



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS



COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

**DETERMINACIÓN DE CADMIO, MACRO Y MICROELEMENTOS EN
GRANOS DE CACAO (*THEOBROMA CACAO* L.) DE LOS ESTADOS DE
TABASCO Y CHIAPAS, MÉXICO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

PRESENTA:

AYDEE TOBIAS BAEZA

DIRECTOR (A)

DR. PEDRO GARCÍA ALAMILLA

CODIRECTOR (A)

DR. RUFO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

VILLAHERMOSA, TABASCO

MAYO, 2023

Villahermosa, Tabasco a 02 de mayo de 2023
Of. No. 196/JP/2023
Asunto: Autorización de impresión de Tesis
202C26001

MTRA. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN
Y TITULACIÓN DE LA U. J. A. T.
P R E S E N T E

En conformidad con lo establecido en el Artículo 77 fracción III del Reglamento de Titulación de la U. J. A. T., me permito comunicar a Usted que el Dr. Pedro García Alamilla (Director) y el Dr. Rufo Sánchez Hernández (Codirector), dirigieron y supervisaron el Trabajo Recepcional de Tesis denominado "Determinación de cadmio, macro y microelementos en granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) de los estados de Tabasco y Chiapas, México", elaborado por la C. Aydee Tobías Baeza egresada de la Maestría en Ciencias Agroalimentarias. El jurado para el examen profesional de este Dr. César Márquez Quiroz, Dr. Carlos Hugo Avendaño Arrazate, Dr. Pedro García Alamilla, Dr. Aldenamar Cruz Hernández y la Dra. Angélica Alejandra Ochoa Flores, revisaron y señalaron las modificaciones pendientes al trabajo recepcional y que la interesada ha llevado a efecto. Por lo tanto, el trabajo recepcional Tesis de Investigación puede imprimirse.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE



M. V. Z. JORGE ALFREDO THOMAS TELLEZ

DIRECTOR



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

El que suscribe, Aydee Tobias Baeza del programa de estudios de posgrado de la Maestría en Ciencias Agroalimentarias, con número de matrícula 202C26001, adscrito a la División Académica de Ciencias Agropecuarias, manifiesto ser autora intelectual y titular de los Derechos de Autor del presente Trabajo de Tesis denominada “Determinación de cadmio, macro y micro elementos en granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) del estado de Tabasco y Chiapas, México”, y autorizo a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice el presente trabajo con fines Académicos y de Investigación ya sea de forma física o digital para su difusión y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la Tesis mencionado y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco; a los veinte días del mes de mayo del año 2023.

ATENTAMENTE



Aydee Tobias Baeza

202C26001

Dedicatorias

Para cada mujer que ha sido violentada por sus parejas en cualquiera de sus diferentes variantes dedico hoy este trabajo con la convicción de que nunca es tarde, siempre con la ayuda de Dios y las personas indicadas todo se puede.

Dedicado especialmente a mi madre, te lo debía.

Dedicado con enorme esperanza a mi hija, si yo pude, tú siempre podrás lograr más.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) agradezco la beca recibida durante el estudio de la maestría, el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto fue invaluable.

Gratitud es un término poco aplicado y pocas veces referido a los maestros; pero la realidad es que estos son sumamente importantes en nuestro desarrollo como personas, en mi caso agradezco infinitamente a mis asesores Dr. Pedro García Alamilla y al Dr. Rufo Sánchez Hernández dignos de toda mi admiración y respeto, fueron cruciales para la realización de este trabajo. Quiero agradecerles a ellos por cada detalle y momento, especialmente su tiempo y paciencia, agradecerles por la claridad y exactitud con la que me enseñaron en cada clase, discurso, practica y lección.

Gracias a mi universidad por ser la base de mi formación y centro de enseñanza, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso de manera directa o indirecta cada uno en su medida son responsables de realizar un gran aporte para lograr mi gran sueño.

Gracias a mis hijos, Didi y Sury por ser la fuente de mi esfuerzo y todas las energías requeridas en este, pero sobre todos ellos a Dios.

Gracias...

Contenido

Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Resumen	ix
Abstract	xi
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	3
3. Justificación	6
4. Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
5. Hipótesis	8
6. Antecedentes	9
6.1 Aspectos botánicos	9
6.2 Distribución mundial	9
6.3 Distribución nacional y estatal	10
6.4 Importancia del fruto	10
6.5 Aspectos de inocuidad para comercialización	10
6.6 Legislación sobre metales pesados	11
6.7 Aspectos de los macro y micronutrientes	14
6.8 Estado del arte	14
7. Materiales y Métodos	22
7.1 Selección de sitios de estudio y muestreo	22
7.2 Análisis de muestras	22
7.3 Cuestionario: recopilación de información sobre el manejo del cultivo	22
7.4 Preparación de las muestras	23
7.5 Humedad en el grano	23
7.6 Peso promedio del grano	23
7.7 Dimensiones lineales del grano	23
7.8 Extracto etéreo	25
7.9 Determinación de cadmio, macro y microelementos	25
7.10 Procesamiento de datos y análisis estadísticos	25
8. Resultados y Discusión	26
8.1 Propiedades físicas del grano	26

8.2 Contenido de cadmio, macro y microminerales	34
9. Conclusión	48
10. Referencias bibliográficas	49
11. Anexos	57

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de Tablas

Tabla 1. Límites de Cd establecidos mundialmente	12
Tabla 2. Propiedades físicas de granos de cacao en cacaos mexicanos comerciales.....	26
Tabla 3. Propiedades físicas de granos de cacao reportados en otros países.	28
Tabla 4. Dimensiones lineales del grano de cacao de muestras comerciales	29
Tabla 5. Correlación de variables físicas de granos de cacao de estados productores en México (Tabasco, Chiapas y Oaxaca)	31
Tabla 6. Análisis de Componentes Principales de las propiedades físicas del grano.....	33
Tabla 7. Contenido mineral en cotiledón y cascarilla del grano de cacao.....	35
Tabla 8. Valores de macro y micro elementos reportados en literatura.	35
Tabla 9. Análisis de correlación cotiledón.....	39
Tabla 10. Análisis de correlación cascarilla	40

Índice de Figuras

Figura 1. Varianza acumulada (línea verde) e individual (azul) explicada por los componentes principales (A), distribución espacial de puntuaciones (B) y cargas (C) por análisis de componentes principales (ACP) de las muestras de cacao mexicanos evaluados con respecto a las variables físicas.....	32
Figura 2. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP) para las variables de minerales en el cotiledón.	41
Figura 3. Análisis de componentes principales cascarilla	42
Figura 4. Manejo y características de la plantación.....	44
Figura 5. Comportamiento del contenido de Cadmio en cotiledón (G-Cd) y en cáscarilla (C-Cd).	45
Figura 6. Contenido mineral de Cd entre los tres Estados productores de cacao.	45
Figura 7. Contenido mineral de Cd, macro y microelementos de las muestras de los estados de Tabasco (A), Chiapas (B) y Oaxaca (C).	46

Resumen

El cacao es la materia prima básica para la industria chocolatera, en función de ello debe cumplir no solo con requisitos de calidad física y química, sino también con aspectos de seguridad alimentaria. La Unión Europea estableció en granos de cacao un límite de 0.8 mg kg⁻¹ de cadmio para su importación. En función de la normatividad, la investigación se ha enfocado a llevar a cabo estudios a nivel de suelo, planta y fruto para identificar los niveles de este metal y su relación con macro-microelementos. En México, el cacao se produce en dos estados principalmente, Tabasco y Chiapas. Los productores que buscan exportar cacao con características de calidad organoléptica requieren conocer los niveles de Cd, puesto que ello puede ser una limitante para lograr esta meta. Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar el contenido de cadmio, macro y microelementos en granos de cacao de los estados de Tabasco y Chiapas. El muestreo fue apoyado por productores cooperantes con cacaos lavados – secos y fermentados – secos. El estudio se dividió en tres etapas, a) propiedades físicas de los granos, b) determinación del contenido de Cd, macro y microelementos, y c) características particulares de las muestras. Las muestras fueron divididas en dos submuestras: el cotiledón y la cascarilla. Los estudios de propiedades físicas para medición de propiedades geométricas fueron con un vernier digital y utilizando ecuaciones clásicas para la determinación de propiedades físicas, mientras que la determinación del contenido mineral se llevó a cabo por espectrofotometría de absorción atómica, los datos fueron analizados por estadística descriptiva y por Análisis de Componentes Principales (ACP). Los resultados encontrados en las propiedades físicas de los granos se encuentran por arriba o debajo de granos de otras regiones, si se comparan con materiales mejorados o nativos. En todos los casos la humedad fue la variable crítica. En el cotiledón, un promedio de 0.46 mg kg⁻¹ por debajo del límite establecido, no así en la cascarilla con un valor de 0.87 mg kg⁻¹. La distribución de macro y microelementos fue de K>Na>Mg>Ca>Fe>Zn>Mn>Cu para el caso del cotiledón y K>Mg>Fe>Na>Ca>Zn>Mn>Cu para el caso de la cascarilla. El ACP para Cd, macro y micro para el cotiledón mostró una explicación de 56.9 % de la variación total observada en los dos primeros componentes, mientras que para la cascarilla explicó el 73.4 %. Un análisis de

correlación mostró que el Cd se correlacionó ($P < 0.05$) con el Zn en la cascarilla, no así en el cotiledón. Los resultados permiten establecer el primer estudio de Cd en México en las zonas productoras de cacao, encontrando promedios por debajo del límite, sin embargo, estudios puntuales son necesario poder establecer aspectos de correlación con genotipo, biodiversidad, edad de las plantaciones, entre otros. Para poder establecer estos resultados se requiere de un mayor muestreo representativo de las zonas productoras identificando por varietal y con análisis de raíces, suelo, planta y fruto.

Palabras Clave: Grano de cacao, cadmio, minerales

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Abstract

Cocoa is the basic raw material for the chocolate industry, based on this it must comply not only with physical and chemical quality requirements, but also with aspects of food safety. The European Union established a limit of 0.8 mg kg^{-1} of cadmium in cocoa beans for importation. Based on the regulations, the research has focused on carrying out studies at the soil, plant and fruit level to identify the levels of this metal and its relationship with macro-microelements. In Mexico, cocoa is mainly produced in two states, Tabasco and Chiapas. Producers seeking to export cocoa with organoleptic quality characteristics need to know the Cd levels, since this can be a limitation to achieve this goal. Therefore, the objective of the research was to evaluate the concentration of cadmium, macro and microelements in cocoa beans from the states of Tabasco and Chiapas. The sampling was supported by cooperating producers with washed-dry and fermented-dry cocoas. The study was divided into three stages, a) physical properties of the grains, b) study of Cd, macro and microelements, and c) characteristics of the samples. The samples were divided into two subsamples: the cotyledon and the shell. The studies of physical properties for the measurement of geometric properties were with a digital vernier and using classical equations for the determination of physical properties, while the determination of minerals was carried out by atomic absorption spectrophotometry and the data were analyzed by descriptive statistics and by Principal Component Analysis (PCA). The results found in the physical properties of the grains are above or below grains from other regions depending on whether they are compared with improved or native materials. In all cases, moisture was the critical variable. The mineral analysis allowed to find an average 0.46 mg kg^{-1} in the cotyledon below the established limits, but not in the shell with a value of 0.87 mg kg^{-1} . The mineral distribution in macro and micro elements was $\text{K} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu}$ for the case of the cotyledon and $\text{K} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{Ca} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu}$ for the case of the husk. The PCA for Cd, macro and micro for the cotyledon showed an explanation of 56.9 % of the total variance

observed in the first two components, while the shell explained 73.4%. A correlation analysis showed that Cd was correlated ($P < 0.05$) with Zn in the hull, but not in the cotyledon. The results allow establishing the first study of Cd in Mexico in cocoa-producing areas, finding averages below the limit, however, specific studies are necessary to be able to establish correlation aspects with genotype, biodiversity, age of the plantations, among others. In order to establish these results, a greater representative sampling of the producing areas is required, identifying by varietal and with analysis of roots, soil, plant, and fruit.

Keywords: Cocoa bean, cadmium, minerals

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1. Introducción

Theobroma cacao (L.) fue domesticado en México, actualmente se producen los tres tipos de cacao (criollo, forastero y trinitario) principalmente en la Región Grijalva (Tadeo-Sánchez et al., 2020). Su centro de origen fue en el continente americano en la región amazónica ubicada al noroeste de América del Sur (Zarrillo et al., 2018), y su domesticación en la Mesoamérica prehispánica (López y Rivero et al., 2017). Castro et al. (2015), el cacao cuenta con una gran variabilidad genética en lo que respecta a las características morfológicas y fisiológicas, es un árbol colifloroso con mecanismos y vías aptas para una acumulación de cadmio en sus granos (Vanderschueren et al., 2021). El cacao es considerado como fuente de nutrientes debido al contenido de diversos compuestos, entre estos, triglicéridos (ácido palmítico, esteárico, oleico), minerales (macro y microelementos), vitaminas, fibra, carbohidratos, proteínas, azúcares (fructuosa y sacarosa) y polifenoles (catequinas, antocianinas y proantocianinas), destacando este último grupo debido a la gran importancia para retrasar el desarrollo de ciertos tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares y algunas asociadas con la edad, entre otros beneficios (Ekpa et al., 1993; Cooper et al., 2007; Katz et al., 2011; Bertoldi et al., 2016; Arévalo-Gardini et al., 2017; Assa et al., 2018; Dico et al., 2018; Kruszewski et al., 2018; Acierno et al., 2020; Abt y Robin, 2020; Anyimah-Ackah et al., 2021). El principal producto del cacao es el chocolate, el cual, en los últimos años ha tenido una mayor demanda debido a sus compuestos funcionales, así como a su contenido mineral, destacando el calcio (Ca), cobre (Cu), hierro (Fe), potasio (K), zinc (Zn), manganeso (Mn) y magnesio (Mg) (Tolentino et al., 2019; De Oliveira et al., 2020).

Kruszewski et al. (2017) declaran que, se ha incrementado la investigación sobre la contaminación de las materias primas del cacao y productos como el chocolate con minerales tóxicos (FAO/OMS CX/CF 15/9/6, 2014; Comisión Europea, 2004). Cada vez más estudios han demostrado que existe una relación directa de la coexistencia de metales pesados en la bioacumulación de Cd en las especies, esta acumulación generalmente varía según la distribución y magnitud de estos en el suelo (Xu et al., 2021). Por tal razón, la seguridad alimentaria es una prioridad internacional y debido al contenido de metales pesados en los alimentos se han establecido criterios para su consumo. La Unión Europea (UE) determinó un límite de 0.8 mg kg^{-1} para el contenido de Cd (Meter et al., 2019; Suhani et al., 2021;

Anyimah-Ackah et al., 2021). Este mineral tiene una vida media biológica de 10 a 35 años en los seres vivos y no es biodegradable (Pineda y Rodríguez, 2015; Maddela et al., 2020; Vanderschueren et al., 2021; Florida-Rofner, 2021; Xu et al., 2022). Florida-Rofner (2021) declara que sus propiedades fisicoquímicas son similares a las del Zinc (Zn) y Mercurio (Hg). El Cd es un metal pesado de origen natural biológicamente no esencial (Engbersen et al., 2019) presente en todos los suelos (McLaughlina et al., 2021). El Cd se ha observado en los cultivos de importancia, como el cacao, el trigo duro, la espinaca, la papa y el arroz (Gui et al., 2020; McLaughlin et al., 2021; Xu et al., 2022). Suhani et al. (2021) indican que es el sistema suelo-planta lo que propicia la biodisponibilidad, bioaccesibilidad y bioacumulación del Cd dándose su transferencia a diferentes niveles tróficos de la cadena alimentaria. Debido a que, los niveles de Cd tienden a elevarse en las áreas geológicas de suelos jóvenes, países de América muestran concentraciones de cuatro a seis veces más altas en comparación a los granos de cacao de Asia o África, (Chávez et al., 2015; Ramtahal et al., 2015; Engbersen et al., 2019; Scaccabarozzi et al., 2020; Abt y Robin, 2020).

McLaughlina et al. (2021) y Vanderschueren et al. (2021) aseguran que en los productos del cacao el Cd proviene principalmente de la bioacumulación en los granos, llega al organismo por medio de los alimentos y provoca diversos daños, aún en el consumo de pequeñas dosis debido a que no se degrada (Florida-Rofner, 2021, Xu et al., 2022), por lo que genera un impacto nocivo a órganos vitales como pulmones, riñones, hígado, huesos y tiene relación con variados tipos de cáncer (riñón, hígado y próstata). Lo anterior se convierte en una amenaza para la salud humana (Akesson et al., 2014; Bertoldi et al., 2016; Maddela et al., 2020; McLaughlina et al., 2021), es así como, las propiedades del cacao se ven interrumpidas por el contenido de Cd y otros metales (Salama, 2018; Gui et al., 2020; Suhani et al., 2021; Xu et al., 2022).

Por lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo analizar el contenido de Cd, macro y microelementos en granos de cacao secos en áreas geográficas con mayor producción nacional para cuantificar y comparar con las regulaciones internacionales.

2. Planteamiento del problema

El Cd es un mineral de origen natural que no tiene un beneficio funcional conocido en plantas o animales (Ramtahal et al., 2015; Arévalo-Gardini et al., 2017). Sin embargo, afecta a los seres vivos en cuestiones relacionadas con la salud (Ramtahal et al., 2015; Engbersen et al., 2019). Maddela et al. (2020) afirman que el Cd tiende a acumularse con una vida media mayor a una década en el cuerpo humano. Este mineral es un contaminante no degradable debido a su alta biodisponibilidad y su bioaccesibilidad en los sistemas suelo-planta, por estas razones se incrementa su concentración en diversas especies comestibles (Chávez et al., 2016; Maddela et al., 2020; Suhani et al., 2021). En el hombre, este metal se ha relacionado a disfunción renal, osteoporosis y diversos tipos de cáncer (Akesson et al., 2014, Anyimah-Ackah et al., 2019), así como, estragos en el hígado y riñones, además otras consecuencias son las complicaciones que genera en órganos vitales como pulmones y huesos (Florida-Rofner, 2021).

La Unión Europea (UE) ha establecido niveles máximos permisibles de Cd en diferentes alimentos, en cacao se acepta concentración máxima de 0.8 mg kg^{-1} (Arévalo-Gardini et al., 2017; Meter et al., 2019; Anyimah-Ackah et al. 2019). Kruszewski et al. (2018) declararon que en todo el mundo existe una diferencia en el contenido entre las muestras de cacao del mismo país, y esta divergencia no solo indica que la ubicación geográfica de los árboles de cacao impacta en el contenido de metales, sino también que, la composición natural del suelo y la contaminación ambiental son de gran impacto en el cultivo del cacao.

El cacao contiene diversos minerales que son considerados potencialmente benéficos para la salud debido a su capacidad antioxidante y funcionalidad, entre los cuales se encuentran el Ca, Cu, Fe, K, Zn, Mn y Mg (Tolentino et al., 2019; De Oliveira et al., 2020, Palma et al., 2021). Sin embargo, las interacciones químicas entre estos elementos podrían conducir a una mayor acumulación de metales pesados en las plantas (Arévalo-Gardini et al., 2017).

Respecto a la problemática que implica la concentración de metales en cacao reportados en diferentes regiones productoras a nivel mundial, en México no se ha localizado alguna investigación publicada que determine el contenido del elemento en los granos de cacao secos, así como relacionar con los micro y macroelementos. Esta información es de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

vital importancia para la comercialización del producto, además de permitir establecer estrategias de control del pH, el uso de vermicompost, adecuado manejo agrícola y mejor procesamiento (Chávez et al., 2016; Scaccabarozzi et al., 2020; Palma et al., 2021).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

3. Justificación

Del fruto del árbol de *Theobroma cacao* (L.) se obtiene el grano de cacao, el cual es un producto agrícola importante para varios países de América, en México el estado de Tabasco tiene la mayor producción nacional destacando “el cacao fino de aroma” o Premium destinado para exportación (Bertoldi *et al.*, 2016; Martínez y Martínez, 2020). Actualmente, existen nichos de mercado para exportación con precios más altos que los que ofrece el mercado nacional o la bolsa de valores, por lo cual, el cacao debe cubrir exigencias de indicadores y atributos de calidad como los límites permisibles de Cd. Por las exigencias demandadas para el consumo del cacao a nivel internacional y nacional, este debería ofrecerse bajo condiciones aptas de inocuidad (Martínez y Martínez, 2020; Florida-Rofner, 2021). Adicionalmente al consumo de bebidas típicas regionales del país (tascalate, bapu, champurrado, el pozol, entre otras), el mercado más grande para los granos de cacao es su uso en la industria del chocolate y confitería (Valero y Hernández, 2011; Wickramasuriya y Dunwell, 2018).

El cacao es un grano que se cotiza en la bolsa de valores (comodity), fijando precios a nivel mundial. Según la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2017), en su Planeación Agrícola Nacional 2017 – 2030 reporta que en el periodo 2003-2016 hubo una reducción en la producción en 46.21% y de su rendimiento del 26.23 %, así también durante el 2016 las 26,863 t producidas cubrieron solo el 41.23 % de los requerimientos nacionales por lo que se recurrió a la importación para abastecer a la industria. Para Tabasco, respecto al ámbito agropecuario, el sector cacaotero constituido por 35 mil productores, 30 asociaciones, 40 empresas agroindustriales y la Unión Nacional de Productores de Cacao representa el 18.1 % concerniente al PIB del estado denotando por lo anterior la importancia del producto (Martínez y Martínez, 2020).

De los minerales que puede contener el grano de cacao, el Cd tiene un enorme impacto dañino en la salud humana aún en bajas concentraciones (Engbersen *et al.*, 2019; Maddela *et al.*, 2020; Vanderschueren *et al.*, 2021; Florida-Rofner, 2021). Engbersen *et al.* (2019), documentaron que el contenido de Cd en granos de cacao cultivados particularmente en América Latina superó los límites internacionales establecidos, especialmente de la Unión Europea y Estados Unidos (Albarracín *et al.*, 2019).

El cacao otorga beneficios a la salud, genera una trascendencia económica dado su comercio mundial (Romero-Estévez et al., 2019) y tiene un alto consumo, por lo anterior, es necesario evaluar el contenido de Cd, macro y microelementos en la producción del país. Esta investigación tiene como meta contribuir al conocimiento de la presencia de Cd, macro y microelementos en granos de cacao a partir de un muestreo representativo en los estados de mayor producción nacional (Tabasco y Chiapas).

México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

4. Objetivos

Objetivo General

Determinar el contenido de cadmio, macro y microelementos en granos de cacao de los estados de Tabasco y Chiapas.

Objetivos Específicos

Cuantificar el contenido de Cd, macro y microelementos en granos de cacao representativos de los municipios productores en los estados de Tabasco y Chiapas.

Buscar la correlación entre el Cd con los macros y microelementos.

Establecer diferencias entre el contenido de los minerales evaluados y la ubicación geográfica de los municipios productores de cacao.

5. Hipótesis

El contenido de Cd presente en los granos de cacao en los estados de Tabasco y Chiapas estará correlacionado con los macro y microelementos, además de haber diferencias agrupadas en función de la ubicación geográfica de los municipios productores.

6. Antecedentes

6.1 Aspectos botánicos

El género *Theobroma* (cacao) de la familia de las Malvaceas es la única con importancia económica de 22 especies pertenecientes (Nair, 2021). Se cultiva a 400 m.s.n.m. a temperaturas entre 22 °C y 30 °C, dependiendo de la variedad (Castro et al., 2015; Damatta et al., 2018), y una precipitación de 1500 a 2500 mm al año. Las almendras o granos son de color marrón y están cubiertas en el exterior por un mucílago blanco y dulce que es comestible. La *Theobroma cacao* (L.) es la especie de mayor distribución geográfica, se obtiene la materia prima para obtener licor de cacao, cacao en polvo, manteca de cacao y cocoa que es el principal producto de la industria chocolatera (Araujo-Abad et al., 2020). Esta especie tiene tres grupos genéticos basados en características morfológicas y anatómicas: Criollo o cacao de fino aroma (*T. cacao* spp. Criollo), Forastero 80 % producción mundial (*T. cacao* spp. *Sphaerocarpum*) y Trinitario que es un híbrido resultado de los dos anteriores (Wickramasuriya y Dunwell, 2018).

6.2 Distribución mundial

Theobroma cacao (L) es considerado de gran importancia económica (Bertoldi et al., 2016) debido a que sus granos son el recurso para la elaboración del chocolate, uno de los productos más consumidos a nivel mundial, así como sus derivados y subproductos (Moore et al., 2020; García et al., 2021). Las regiones tropicales de África y América son las mayores productoras de cacao, es así como los aspectos comerciales de este cultivo adquieren una importancia económica considerable con la Organización Mundial del Comercio (OMC) (Nair, 2021; García et al., 2021). Las exportaciones mundiales de cacao en grano y elaborados han registrado un crecimiento importante alcanzando en el 2020 USD \$850 (millones), en comparación con el año 2019 que fueron de \$720 (García et al., 2021). En el año 2019-2020, la producción mundial de cacao fue de 4.7 millones de toneladas, de esta producción anual, en Latino América se produjeron el 18.4 % equivalente a 0.9 millones t. (García-Briones et al., 2021; ICCO 2021). A nivel mundial Suiza es el mayor consumidor (Wickramasuriya y Dunwell, 2018).

6.3 Distribución nacional y estatal

En promedio de 2008 a 2018 a nivel mundial de cacao en grano fue 5,132, 899.1 t, en 10,458,046.3 ha cosechadas (FAO, 2021). México ocupó el lugar número 13 a nivel mundial con 28,105.84 t de cacao producidas en el año 2021 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2021). Martínez y Martínez (2020) afirman que, en el país, los principales estados productores son Tabasco, Chiapas, Oaxaca, Guerrero y el mayor de estos es Tabasco, para el cual, este cultivo es el más emblemático. Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021), la superficie sembrada de cacao en este estado es de 34,260.50 ha y 34,176.43 ha cosechadas, aportando más del 60% del volumen de producción nacional con 17,409.92 t, con un valor de producción de 786,669.13 pesos mexicanos.

6.4 Importancia del fruto

Entre 5 a 6 millones de agricultores obtienen sus ingresos del cultivo de cacao y alrededor de 40 a 50 millones de personas depende de este cultivo (Beg et al., 2017), siendo una industria basada en pequeños productores (Wickramasuriya y Dunwell, 2018). Estas cifras reflejan la importancia del cacao en términos de generación de empleos y recursos financieros no derivados del petróleo. A nivel mundial la industria chocolatera ha crecido debido a que este subproducto es el más reconocido por su contribución a la salud, donde, el contenido de flavonoides que aporta a la dieta es de gran importancia para retrasar el desarrollo de ciertos tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares y algunas asociadas con la edad, entre otros beneficios (Cooper et al., 2007; Arévalo-Gardini et al., 2017; Assa et al., 2018).

6.5 Aspectos de inocuidad para comercialización

De acuerdo con Barrezueta-Unda et al. (2017) los diferentes retos del sector cacaotero implican entre otros, los precios variables que el mercado internacional impone, los problemas fitosanitarios como la moniliasis, problemas de organización entre las comunidades productoras y, además, la inocuidad de los productos alimenticios. Varios atributos de la calidad del grano, tanto físicos como químicos, son requeridos por los fabricantes, compradores de cacao y organismos de control para alentar a la comunidad del cacao hacia una producción de mejor calidad (Araujo-Abad et al., 2020). La alta concentración de metales pesados en los granos de cacao amenaza la seguridad alimentaria

y el desarrollo económico, entre estos minerales se encuentra el Cd, un metal traza sin función biológica esencial debido a su alta toxicidad para plantas, animales y humanos, incluso en bajas concentraciones (Arévalo-Gardini et al., 2017; Engbersen et al., 2019; Gil et al., 2022).

6.6 Legislación sobre metales pesados

Anyimah-Ackah et al., 2019 declaran que la Organización Mundial de la Salud (OMS) pidió medidas preventivas debido a la preocupación internacional para el consumo en alimentos que contienen Cd, argón (Ar), plomo (Pb) y mercurio (Hg) ya que son nocivos para la salud humana.

Según el Codex Alimentarius define la contaminación en alimentos por metales pesados como aquellos metales no añadidos por el hombre, presentes en el cacao como resultado de la producción, post cosecha, fabricación, embalaje o como producto de contaminaciones ambientales con potencialidad de presentar riesgos sobre la salud humana (Lanza et al., 2016). Al respecto, diversos organismos están monitoreando las concentraciones de estos en los alimentos a nivel mundial (Anyimah-Ackah et al., 2019). En 2014, la Unión Europea anunció mediante el Reglamento (UE) No. 488/2014, las regulaciones que rigen el chocolate y productos de cacao que contengan niveles excesivos de Cd, siendo este de 0.8 mg kg^{-1} , entrando en vigor el 1 de enero de 2019 (Meter et al., 2019). Actualmente, la Comisión del Codex Alimentarius del Programa Conjunto FAO/OMS sobre Normas Alimentarias estableció niveles máximos para Cd (0.7 mg kg^{-1}) en chocolate y productos derivados (Arévalo-Gardini et al., 2017). De la producción mundial de cacao, los granos de América presentan mayores niveles de metales pesados, especialmente Cd con 1.38 mg kg^{-1} y Pb con 0.06 mg kg^{-1} (Bertoldi et al., 2016). La presencia de estos metales pesados en el suelo y su transferencia a los frutos y los granos, así como, el impacto directo a la seguridad alimentaria y el comercio (Castebianco, 2018) son un foco de atención por las consecuencias en la salud del consumidor. Diversos países han implementado sus normas respecto al tema (Tabla 1).

Tabla 1. Límites de Cd establecidos mundialmente.

País	Norma	Límite	Autor de Referencia
Unión Europea	EC No. 488/2014 (EU, 2014)	Rango de 0.3 a 0.10 mg kg ⁻¹ según el producto	Maddela et al. (2020), Anyimah-Ackah et al. (2019),
Indonesia	La Autoridad de Alimentos y Medicamentos de Indonesia (FDA) Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM)	0.5 mg kg ⁻¹ para manteca de cacao y productos de chocolate 0.1 mg kg ⁻¹ para cacao en polvo y pasta de cacao	Meter et al. (2019), Maddela et al. (2020).
Estado de California en EE. UU.	Acuerdo Industrial Proposición 65 (19/02/2018) el límite máximo establecido para un período 2018-2025	Chocolate y productos con cocoa fue (<65% 0.4 mg kg ⁻¹ , con 65-95% 0.45 mg kg ⁻¹ y >95% 0.96 mg kg ⁻¹)	Meter et al. (2019), Maddela et al. (2020).
Australia y Nueva Zelanda	Norma del Código de Normas Alimentarias de Australia y Nueva Zelanda (ANZFSC, 2000)	0.5 mg kg ⁻¹ Chocolates y productos de cacao	Meter et al. (2019), Maddela et al. (2020).
Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay y Venezuela	El Mercado Común del Sur (MERCOSUR)	0.2 mg kg ⁻¹ Chocolates y productos de cacao con <40% de cacao, 0.4 mg kg ⁻¹ Chocolates y productos de cacao con >40% 0.5 mg kg ⁻¹ Pasta de cacao	Meter et al. (2019), Maddela et al. (2020).
China productos de cacao, chocolate y dulces	La Administración de Drogas y Alimentos de China (CFDA)	0.5 mg kg ⁻¹ productos de cacao, chocolate y dulces	Meter et al. (2019), Maddela et al. (2020), Suhani et al. (2021), Anyimah-Ackah et al. (2019).

Unión Africana	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) 2018	Rango de 0.4 a 1.2 mg kg ⁻¹ según la cantidad de sólidos de cacao en los productos	Maddela et al. (2020).
India	Autoridad de Normas y Seguridad Alimentaria de la India (FSSAI)	Rango 0.05 a 0.2 mg kg ⁻¹ dependiendo el producto	Maddela et al. (2020), Suhani et al. (2021),
Rusia	Federación rusa (SanPin 2.3.2-1078-01)	0.2 mg kg ⁻¹ en Mantequillas con cacao	Maddela et al. (2020).

6.7 Aspectos de los macro y micronutrientes

Las plantas requieren macro y microelementos, sin embargo, hay elementos traza que se acumulan de forma natural. Algunos de los factores que influyen en la acumulación son la especie vegetal, el genotipo, la variedad, factores antropogénicos, así como, depósitos y fuentes naturales. La ingesta de metales pesados perjudica la salud humana (Engbersen et al., 2019; Barraza et al., 2019; Suhani et al., 2021). Para el hombre, los requerimientos macro y microelementos son esenciales para la salud en pequeñas dosis (Tolentino et al., 2019). En la gama de minerales altamente tóxicos, los más importantes son As, Pb, Hg y Cd, ocupando respectivamente el primer, segundo, tercer y séptimo lugar en la lista de prioridades de sustancias peligrosas de la Agencia de Sustancias Tóxicas (2013) y el (ATSDR) Registro de Enfermedades de EE. UU. (Clemens y Ma, 2016).

El cacao en polvo contiene la mayor parte de los elementos esenciales para nuestra dieta, como Ca, Co, Cu, Cr, K y Zn, así mismo, el consumo de chocolate y sus derivados tiene efectos beneficiosos para la salud como la reducción del riesgo de cáncer, hipertensión y diabetes, que se asocian a la presencia de flavonoides y polifenoles (Herreros-Chávez et al., 2019).

6.8 Estado del arte

El estado de arte se presenta en este apartado y resume la información publicada de diferentes trabajos de investigación, los cuales, se han realizado a través de la cadena productiva (chocolate, plantaciones, muestras fermentadas y secas e invernadero), así como, las propiedades físicas de los granos, los diferentes límites de Cd y otros minerales encontrados en distintas regiones productoras de cacao en el mundo (Brasil, Ecuador, África, Colombia, Costa Rica, Perú y Trinidad y Tobago).

Las propiedades físicas (morfológicas) de los alimentos (en este caso los granos de cacao), son importantes al momento de definir y clasificar al grano de cacao como “cacao fino o cacao de fino aroma” (Sánchez et al., 2017; Morales-Morales et al., 2019), además, la caracterización de las variedades agrícolas se basa en sus atributos morfológicos. Las propiedades físicas requeridas al cumplir ciertos parámetros en el diseño de procesamiento, limpieza, clasificación, procesamiento y conservación, embalaje, empaquetado, transporte, secado y forma de distribución (Bart-Plange y Baryeh, 2003; García-Alamilla et al., 2012;

Jaiyeoba et al., 2016; Sandoval et al., 2019). Respecto a calidad, Bart-Plange y Baryeh (2003) analizaron las propiedades físicas de granos de cacao categoría B cultivados en Ghana; en función del contenido de humedad en el rango de 5 %-24 % (wb), el largo, ancho y espesor aumentó de 22.41 a 22.5 mm, 12.2 a 12.86 mm y 7.36 mm respectivamente. Con un contenido de humedad del 8.6 % (wb), el 87 % de los granos tenían largos de 20.0-26.0 mm, el 87 % tenían un ancho entre 10.0 y 14.0 mm y el 95 % tenían espesor de 6.0-10.0 mm. La esfericidad varió de 0.57 y 0.58 con un contenido de humedad del 8.6 % y 24.0 % respectivamente. La masa media de grano fue de 1.11-1.31 g con el 77 % de los granos entre 1.13-1.53 g al 8.6 % (peso húmedo). La masa de 1000 granos y el porcentaje de masa de cáscara aumentaron de 1125 a 1247 g y de 10.7% a 19.6 % respectivamente. La densidad y la porosidad aumentaron de 946 a 991 kg m³ y de 20.58 a 31.59 % respectivamente, la densidad aparente disminuyó de 560 a 505 kg m³. Los ángulos de reposo de llenado y vaciado aumentaron con el aumento del contenido de humedad de 23.7 a 33.8 y de 27.3 a 37.5 respectivamente. El coeficiente de fricción estática de los granos aumentó de 0.20 a 0.25, de 0.45 a 0.60 y de 0.53 a 0.7 para el caucho, acero galvanizado y madera contrachapada respectivamente.

Oyedokun et al. (2011) analizaron muestras obtenidas del Instituto de Nigeria (CRIN), Sede, Ibadán, (14 genotipos - granos fermentados) con el objetivo de evaluar las variaciones fenotípicas de algunos caracteres cuantitativos en los granos de cacao y las características genotípicas, obteniendo valores (medias), para el peso de un grano de 1.09 g, longitud 2.16 cm, ancho 1.20 cm, espesor 0.73 cm, 100 granos 125.26 g, ratio de largo a ancho de grano 1.83, relación de longitud a grosor 3.07, relación ancho/grosor 1.7. Concluyendo que siete (híbridos F3 Amazon) de los catorce genotipos tuvieron mayores dimensiones de grano en comparación con la mayoría de las variedades.

García-Alamilla et al. (2012) analizaron las propiedades físicas de cacao criollo mexicano colectado en la hacienda cacaotera “La joya” en Cunduacán, Tabasco (30 muestras aleatorias y evaluadas durante el proceso de fermentación). Los resultados indicaron el promedio de humedad en un rango de 1.075-0.064 g g⁻¹ en materia seca, el índice de grano fue 1.38-1.48 g y de mazorca 18.03 g, el porcentaje de semillas blancas fue 73.22, la longitud, espesor y amplitud fueron de 24.048-23.64, 14.139-13.710 y 10.085-8.013 mm

respectivamente, la forma elipsoide fue de 1.0364-1.0484, el área superficial de 1006.99-890.48 mm³ y el peso (1000 granos) 2.4418-1.4682 g.

Jaiyeoba et al. (2016) evaluaron la dimensión axial (Largo, Ancho y Espesor) de 4 muestras a diferente humedad de las mazorcas de plantaciones en Nigeria para el aprovechamiento de residuos, determinado el Contenido de humedad (12.45-44.50), Largo (185.9-185.84x10⁻³m), Ancho 78.28-78.38x10⁻³m), Espesor (78.24-78.34x10⁻³m), Diámetro medio geométrico (104.43-104.43x10⁻³m), Esfericidad (0.5619-0.5623) y Área de superficie (34261.03-34326.48 x10⁻⁶m).

En Venezuela, Sandoval et al. (2019) realizaron una investigación para determinar algunas propiedades físicas de granos de cacao fino de primera Trinitario (fermentados y secos) obtenidos (5 kg) de la hacienda La Trinidad, Caracas, Venezuela. Los resultados obtenidos en la forma de grano lo clasificaron como clase E (alargada), los rangos para las dimensiones (mm) fueron: Largo 26.8-20.6, Ancho 15.9-11.3, Espesor 11.4-7.6, Esfericidad 0.74-0.51, Diámetro geométrico 16.1-13.7, Volumen medio (mL) 1.77-1.63, Superficie (mm²) 932.3-587.0, Peso del grano (g) 1.46-1.41, Densidad aparente (g/mL) 0.561-0.542, Densidad del grano (g/mL) 0.994-0.937, Porosidad (fracción vacía) 0.438-0.422.

Sánchez et al. (2017) determinaron las características físicas y químicas en granos de cacao fermentadas y tostadas provenientes de los estados de Aragua, Mérida, Miranda y Zulia en Venezuela; los resultados mostraron que los granos Criollos del estado Zulia presentaron mayor volumen (1.76 cm³), acidez (6.15 mg/g de muestra), pH (5.24) y grasas (66.7 %) en granos tostados, mientras que el mayor índice de grano (1.39 g), cascarilla (19.47 %) y humedad (5,10 %) fue del estado Aragua. La conclusión que se estableció fue que la variabilidad dependía de la variabilidad genética, factores climáticos y técnicas postcosecha.

La composición nutrimental del cacao es extensa y rica gracias a los minerales (macro y microelementos), composición proximal y los compuestos fenólicos, destacando los flavonoides generando un impacto en beneficio a la salud, entre estos, con efectos adversos los metales pesados (Ekpa et al., 1993; Bertoldi et al., 2016; Kruszewski et al., 2018; Dico et al., 2018; Abt y Robin, 2020; Acierno et al., 2020; Anyimah-Ackah et al., 2021). Los metales pesados son un grupo de elementos con diferentes características fisicoquímicas y biológicas de número atómico mayor a 20 con una alta densidad relativa en su forma elemental (≤ 5 g

cm⁻³) clasificados según su función y efecto biológico. Se encuentran presentes en la naturaleza en la corteza terrestre de forma natural y antropogénica, coexisten e interactúan en el suelo, planta y frutos generando un impacto nocivo en la salud (Beltrán y Gómez, 2015; Pineda y Rodríguez, 2015; Salama, 2018; Gui et al., 2020; Xu et al., 2022).

Los estudios han demostrado que la concentración de Cd en el suelo respecto a las áreas de producción de cacao son diferentes con tendencia a ser más altas en las áreas geológicas, así como, en suelos jóvenes como los de América Latina (0.22 y 10.8 mg kg⁻¹) donde la principal fuente de minerales en cacao es probablemente geogénica directamente relacionada con la disponibilidad de este metal para la planta (Chavez et al., 2015; Ramtahal et al., 2015; Arévalo-Gardini et al., 2017; Gramlich et al., 2017; Barraza et al., 2019; Lewis et al., 2018; Argüello et al., 2019; Engbersen et al., 2019; Albarracín et al., 2019; Scaccabarozzi et al., 2020; Maddela et al., 2020; Acierno et al., 2020; Vanderschueren et al., 2021).

En Brasil se realizó un estudio en condiciones de invernadero con semillas de cacao de CCN-51 germinadas y cultivadas en suelo arenoso (pH 4.7) sin adición de Cd (control) y con concentraciones de Cd (0.05 y 0.1 g kg⁻¹ de suelo) en forma de CdCl₂ en macetas de plástico negro (4 L) durante 120 días. El estudio tuvo como objetivo evaluar la toxicidad de Cd en plantas jóvenes y los resultados mostraron que el contenido de Cd aumento en tallo, hoja y especialmente en la raíz en relación con el incremento de la concentración en el suelo, para 0.05 g Cd kg⁻¹ de suelo, el Cd fue de 218 en raíces y 2 35 mg Cd g⁻¹ en hojas. En 0.1 g Cd kg⁻¹ de suelo fue 345 y 388 mg Cd g⁻¹ en raíces y hojas respectivamente (De Araujo et al., 2017).

En Ecuador, en nueve provincias del país productoras de cacao, Romero-Estévez et al. (2019) determinaron la concentración de Cd, Ni y Pb en granos de cacao recolectados según el procedimiento de muestreo ISO 2292:2017 (ISO, 2017) recolectando 9 muestras por provincia de las variedades Blend, Nacional, CCN-51 y la correlación con la absorción de estos metales en diferentes procesos de fermentación y tiempos de secado. Los resultados mostraron que las concentraciones más altas de Cd se observaron en Guayas, Esmeraldas y Los Ríos con 1.715 mg kg⁻¹, 1.249 mg kg⁻¹, y 0.882 mg kg⁻¹, respectivamente, mientras que las concentraciones más altas de níquel (Ni) se encontraron en Esmeraldas, Manabí y Azuay

con 8.528 mg kg^{-1} , 6.033 mg kg^{-1} , y 4.428 mg kg^{-1} respectivamente, y finalmente para Pb las concentraciones más altas fueron en Santo Domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas y Guayas con 1.966 mg kg^{-1} , 1.833 mg kg^{-1} , y 1.750 mg kg^{-1} respectivamente.

Debido al potencial de absorción del Cd en cacao combinado con factores de suelo, Arguello et al. (2019) y Barraza et al. (2019) evaluaron áreas vírgenes y lugares impactados por actividades petroleras en Ecuador de las variedades CCN-51, Nacional, Trinitario y Super-Árbol, su estudio mostró una correlación positiva entre Cd y Zn en tierra vegetal y tejidos de cacao para la variedad CCN-51. Por otro lado, los estudios de Cd y Ni para la variedad Nacional, han mostrado correlaciones y algunas diferencias en algunos parámetros, incluidas las interacciones de Cd con Zn y Ni. Las variedades de cacao mostraron diferentes niveles de oligoelementos arsénico (As), bario (Ba), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), molibdeno (Mo), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V) y zinc (Zn) en cada tejido (relativamente altos en suelos, pero transferencia baja), su contenido mineral está claramente modulado en el campo por las propiedades del suelo y fisiología de las plantas, además del impacto antropogénico.

Vanderschueren et al. (2020) identificaron en los frutos de cacao sin fermentar (variedad Nacional y CCN-51) obtenidas de cuatro diferentes provincias en Ecuador, que el contenido de Cd es mayor en cascarilla, seguidas del grano y por último en el mucílago. En función de las fracciones de peso promedio para cotiledón (0.93) y cascarilla (0.07), el 91 % del Cd total del grano se ubicó en cotiledón y 9 % en cascarilla en granos sin fermentar. Los contenidos de Cd en granos tuvieron una reducción del 15 % disminuyendo por debajo del límite establecido en granos de cacao destinados a la exportación (UE 0.60 mg kg^{-1}), concluyendo que, el proceso de la fermentación puede ser útil para disminuir la concentración y estar dentro de los límites establecidos en normas.

En plantaciones cacaoteras ubicadas en el municipio de Yacopí (Cundinamarca, Colombia) Albarracín et al. (2019) propusieron un modelo predictivo de regresión espacial que calcula los niveles de Cd en granos de cacao relacionando las propiedades químicas edáficas, la ubicación y la profundidad del suelo en función del suelo y hojarasca. En las cuatro plantaciones con características similares se eligieron 12 puntos de colecta, los resultados mostraron que las variables edáficas y foliares están altamente relacionadas con

los contenidos de Cd en granos mostrando una alta variabilidad en profundidades de 30 y 60 cm, los niveles encontrados en suelo fueron de 10.68 y 7.92 mg kg⁻¹ así como, el Cd total y disponible disminuyeron un 18 % y 36 % respectivamente, el Cd promedio en las hojas fue de 71.32 mg kg⁻¹.

Sandoval-Pineda et al. (2020) caracterizaron la estructura de la comunidad de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) en la región de Yacopí, Colombia presentes en la rizosfera de plantas de cacao en dos suelos con baja (B-Cd: 0.1 mg kg⁻¹) y alta (A-Cd: 20.9 mg kg⁻¹) contenido de Cd, A-Cd presentó 18 y 209 veces más Cd-t (cadmio total) y Cd-d (cadmio disponible), respectivamente, que lo encontrado en B-Cd.

En Perú, Arévalo-Gardini et al. (2017) en 70 plantaciones de tres regiones (Amazonas, Centro y Sur) de diferentes genotipos (Híbridos espontáneos, Piura Blanco, Piurano, Cajamarca, CCN51, Nativo Marañón, ICS95, ICS39, Nativo Satipo y Chuncho) determinaron la acumulación de metales pesados en hojas y granos de cacao, los resultados indicaron diferencias en función del genotipo respecto a la acumulación de Cd, menor acumulación de Cd en clones y una importante interacción en Cd y Zn en suelo y planta. Las concentraciones medias de Cd para grano fueron 0.17 a 1.78 µg g⁻¹. El 57 % de todas las muestras recolectadas excedió el límite crítico (0.8 mg kg⁻¹ para Cd).

Cien accesiones que representan los diversos grupos genéticos y poblaciones híbridas en *Theobroma cacao* (L.) obtenidas del Banco Internacional de Germoplasma del Cacao en Trinidad y Tobago fueron evaluadas para los niveles de cadmio en suelo, hoja y grano. Los estudios han encontrado diferencias en el contenido de Cd entre accesiones y entre grupos genéticos (0.17 y 2.31 mg kg⁻¹ respectivamente). El contenido de Cd foliar en todas las accesiones fue más variable (7 veces) que las concentraciones de Cd biodisponible encontradas en el suelo indicando una fuerte influencia genética. La concentración de Cd en los granos fue de 0.17 a 2.31 mg kg⁻¹ indicando una variación entre accesiones de 13 veces. Dentro del grano de cacao, la concentración en el cotiledón fue menos de la mitad que en cascarilla, la evidencia mostró una variabilidad según el genotipo entre 13 % y 81 % (Lewis et al., 2018). En otro estudio igualmente en Trinidad y Tobago se analizaron 45 muestras de granos de cacao fermentados y secos de diferentes áreas de cultivo de cacao con el objetivo

de determinar el contenido de Cd y su distribución en el grano reportando valores de 0.5 a 2.34 $\mu\text{g g}^{-1}$ para cotiledón y de 1.07 a 4.58 $\mu\text{g g}^{-1}$ para cascarilla (Ramtahal et al., 2015).

Furcal-Beriguete y Torres-Morales, (2020), determinaron concentraciones de Cd en suelo, raíz, hoja en grano seco no fermentado de cacao de dos regiones productoras con suelos arcillosos y diferentes altitudes (41 y 477 msnm y 15 a 601 msnm en Costa Rica (40 muestras), la región Sur tiene mayor porcentaje de concentración determinando en raíz 84.21 %, hoja 84.21 %, grano 89.47 % y suelo 15.79 %. En la región Norte los porcentajes fueron en raíz 28.57 %, hoja 38.01 %, grano 33.3 % no detectando Cd en suelo.

Al norte de Honduras, Engbersen et al. (2019) determinaron que la concentración de Cd de los granos de cacao superó el valor 0.8 mg kg^{-1} en muestras del Centro Experimental y Demostrativo de Cacao “Jesús Alfonso Sánchez” (CEDEC-JAS) en un sistema agroforestal con una superficie total de 43 ha y muchas variedades diferentes de cacao cultivadas en combinación con otras 35 especies de árboles, muestreando portainjertos, vástagos, hojas y granos de tres árboles replicados de cada uno de los 20 cultivares de 7 parcelas diferentes. La variación en las concentraciones de Cd en grano mostró una influencia significativa del cultivar y sólo una pequeña parte de esta variación se explica por factores del suelo, mientras que la absorción de Cd ocurrió principalmente durante la translocación de Cd de las partes vegetativas a los frutos. Las concentraciones de Cd de los vástagos estaban estrechamente correlacionadas con el grano, mientras que el Cd en el suelo tenía mayor correlación con las hojas, la relación entre el Cd de la hoja y el grano no mostró dependencia del cultivar.

En Perú, Tolentino et al. (2019) determinaron Cd, Pb, macro y microelementos en cacao de la variedad CCN-51 y nacionales en granos frescos, secos y pasta de cacao (31 muestras respectivamente). Para K fue de 24429.2-12950 ppm tanto el máximo y mínimo valor fue en granos secos. En Zn el rango fue de 90.46-20.75 ppm, el mayor contenido fue en grano seco y el menor en fermentado; el mayor contenido para Mn fue 33.04 ppm en grano seco y el menor fue de 3.78 ppm en grano fermentado; el Cu varió entre 29.02 a 4.07 ppm en grano y pasta respectivamente, en granos fermentados y pasta; el P varió entre 483.24-1.975.54 ppm; el Fe varió entre 40.51 a 14.46 ppm, el mayor contenido de este mineral fue en grano seco y el menor en grano fermentado; el Na en las muestras de granos secos y la pasta de cacao varió entre 42.08-355.75 ppm; el Pb se encontró en mayor nivel en grano

fermentado (3.44 ppm) y el menor contenido en pasta de cacao (0.20 ppm) ambos en la variedad CCN-51; en 25 muestras de granos secos los niveles de Cd fueron inferiores a 0.61 ppm, el mayor nivel fue en grano fresco seco de la variedad Común con 1.20 ppm y el menor fue de 0.05 ppm de la variedad CCN-51.

Oliva et al. (2020) evaluaron 29 plantaciones de cacao en la provincia de Bagua en Perú, analizaron el contenido de Cd en suelo, raíces, hojas y granos de cacao. En el suelo el Cd osciló entre 1.02 y 3.54 mg kg⁻¹, en los árboles de cacao (determinado a partir de raíces, hojas y grano) el Cd varió de 0.49 a 2.53 mg kg⁻¹ mencionando que las cantidades de Cd en las raíces eran hasta cinco veces mayor que los niveles en suelos y 2.85 que en el cotiledón. El contenido promedio de Cd fue 1.6, 2.53, 0.49 y 0.99 mg kg⁻¹ para muestras de raíz, hoja, cascarilla y cotiledón respectivamente. En granos la concentración mínima de Cd fue 0.03 y 0.14 mg kg⁻¹ y máxima de 3.03 y 5.12 mg kg⁻¹ en cascarilla y cotiledón respectivamente. También en Perú, Scaccabarozzi et al. (2020) analizaron el Cd en plantaciones con cuatro climas contrastantes, el contenido de Cd osciló entre 1.1 y 3.2 mg kg⁻¹ los valores medios por región estuvieron por debajo 2.7 mg kg⁻¹. Los resultados fueron significativamente ($p < 0.001$) mayores en sitios elevados y en climas templado y seco. El Cd se correlacionó positivamente con el pH ($r = 0.57$; $p < 0.05$) y fue mayor ($p < 0.001$) en sedimentos aluviales y Leptosoles.

Anyimah-Ackah et al. (2019) realizaron una síntesis de las últimas publicaciones científicas sobre As, Cd, Pb y Hg contenidos en cacao encontrando productos (manteca, licor, cocoa, chocolates y dulces) que superan el máximo de la Unión Europea (0.8 mg kg⁻¹) y China (0.6 mg kg⁻¹). Los resultados permitieron establecer que el procesamiento puede disminuir o incrementar los niveles de dichos minerales, dependiendo diversos factores que inciden en el grano incluido el proceso postcosecha, el método de procesamiento, materias primas, producto, etc.

7. Materiales y Métodos

7.1 Selección de sitios de estudio y muestreo

La selección de sitios de estudio fue representativa del estado de Tabasco y Chiapas. Las muestras fueron obtenidas en el periodo diciembre 2021 a marzo 2022 gracias a la intervención del Sistema Producto Cacao Nacional, el cual proveyó, con la participación de los productores, las muestras de granos lavados y secados, así como, fermentados y secados.

Un total de 51 muestras colectadas de cada uno de los principales municipios productores de cada estado, 36 de Tabasco (15 Comalcalco, 6 Paraíso, 6 Huimanguillo, 4 Cunduacán, 2 Cárdenas, 1 Jalapa y 1 Teapa), 12 de Chiapas (5 Pichucalco, 2 Ostucán, 2 Tecpatán, 1 Salto de Agua, 1 Huixtla y 1 Ignacio Allende) y 3 de Oaxaca (2 Toluquepec y 1 Puerto Escondido) de un kilogramo aproximadamente cada una.

7.2 Análisis de muestras

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Suelos y Plantas y en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la División Académica de Ciencias Agropecuarias (DACA) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, ubicada en el Km. 25 Carretera Villahermosa-Teapa.

7.3 Cuestionario: recopilación de información sobre el manejo del cultivo

Con el muestreo se aplicó un cuestionario a los productores para recopilar información de características específicas de la plantación (Anexo A). En México no existe un mapeo varietal real de los cacaos en las zonas productoras, además de que el promedio de hectáreas por productor es menos de dos ha, por lo que existe un reto enorme en clasificar los tipos de cacao desde el punto de vista genético. La biodiversidad es otra variable que puede influir con la distribución y almacenamiento de Cd en la especie de estudio; información relacionada con la aplicación de insumos en el suelo y los árboles, tales como fungicidas, abonos químicos, orgánicos u otras enmiendas, con el fin de conocer las diferentes labores que realiza el productor y su posible incidencia en la presencia de Cd en las parcelas; así también la georreferenciación para ubicar parámetros como altitud y tipo de suelos.

7.4 Preparación de las muestras

Las muestras de cacao fueron inspeccionadas seleccionando granos limpios, enteros sanos a partir de una muestra compuesta (mezcla de granos diferentes puntos de un lote) proporcionada por el sistema producto cacao realizándose un submuestreo aleatorio de 100 granos (3 repeticiones), los cuales se descascarillaron de forma manual separando cascarilla y cotiledón. Por lo anterior se generaron dos tipos de muestras a partir del muestreo general. El cotiledón y la cascarilla fueron molidas en un molino de café y especias (KRUPS modelo GX4100), el polvo obtenido fue tamizado a través de una malla estándar No. 40 (425 μ m ASTM de 8") y No.20 (850 μ m ASTM de 8") (Montinox "Manufacturado por Montiel inoxidable México").

7.5 Humedad en el grano

Se tomaron en promedio 10 granos enteros de cacao colocándose en el medidor de contenido de humedad (Aqua Boy KPM202, Germany) directamente en la prensa, registrando la humedad.

7.6 Peso promedio del grano

El peso promedio del grano se determinó a partir de la cuantificación aleatoria del peso de 100 granos de cacao fermentado, seco y sano de la muestra, mediante una balanza semi analítica (Ohaus, Scout Pro SP202, China) con exactitud de 0.01 g. El peso registrado se dividió entre 100, obteniendo el peso promedio de un grano (Afoakwa et al., 2014).

7.7 Dimensiones lineales del grano

Una muestra de 60 granos tomados al azar se utilizó para determinar la longitud (L), ancho (W) y grosor (T) de cada grano, el cual, se midió en milímetros a través de un calibrador digital pie de rey (KNOVA, China) de acuerdo con los descrito por Kaushik et al. (2007). El ancho y grosor se midió perpendicularmente al eje mayor (Bart-Plange et al., 2003; Oyedokun et al., 2011; García-Alamilla et al., 2012; Jaiyeoba et al., 2016; Sandoval et al., 2019).

El grado de esfericidad del grano se calculó utilizando la ecuaciones (1) y (2) descritas y usadas por Bart-Plange et al. (2003); Jaiyeoba et al. (2016); Kwino et al. (2017) y Sandoval et al. (2019):

$$\Phi = \left(\frac{WTL}{L}\right)^{1/3} \quad (1)$$

$$\Phi = \left[\frac{B(2L-B)}{L}\right]^{1/3} \quad \text{Donde } B = (WT)^{-5} \quad (2)$$

Diámetro medio geométrico

El diámetro medio geométrico de las muestras se calculó usando la expresión citada por Bart-Plange et al. (2003); García-Alamilla et al. (2012); Jaiyeoba et al. (2016); Sandoval et al. (2019). Donde: D_g es el diámetro medio geométrico (mm).

$$D_g = (WTL)^{1/3} \quad (3)$$

Área de superficie

Se calculó usando la expresión matemática dada por Bart-Plange et al. (2003); García-Alamilla et al. (2012); Jaiyeoba et al. (2016); Sandoval et al. (2019). Donde: S es el área superficial.

$$S = \frac{\pi BL^2}{2L-B} \quad S = (\pi D_g)^2 \quad (4)$$

El área superficial ha sido estimada a partir del D_g a partir de la expresión propuesta por McCabe, Smith y Harriott (Bart-Plange et al., 2003).

$$S = \pi D_g^2 \quad (5)$$

Volumen

El volumen se calculó usando la expresión matemática dada por García-Alamilla et al. (2012):

$$V = \frac{\pi B^2 L^2}{6(2L-B)} \quad (6)$$

7.8 Extracto etéreo

La extracción de grasa se llevó a cabo utilizando la metodología propuesta por la norma deseable “NMX-F-615-NORMEX-2004” Alimentos-determinación de extracto etéreo (método soxhlet)”. Se considero 5 g de polvo de cotiledón y la grasa fue extraída utilizando éter de petróleo durante 18 h de reflujo en el sistema Soxhlet. El porcentaje fue estimado a partir de:

$$\% = (P-p) \times 100 / M \quad (7)$$

La ecuación matemática para determinar el porcentaje de grasa fue la descrita y utilizada en el manual de prácticas de la Unidad de Aprendizaje de Bromatología de la Universidad de Nayarit, México (Rea-Paéz, 2017). Donde P: masa en gramos del matraz de fondo plano con grasa, p: masa en gramos del matraz de fondo plano a peso constante, y M: es la masa en gramos de la muestra.

7.9 Determinación de cadmio, macro y microelementos

De acuerdo con la metodología presentada por Güldas (2018), se pesaron 2.5 g de muestra (polvo tamizado de cotiledón y cascarilla) colocándose en la mufla a 550 °C durante 5 horas. Las cenizas obtenidas se disolvieron con 1 ml de HNO₃ concentrado y 10 ml de agua desionizada. La solución digerida se filtró con papel Whatman No. 42 y afora a 25 ml en agua desionizada. La concentración de Cd, Mg, Fe, K, Zn, Ca, Na, Cu y Mn elementos de las muestras se leyó en un equipo de absorción atómica Perkin Elmer modelo Analisis 100, calibrado con el estándar respectivo. En todos los casos se llevó a cabo por triplicado presentando sus medias y desviación estándar.

7.10 Procesamiento de datos y análisis estadísticos

Se realizó estadística descriptiva para todas las variables evaluadas en los granos de cacao y se aplicó un análisis de componentes principales (ACP). El ACP de las variables de estudio se realizó con las desviaciones normalizadas y por un método de auto escalado por MetaboAnalyst 5.0, un análisis de correlación de Pearson y mapa de análisis de clústeres.

8. Resultados y Discusión

El estudio comprendió tres etapas, la primera de ellas fue determinar las propiedades físicas de los granos, para conocer y comparar con otros granos de cacao producidos en el mundo; la segunda etapa se dirigió al estudio de cadmio, macro y microelementos y su análisis, en ambas etapas se utilizó análisis multivariado; conocer como las características particulares de las muestras estudiadas fue la tercera etapa.

8.1 Propiedades físicas del grano

Entre los indicadores para medir la calidad física de los granos de cacao se encuentra el tamaño y conteo del grano por cada 100 g (Kongor et al., 2016); mientras que otro factor de importancia relevante es la humedad del grano que debe cumplir con un 7 %, debido a que un porcentaje más elevado genera el deterioro del grano por la presencia de microorganismos (hongos) y un valor menor al 6 % afecta al grano al volverse quebradizo (Andrade-Almeida et al., 2019). La Tabla 2, muestra los valores promedio de las muestras respecto a las granos de cacao lavados-secos y fermentados-secos. La evaluación general de todas las muestras en cuanto a mediciones físicas son un indicador de la variabilidad existente entre los granos comercializados, lo cual está asociado a diferentes factores, como son la genética, condiciones edafoclimáticas y manejo postcosecha. La variable humedad del grano es un punto crítico que indicó las muestras que estuvieron por arriba de los límites, lo que las hace susceptibles a la contaminación microbiana.

Tabla 2 Propiedades físicas de granos de cacao en cacaos mexicanos comerciales.

Característica física del grano	Promedio	Máx	Mín	±DE	% CV
Humedad (%)	5.24	9.1	2.4	1.3	24.93
Peso promedio 100 granos (g)	112.96	202.3	71.3	22.30	19.74
Grasa en cotiledón (%)	49.66	75.13	27.34	6.70	13.48
Largo LG (mm)	21.54	25.56	17.19	101.66	8.72
Ancho AG (mm)	12.65	21.27	8.70	1.22	9.64
Espesor EG (mm)	7.34	9.46	5.99	0.73	9.93
Razón LG/EG	2.94	3.69	2.17	0.27	9.94

Fuente propia

La apariencia visual del grano define el cuidado durante el manejo postcosecha (fermentación y secado), impactando en el sabor, lo que es fundamental en un grano de

calidad (Sánchez et al., 2017). Sin embargo, el peso del grano juega un papel importante. En este sentido Álvarez et al. (2007) afirman que hay una relación entre el peso promedio del grano de cacao fermentado y secado con su contenido de cáscara (testa), además, el peso es importante dado que afecta en el rendimiento de grasa. Los resultados mostraron que existe variabilidad (>24 %) en el peso promedio, que tiene diferentes causas, entre ellas, la humedad no es homogénea entre las muestras, la genética y el manejo postcosecha. En cuanto al manejo postcosecha, se tienen muestras que son lavadas-secas y fermentadas-secas, por lo anterior, si el proceso de fermentación no degradó adecuadamente el mucílago, el peso del grano será mayor a que si esa muestra hubiera sido lavada y se refleja en el porcentaje de cascará (testa). También hay que considerar que en grano fermentado las paredes celulares se destruyen exponiendo al grano a factores químicos afectando sus propiedades, entre estas las organolépticas (Vera et al., 2014). En lo que respecta al grano lavado y seco, las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad afectan sus propiedades, entre estas el porcentaje de la humedad determinada por el proceso de secado, factor determinante en la calidad (Andrade-Almeida et al., 2019) y según la norma mexicana NOM-116-SSA1-1994 para granos de cacao la humedad debe ser un máximo de 7.5 %. La variable que menos se vio afectada en el estudio, fue el contenido de grasa con un promedio de 49 % aproximadamente.

Diversos autores han evaluado las dimensiones lineales de los granos de cacao (Tabla 3) en diversos países productores de cacao con variedades comerciales nativas o mejoradas. El peso promedio de grano realizado por Bart-Plange y Baryeh (2003) y Andrade-Almeida (2019) estuvieron por arriba del presente. En el caso de cacaos de América del Sur (ICS, CCN51) son materiales mejorados señalados con altos rendimientos por hectárea y tamaños sobresalientes. De lo reportado en el estudio, cabe señalar que no se trabajó con una variedad genética específica, sino son materiales comerciales con la existencia de materiales criollos como Carmelo y cruza no identificadas. Es importante señalar que dentro de las muestras evaluadas se tienen cacaos lavados y secos, a diferencia de los reportados en la Tabla 3, que corresponden a cacaos fermentados y secos, así también, el valor de humedad como se ha comentado representa un factor crítico en las dimensiones lineales. Así, por ejemplo, Vera et al. (2014) registrarón en muestras fermentadas de 15 clones en Ecuador un peso promedio de 100 granos un valor de 136 g, con contenidos de humedad de 6.49 %, por arriba de los

reportado en el presente estudio, pero también con humedad más elevada. En el mismo sentido, Álvarez et al. (2007) reportó un contenido de humedad entre 4.26-6.37 %, para los genotipos y de 5.17 % para la muestra comercial reportada en la Tabla 3, por lo que la variabilidad es atribuida a este parámetro, mientras que el contenido de grasa reportado en su estudio fue de 54.61-56.07 % para los diferentes genotipos y en la muestra comercial 56.01 %, valores por arriba de los cacaos estudiados en nuestro estudio.

Tabla 3. Propiedades físicas de granos de cacao reportados en otros países.

Autores	Peso promedio (g)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	País
Bart-Plange y Baryeh (2003)	1.23	20.0-26.0	10.0-14.0	6.0-10.0	Ghana
Álvarez et al. (2007)	1.19-1.42	20.6-23.2	12.8-13.5	8.4-10	Venezuela
Oyedokun et al. (2011)	1.09	21.6	12	7.3	Nigeria (Híbridos)
García-Alamilla et al. (2012)	1.12	24.048-23.64	14.139-13.710	10.085-8.013	México (Carmelo)
Andrade-Almeida et al. (2019)	1.24	21.96	12.32	8.19	Ecuador (Nacional)
	1.30	23.39	12.82	9.32	Peru (ICS)
	1.50	22.45	12.79	8.24	Ecuador (CCN51)
	1.41	29.97	13.80	9.78	Peru (CCN51)

Fuente propia.

Las dimensiones lineales del grano de cacao permitieron estimar el diámetro geométrico, esfericidad, área superficial y Volumen que se presentan en la Tabla 4. Al evaluar estas características Oyedokun et al. (2011) afirman que están relacionadas con la variedad del cacao y su morfología muestra índices de calidad, rendimiento, así como, resistencia de las plagas de almacenamiento o susceptibilidad. Particularmente la forma, área de superficie, volumen y tamaño en los granos de cacao dependen de la cantidad de agua almacenada por lo que, a mayor agua contenida, mayores dimensiones (García-Alamilla et al., 2012). Se determina la esfericidad en función de que el grano acerque su forma a una esfera, lo que impacta en la tendencia para rodar en productos agrícolas, esta propiedad es útil especialmente en el diseño de tolvas y en equipos de descascarillado (García-Alamilla et al., 2012; Jaiyeoba et al., 2016). Como se estableció en el apartado de materiales y métodos,

la estimación de propiedades para esfericidad y área superficial se utilizaron dos ecuaciones. Los resultados encontrados en el presente estudio de las dimensiones geométricas estuvieron por arriba en relación con los presentados por Bart-Plange y Baryeh (2003), mientras que con respecto a los valores de García-Alamilla et al. (2012) los datos fueron menores para área superficial (1006.99-890.48 mm³) y volumen (1280.17-873.76 mm³). En el caso de Sandoval et al. (2019) en granos Trinitarios fermentados sus dimensiones geométricas están por encima a nuestros registros, con un diámetro geométrico de 15.9 mm, superficie de área 742.4 mm² y esfericidad 0.61.

Los resultados de cada variable, se infiere, están relacionadas con características muy particulares las cuales conocemos gracias al cuestionario participativo de cada productor correspondiente a las muestras analizadas, al respecto, se observa una densidad de plantación por ha promedio de 614.09 árboles ha⁻¹, una productividad (kg/ha) de 95-649 kg ha⁻¹, una edad promedio de 31 años con replantaciones jóvenes en su mayoría, plantaciones biodiversas casi en su totalidad con un manejo de buenas prácticas y pocos productores utilizan agroquímicos, el origen genético de las muestras en orden ascendente es trinitario, forastero, criollo y clones.

Tabla 4. Dimensiones lineales del grano de cacao de muestras comerciales.

Característica física	Promedio	Máx	Mín	±DE	%CV
Dg (mm)	12.55	15.17	10.66	0.91	7.22
Esfericidad (ec 2)	0.58	0.65	0.50	0.03	4.44
Esfericidad (ec 3)	9.59	11.71	7.73	0.72	7.51
Área superficial (mm ²) (ec 5)	420.23	609.51	306.99	59.70	14.21
Área superficial (mm ²) (ec 6)	498.30	724.04	365.37	71.03	14.25
Volumen (mm ³)	681.39	1195.50	436.77	146.20	21.46

Fuente propia.

La Tabla 5. muestra la correlación entre las variables físicas evaluadas en el presente estudio de muestras comerciales de los tres estados productores (Tabasco, Chiapas, y Oaxaca). El análisis de correlación mostró que el diámetro geométrico, áreas superficiales (ec 1 y 2), largo del grano, razón largo/ancho, mostraron una correlación negativa significativa con respecto al peso promedio, la humedad y en la mayoría de los casos con el

espesor del grano. La esfericidad fue altamente significativa ($p < 0.001$) negativa con respecto al diámetro geométrico, con la humedad, espesor y el ancho del grano, lo cual es de esperarse puesto que la ecuación para el cálculo depende de estas dos últimas dimensiones lineales. En el caso del peso promedio fue altamente significativo ($p < 0.001$) positivo con respecto al ancho del grano, si bien, se hubiera esperado una relación con respecto a la humedad, pero no se presentó. En todos los casos la humedad es la variable crítica de la cual dependen las mediciones geométricas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Tabla 5. Correlación de variables físicas de granos de cacao de estados productores en México (Tabasco, Chiapas y Oaxaca)

PROP. FÍSICAS	Dg (mm)	Área 1 (mm ²)	Área 2 (mm ²)	LG (mm)	Razon LG/EG	PS (g)	Humedad (%)	EG (mm)	B	AG (mm)	Esfericidad 1	Esfericidad 2
Dg (mm)	1											
Área 1 (mm²)	0.81929	1										
Área 2 (mm²)	0.77716	0.98822	1									
LG (mm)	0.76633	0.97886	0.99831	1								
Razon LG/EG	0.77508	0.97464	0.99649	0.99937	1							
PS (g)	-0.18595*	-0.26003**	-0.32025***	-0.32579***	-0.33218***	1						
Humedad (%)	0.32875***	-0.27906***	-0.22084**	-0.19746*	-0.19167*	-0.018422	1					
EG (mm)	-0.018633	-0.42643***	-0.50505***	-0.53395***	-0.52441***	0.10704	-0.13928	1				
B	-0.36722	-0.72581	-0.79167	-0.81658	-0.81362	0.14369	-0.034217	0.87074	1			
AG (mm)	-0.82754	-0.74779	-0.71552	-0.70007	-0.70807	0.26384***	0.33528***	-0.15529	0.29804***	1		
Esfericidad 1	0.54193***	-0.75401	-0.70203	-0.69101	-0.67524	-0.21147**	0.2515**	0.51944***	0.69627	0.41474***	1	
Esfericidad 2	0.56036***	-0.81386	-0.74186	-0.71356	-0.69274	-0.076399	0.35642***	0.35811***	0.5541***	0.51834***	0.92261	1

Dg=Diaméto geométrico; Área 1 (ec 5); Área 2 (ec 6); LG=Largo del grano; Razon LG/EG=Razón Largo/Espesor; PS=Peso promedio de 100 g; EG=Espesor del grano; AG=Ancho del grano; Esfericidad 1 (Ec. 2); Esfericidad 2 (Ec. 3). **P ≤ 0.05 ***, **P ≤ 0.01 ****, **P ≤ 0.001 *****

El análisis de componentes principales explicó el 97.3 % de la variación total observada con los dos primeros componentes (Figura 1. A) entre las muestras de cacao que proceden de los tres estados de estudio (Tabasco, Chiapas, y Oaxaca). El primer componente principal (PC1) explicó el 92.3 % de la variación total, donde el peso de la semilla, el ancho y espesor del grano, la esfericidad 1 y 2, el parámetro B (ver ecuación 3) y la humedad fueron las que presentaron mayor contribución (Tabla 6). Todas las variables significativas presentaron una correlación positiva en este componente.

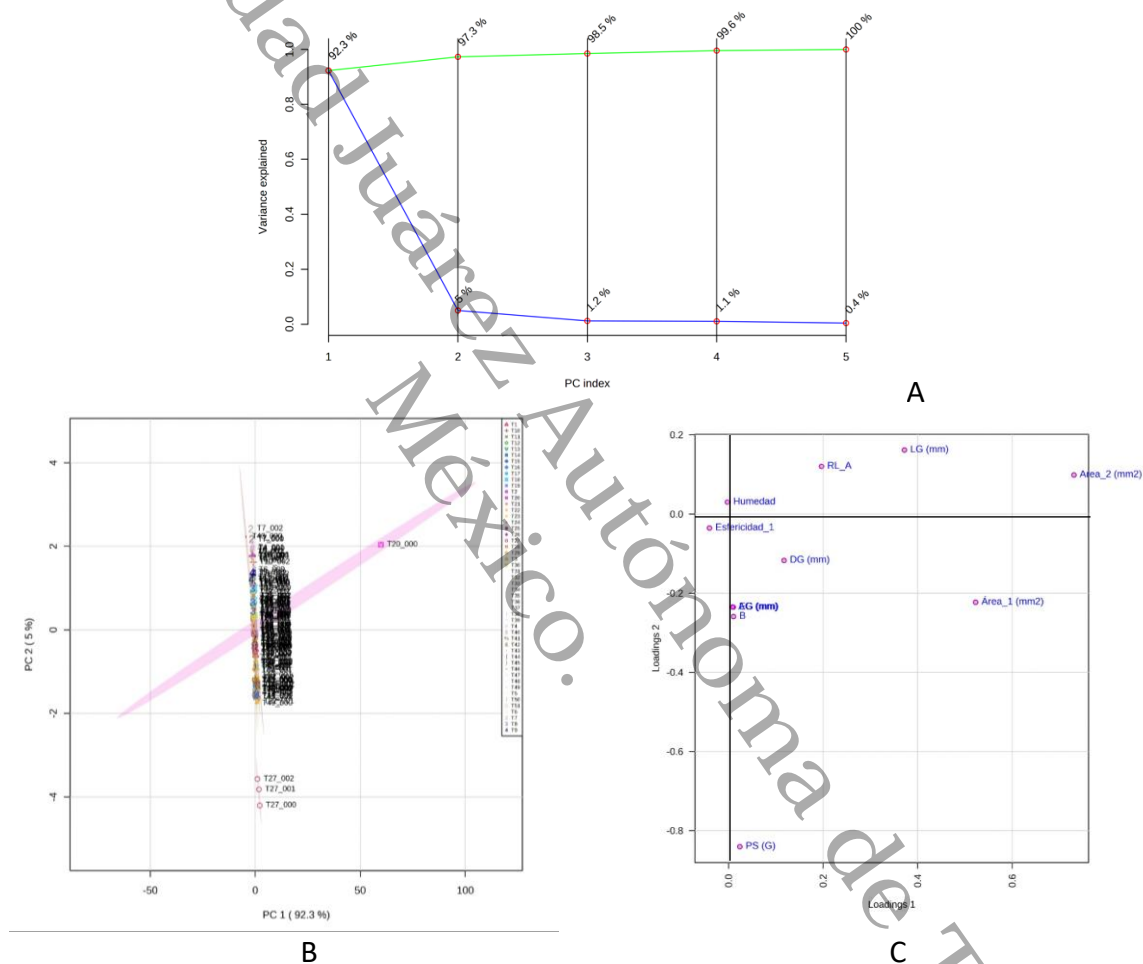


Figura 1. Varianza acumulada (línea verde) e individual (azul) explicada por los componentes principales (A), distribución espacial de puntuaciones (B) y cargas (C) por análisis de componentes principales (ACP) de las muestras de cacaos mexicanos evaluados con respecto a las variables físicas.

El segundo componente principal (CP2) explicó 5 % de la variación total, donde el largo del grano, la razón L/A, el área 1 y la humedad fueron las variables que describieron

esta variación (Tabla 6). De las cuatros variables que describen la correlación en este eje, solo fue negativa la contribución del Área 1 (ec 5).

Tabla 6. Análisis de Componentes Principales de las propiedades físicas del grano

Variables	PC1	PC2	PC3
PS (g)	0.3078*	-0.0656	-0.0347
LG (mm)	-0.0898	0.5313*	-0.1915*
AG (mm)	0.3343*	0.0738	-0.0299
EG (mm)	0.3211*	-0.1976	0.1868
Razon LG/EG	-0.0586	0.6535*	0.3981*
DG (mm)	0.2595	0.0937	0.1474
Esfericidad 1	0.4544*	-0.0233	0.1545
Área 1 (mm ²)	0.1188	-0.2110*	0.0275
B	0.3346*	-0.0635	0.1108
Esfericidad 2	0.3989*	0.1028	0.1844
Área 2 (mm ²)	-0.1315	-0.0268	-0.0052
Humedad %	0.3204*	0.4155*	-0.8216

Variables de mayor contribución para cada componente principal (*).

PS: peso de grano, LG: largo de grano, AG: ancho de grano, EG: espesor de grano, RL_A: Razón largo/espesor del grano, DG: Diámetro geométrico de grano.

La figura 1 B presenta la distribución espacial de las muestras de cacao mostrando el peso de los dos componentes principales obtenido de las desviaciones normalizadas. El gráfico de puntaje mostró la presencia de tres grupos, dos de ellos formados únicamente por una muestra (Huimanguillo y Cunduacan), mientras que en un grupo se integró a todas las demás. Las variables que explicaron el comportamiento de acuerdo con el gráfico de cargas (Figura 1 C) fueron esfericidad (ec 2) para un grupo, humedad, razón LG/EG, largo del grano y área 1 (ec 6) para un segundo grupo y las demás variables para el tercero. Oyedokun et al. (2011) en el estudio de ACP encontraron que se formaron cuatro grupos y el factor determinante fue el peso de grano, la correlación más alta fue entre el ancho y grosor de grano, rasgo característico para la agrupación. De igual forma, Jaiyeoba et al. (2016) observaron una relación inversa en la relación entre el contenido de humedad y las dimensiones axiales, el diámetro geométrico, la esfericidad y la superficie.

8.2 Contenido de cadmio, macro y microminerales

Los reportes científicos muestran avances importantes sobre la bioacumulación de Cd en granos de cacao. El Cd se caracteriza como un elemento con alta movilidad y tener propiedades intermedias entre el Zn y el Hg (Florida-Rofner, 2021), es así como, a mayor Zn en el suelo disponible menor es la absorción de Cd en plantas (Abt y Robin, 2020), esta es una correlación que con frecuencia se observa en el contenido mineral en cacao. El contenido de Cd en granos de cacao se ha relacionado directamente a tres aspectos importantes, los factores y propiedades del suelo, la planta y sistema de cultivo, así como, el procesamiento (Chávez et al., 2016; Gramlich et al., 2017; Anyimah-Ackah et al., 2019 Argüello et al., 2019), y por consecuencia los niveles de Cd contenidos en el producto final como el chocolate derivan de la cantidad de sólidos de grano que tenga el producto (Vanderschueren et al., 2021). Al respecto, cuando hablamos de cuestiones de suelo en comparación a otras partes del mundo, América Latina posee niveles más altos de metales pesados contenidos en granos de cacao, especialmente Cd y Pb atribuyendo este hecho a las cuestiones geológicas, dado que, son suelos jóvenes ricos en minerales sin dejar de mencionar otras características que hace que los minerales estén biodisponibles como pH, materia orgánica, conductividad eléctrica (Bertoldi et al., 2016; Arévalo-Gardini et al., 2017; Argüello et al., 2019). En cuestiones de nutrición, manejo y especie en *Theobroma cacao* (L). diversos autores han mencionado que influyen en el contenido de Cd en los granos (Chávez et al., 2016; Maddela et al., 2020; Suhani et al., 2021). Respecto a los procesos postcosecha Vanderschueren et al. (2020), mencionan que en función de los cambios en pH durante el proceso de fermentación disminuye potencialmente la cantidad final del Cd almacenado en el cotiledón. La Tabla 7 muestra el contenido promedio (mg kg^{-1}) de Cd obtenido de las muestras analizadas para cotiledón y cascarilla de los granos de cacao analizados. Los valores para K, Ca, Zn y Fe fueron más altos (Tabla 8) que los niveles promedios encontrados por Anyimah-Ackah et al. (2021). Por otro lado, los reportes de Bertoldi et al. (2016), en un análisis a granos de cacao de cinco diferentes áreas (este y oeste de África, Asia, centro y sur de América) mostraron concentraciones de macro y microelementos que los ubican por arriba de nuestro estudio (Tabla 8). Lanza et al. (2016) en Venezuela, analizaron granos de cacao (híbrido y porcelana) con concentración inferior a los encontrados en el estudio realizado (Fe 35.3-890, Cu 6.0-89.4 mg/kg^{-1}). En Perú, Tolentino et al. (2019) analizaron 31 muestras en grano de cacao

encontrando niveles más elevados que nuestro estudio para Ca, Cu y menor contenido para K, Na, Cu, Fe, Zn y Mn. En indonesia fueron analizados granos fermentados de tres clones por Assa et al. (2018) mostrando resultados para Cu (PBC 123 de 19.343 mg kg⁻¹, BR 25 de 10.391 mg kg⁻¹ y MCC 02 de 18.594 mg kg⁻¹) valores menores a los nuestros (26.80 mg kg⁻¹). En Perú, Rosales-Huamani et al. (2020) reportaron para Zn una media de 79.03 mg kg⁻¹ en granos de CCN-51 y 69.72 mg/kg⁻¹ en Criollo, valores mayores a nuestros datos.

Tabla 7. Contenido mineral en cotiledón y cascarilla del grano de cacao

Mineral	Cotiledón (mg kg ⁻¹)					Cascarilla (mg kg ⁻¹)				
	Promedio	Máx	Mín	±DE	%CV	Promedio	Máx	Mín	±DE	%CV
Cd	0.46	1.33	0.20	0.23	50.11	0.87	3.09	0.36	0.55	63.40
K	1135.24	1994.00	823.00	212.84	18.75	2051.52	3853.00	25.68	987.59	48.14
Na	482.18	1002.00	108.00	184.85	38.34	168.09	1653.00	29.00	238.66	141.98
Ca	62.96	154.00	28.00	30.10	47.80	161.06	378.00	22.00	81.71	50.73
Mg	379.39	904.00	265.00	90.35	23.82	613.31	1411.00	16.00	262.91	42.87
Cu	8.45	53.60	2.80	6.89	81.49	18.35	35.80	5.20	7.11	38.71
Mn	17.29	38.20	10.90	5.29	30.59	29.75	64.40	14.30	12.71	42.71
Fe	39.67	425.00	16.10	55.67	140.34	171.67	455.00	19.20	104.64	60.95
Zn	18.25	121.00	9.50	15.75	86.30	31.65	151.00	13.00	22.98	72.60

Tabla 8. Valores de macro y microelementos reportados en literatura

Autores	Cd	K	Na	Ca	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn
mg kg ⁻¹									
Lanza et al. (2016)	0.95- 2.09					4.87- 21.36		5.13- 34.26	
Tolentino et al. (2019)		12950- 24429.2		12550- 31420.8	33.04	29.02- 4.07		40.51- 14.46	90.46
		1714.58- 29429.17	42.08- 355.75				3.78		20.75
Anyimah-Ackah et al. (2021)		12000- 145000	10-31.7	1130- 11730	3390- 3830	20.1-24	21.4- 35.4	65.5- 183	39.4- 73.4

Fuente propia.

Bertoldi et al. (2016) reportaron niveles de Cd en granos de cacao a las concentraciones que se reportan en el presente estudio (1.32 mg kg⁻¹), evaluados en cinco áreas diferentes (0.092-1.38 mg kg⁻¹), siendo los niveles más altos en granos provenientes de centro y sur América. Por otro lado, Lanza et al. (2016) reportaron para las variedades de cacao estudiadas en Santa Bárbara del Zulia, en Venezuela un intervalo entre 0.95-2.09 mg kg⁻¹, lo que los ubica por arriba del promedio de Cd reportado en el estudio presente. Assa

et al. (2018) en sus estudios con granos fermentados de tres clones de cacao (PBC 123, BR 25 y MCC 02) reportaron 0.05 mg kg^{-1} en cotiledón y 0.10 mg kg^{-1} en cascarilla en Sahar Cocoa Village (SCV), Indonesia, lo cual representa niveles de concentración bastante bajos comparados con otros reportes científicos; y más tarde Mohamed et al. (2019) reportaron concentraciones de Cd de 0.25 mg kg^{-1} en granos de cacao provenientes de pequeños productores en Malasia, lo que indica que en esta región los niveles se encuentran por debajo de los reportados en otras zonas del mundo. Rosales-Huamani et al. (2020) en Perú, reportaron una media de 0.96 mg kg^{-1} de Cd en granos de cacao criollo y CCN-51. En Perú Tolentino et al. (2019) observaron que 25 de 31 muestras estaban por debajo de los límites internacionales y su rango determinado fue de $0.05\text{-}1.20 \text{ mg kg}^{-1}$. En Perú también, Oliva et al. (2020) evaluaron plantaciones de cacao, las concentraciones de Cd en suelo oscilaron de 1.02 y 3.54 mg kg^{-1} , el Cd dentro de los árboles de cacao medidos a partir de raíces, hojas, testa y cotiledón osciló entre 0.49 mg kg^{-1} hasta 2.53 mg kg^{-1} , los árboles de cacao presentaron variabilidad de Cd del suelo a sus tejidos, con cantidades de Cd mayor en raíces que en el suelo y 2.85 veces mayores en el cotiledón. Los datos obtenidos respecto a los niveles de Cd en cotiledón y cascarilla promedios fueron de 0.46 mg kg^{-1} en un rango de $0.2\text{-}1.33 \text{ mg kg}^{-1}$ y 0.82 mg kg^{-1} en un rango de 0.38 mg kg^{-1} a 2.5 mg kg^{-1} respectivamente, estas cifras son coincidentes para los países productores de América incluidos los valores obtenidos para México en nuestro estudio. En Ecuador, Romero-Estévez et al. (2019) determinaron que el 33.3 % de las muestras fue superior a 0.8 mg kg^{-1} y no existió correlación entre el contenido de Cd, Ni y Pb en las muestras analizadas; de igual forma en Ecuador Arguello et al. (2019), determinaron que la concentración de Cd en cotiledón fue 0.90 mg kg^{-1} debido al potencial de absorción del Cd en cacao, este valor fue mayor a nuestro promedio. Un estudio realizado en Ecuador por Vanderschueren et al. (2020) en grano lavado y seco (no fermentado), registro un contenido de Cd de hasta 0.78 mg kg^{-1} , afirmando que, estos niveles son disminuidos en un factor de 1.3 al fermentarse. En Honduras, Engbersen et al. (2019) registraron concentraciones de Cd en granos de cacao sobre el valor 0.8 mg kg^{-1} por dos o más niveles. Para granos, De Oliveira et al. (2020) determinaron un contenido de $0.022\text{-}0.050 \text{ mg kg}^{-1}$ con muestras de Ecuador, en África se obtuvo un rango de $0.037\text{-}1.04 \text{ mg kg}^{-1}$ y para Brasil $0.022\text{-}2.53 \text{ mg kg}^{-1}$ todos estos niveles fueron menores a nuestros valores evaluados. Gil et al. (2022) en Colombia, determinaron en granos de la región un

promedio de 0.40 mg kg^{-1} de Cd. Para Perú Zug et al. (2019) determinaron cifras alarmantes en granos lavados y secos registrando niveles de hasta 12.56 mg kg^{-1} sugiriendo que esto se debe al contenido de Cd en el suelo, el uso de fertilizantes y la vegetación alrededor de los árboles de muestra. De Araújo et al. (2017) afirman que el aumento de las concentraciones de Cd en el suelo impacta en la absorción, acumulación y distribución de macro y micronutrientes en la planta de cacao y por lo tanto se infiere que se reflejaran en el contenido en el grano; esta afirmación tiene sentido cuando se observan resultados como el de Lewis et al. (2018), donde, se describen correlaciones significativas entre hoja y grano de Cd con Mn. Por otro lado, investigaciones de Chávez et al. (2015) y Albarracín et al. (2019), han determinado de forma específica una correlación entre Cd y Zn en suelo, así también en la bioacumulación en el grano como función del suelo de forma positiva. La correlación entre Cd y Zn es controvertida, debido que los estudios reportan tanto sinergismo como antagonismo, así también con P y As (Arévalo-Gardini et al., 2017; Argüello et al., 2019). Estas interacciones son mostradas específicamente en granos de cacao principalmente para Cd con Ca, Mg, Mn y Zn los cuales se correlacionan significativamente (Lewis et al., 2018). En la Tablas 8 y 9 se observan las correlaciones de macro y microelementos contenidos en los granos de cacao analizados. Estas correlaciones han sido estudiadas, tal es el caso de Anymah-Ackah et al. (2021) donde, a través del análisis de correlación de Pearson ($p < 0.05$) se determinaron cinco categorías significativas de interacción entre los elementos en los granos de cacao en función de su dirección y magnitud de correlación; el primer grupo formado por Ca, Cr, Fe, Mo, K, Sc, Se, Ti, V y Zn constituyen el grupo de elementos benéficos que se correlacionan positivamente entre sí, el segundo grupo Sc, Ti, V, Cr, Fe, Zn y Se mostraron una correlación positiva con elementos tóxicos, el Ca y U se ubicaron en el tercer grupo con correlación negativa de elementos benéficos con elementos tóxicos reforzando la sospecha de que el U es un mimético del Ca, el cuarto grupo mostro que el S no tiene una correlación significativa, positiva o negativa, con ningún otro elemento y el quinto grupo formado por Zr, Sr, U, Th, Pb, Au y Hg son los elementos tóxicos que se correlacionaron positivamente. Nuestros resultados mostraron que el Cd mostró una correlación en cotiledón con cinco de los minerales evaluados (Mn, Ca, Na, K, Mg) y en todos los casos fue positiva, mientras que la cascarilla se correlaciono con cuatro minerales de forma también positiva (K, Mg, Na, Fe). Sin embargo, a pesar de los resultados reportados

en la revisión previa, no se encontró correlación con respecto a Zn (Tabla 10) en cotiledón, no así, en cascarilla (Tabla 9), donde se encontró una correlación positiva alta significativamente ($p < 0.001$)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Tabla 9. Análisis de correlación cotiledón

Cotiledón	Cd	Mn	Ca	Na	K	Mg	Fe	Cu	Zn
Cd	1								
Mn	0.36923***	1							
Ca	0.25895**	0.23364**	1						
Na	0.43948***	0.46916***	0.40958***	1					
K	0.37685***	0.54364***	0.37055***	0.58673***	1				
Mg	0.31014***	0.41478***	0.6546	0.5024***	0.65461***	1			
Fe	-0.1487	-0.3132	-0.1551	-0.2064	-0.2754	-0.2624	1		
Cu	0.09468	0.15847	-0.1185	-0.1202	0.06606	-0.0084	0.23506**	1	
Zn	-0.0958	0.00741	0.00035	0.17153*	0.16515*	0.14528	0.32273***	0.53169***	1

P ≤ 0.05 *, P ≤ 0.01 **, P ≤ 0.001 ***

Tabla 10. Análisis de correlación cascarilla

Cascarilla	Ca	K	Mg	Na	Fe	Cu	MN	Cd	Zn
Ca	1								
K	0.4033***	1							
Mg	0.3809***	0.76871	1						
Na	-0.13261	0.17198*	-0.16694	1					
Fe	-0.10076	0.11469	-0.080853	0.78503	1				
Cu	0.27521***	0.49968***	0.53371***	0.48778***	0.53361***	1			
Mn	0.23199**	0.56245***	0.51918***	0.59798***	0.6478	0.85842	1		
Cd	0.13549	0.58332***	0.52758***	0.36386***	0.27795***	0.67173	0.66293	1	
Zn	0.18017*	0.39513***	0.57328***	0.26456***	0.26976***	0.67059	0.7348	0.59399***	1

P ≤ 0.05 *, P ≤ 0.01, P ≤ 0.001*****

La Figura 2 describe el comportamiento de las variables de Cd, macro y microelementos en el cotiledón a través del análisis de componente principales (ACP), donde los dos primeros componentes principales explican el 56.9 % de la variación total observada. El primer componente (PC1) explicó el 37.5 % de la variación total siendo el Zn, Cu y Fe las de mayor contribución; mientras que el segundo componente (CP2) explicó 19.4 % de la variación total donde el K, Mg, Na, Mn, Ca y Cd fueron las variables que describieron esta variación.

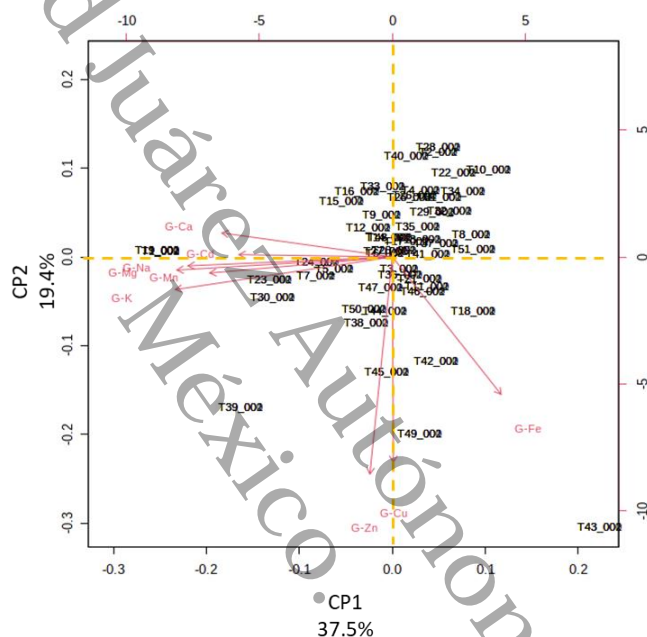


Figura 2. Biplot del Análisis de Componentes Principales (ACP) para las variables de minerales en el cotiledón.

La cascarilla del grano es rica en macronutrientes (proteínas, carbohidratos, lípidos) y micronutrientes (vitaminas y minerales), así como, fibra dietaría; si bien el contenido de elementos esenciales es alto, se registra de igual forma un alto contenido de minerales tóxicos entre los cuales destaca el Cd (Briones et al., 2020; Barišić et al., 2022). El análisis realizado por Ramtahal et al. (2015) demostró una correlación positiva y significativa ($P < 0.05$) de 0.63 entre las concentraciones de Cd del cacao fermentado y seco en cotiledón (Vanderschueren et al., 2019).

La Figura 3 describe el comportamiento de las variables de macro y microelementos en la cascarilla y ACP explicó el 73.4 % de la variación total observada con los dos primeros componentes. El primer componente principal (PC1) explicó el 50.8 % de la variación total siendo el Na, Fe, Mn y Cu las de mayor contribución; mientras que el segundo componente (CP2) explicó 22.6 % de la variación total donde el Mg, K, Ca, Cd y Zn fueron las variables que describieron esta variación.

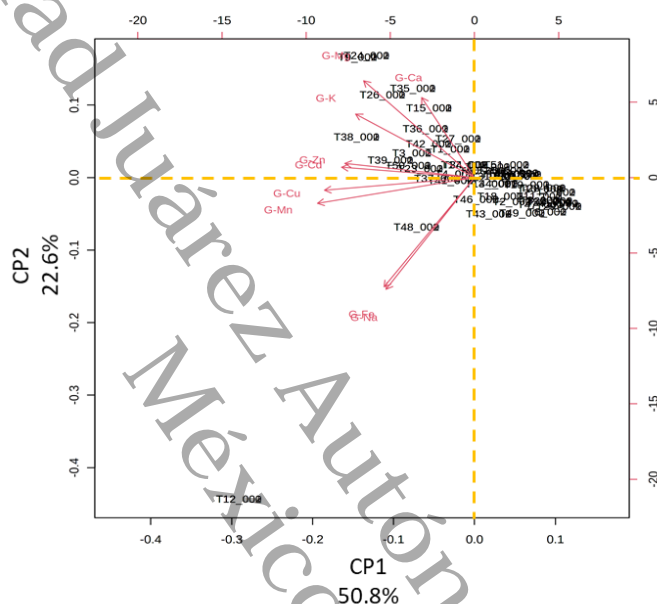


Figura 3. Análisis de componentes principales cascarilla

En las figuras 2 y 3 se observa el agrupamiento de los macro y microelementos en los granos de cacao analizados. En este sentido, Tolentino et al. (2019) presentaron para el ACP 3 agrupamientos, dos de ellos con una correlación negativa con Ca (Ca1 grano lavado y Ca2 grano fermentado) en granos de cacao lo que responde a factores tales como el suelo, clima y variedad; al igual que el Ca el K tuvo mayor concentración en grano lavado, el resto de los minerales evaluados tuvieron menos influencia en la variabilidad de las respuestas. Las muestras que destacaron en la variabilidad de las respuestas e influyeron en los PCA fueron en granos fermentados; en lo que respecta a Cd el CP1 mostro el 99 % de este mineral en las muestras en granos lavados. El mismo comportamiento mostraron estas variables en el estudio reportado por Bertoldi et al. (2016), donde, el elemento con mayor nivel registrado

fue el K seguido del P, Mg y Ca lo cual coincide con la literatura y diversos estudios; en el caso del análisis de ACP los dos primeros componentes mostraron el 56 % de la variabilidad registrando una diferencia geográfica (Este y Oeste de África, Asia, Centro y sur de América) respecto al contenido mineral en muestras de granos. Acierno et al. (2020) reportaron en las primeras dos dimensiones de su análisis de componentes principales (muestras de granos de diferentes países y sus respectivos chocolates), donde, PC1 mostro una correlación significativa (coeficiente de correlación de Pearson = 0.65) entre los granos de cacao y los chocolates.

8.3 Datos particulares de las muestras evaluadas

Los resultados del formulario aplicado y respuesta que dieron los productores se muestran en la figura 4. Esto implica una diversidad de aspectos a considerar para poder correlacionar los datos cuantitativos que dio el análisis de multivariado. En todos los casos, existe escasez de certificación y el manejo de buenas prácticas culturales predomina. No existe un conceso sobre material genético, que se refleja en la poca respuesta en la pregunta correspondiente. La proporción entre el material fermentado y lavado prácticamente es equivalente. En cuanto a tamaño, las respuestas solo confirman lo que sucede con la producción mundial, es decir, el cacao se produce en unidades pequeñas de producción, con densidad promedio de 614 plantas por hectárea, rendimiento bajos de 450 kg y con edades avanzadas.

La Figura 5 muestra las diferencias en concentración de Cd entre el cotiledón y cascarilla. Los resultados confirman lo descrito en el apartado anterior, demostrando que la bioacumulación de este mineral en la región de la cascarilla. Los tres picos máximos que se muestran en la cascarilla en cuanto a concentración (izquierda a derecha) corresponden a fermentado, lavado y fermentado. La nomenclatura de las muestras en las iniciales indica el estado, por ejemplo, T de Tabasco, C de Chiapas y O de Oaxaca. Tres muestras rebasan los límites permisibles (0.8 mg/kg) en el cotiledón, y en la concentración en la cascarilla de muchas muestras también están por arriba. Sin embargo, la cascarilla no se utiliza para la elaboración de licor o chocolate.

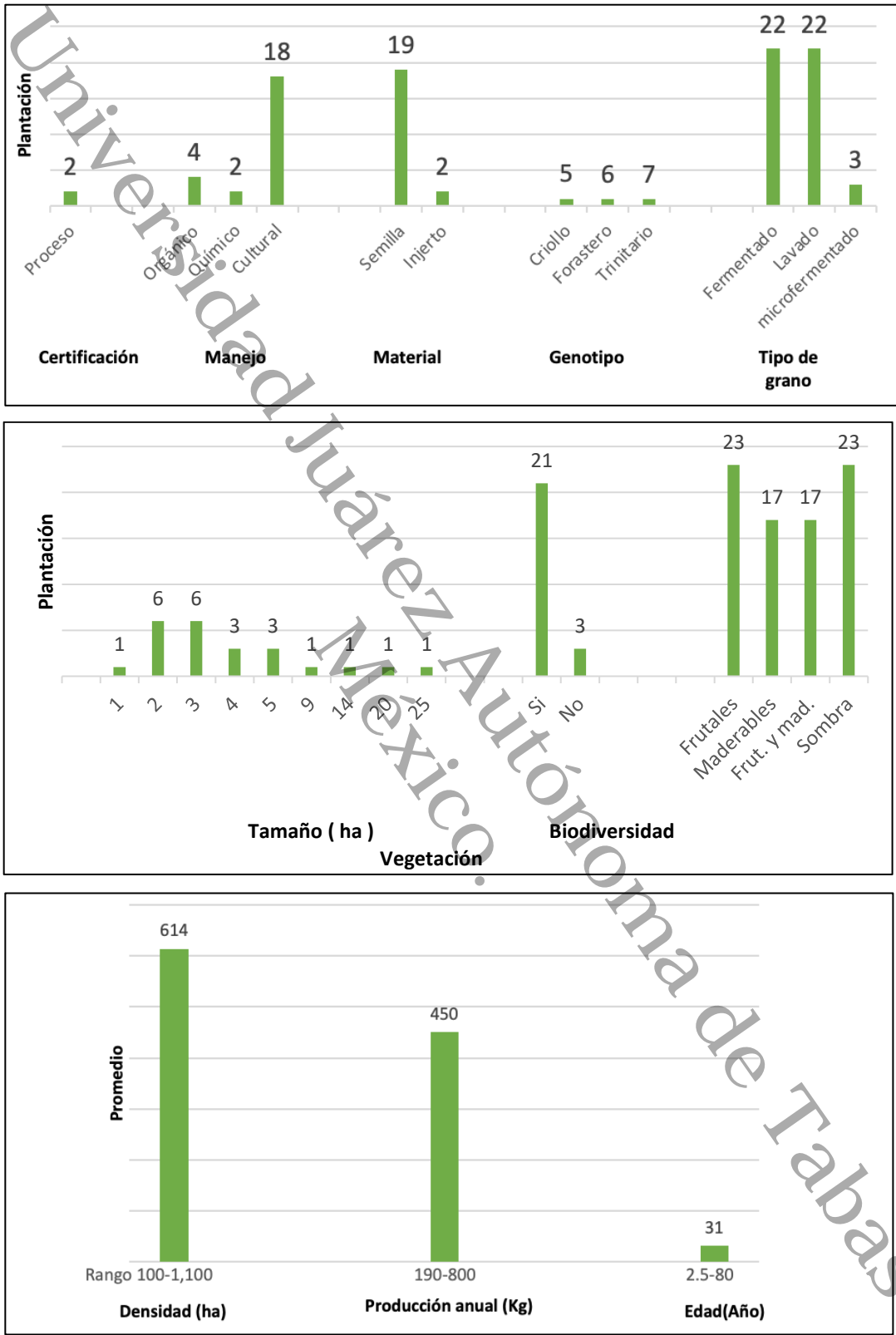


Figura 4. Manejo y características de la plantación

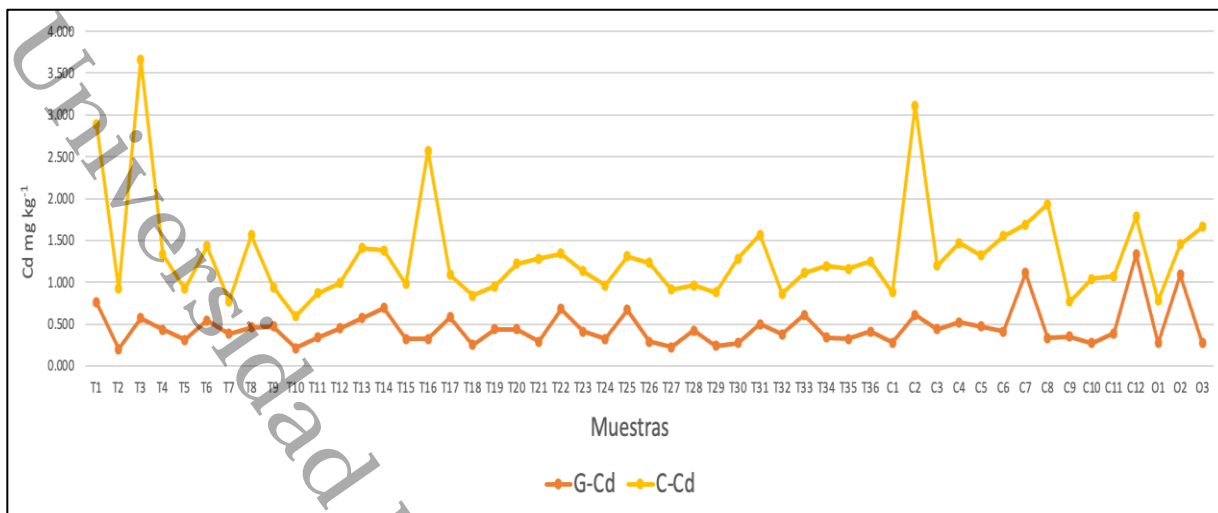


Figura 5. Comportamiento del contenido de Cadmio en cotiledón (G-Cd) y en cáscarilla (C-Cd).

A nivel estado, se presenta los resultados en las Figura 6 y 7, donde se aprecia que Tabasco presenta el menor nivel promedio de Cd, comparado con Chiapas y Oaxaca (Figura 6). Cabe destacar que estas muestras son de lugares que tienen manejo orgánico, el cual pudiera estar asociado a los niveles asociados al reciclar materia orgánica y estar concentrando este mineral en el suelo y por ende ser bioacumulado en los granos de cacao. Por otro lado, del muestreo total de 52, solo tres muestras corresponden a Oaxaca y la desviación como se puede apreciar es la más alta en el estudio, por lo que se requiere visitar la zona y realizar un estudio de las condiciones del cultivo. Por otro lado, Chiapas también presenta una desviación alta, el número de muestras fue de 12, y en Tabasco donde se aprecia la menor desviación el universo de muestreo fue de 36. Por lo que la desviación puede estar asociada al situación geográfica.

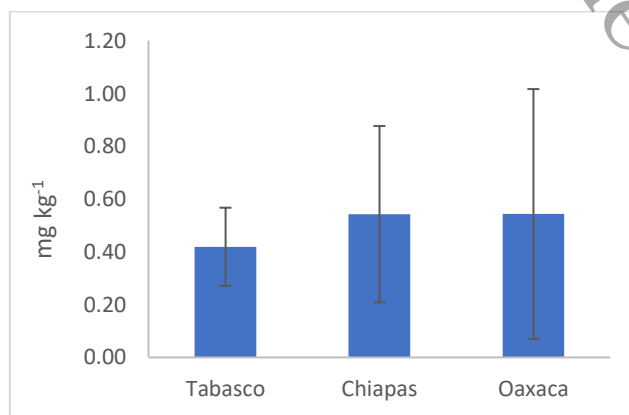


Figura 6. Contenido mineral de Cd entre los tres Estados productores de cacao.



Figura 7. Contenido mineral de Cd, macro y microelementos de las muestras de los estados de Tabasco (A), Chiapas (B) y Oaxaca (C).

El contenido de minerales varía en función de la región de cultivo, tipo de suelo y manejo. La distribución mineral en el total de muestras en el presente estudio estuvo en el orden de K>Na>Mg>Ca>Fe>Zn>Mn>Cu para el caso del cotiledón y K>Mg>Fe>Na>Ca>Zn>Mn>Cu para el caso de la cascarilla. Esta distribución varía en función del estado productor, como se aprecia también en la Figura 8.6. en cualquier caso, el Cu fue el mineral que presentó la menor concentración, mientras que Fe y Zn son los que muestran mayor diferencia entre los estados en cuanto a niveles de concentración.

Como se mencionó en los antecedentes, autores como Tolentino et al. (2019), De Oliveira et al. (2020) y Palma et al. (2021) mencionan los beneficios de estos minerales por su capacidad antioxidante y funcionalidad, lo que complementaria con respecto a otras sustancias presentes en el cacao como son los flavonoides y las metilxantinas. Pero también implicaría estudios específicos para poder conocer la sinergia entre los minerales y las otras sustancias que proporcionan estos efectos. Asociado con ello, la diversidad de suelos, por lo que la trazabilidad es fundamental con estudios integrados entre suelo, planta y fruto.

9. Conclusión

El peso del grano fue la variable cuantitativa que presentó significancia, las otras mediciones como largo, ancho y espesor de grano de forma individual no presentaron significancia, sin embargo, combinadas en las expresiones de área superficial y volumen fueron significativas. La humedad es un parámetro crítico en los granos de cacao secos, sin embargo, no mostró una significancia en las mediciones físicas-geométricas.

El contenido promedio de Cd encontrado en el cotiledón en las muestras de los estados de Tabasco, Chiapas y Oaxaca no supera el límite internacional. El estudio confirmó que la cascarilla es la parte del grano donde se presenta mayor bioacumulación de cadmio, con niveles mayores a los límites permitidos. No se encontró evidencia de la existencia de una correlación entre el Cd y Zn para el cotiledón, sin embargo, esta correlación es altamente significativa positiva entre el Cd y Zn en la cascarilla. Los estudios mostraron una correlación positiva entre el Cd y los elementos Mn, Ca, Na, K, Mg y K, Mg, Na, Fe en cotiledón y cascarilla respectivamente.

El estudio no permitió encontrar en las muestras evaluadas diferenciación geográfica a partir del análisis multivariado con componentes principales. Un análisis cuidadoso de un dendograma y de mapas de calor es necesario.

10. Referencias bibliográficas

Abt, E., Robin, L. P. (2020). Perspective on cadmium and lead in cocoa and chocolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 13008-13015. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.9b08295>

Acierno, V., de Jonge, L., van Ruth, S. (2020). Sniffing out cocoa bean traits that persist in chocolates by PTR-MS, ICP-MS and IR-MS. *Food Research International*, 133, 109212. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109212>

Afoakwa, E. O., Budu A. S., Mensah-Brown H., Takrama J. F., Akomanyi E. 2014. Changes in Biochemical and Physico-chemical Qualities during Drying of Pulp Preconditioned and Fermented Cocoa (*Theobroma cacao*) Beans. *Journal of Nutritional Health & Food Science*, 2(3): 1-8. <http://dx.doi.org/10.15226/jnhfs.2014.00121>

Akesson, A., Barregard, L., Bergdahl, I. A., Nordberg, G. F., Nordberg, M., Skerfving, S. (2014). Non-renal effects and risk assessment of environmental cadmium exposure. *Environmental Health Perspectives*, 122(5), 431-438. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307110>

Albarraçín, H. S. R., Contreras, A. E. D., Henao, M. C. (2019). Spatial regression modeling of soils with high cadmium content in a cocoa producing area of Central Colombia. *Geoderma Regional*, 16, e00214. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00214>

Álvarez, Clímaco., Pérez, Evelina., Lares, Mary C. (2007). Caracterización física y química de almendras de cacao fermentadas, secas y tostadas cultivadas en la región de Cuyagua, estado Aragua. *Agronomía Tropical*, 57(4), 249-256. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2007000400001&lng=es&tlng=es.

Andrade-Almeida, J., Rivera-García, J., Chire-Fajardo, G. C., Ureña-Peralta, M. O. (2019). Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao *Theobroma cacao* L. de Ecuador y Perú. *Enfoque UTE*, 10(4), 1-12. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.462>

Anyimah-Ackah, Isaac, W., Ofori, Herman E., Lutterodt, Godfred Darko, Exposures and risks of arsenic, cadmium, lead, and mercury in cocoa beans and cocoa-based foods: a systematic review. (2019). *Food Quality and Safety*, 3(1), 1-8 <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy025>

Anyimah-Ackah, E., Ofori, I. W., Lutterodt, H. E., Darko, G. (2021). Health Benefit: Risk Assessment of Trace and Essential Elements Found in Cocoa Beans and Derived Products. *Chemistry Africa*, 4(2), 299-312. <https://doi.org/10.1007/s42250-020-00214-8>

AOAC. 2000. Official methods of analysis. En línea: AOAC (<http://img.21food.cn/img/biaozhun/20100108/177/11285282.pdf>, 24 abril 2016)

Araujo-Abad, L. S., Villamarín O. A., Tapia, W., (2020). Verificación del método analítico de espectroscopía de absorción atómica con horno de grafito para la cuantificación de cadmio en almendra de cacao (*Theobroma cacao*). *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 31 (1), 56-70. DOI: <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.04>

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*, 605-606, 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>.

Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, 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*, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>

Assa, A., Noor, A., Yunus, M. R., Djide, M. (2018). Heavy metal concentrations in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). *Journal of Physics: Conference Series*, 979, 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/979/1/012011>.

Barišić, V., Kerovec, D., Flanjak, I., Jozinović, A., Babić, J., Lončarić, Z., Ačkar, Đ. (2022). Effect of high-voltage electrical discharge treatment on multi-element content in cocoa shell and chocolates with cocoa shell. *LWT- Food Science and Technology*, 155, 112944. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112944>

Barraza, F., Moore, R. E., Rehkämper, M., Schreck, E., Lefeuvre, G., Kreissig, K., Maurice, L. (2019). Fraccionamiento de isótopos de cadmio en los sistemas suelo-cacao de Ecuador: un estudio de campo piloto. *Avances RSC*, 9 (58), 34011-34022. DOI: 10.1039/C9RA05516A

Barrezueta-Unda, S., Carpio, E. P., Sarmiento, R. J. (2017). Características del Comercio de cacao a nivel intermediario en la provincia de El Oro-Ecuador. *European Scientific Journal*, 13(16), 273. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n16p273>

Bart-Plange, A. and Baryeh, E.A. (2003). The physical properties of Category B cocoa beans. *Journal of Food Engineering*, 60, 219–227.

Beg, M. S., Ahmad, S., Jan, K., Bashir, K. (2017). Status, supply chain and processing of cocoa-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.007>

Beltrán-Pineda, M. E., Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 12(2), 172-197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>

Bertoldi, D., Barbero, A., Camin, F., Caligiani, A., Larcher, R. (2016). Multielement fingerprinting and geographic traceability of *Theobroma cacao* L. beans and cocoa products. *Food Control*, 65, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.013>

Castebianco, J. A. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *La granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 21–35. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>.

Castro, A. V., de Almeida, A. A. F., Pirovani, C. P., Reis, G. S., Almeida, N. M., Mangabeira, P. A. (2015). Morphological, biochemical, molecular and ultrastructural changes induced by Cd toxicity in seedlings of *Theobroma cacao* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115, 174-186.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.003>
- Chávez, E., He, Z. L., Stofella, 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>
- Chávez, E., He, Z. L., Stofella, P. J., Mylavarapu, R., Li, Y., Baligar, V. C. (2016). Evaluation of soil amendments as a remediation alternative for cadmium-contaminated soils under cacao plantations. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17571-17580. DOI 10.1007/s11356-016-6931-7
- Clemens, S., Ma, J. F. (2016). Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology*, 67(1), 489-512. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043015-112301
- Cooper, K. A., Donovan, J. L., Waterhouse, A. L., Williamson, G. (2007). Cacao y salud: una década de investigación. *British Journal of Nutrition*, 99(1), 1-11. DOI: 10.1017/S0007114507795296
- Codex Alimentarius Commission, (2012). Discussion paper on ochratoxin A in cocoa. Joint FAO/WHO Food Standards Program, FAO, Rome (ftp://ftp.fao.org/codex/meetings/cccf/cccf6/cf06_15e.pdf).
- DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C., Ramalho, J. C. (2018). Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(21), 5264-5274. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>
- De Araújo, R. P., de Almeida, A. A. F., Pereira, L. S., Mangabeira, P. A., Souza, J. O., Pirovani, C. P., Baligar, V. C. (2017). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.006>
- De Oliveira, A. P.F., Milani, R. F., Efraim, P., Morgano, M. A., & Tfouni, S. A. V. (2021). Cd y Pb en granos de cacao: Ocurrencia y efectos del procesamiento del chocolate. *Control de Alimentos*, 119, 107455. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107455>
- Dico, G. M. L., Galvano, F., Dugo, G., D'ascenzi, C., Macaluso, A., Vella, A., Ferrantelli, V. (2018). Toxic metal levels in cocoa powder and chocolate by ICP-MS method after microwave-assisted digestion. *Food Chemistry*, 245, 1163-1168. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.052>
- European Commission (2004). Assessment of the dietary exposure to arsenic, cadmium, lead and mercury of the population of the EU Member States: SCOOP, Scientific Cooperation on Questions Relating to Food: task 3.2.11: final report 2004.
- FAO/WHO. (2014). Proposed draft maximum levels for cadmium in chocolate and cocoa-derived products. The 9th session of the Codex Committee on Contaminants in Foods, New Dehli, 16-20 March 2015. CX/CF 15/9/6. Agenda Item 6.

Furcal-Beriguete, P., Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(1), 122-137.

<https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>

Ekpa, O., Akpan, A. A., Udo, A. E. (1993). Industrially important parameters and mineral composition of cocoa: A comparative study of cocoa pod husks and beans from plantations in south-eastern Nigeria. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 61(1), 47-50. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740610108>

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*, 660–670, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>

FAO. (2021). Statics plataform of the Food and Agriculture Organization. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>

Florida-Rofner, N. (2021). Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 34(2), 117-130. <http://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>.

García-Alamilla, P., González-Lauck, V. W., De La Cruz-Lázaro, E., Lagunes-Gálvez, L. M., García-Alamilla, R. (2012). Description and physical properties of Mexican criollo cacao during post-harvest processing. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(1), 58-65.

García-Briones, A., PicoPico, B. Jaimez, R., (2021). La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción. *Novasinergia*. 4(2). 152-172. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.10>

García, L., Angulo Castro, F., Hernández Amasifuen, A. D., Corazon Guivin, M. A., Alburquerque Vásquez, J., Guerrero Abad, J. C., Oliva, M. (2021). Global studies of cadmium in relation to *Theobroma cacao*: A bibliometric analysis from Scopus (1996-2020). *Scientia Agropecuaria* 12 (4). 611-623. DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.065>

Gil, J. P., López-Zuleta, S., Quiroga-Mateus, R. Y., Benavides-Eraza, J., Chaali, N., Bravo, D. (2022). Cadmium distribution in soils, soil litter and cacao beans: a case study from Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 2455-2476. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03299-x>

Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Paniagua, J. C., Armengot, L., Schneider, M., Schulin, R. (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of The Total Environment*, 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>

Gui R Y, Hu Y Y, Li Q, Zhuang S Y. (2020). Effect of cultivation time on soil heavy metal accumulation and bioavailability in *Phyllostachys praecox* stands. *Pedosphere*. 30(6). 810–816. DOI:10.1016/S1002-0160(20)60033-9

Güldas, A., Zeyveli, M., Kaya, S. y Altuğ, M. (2018). Untersuchung der rheologischen und mechanischen Eigenschaften von holzmehlverstärktem Polypropylen.

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 49 (1), 73-88.
<https://doi.org/10.1002/mawe.201600714>

Herreros-Chavez, L., Cervera, M. L., Morales-Rubio, A. (2019). Direct determination by portable ED-XRF of mineral profile in cocoa powder samples. *Food Chemistry*, 278, 373-379. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.065>

Jaiyeoba, K., Jekayinfa, S. O., Olaniran, J. A., Oloyede, C. T., Ogunlade, C. A., Oke, A. M. (2016). Moisture-dependent physical properties of cocoa (*Theobroma cacao*) pods. *The International Journal of Organic Agriculture Research and Development*, 13, 40-46.

Katz, D. L., Doughty, K., Ali, A. (2011). Cocoa and chocolate in human health and disease. *Antioxidants & Redox Signaling*, 15(10), 2779-2811. DOI: 10.1089/ars.2010.3697

Kongor, J. E., Hinneh, M., Van de Walle, D., Afoakwa, E. O., Boeckx, P., Dewettinck, K. (2016). Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile — A review. *Food Research International*, 82, 44-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>

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

Lanza, J. G., Churión, P. C., Liendo, N. J., López, V. H. (2016). Evaluación del contenido de metales pesados en cacao (teobroma cacao l.) de santa bárbara del Zulia, Venezuela. *Saber*, 28(1), 106-115. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S131501622016000100011&lng=es&tlng=es.

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*, 640, 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>

López, M., Rivero, G. (2017). Características germinativas de semillas de *Theobroma cacao* L. (*Malvaceae*) "cacao". *Arnaldoa*, 24(2), 609–618. <http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24212>.

Maddela, N. R., Kakarla, D., García, L. C., Chakraborty, S., Venkateswarlu, K., Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of the Total Environment*, 720, 137645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>

Martínez, R. M., Martínez, M. F. R. (2020). Variables que impiden incrementar las exportaciones de cacao en grano del estado de Tabasco. *Cimexus*, 15(2), 63-81. <https://doi.org/10.33110/cimexus150203>

McLaughlin, M. J., Smolders, E., Zhao, F. J., Grant, C., Montalvo, D. (2021). Managing cadmium in agricultural systems. *Advances in Agronomy*, 166, 1-129. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.10.004>

Meter, A., Atkinson R.J., Laliberte B. (2019). *Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe. Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación*. Bioversity International, Roma. 1–83. <https://hdl.handle.net/10568/102354>

Moore, R. E., Ullah, I., de Oliveira, V. H., Hammond, S. J., Strekopytov, S., Tibbett, M., 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), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0292-6>

Morales-Morales, A. E., Andueza-Noh, R. H., Márquez-Quiroz, C., Benavides-Mendoza, A., Tun-Suarez, J. M., González-Moreno, A., Alvarado-López, C. J. (2019). Morphological characterization of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds from the Yucatan Peninsula. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18), 463-475. DOI: 10.19136/era.a6n18.2171

Nair, K.P., (2021). Tree Crops. Harvesting Cash from the World's Important Cash Crop. Springer, 1, 153-210. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62140-7>

Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., Leiva, S. (2020). Cadmium Uptake in Native Cacao Trees in Agricultural Lands of Bagua, Peru. *Agronomy*, 10(10), 1551. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10101551>

Oyedokun, A.V., Omoloye A.A., Adewale B.D., Adeigbe O.O. (2011). Phenotypic variability and diversity analysis of bean traits of some cocoa hybrids in Nigeria. *Asian Journal of Agricultural Sciences*. 3(2): 127–131.

Palma V. H.J., Intriago F. F. G., Andrade A. V. V., Gorozabel M. W. A., Zambrano S. M. J., (2021). determinación de los niveles de cadmio en el beneficio de la almendra de cacao con diferentes concentraciones de salmuera. *Revista Pertinencia Académica*, 5(1), 86-96. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4796595>

Pineda, M. E. B., Rodríguez, A. M. G. (2015). Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación, *I3+*, 2(2), 82-112. <https://doi.org/10.24267/23462329.113>

Rea-Páez H. (2017). Manual de Prácticas de la Unidad de Aprendizaje de Bromatología. ECORFAN, 1, 18-23

Ramtahal, G., Yen, I. C., Bekele, I., Wilson, L., Maharaj, K., Sukha, B. (2015). Implications of distribution of cadmium between the nibs and testa of cocoa beans on its marketability and food safety assessment. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(5), 731-736. <https://doi.org/10.3920/QAS2013.0388>

Romero-Estévez, D., Yáñez-Jácome, G. S., Simbaña-Farinango, K., Navarrete, H. (2019). Content and the relationship between cadmium, nickel, and lead concentrations in Ecuadorian cocoa beans from nine provinces. *Food Control*, 106, 106750. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106750>

Salama, A. K., (2018). Health risk assessment of heavy metals content in cocoa and chocolate products sold in Saudi Arabia. *Toxin Reviews*, 38(4), 1-10. DOI: 10.1080/15569543.2018.1471090

Sánchez, R. E., García, P., Dugarte, S., Mendoza, D., Rivas-Echeverría, C. (2017). Características físico-químicas de granos de cacao de los estados Aragua, Mérida, Miranda y Zulia de la República Bolivariana de Venezuela. *Conocimiento Libre y Licenciamiento (CLIC)*, (15).

<https://convite.cenditel.gob.ve/revistacliv/index.php/revistacliv/article/view/878>

Sandoval, A. J., Barreiro, J. A., De Sousa, A., Valera, D., Müller, A. J. (2019). Determination of the physical properties of fermented and dried Venezuelan Trinitario cocoa beans (*Theobroma cacao*). *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 42(2), 50-56. <https://doi.org/10.22209/rt.v42n2a01>

Sandoval-Pineda, J. F., Pérez-Moneada, U. A., Rodríguez, A., Torres-Rojas, E. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biológica Colombiana*, 25(3), 333-344.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n3.78746>

Scaccabarozzi, D., Castillo, L., Aromatisi, A., Milne, L., Bullon Castillo, A., Muñoz-Rojas, M. (2020). Soil, Site, and Management Factors Affecting Cadmium Concentrations in Cacao-Growing Soils. *Agronomy*, 10(6), 806. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10060806>

Schaeffer, L.R., Mendenhall W., Ott R.L. (1986). *Elementos de Muestreo*. Grupo Editorial Iberoamericana, México, D.F.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). *Datos preliminares de producción agrícola, Tabasco*. <https://www.gob.mx/siap>

Suhani, I., Sahab, S., Srivastava, V., Singh, R. P. (2021). Impact of cadmium pollution on food safety and human health. *Current Opinion in Toxicology*, 27, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.04.004>

Tadeo-Sánchez, J. M., Tolentino-Martínez, J. M. (2020). El cacao Grijalva de Tabasco: dinámicas socio territoriales en torno a su producción. *Estudios sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(56). <https://doi.org/10.24836/es.v30i56.1002>

Tolentino, M. E., Camasca, P., Peláez, P. P. (2019). Macro and microelements, lead, cadmium, functional compounds, antioxidant capacity in fresh, dry cocoa beans and cocoa paste. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 521-530. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2019.04.09

Valero, C. B., Hernández, M. B. (2011). Pozol, popo, champurrado. <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num4/art41/index.html>

Vanderschueren, R., De Mesmaeker, V., Mounicou, S., Isaure, M. P., Doelsch, E., Montalvo, D., Smolders, E. (2020). The impact of fermentation on the distribution of cadmium in cacao beans. *Food Research International*, 127, 108743. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108743>

Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products:

Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of the Total Environment*, 781, 146779. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146779

Vera Chang, J. F., Vallejo Torres, C., Párraga Morán, D. E., Macías Véliz, J., Ramos Remache, R., Morales Rodríguez, W. (2015). Atributos físicos-químicos y sensoriales de las almendras de quince clones de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia Y Tecnología*, 7(2), 21–34. <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i2.139>

Vera, J., Vallejo, Ch., Párraga, D., Morales, W., Macías, J., y Ramos, R. (2014). Atributos físicos-químicos y sensoriales de las Almendras de quince clones de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 21-34. DOI: <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i2.139>

Wickramasuriya, A. M., Dunwell, J. M. (2018). Cacao biotechnology: current status and future prospects. *Plant Biotechnology Journal*, 16(1), 4-17. <https://doi.org/10.1111/pbi.12848>

Xu, J., Hu, C., Wang, M., Zhao, Z., Zhao, X., Cao, L., Cai, X. (2022). Changeable effects of coexisting heavy metals on transfer of cadmium from soils to wheat grains. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127182>

Zarrillo, S., Gaikwad, N., Lanaud, C., Powis, T., Viot, C., Lesur, I., Valdez, F. (2018). The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. *Nature Ecology & Evolution*, 2(12), 1879-1888. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0697-x>

11. Anexos

Anexo A. Cuestionario para recopilación de información

Descripción del productor, asociación, cooperativa, etc	
1	Nombre del productor
2	Indicar si es cacao lavado o fermentado
3	Dirección (Geofrenciación)
4	Datos de contacto (Dirección completa de acuerdo al INE y número de teléfono)
Descripción de la finca, parcela, etc.	
5	Tamaño de la finca o parcela
6	Densidad de arboles de cacao por hectárea
7	Productividad (kg de granos de cacao seco/ha)
8	Edad promedio de los arboles
9	Tipo de prácticas de cultivo
10	Arboles de sombra permanente (si/o), ¿ Cuales ?
11	Que tipo de frutales o maderables hay en la plantación
12	Certificación
13	Uso de fertilizantes, pesticidas. (si/no) ¿ Cuáles?
Origen genéticos de la muestra y propagación	
14	Nombre local o asignado
15	Origen genético dominante
16	Si es un curece, especifique (madre x padre)
17	¿El material fue plantado por semillas, injertos u otra técnica de propagación?