34, 235-248.

Kruszewski, B., Wiesław, O., Kowalska, J. (2018). "Nickel, cadmium and lead levels in raw cocoa and processed chocolate mass materials from three different manufacturers". In: *Journal of Food Composition and Analysis*, 66, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.12.012>

Kumar, A., Bhattacharya, T. (2021). Biochar: a sustainable solution. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 6642-6680. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>

Kumar, V., Sharma, A., Bhardwaj, R., Thukral, A. K. (2018). Comparación de diferentes índices de reflectancia para análisis de vegetación utilizando datos Landsat-TM. *Aplicaciones de la teledetección: sociedad y medio ambiente*, 12, 70-77.

Lafargue-Molina, P. (2021). Marker development for the traceability of certified sustainably produced cacao (*Theobroma cacao* L.) in the chocolate industry. (Thesis). Faculty of Health and Applied Sciences, Centre for Research in Biosciences. University of the West of England. 225 p.

- Lau, C. H., Jarvis, A., Ramírez, J. (2011). Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 4p. <https://hdl.handle.net/10568/57475>
- LaBarge, Richard Allen, (1959). A Study of the United Fruit Company Operations in Isthmian America, 1946-1956. Tesis. Departameto de Economía, Duke University.
- Lassatt, M. (2001). The use of plants for removal of toxic metal from contaminated soil. USEPA.
- Lehmann, J., Coumou, D., Frieler, K., Eliseev, A. V., Levermann, A. (2014). Cambios futuros en las trayectorias de tormentas extratropicales y baroclinicidad bajo el cambio climático. Cartas de investigación ambiental, 9 (8), 084002.
- Leon-Moreno, C. E., Rojas-Molina, J., Castilla-Campos, C. E. (2019). Physicochemical characteristics of cacao (*Theobroma cacao* L.) soils in Colombia: ¿Are they adequate to improve productivity? Agronomía colombiana 37(1), 28-38. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n1.70545>
- Lewis, C., Lennon, A. M., Eudoxie, G., Umaharan, P. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. Science of the Total Environment, 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>
- Liu, N., Jiang, Z., Li, X., Liu, H., Li, N., Wei, S. (2020). Mitigation of cadmium (Cd) accumulation in rice through the joint application of organic amendments and selenium (Se) in contaminated soils with high Cd content. Chemosphere, 241. 125106. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125106>
- Llatance, W. O., Gonza, C. J., Guzmán, W., Pariente, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. Revista Forestal del Perú, 33(1), 63-75. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1156>
- López, Y., Cunias, M., Carrasco, Y. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. Universidad y Sociedad, 12(3), 344-352.
- López-López, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M., López-Cruz, I., Sánchez-Cohen, I., and Ruiz-García, A. (2009). Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Revista Chapingo Serie Horticultura. 15(3), 259-267.

- Long, A., Zhang, J., Yang, L. T., Ye, X., Lai, N. W., Tan, L. L., Chen, L. S. (2017). Effects of low pH on photosynthesis, related physiological parameters, and nutrient profiles of citrus. *Frontiers in plant science*, 8, 185. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00185>
- Lüttge, U. E. (2007). *Physiological ecology of tropical plants*. Springer. Berlin.
- Marruecos, P. C. L., Loureiro, G. A. H. A., Araujo, Q. R., Sodre, G. A., Ahnert D., Escalona-Valdez, R. A., Baligar, V. C. (2020). Mineral nutrition of cocoa (*Theobroma cacao* L.): relationships between foliar concentrations of mineral nutrients and crop productivity. *Jounar Plant Nutrition* 43(10), 1498-1509. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1739295>
- Martínez M. M. (1971). Calibración y comparación de algunos métodos para la determinación de humedad del suelo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- McBride, M., Suave, S., Hendershot, W. (1997). Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soil. *European Journal of Soil Science*. 48, 337-346. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00554.x>
- McGrath, S. P., Loveland, P. J. (1992). *The Soil Geochemical Atlas of England and Wales*. Blackie Academic and Professional.
- Medina, V., Laliberte B. (2017). A review of research on the effects of drought and temperature stress and increased CO₂ on *Theobroma cacao* L., and the role of genetic diversity to address climate change. Costa Rica: Bioversity International. <https://hdl.handle.net/10568/89084>
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, 15(12), 1409-1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva*, 238, 62(2), 39-46.
- Meter A., Atkinson, R. J., Laliberte, B. (2019). Cadmium in Cocoa from Latin America and the Caribbean – Analysis of research and potential solutions for mitigation. Bioversity International, Rome. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1506>

- Meyer, S. J., Hubbard, K. G., Wilhite, D. A. (1993). A crop-specific drought index for corn. II. Application in drought monitoring and assessment Agronomy Journal. 85, 396-399. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500020041x>
- Miheretu, B. (2020). Soil acid management using biochar: Review. International Journal Agricultural Sciences and Food Technology. 6, 211–217.
- MINAM. (2014). Guía para Muestreo de Suelos. En el marco del Decreto Supremo No 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf
- Montemayor, J. C., Risterucci, A. M., López, P. A., Ortiz, C. F., Moreno, A., Lanaud, C. (2002). Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. Heredity, 89(5): 380-386.
- Montheith, J. L., Unsworth, M. H. (2008). Principles of environmental physics. 3 ed. Academic Press, Boston, Estados Unidos. 418 p.
- Moore, R. E. T., Ullah, I., de Oliveira, V. H., Hammond, S. J., Strekopytov, S., Tibbett, M., Dunwell, J. M., and Rehkämper, M. (2020). Cadmium isotope fractionation reveals genetic variation in Cd uptake and translocation by *Theobroma cacao* and role of natural resistance-associated macrophage protein 5 and heavy metal ATPase-family transporters. Horticulture Research, 7(1), 71. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0292-6>
- Moreno, J., Sevillano, G., Valverde, O., Loayza, V., Haro, R., Zambrano, J. (2018). Soil from the coastal plane. In The soils of Ecuador. pp: 27-77. Springer, Cham.
- Mounicou, S., Szpunar, J., Lobinski, R., Andrey, D., Blake, C. J. (2002). Bioavailability of cadmium and lead in cacao: comparison of extraction procedures prior to size exclusion fast-flow liquid chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometric detection (SEC-ICPMS). J Anal at Spectrum 17(8), 880–886. <https://doi.org/10.1039/b201639g>
- Name, B., Cordero, A. (1987). Alternativas para uso y manejo de suelos ácidos en Panamá. In Compendio de Resultados de Investigación presentados en la Jornada Científica. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá, Región Central, 23.
- Navarro, G. G., Navarro, B. S. (2003). Química agrícola El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal Madrid España Mundi Prensa, p576.

- Nicols, R., Estrela, M., Valiente, J., Barbera, M. (2010). Análisis de correlaciones entre la temperatura del aire y la temperatura de las superficies vegetadas medida con radiometría térmica. *Revista de teledetección*. 34, 36-43
- Nieto, A. S. F., González, A. R. B. (2018). Destino sostenible de los residuos generados en las plantas de beneficio avícola. *AiBi Revista de investigación, administración e ingeniería*, 6(1), 11-22. <https://doi.org/10.15649/2346030X.473>
- Niinemets, Ü. (2007). Photosynthesis and resource distribution through plant canopies. *Plant, Cell and Environment*, 30(9), 1052-1071. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01683.x>
- Núñez-Cano, J. I., Gordón-Mendoza, R., Franco-Barrera, J., Jaén-Villarreal, J., Sáez-Cigarruista, A., Ramos-Manzané, F., Ávila-Guevara, A. (2018). Índice hídrico de dos cultivares de maíz bajo dos sistemas de siembra. *Ciencia Agropecuaria*, (29), 99-111.
- Ogunlade, M. O., Agbeniyi, S. O. (2011). Impact of pesticides use on heavy metals pollution in cocoa soils of Cross-River State, Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*, 6(16), 3725-3728. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.541>
- Osorio, M. A., Leiva, E. I., Ramírez, R. (2017). Cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings growth in different pot sizes. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(2), 4.
- Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, J., Palacios-Sánchez, L. (2011). Agricultura de riego asistida con satélites. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2(2), 69-81.
- Panamá. Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA). Dirección de Agricultura. (2020). Cierre agrícola 2019-2020. 50 p
- Phillips-Mora, W., Aime, M. C., Wilkinson, M. J. (2007). Biodiversity and biogeography of the cacao (*Theobroma cacao*) pathogen *Moniliophthora roreri* in tropical America. *Plant pathology*, 56(6), 911-922. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01646.x>
- Pedraza, E. T., Rojas, M. Á. H. (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 de Agroproducción Sustentable*, 1(2), 69-78.

- Pedrero, F., Maestre-Valero, J. F., Mounzer, O., Alarcón, J. J., Nicolás, E. (2014). Physiological and agronomic mandarin trees performance under saline reclaimed water combined with regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 146, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.013>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Puentes, P. Y. J., Menjivar, J. C., Aranzazu, F. (2016). Concentration of nutrients in leaves, a tool for nutritional diagnosis in cocoa. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), 329-336.
- Puentes-Páramo, Y., Menjivar-Flores, J., Aranzazu-Hernández, F. (2014). Eficiencias en el uso de nitrógeno, fósforo y potasio en clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Bioagro*, 26(2), 99-106.
- Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R., Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas.
- López, C. P. (2010). Técnicas de muestreo estadístico. Ibergarceta.
- Quesada-Hinojosa, R. P., Föllmi, K. B., Verrecchia, E., Adatte, T., Matera, V. (2015). Speciation and multivariable analyses of geogenic cadmium in soils at Le Gurnigel, Swiss Jura Mountains. *Catena*, 125, 10-32. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.003>
- Rábago, I., Aracil, J., (2011). Buffer capacity for lead and cadmium contamination in soils in the Community of Madrid. PhD Pharmacy Thesis. Madrid, Spain. Universidad Complutense de Madrid, 285 pp.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K., Harrynanan, L. (2016). Relationships between Cadmium in Tissues of Cacao Trees and Soils in Plantations of Trinidad and Tobago. *Food and Nutrition Sciences*, 07(01), 37–43. <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2016.71005>
- Ramtahal, G., Umaharan, P., Hanuman, A., Davis, C., Ali, L. (2019). The effectiveness of soil amendments, biochar and lime, in mitigating cadmium bioaccumulation in *Theobroma cacao* L. *Science of the Total Environment*, 693, 133563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.369>

- Rieuwerts, J., Thornton, I., Farago, M., Ashmore, M. (2015). Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*.10(2), 61-75. <https://doi.org/10.3184/095422998782775835>
- Rieuwerts, J. S. (2007) ‘The mobility and bioavailability of trace metals in tropical soils: A review’, *Chemical Speciation and Bioavailability*, 19(2), 75–85. <https://doi.org/10.3184/095422907X211918>
- Rojas-Molina, J., Ortiz-Cabralez, L., Escobar-Pachajoa, L., Rojas-Buitrago, M., Jaimes-Suarez, Y. (2021). Descomposición and release of nutrients in biomass generated by cocoa (*Theobroma cacao L.*) pruning in Rionegro, Santander, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 888-900. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v32i3.41608>
- Romero, M. A., Vasquez, S. C., Romero, A. E., Molina-Müller, M. L., Capa-Morocho, M. I., Granja, F. (2022). Nutrient Dynamic in cocoa leaves under different nitrogen sources: a reference tool for foliar analysis. *Soil and Plant Nutrition. Revista Brasileira de Fruticultura*, 44(5), e-035. <https://doi.org/10.1590/0100-29452022035>
- Rosas Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., Menjívar Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* (Mosquera, Colombia). 18(3), 529-541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Rosas-Martinez, V., Aguilar-Rivera, N. (2022). Composting for the reduction of bird droppings (*Gallus gallus domesticus*). *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), 19. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.44815>
- Samaniego, J., Alatorre, J. E., Van Der Borgh, R. (2021). Soluciones basadas en la naturaleza: el potencial de la restauración y conservación de bosques para la adaptación al cambio climático en Centroamérica.
- Samborski, SM., Tremblay, N., Fallon, E. (2009). Estrategias para hacer uso de la información de diagnóstico basada en sensores de plantas para la recomendación de nitrógeno. *Revista de Agronomía* 101(4), 800-816.
- Samuel, K. G. (2014). Improving the efficiency and transparency of the Cocoa Global Value Chain (GVC); market structure and potential impacts on smallholder farmers (presentation). UNCTAD.

SEMARNAT. (2002). Official Mexican Standard. NOM-021-RECNAT-2000. That establishes the specifications of fertility, salinity and classification of soils, study, sampling and analysis. Secretary of Environment and Natural Resources. Mexico, 85 pp.

Serrano, M., Martínez, N., Romero, M., Del Rio, L., Sandallo, L. (2008). Toxicidad de cadmio en plantas.

Shahbandeh, M. (2019). World cocoa production by country from 2012/2013 to 2018/2019 (in 1,000 metric tons). <https://www.statista.com/statistics/263855/cocoa-bean-production-worldwide-by-region/>

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., Antunes, P. M. C. (2016). Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil Plant System. In P. de Voogt (Ed.), Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 241, 73–137.

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. Journal of hazardous materials, 325, 36-58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>

Sêkara, A., Ciura, J., Jêdrszczyk, E. (2005). Cadmium and Lead Accumulation and Distribution in the Organs of Nine Crops: implications for phytoremediation. Polish Journal of Environmental Studies, 14(4), 509–516.

Sikora, F. J., Wolt, J. (1986). Effect of cadmium and zinc treated sludge on yield and cadmium-zinc uptake of corn. J. Environ. Qual. 15, 340-345.

Singh, B., Singh, G. (2006). Effects of controlled irrigation on water potential, nitrogen uptake and biomass production in Dalbergia sissoo seedlings. Environmental and Experimental Botany, 55(1-2), 209-219.

Skirycz, A., e Inzé, D. (2010). More from less: plant growth under limited water. Current Opinion on Biotechnology. 21, 197-203.

Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J, Bastide, P., Jagoret, P. (2016). Cacao nutrition and fertilization. In: Lichtfouse (ed) Sustainable agriculture reviews. Springer International Publishing, Switzerland 19, 155–202. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4

- Song, Y., Jin, L., and Wang, X. (2016). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International journal of phytoremediation*, 19(2), 133-141. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1207598>
- Sosa, E. P., Ramírez, G. R. G. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*. 3, 39-67. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>
- Spalding, P., Brooks Scott, C., Watson, D. B. (2010). Hydrogel-Encapsulated Soil: A Tool to Measure Contaminant Attenuation in Situ. *Environmental Science & Technology*, 44 (8), 3047-3051.
- Spliethoff, J., Rampim, L., Pott, C. A., Vidigal, J. C. B., Neto, E. G. (2022). Development and validation of a hydraulic sampler for collection of undisturbed soil samples. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(4), 431-446. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1839057>
- Sut-Lohmann, M., Jonczak, J., Raab, T. (2020). Phyto filtration of chosen metals by aquarium liverwort (*Monosoleum tenerum*). *Ecotoxicology and environmental safety*, 188, 109844. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109844>
- Sun, H., Li, Y., Ji, Y., Yang, L., Wand, W., and Li, H. (2010). Environmental contamination and health hazard of lead and cadmium around Chatian mercury mining deposit in western Hunan Province, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(2), 308–314. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60139-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60139-4)
- Tahboub, M., Lindemann, W., Murray, L. (2008). Chemical and physical properties of soils amended whit pecan wood chips. *American Society Horticultural Science* 43:891-896. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.891>
- Taiz, L., Zeiger, L., Moller, I., Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Deleopment*. 6th ed. Sunderland (USA): Sinauer Associates.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology*, 101, 133-164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise do solo. 3.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 573 p.
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>
- Tomita, K. (2020). Basic practical knowledge about soil chemistry in Latin America. Taking advantage of the results of Costa Rica, Panama, Colombia, Ecuador, Brazil, Paraguay. Spain, Edition. Spanish Academy, 152 p.
- Torres, C. P., and Otiniano, A. J. (2021). Innovación tecnológica en cacao andino Producto 4. Informe sobre absorción de cadmio y manejo agronómico y su validación en vivero.
- Traina, S. J. (1999). The environmental chemistry of cadmium. In M. J. McLaughlin and B. R. Singh (Eds.), Cadmium in soils and plants (p. 11–37). Dordrecht: Kluwer Academic.
- U.E (Unión Europea). (2014). Reglamento (CE) No 488/2014, que modifica el Reglamento (CE) 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. Reglamento de la Comunidad Europea, Bélgica, 138/78.
<https://www.boe.es/doue/2014/138/L00075-00079.pdf>
- U.E. Environmental Protection Agency (US EPA). (1993). Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (40 Codw of Federal Regulations Part 503). Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). Servicio de Conservación de Recursos Naturales. (2014). Clave para la Taxonomía de los Suelos. 12. Ed. Texcoco, México, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. 374 pp. (Traducido por Carlos Alberto Ortiz-Solorio, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena y Edgar V. Gutiérrez-Castorena).
- USDA (United States Department of Agriculture). Natural Resources Conservation Service, 2014. Key to the Taxonomy of Soils. 12. Ed. Texcoco, México, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, 374 pp. (Translated by Carlos Alberto Ortiz-Solorio, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena and Edgar V. Gutiérrez-Castorena).
- USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). (2002). Guía complementaria para desarrollar niveles de detección de suelos para sitios de super fondo.

- USEPA. (2007). Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils. Revision 1. Washington, DC.
- Vallejos-Torres, G., Ruíz-Valles, R., Chappa-Santa María, C. E., Gaona-Jiménez, N., and Marín, C. (2022). Una alta diversidad de hongos micorrízicos arbusculares influye en la absorción de cadmio y crecimiento vegetal del cacao. *Bioagro*, 34(1), 75-84. <https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>
- van Vliet, J., Slingerland, M., Giller, K. (2015). Mineral Nutrition of Cocoa. A Review. Wageningen: Wageningen University and Research Centre.
- Verbruggen, N., Hermans, C., Schat, H. (2009). Mechanisms to cope with excess arsenic or cadmium in plants. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 364-372.
- Villalaz-Pérez, J. A., Villarreal-Núñez, J. E., Santo-Pineda, A., Gutiérrez, A., Ramos-Zachrisson, I. A. (2021). Caracterización pedogenética de los suelos dedicados al cultivo de cacao, Almirante, Bocas del Toro, Panamá. *Ciencia Agropecuaria*, No. 31, 37-58. <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/299>
- Walkley, A., Black, A. I. (1934). An examination of the method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37, 29-38.
- Voora, V., Bermúdez, S., Larrea, C. (2019). Global Market Report: cocoa. In Winnipeg, MB, Canada: International Institute for Sustainable Development.
- WHO. World Health Organization .(2010). Exposure to cadmium: a major public health concern, Geneva 27, Switzerland.



El objetivo fue aportar una línea base para mejorar la producción de cacao y hacer una primera exploración sobre los diferentes actores que potencialmente podría afectar la producción y calidad del cultivo, como el Cd o el efecto de la sequía temporal en la región de Almirante, en Bocas del Toro, República de Panamá. Se demostró que el abono orgánico incrementó la biodisponibilidad de elementos esenciales en el suelo y la absorción de nutrientes en la planta. Se encontró un bajo contenido de Cd en el suelo derivando a la baja concentración de Cd en el grano de cacao. El estudio del Clon de cacao AS-CP-26-61 sirvió para identificar la toxicidad del Cd que puede ser transferido desde el suelo a la planta. Se relacionó el porcentaje de humedad del cultivo con el estrés hídrico en la planta de cacao.