

Distribución del contenido de cadmio en el suelo en fincas productoras de cacao de San
Vicente de Chucuri, Dpto. de Santander.

Manuel Julián Carvajal Ramírez

Trabajo de Grado para Optar el título de Biólogo

Director

Nelson Rodríguez López

D. Sc. Fisiología Vegetal

Codirector

Miquel González Meler

PhD, University of Barcelona

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Biología

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Le agradezco a Dios por todos estos años, por guiarme en el buen camino y darme fuerzas para seguir adelante y no quedarme en los problemas que se presentaban; a mi nona, a mis padres y sobre todo a mi mamá que con todo el esfuerzo y dedicación logro sacar a un buen profesional, a mis hermanos que son lo mejor que he tenido en mi vida y los quiero con toda el alma, a mis primos Edgar y especialmente Carolina que me guiaron y me dieron buenos consejos durante mi estancia en la universidad, a mis amigos de la universidad que estuvieron durante todo mi desarrollo profesional y estaban en todos los momento buenos y malos.

Agradecimientos

Le agradezco a mi profesor Nelson Rodríguez, por brindarme su conocimiento en todo mi desarrollo profesional; también a la Doctora Silvia Barrera, una profesional en todo sentido de la palabra, muchas gracias por brindarme su apoyo en todo momento y compartirme su conocimiento profesional y a mis compañeros del grupo de investigación GIEFIVET (Juan Diego, Sebastián, David, Mayra, Jesús, Sergio, Paula, Carlos V, Carlos R, José)

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco referencial	18
2.1 Origen y contenido de Cd en los suelos.....	18
2.2 Absorción y tolerancia al Cd en las plantas.	19
2.3 Distribución del Cd en los órganos de las plantas del cacao	19
3. Método.	22
3.1 Área de estudio	22
3.1.1. Caracterización de la cobertura terrestre utilizando sistemas de información geográfica	23
3.1.2 Muestreo del suelo	25
3.1.3 Caracterización fisicoquímica de suelo	25
3.1.4 Cuantificación del contenido total y disponible de Cd en el suelo	26
3.1.5 Análisis estadístico de los datos.....	26
4. Resultados.....	27
4.1 Caracterización fisicoquímica del suelo en las tres profundidades	27

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CADMIO EN EL SUELO

7

4.2 Contenido total y disponible de Cd en el suelo.....	33
4.3 Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la disponibilidad de Cd.....	38
5. Discusión.....	41
6. Conclusiones	46
Referencias bibliográficas.....	47
Apéndices.....	56

Lista de Tablas

Tabla 1. Contenido de Cd en los órganos de la planta de cacao en diferentes plantaciones en Latinoamérica.	21
Tabla 2. pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes del suelo en la profundidad de 0-15 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.	29
Tabla 3. pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes del suelo en la profundidad de 15-30 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.	30
Tabla 4. pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes del suelo en la profundidad de 30-45 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.	31
Tabla 5. Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo en la profundidad de 0-15 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.	31
Tabla 6. Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo en la profundidad de 15-30 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.	32
Tabla 7. Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo en la profundidad de 30-45 cm de 12 fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.	33

Tabla 8. Contenido de Cd total en tres profundidades, 0-15, 15-30 y 30-45 cm de 12 fincas cacaoteras del municipio de San Vicente de Chucurí.....	35
Tabla 9. Contenido de Cd total y disponible en 12 fincas cacaoteras del municipio de San Vicente de Chucurí.....	38
Tabla 10. Coeficientes de correlación de Spearman entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y el contenido disponible de Cd en la profundidad de 0-15 cm, en las 12 fincas cacaoteras evaluadas.	39
Tabla 11. Índice de Moran del contenido disponible de Cd y las propiedades fisicoquímicas en la profundidad de 0-15 cm en el municipio de San Vicente de Chucuri.....	40

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación espacial del municipio de San Vicente de Chucurí en el departamento de Santander. Fuente propia (2019).	22
Figura 2. Mapa de cobertura vegetal y localización de las fincas cacaoteras en el área de muestreo en el municipio de San Vicente de Chucuri, Santander.	24
Figura 3. Localización de las 12 fincas cacaoteras y variación en el contenido de total y disponible de Cd en el área de estudio. Ver los valores de concentración de Cd total y disponible en la Tabla 9.	37
Figura 4. Efecto de las propiedades fisicoquímicas del suelo sobre la disponibilidad de Cd en la profundidad de 0-15 cm en las fincas cacaoteras de San Vicente de Chucuri	40

Lista de Apéndices

Apéndice A. Zona de estudio y muestreo de suelo en un cultivo de cacao en el municipio de San Vicente de Chucuri	56
Apéndice B. Muestras de suelos para análisis fisicoquímicos en el laboratorio de suelos de la Universidad Industrial de Santander.....	56
Apéndice C. pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes en las tres profundidades evaluadas en las fincas cacaoteras del municipio de San Vicente de Chucuri.	57
Apéndice D. Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura en las tres profundidades evaluadas en las fincas cacaoteras del municipio de San Vicente de Chucuri.	58
Apéndice E. Mapa geológico de San Vicente de Chucuri mostrando la ubicación espacial de las 12 fincas evaluadas.	61

RESUMEN

TITULO: Distribución del contenido de cadmio en el suelo en fincas productoras de cacao de San Vicente de Chucuri, Dpto. de Santander.

AUTOR: MANUEL JULIAN CARVAJAL RAMIREZ**

PALABRAS CLAVE: Disponibilidad de Cd, *Theobroma cacao L.*, condiciones edáficas.

La presencia de cadmio (Cd) en el suelo en sistemas agroforestales con cacao puede provenir de fuentes naturales o antropogénicas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el contenido de Cd y su distribución en fincas cacaoteras de San Vicente de Chucurí, Santander. Las muestras de suelo fueron tomadas de 0-15, 15-30, 30-45 cm de profundidad, en 12 fincas cacaoteras de la zona. Tres puntos fueron escogidos de forma aleatoria por finca, dos muestras por punto, a 50 y 150 cm de la base del árbol, totalizando 72 muestras. La concentración total de Cd fue determinada usando el método de digestión ácida, mientras que la concentración disponible de Cd fue determinada mediante extracción con agentes complejantes EDTA-CaCl-DTPA. La cuantificación del Cd se realizó por espectrofotometría de absorción atómica de llama directa aire-acetileno y horno de grafito. Un análisis de Kruskal-Wallis (SigmaPlot 11.0) fue realizado para comparar el contenido total de Cd entre las tres profundidades y la disponibilidad de Cd entre fincas, de 0-15 cm. Se realizó una correlación de Spearman y un análisis de regresión (R studio) para evaluar los efectos fisicoquímicos sobre la disponibilidad de Cd en el suelo y el índice de Moran para evaluar la autocorrelación espacial entre las muestras usando el programa Arcgis 10.6. Las fincas con mayor disponibilidad de Cd en el suelo fueron F12, F2 y F1 con 46,36, 12,42, y 7,99 mg kg⁻¹, respectivamente. El %C, capacidad de intercambio catiónico, %N, materia orgánica y contenido de Zn, son los parámetros que más influyen sobre la disponibilidad de Cd en el suelo (78,47 %), según el modelo de regresión. En conclusión, las fincas F12, F2 y F1 reportaron concentraciones de Cd disponible en el suelo, superiores a 3 mg kg⁻¹, valor crítico para suelos agrícolas según la normativa No 488/2014 de la Unión Europea.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Biología. Director: Nelson Facundo Rodríguez López, D. Sc. Fisiología Vegetal

ABSTRACT

TITLE: Distribution of cadmium in soil at cocoa farms in San Vicente de Chucuri, Santander.

AUTHOR: MANUEL JULIAN CARVAJAL RAMIREZ**

KEYWORDS: Cd availability, *Theobroma cacao L*, edaphic conditions.

DESCRIPTION:

Cadmium (Cd) in agroforestry systems with cocoa can come from natural or anthropogenic sources. The aim of this work was to evaluate Cd levels and its distribution in cocoa farms in San Vicente de Chucuri municipality in Santander. Soil samples were taken from 0-15, 15-30 and 30-45 cm in 12 cocoa farms in this region. Three points were chosen randomly by farm, two soil samples were collected per point (50 and 150 cm from the cocoa tree) totalizing 72 samples. Total level of Cd was determined using acid digestion while available Cd was determined by EDTA-CaCl-DTPA extraction. Total and available Cd levels were determined through atomic absorption spectroscopy and graphite furnace. We used Kruskal-Wallis analysis (SigmaPlot 11.0) to evaluate total levels of Cd along soil profile and available levels of Cd among cocoa farms at 0-15 cm. Spearman correlation and regression analysis were performed (R studio) to evaluate the edaphic condition on available level of Cd in soil. Morgan index was used to assess spatial autocorrelation among samples (Arcgis 10.6). Farms with higher available levels of Cd were F12, F2 and F1 with 46.36, 12.42, and 7.99 mg kg⁻¹, respectively. Carbon and nitrogen percentage, organic matter, cationic exchange capacity and Zn level were the most important parameters affecting available Cd in soil (78.47 %), according to regression model. In conclusion, F12, F2 and F1 farms showed concentrations of available Cd higher than 3.00 mg kg⁻¹, this is a critical value to agricultural soils according to normative No 488/2014 from Europe Union.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ciencias. Escuela de Biología. Director: Nelson Facundo Rodríguez López, D. Sc. Plant physiology

Introducción

El cadmio (Cd) es un elemento potencialmente tóxico para los seres humanos, animales y plantas, si se presenta en concentraciones elevadas (Engbersen et al., 2019) y considerando la capacidad de bioacumulación que presentan algunos seres vivos a este metal pesado, este puede depositarse en los tejidos de determinados seres vivos y así ingresar a la cadena alimenticia, aumentando el riesgo de exposición a este tipo de sustancias (Nava-Ruíz et al. 2011; Blanco-Hernández et al. 1998), lo que puede ocasionar daño renal y alteraciones nerviosas y coronarias (Espinoza et al., 2011, Bravo et al. 2014).

El Cd es un elemento químico no esencial encontrado en el suelo en la forma de Cd^{+2} (Rascio & Navari, 2011; Song et al., 2017). Este elemento se encuentra de forma natural en los suelos debido principalmente a la mineralización del material parental, así como en concentraciones elevadas en suelos próximos a puntos de actividad volcánica intensa (Adriano, 2001). La concentración natural de Cd en el suelo está en el rango de 0,1-1,0 mg kg⁻¹ (Smolders & Mertens, 2013), sin embargo, diversas actividades antrópicas, particularmente, el uso de fertilizantes fosfatados (Smolders & Mertens, 2013), la explotación minera, la incineración de residuos provenientes de centros urbanos, el uso de lodos y agentes agroquímicos en la actividad agrícola, los gases generados por la industria, el uso de combustibles fósiles y materiales derivados del petróleo (Mite et al., 2010), tienen como consecuencia la deposición de este elemento (Smolders & Mertens, 2013), ocasionando efectos nocivos con consecuencias aún por determinar.

Para detectar la fuente de contaminación por Cd en el suelo se evalúa la distribución de este metal pesado a través del perfil del suelo, considerando que generalmente la concentración de este elemento es mayor en los primeros 10 o 15 cm y disminuye a medida que aumenta la profundidad

(Buccolieri et al., 2010), sin embargo la distribución del Cd a lo largo del perfil vertical del suelo puede llegar a ser altamente variable o similar dependiendo de la actividad agrícola o el material de origen, indicando que factores antrópicos o naturales pueden influir en la acumulación de Cd en el suelo en algunas regiones (Caridad-Cancela et al., 2005).

En este sentido, los suelos presentan atributos fisicoquímicos que determinan su capacidad para movilizar el Cd depositado, dentro de los cuales se encuentran el pH, el potencial redox, la presencia de ciertos iones, la capacidad de intercambio iónico y el contenido de materia orgánica, el tipo de suelo y la especie vegetal (PNUMA,2008; Martínez & Palacio, 2010; Ramtahal et al. 2018); por otro lado, la materia orgánica afecta la disponibilidad de Cd para la planta, al acidificar el medio debido a la formación de ácidos orgánicos (Chavez et al., 2016), esa acidificación genera pequeños cambios de pH que podría causar modificación en la disponibilidad de este metal (Singh & Soledad, 2005).

Los sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L.) son de alta exigencia climática en lo que se refiere a precipitación, temperatura y humedad, sin embargo, las condiciones extremas de estas variables afectan negativamente la sanidad de la planta (Mantilla et al. 2000). El cacao es uno de los cultivos económicamente importantes para el país, siendo el departamento de Santander, donde se concentra la mayor producción nacional con 24.890,18 toneladas por año, equivalente al 24.63 % del total de cacao que exportó el país en el 2018 (Agronet, 2019).

Recientemente, áreas cacaoteras en Latinoamérica y Colombia, han estado recibiendo especial atención, debido al incremento en el número de estudios donde se han reportado altas concentraciones de Cd en los productos finales del cacao según la normativa de la Unión Europea No 488/2014, la cual se hizo efectiva en enero del 2019 (The European Commission, 2014), así como, algunas áreas han superado el nivel crítico establecido para suelos agrícolas de 0,43 mg kg⁻¹

¹ según la US EPA (USEPA, 2002). En Ecuador, Honduras, Perú, Venezuela e inclusive en las Islas de Trinidad-Tobago se han realizado estudios en zonas cacaoteras que presentan altas concentraciones de Cd en el suelo, con concentraciones que varían entre 0,16 y 6,00 mg kg⁻¹ (Martínez y Rivero, 2005; Mite et al., 2010; Huamani et al., 2012; Chávez et al., 2015; Gramlich et al., 2018; Ramtahal et al., 2016, 2018). De acuerdo a los datos reportados para Colombia, las concentraciones más altas de Cd se presentan en el suelo y en las almendras, en comparación con lo encontrado en países como Ecuador, Honduras, Perú y Trinidad y Tobago (Chávez et al., 2015, Arévalo et al., 2017, Gramlich et al., 2018, Ramtahal et al., 2018). A su vez, estudios previos realizados en San Vicente de Chucurí, en el departamento de Santander se han reportado concentraciones de Cd en el suelo que varían de 0,30 a 6,00 mg kg⁻¹, mientras que en el grano se observan concentraciones entre 4,00 y 7,00 mg kg⁻¹ (Martínez & Palacio, 2010).

En este trabajo se abordó el problema de la presencia de Cd en sistemas agroforestales con cacao, para determinar la variación en la disponibilidad de este elemento, en diferentes fincas productoras del municipio de San Vicente de Chucurí, en el departamento de Santander, con el fin de evaluar la distribución de este metal pesado y cuales propiedades fisicoquímicas del suelo afectan la disponibilidad de este elemento.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el contenido de Cd y su distribución en fincas cacaoteras de San Vicente de Chucurí, Dpto. de Santander.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la concentración total de Cd en tres diferentes profundidades del suelo.
- Cuantificar el Cd disponible en la profundidad con mayor concentración total de Cd.
- Establecer las relaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo con la disponibilidad de Cd en el perfil del suelo

2. Marco Referencial

2.1 Origen y contenido de Cd en los suelos

El Cd se encuentra en el suelo a través de fuentes naturales como erupciones volcánicas, a la mineralización del material parental o por acción antropogénica; donde sobresalen las explotaciones de minas, quemas de basuras urbanas, uso de lodos urbanos en la agricultura, agroquímicos, gases provenientes de las industrias, quema de combustibles fósiles, entre estos el carbón, los derivados del petróleo, etc. (Mite et al., 2010), vertimientos de metales pesados a las fuentes hídricas cercanas a las plantaciones y contaminación directa de las aguas subterráneas, esta última guarda efectos a largo plazo en el terreno (Blanco-Hernández et al., 1998) y sus consecuencias en el ecosistema aún no están bien estudiadas.

El Cd puede llegar a ser tóxico para los humanos si se presenta en concentraciones elevadas (Mite et al., 2010). La vida silvestre tiene la habilidad de acumular dicho metal pesado haciendo que estos entren a la cadena alimenticia e incrementando así el riesgo de sobre exposición (Navarúiz et al., 2011; Blanco-Hernández et al., 1998), lo que se convierte en altamente negativo para la salud ya que la sobre exposición a este elemento afecta las funciones renales, el sistema nervioso central, periférico, la función coronaria entre otras (Espinoza et al., 2011, Bravo et al. 2014).

Se ha sugerido que los principales factores que influyen en la movilización de Cd en el suelo son el pH, el potencial redox, la presencia de iones, la capacidad de intercambio catiónico y/o aniónico, el contenido de materia orgánica y la textura, entre otras. La contaminación por Cd puede producir acidificación y cambios en las condiciones redox (Sehuquillo et al., 2003). El pH del suelo es un importante parámetro que determina la velocidad de descomposición de la materia

orgánica, la disponibilidad de los elementos nutritivos (Chávez y Mansilla, 2004) y la disponibilidad de metales pesados como el Cd (Martínez y Palacio, 2010; Ramtahal et al., 2018).

2.2 Absorción y tolerancia al Cd en las plantas.

Los metales pesados son absorbidos por las plantas en diferentes proporciones dependiendo de la especie y sus características, adoptando diversas estrategias ante la presencia de dichos metales en el suelo. En el caso del Cd, cuando se acumula en altas concentraciones en raíces, tallos, frutos y semillas, detiene la entrada y el transporte de elementos esenciales y del agua provocando deshidratación y desnutrición en la planta (Acosta, 2018).

La disponibilidad de Cd en el suelo para las plantas depende de las propiedades de este (pH y ácidos húmicos), así como de la acción de los exudados liberados a través de la de la raíz (Song et al., 2017). La mayor disponibilidad de Cd y la movilización o inmovilización de este elemento en el suelo puede contribuir en su absorción y deposición en los tejidos de los órganos de las plantas. (Song et al., 2017).

La alta movilidad del Cd permite la entrada de este elemento por la raíz, así mismo, el transporte y la distribución del Cd en las hojas se produce a través de las vías apoplástica o simplástica (Song et al., 2017). El transporte del Cd se produce dentro de cada célula vegetal, manteniendo las concentraciones de estas moléculas dentro de la fisiológica específica en cada orgánulo y asegurando la entrega del Cd a las proteínas que lo requieren (Clemens et al. 2002).

2.3 Distribución del Cd en los órganos de las plantas del cacao

La acumulación de Cd dentro de los órganos de la planta causa cambios a nivel molecular, bioquímico y fisiológico en los diferentes órganos de la misma (Zhang et al., 2010), por lo que.

En la raíz, la pared celular es la principal estructura donde se almacena el Cd (Vázquez et al., 2006), debido a que los iones de este metal pesado que se encuentra en la solución del suelo, se acumulan en el córtex y en la endodermis después de atravesar las células de la epidermis (Yamaguchi et al., 2011). Por otro lado, se ha observado que en las plantas hiperacumuladoras el almacenamiento de Cd en la raíz es reducido con el fin de que este sea transportado al tallo y a las hojas vía xilema (Hassan and Aarts, 2011).

La concentración de Cd en las hojas varía dependiendo del material vegetal (Arévalo et al., 2017), de la edad de la hoja (Lavid et al., 2001) y del tejido vegetal donde se almacena (Almeida et al., 2013). Utilizando técnicas histológicas, se ha observado que algunas estructuras como la pared celular, el parénquima esponjoso y de empalizada en el mesófilo de la hoja son algunos de principales sitios de almacenamiento de Cd en este órgano (Marquez-Garcia et al., 2012).

En el caso del cacao, en Colombia han sido reportas concentraciones más altas de Cd en el suelo y en las almendras al compararse con países de Latinoamérica (Tabla 1) (Huamani et al., 2012., Chávez et al. 2015., Gramlich et al., 2018., Ramtahal et al., 2018). Estudios realizados en San Vicente de Chucuri en el departamento de Santander, han reportado concentraciones de Cd en el suelo, en contenidos que varían de 0,33 a 6,0 mg kg⁻¹ (Martínez & Palacio, 2010).

Tabla 1.

Contenido de Cd en los órganos de la planta de cacao en diferentes plantaciones en Latinoamérica.

PAÍS	CÁSCARA	ALMENDRA	HOJA	REFERENCIA
mg kg-1				
Ecuador	0,02-0,46	0,02-3,00	10,00	Chávez <i>et al.</i> , 2015
Honduras	0,04-10,20	0,03-7,10	0,10-28,00	Gramlich <i>et al.</i> , 2018
Perú	-	0,17-1,78	0,23-2,50	Arévalo <i>et al.</i> , 2017
Trinidad y Tobago	0,44-4,41	0,35-3,82	0,54-5,21	Ramtahal <i>et al.</i> , 2018
Venezuela	-	-	-	Martínez & Rivero, 2005
Colombia (SVC)[†]	-	4,00 - 7,00	-	(Martínez & Palacio, 2010; Guerra <i>et al.</i> , 2018)

Fuente Propia.

3. Método.

3.1 Área de estudio

El área de estudio comprende el municipio de San Vicente de Chucurí (Figura 1). En esta zona es predominante el Bosque Húmedo Tropical, con una temperatura media de 27,8 °C, y un régimen de lluvias con valores que oscilan entre 1.900 mm y 3.100 mm anuales, en promedio, brindando las condiciones propicias para el cultivo de cacao (Acevedo, 2016). El municipio de San Vicente de Chucurí pertenece a la cuenca media del río Magdalena, el uso actual de suelo del lugar está distribuido entre los bosques, los sistemas agroforestales, la agricultura y la ganadería (Acevedo, 2016).

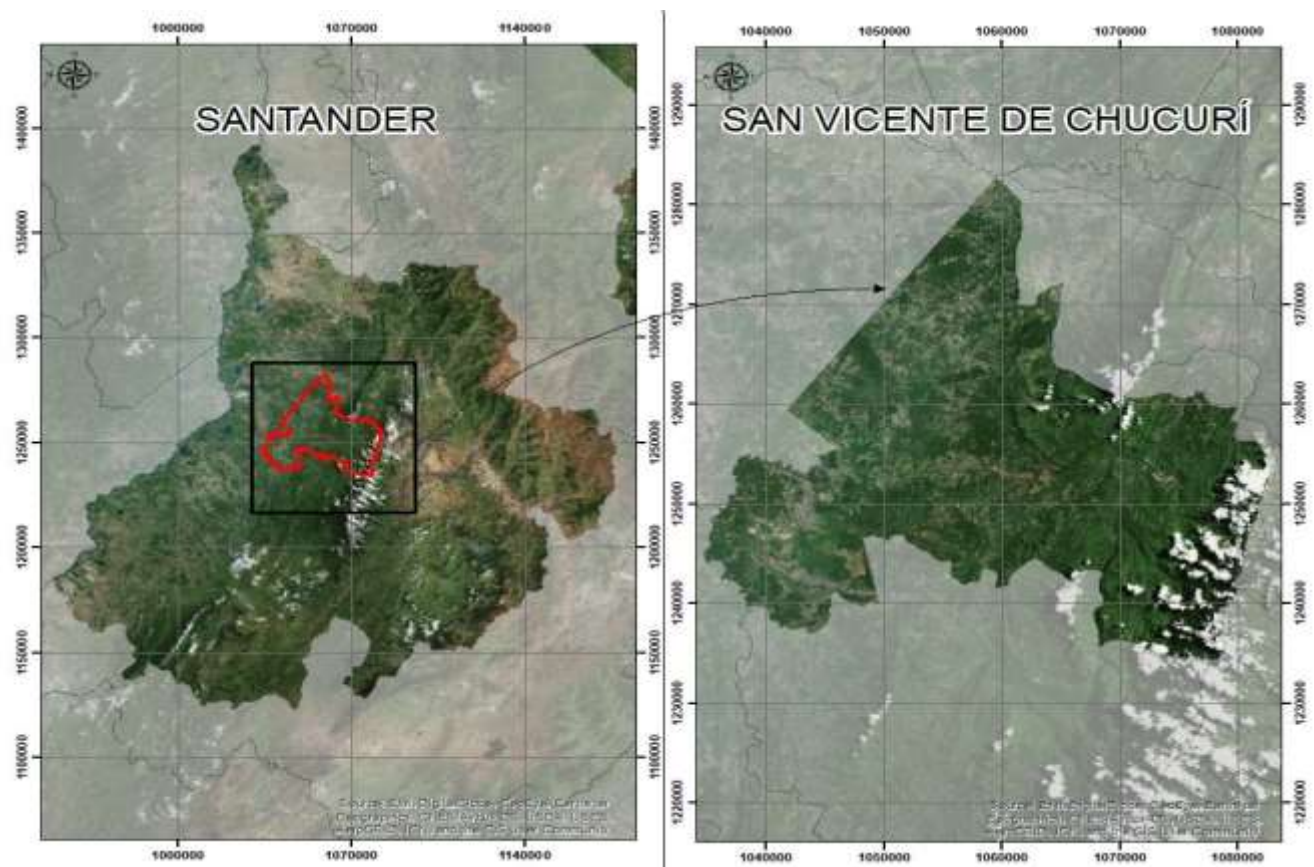
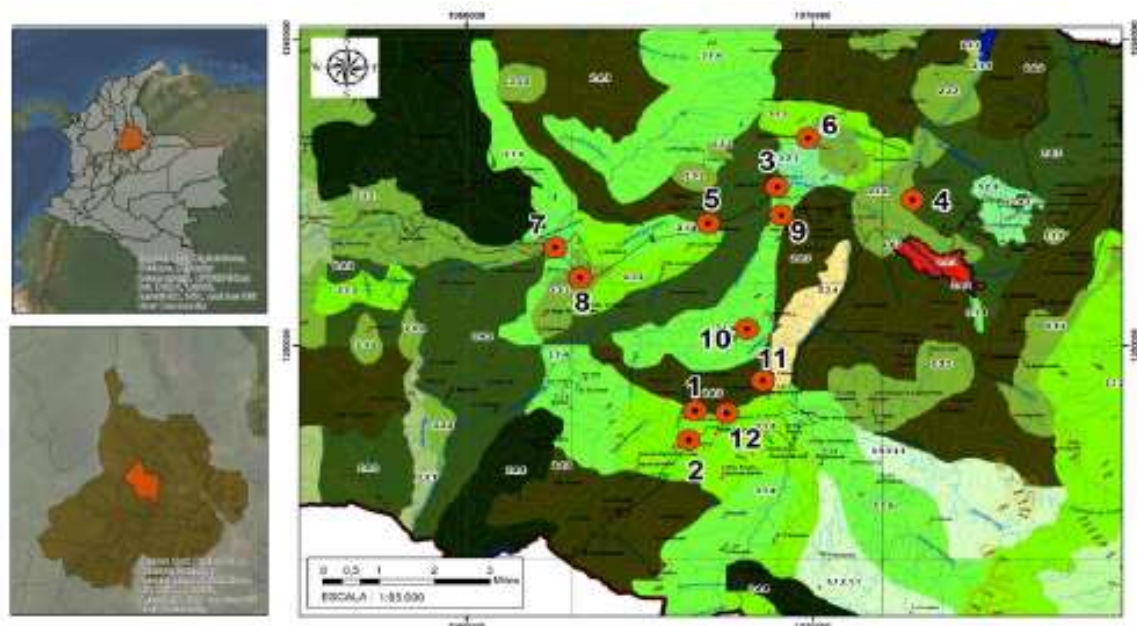


Figura 1. Ubicación espacial del municipio de San Vicente de Chucurí en el departamento de Santander. Fuente propia (2019).

3.1.1. Caracterización de la cobertura terrestre utilizando sistemas de información geográfica

Se utilizó el mapa de cobertura y uso de suelo rural del proyecto “Apoyo técnico para la revisión excepcional de los planes y esquemas de ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona de embalse del proyecto hidroeléctrico Sogamoso”, del municipio de San Vicente de Chucuri, como base de las unidades de cobertura adoptadas por la Leyenda Nacional de Coberturas de La Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a Escala 1:100.000, elaborada por la unión temporal conurbano, para identificar la zona del municipio de San Vicente de Chucurí con sistemas agroforestales con cacao (*Figura 2*).

La cobertura vegetal en el área de estudio está determinada climáticamente y dentro de las siguientes zonas de vida: como Bosque pluvial montano (bp-M), premontano (bp-PM) y montano Bajo (bp-MB); Bosque muy húmedo Montano (bmh-M), montano bajo (bmh-MB), pre montano (bmh-PM), Bosque húmedo pre montano (bh-PM) y Bosque húmedo tropical (bhT) (Acevedo, 2016); hay varios tipos de vegetación tales como, bosque primario intervenido, bosque secundario, potreros y rastrojos, vegetación de vega baja y orillares, sistemas agroforestales con cacao y café con sombrío y frutales, cultivos densos, limpios y semi-limpios (Acevedo, 2016). (*Figura 2*).



LEYENDA MAPA DE COBERTURA Y USO ACTUAL DEL SUELO RURAL					
UNIDADES DE COBERTURA	NOMENCLATURA	COLOR	DESCRIPCIÓN	ÁREA (ha)	%
TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1.1		Tejido urbano continuo	182,36 ha	0,15 %
	1.1.2		Tejido urbano discontinuo	70,56 ha	0,06 %
	1.3.2		Extracción de Hidrocarburos	25,87 ha	0,02 %
TERRITORIOS AGRICOLAS	2.2.3.2		Palma de Aceite	3410,19 ha	2,86 %
	2.2.3.1		Otros cultivos permanentes Arbóreos	733,31 ha	0,61 %
	2.2.4		Cultivos Agroforestales	390,18 ha	0,33 %
	2.3.1		Pastos limpios	5390,66 ha	4,52 %
	2.3.2		Pastos Arbolados	18536,79 ha	15,54 %
	2.3.3		Pastos enmalezados	45,29 ha	0,04 %
	2.4.2		Mosaico de Pastos y Cultivos	14719,40 ha	12,33 %
	2.4.3		Mosaico Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	12144,69 ha	10,18 %
BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	3.1.1.1.1		Bosque Denso Alto de Tierra Firme	10335,98 ha	8,66 %
	3.1.2.1.1		Bosque Abierto Alto de Tierra Firme	2123,71 ha	1,78 %
	3.1.3		Bosque fragmentado	9334,74 ha	7,82 %
	3.1.4		Bosque de Galería y Ripario	7767,81 ha	6,50 %
	3.2.3		Vegetación Secundaria Alta o en transición	10444,19 ha	8,75 %
	3.3.3		Tierras desnudas y degradadas	213,43 ha	0,18 %
	3.3.4		Zonas quemadas	25,91 ha	0,02 %
SUPERFICIES DE AGUA	5.1.4		Cuerpos de agua artificiales	94,90 ha	0,08 %

Figura 2. Mapa de cobertura vegetal y localización de las fincas cacaoteras en el área de muestreo en el municipio de San Vicente de Chucuri, Santander.

Finalmente, la información del proyecto (capas, tablas, imágenes, etc.) se agrupó en un modelo de datos geográficos o geodatabase para su almacenamiento y gestión.

3.1.2 Muestreo del suelo

Para la selección de las 12 fincas (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F11 y F12) evaluadas se revisaron las unidades de cobertura adoptadas por la Leyenda Nacional de Coberturas de La Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a Escala 1:100.000 (Ardila et al., 2010), teniendo en cuenta las características orográficas del municipio de San Vicente de Chucurí y la producción de las fincas. En cada finca (unidad de muestreo) se seleccionaron tres sitios, en cada sitio, se tomaron dos puntos que fueron georreferenciados usando dispositivo Garmin GPS, el primero, a 50 cm y el segundo a 150 cm, tomados desde la base de una planta de cacao en etapa productiva, para tener dos repeticiones por sitio. En cada punto se tomó una muestra de suelo a tres profundidades: 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm, utilizando un barreno, totalizando 216 muestras (Apéndice A).

3.1.3 Caracterización fisicoquímica de suelo

Las variables fisicoquímicas del suelo textura, contenido de materia orgánica (%MO), pH, y contenido de macro y micronutrientes fueron determinadas (Apéndice B). La textura del suelo se determinó por medio del método Bouyoucous (degy, 1965). El carbono orgánico fue determinado por el método colorimétrico de Walkley Black (Jakcson, 1976) y partir de este dato fue calculado el %MO. El pH del suelo fue medido en agua (1:1 v/v) (IGAC, 2006). El contenido de K, Ca, Mg y Na intercambiables fue extraído con acetato de amonio (Thomas, 1982) y determinados por espectrofotometría de absorción atómica. La cantidad de fósforo disponible para la planta se

determinó por el método Bray II en HCl 0.1 N-NH₄F 0.03 N. El boro disponible para la planta se determinó por colorimetría (Shanina et al., 1967), la cantidad de Fe, Cu y Zn se determinaron por extracción con DPTA (Lyndsay & Norvell, 1978) y la capacidad de intercambio catiónico se determinó por extracción de acetato de amonio (Thomas, 1982).

3.1.4 Cuantificación del contenido total y disponible de Cd en el suelo

La determinación del contenido total de Cd en el suelo se realizó de acuerdo con el método de digestión ácida EPA 3050B y Espectrofotometría de Absorción Atómica por llama directa aire-acetileno, SM 3111 B. (IDEAM, 2013). La concentración de Cd disponible fue determinada mediante extracción con agentes acomplejantes EDTA-CaCl-DTPA y su cuantificación se realizó por absorción atómica y horno de grafito para valores mínimos. (Semarnat, 2002).

3.1.5 Análisis estadístico de los datos

Un análisis de Kruskal-Wallis fue realizado para comparar la variación de las propiedades químicas del suelo y el contenido total de Cd dentro de cada finca a diferentes profundidades (0-15, 15-30, 30-45 cm) y entre fincas, considerando la misma profundidad. Por medio de este mismo análisis se evaluó la variación del Cd disponible en el suelo en la profundidad de 0-15 cm entre fincas. Los parámetros fisicoquímicos del suelo y su relación con el contenido de Cd disponible fueron evaluados por medio de una correlación de Spearman. Los análisis fueron realizados en SigmaPlot ver 11.0 (SYSTAT Software Inc., California, USA). Con el fin de determinar el grado de autocorrelación espacial de las variables bajo estudio se calculó el índice de Moran, usando el programa Arcgis 10.6 (Esri, 2018). Se realizó un análisis de regresión utilizando el algoritmo randomForest (Breiman et al., 1984) en el programa R studio ver. 3.4.2 (The R for statistical computing platform), para evaluar el efecto de los parámetros fisicoquímicos del suelo en la disponibilidad de Cd.

4. Resultados.

4.1 Caracterización fisicoquímica del suelo en las tres profundidades

Diferencias significativas fueron observadas entre fincas a una misma profundidad. En la profundidad de 0-15 cm (Tabla 2), el pH en F10 fue significativamente mayor que en F3, F5, F6, F8 y F9 ($p < 0,05$); el porcentaje de MO fue significativamente mayor en F12 que en F6, F7, F8, F9 y F11 ($p < 0,05$). En la profundidad de 15-30 cm (Tabla 3) el pH en F10 fue significativamente mayor que en F3, F4, F5, F6, F8 y F9 ($p < 0,05$); el porcentaje de MO fue significativamente mayor en F12 que en F6, F7, F8 y F11 ($p < 0,05$). En la profundidad de 30-45 cm (Tabla 4) el pH en F10 fue significativamente mayor que en F3, F4, F5, F6, F8 y F9 ($p < 0,05$); el porcentaje de MO fue significativamente mayor en F12 que en F6, F7, F8 y F11 ($p < 0,05$).

El contenido de macronutrientes se observa en las tablas 2, 3 y 4. En la profundidad de 0-15 cm (Tabla 2) el contenido de P en F12 fue significativamente mayor que en F5, F6 y F8 ($p < 0,05$), el contenido de K fue significativamente mayor en F11 cuando se comparó con F8 ($p < 0,05$), El contenido de S fue significativamente mayor en F9 que en F11 ($p < 0,05$), el contenido de Na fue significativamente mayor en F1 que en F8 ($p < 0,05$), el contenido de Ca fue significativamente mayor en F12 cuando se comparó con F3, F5, F6, F8 y F9 ($p < 0,05$) y el contenido de Mg fue significativamente mayor en F9 que en F1, F2, F8 y F11 ($p < 0,05$).

En la profundidad de 15-30 cm (Tabla 3) el contenido de P en F2 fue significativamente mayor que en F5, F6 y F8 ($p < 0,05$), el contenido de K fue significativamente mayor en F5 cuando se comparó con F8, F9, F10, F11 y F12 ($p < 0,05$), no hay diferencias significativas en el contenido de S en las fincas evaluada, el contenido de Na fue significativamente mayor en F7 que en F2, F3, F4, F5 y F6 ($p < 0,05$), el contenido de Ca fue significativamente mayor en F2 cuando se comparó

con F3, F6, F8 y F9 ($p < 0,05$) y el contenido de Mg fue significativamente mayor en F7 que en F1, F2, F8 y F11 ($p < 0,05$).

En la profundidad de 30-45 cm (Tabla 4) el contenido de P en F2 fue significativamente mayor que en F5, F6 y F8 ($p < 0,05$), el contenido de K fue significativamente mayor en F5 cuando se comparó con F8 ($p < 0,05$), no hay diferencias significativas en el contenido de S y Na en las fincas evaluadas, el contenido de Ca fue significativamente mayor en F12 cuando se comparó con F3, F6, F8 y F9 ($p < 0,05$) y el contenido de Mg fue significativamente mayor en F7 que en F1, F2, F8 y F11 ($p < 0,05$).

El contenido de micronutrientes se observa en las tablas 5, 6 y 7. En la profundidad de 0-15 cm (Tabla 5) la concentración de B fue significativamente mayor en F1 que en F5, F7, F8, F9, F11 ($p < 0,05$), el contenido de Fe fue significativamente mayor en F3 que en F10 ($p < 0,05$), el contenido de Mn fue significativamente mayor en F9 cuando se comparó con F1, F2, F10 y F12 ($p < 0,05$), el contenido de Cu fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F8 y F11 ($p < 0,05$), el contenido de Zn fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F6, F7, F8 y F11 ($p < 0,05$). La CIC fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F6, F7 y F8.

En la profundidad de 15-30 cm (Tabla 6) la concentración de B fue significativamente mayor en F1 que en F3, F5, F8, F9, F11 ($p < 0,05$), el contenido de Fe fue significativamente mayor en F3 que en F10 ($p < 0,05$), el contenido de Mn fue significativamente mayor en F9 cuando se comparó con F1, F2, F10 y F12 ($p < 0,05$), el contenido de Cu fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F8 y F11 ($p < 0,05$), el contenido de Zn fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F6, F8 y F11 ($p < 0,05$). La CIC fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F6 y F8.

En la profundidad de 30-45 cm (Tabla 7) la concentración de B fue significativamente mayor en F1 que en F3, F5, F8, F9, F11 ($p < 0,05$), el contenido de Fe fue significativamente mayor en F5

que en F10 ($p < 0,05$), el contenido de Mn fue significativamente mayor en F9 cuando se comparó con F1, F2, F10 y F12 ($p < 0,05$), el contenido de Cu fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F8 y F11 ($p < 0,05$), el contenido de Zn fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F6, F8 y F11 ($p < 0,05$). La CIC fue significativamente mayor en F12 que en F3, F4, F6 y F8.

Al comparar las propiedades químicas del suelo entre profundidades, dentro de cada finca, se observaron diferencias significativas en el contenido de K en las fincas F7, F9, F10, F11 y F12 y en el contenido de Na en las fincas F7, F10, F11 y F12. (Apéndice C). La concentración de K fue significativamente mayor en la profundidad de 0-15 cm en F7 (1,72 mg kg⁻¹), F9 (1,01 mg kg⁻¹), F10 (0,70 mg kg⁻¹), F11 (0,82 mg kg⁻¹) y F12 (0,70 mg kg⁻¹). La concentración de Na fue significativamente mayor en la profundidad de 15-30 cm en F7 (0,99 mg kg⁻¹), F10 (0,58 mg kg⁻¹), F11 (0,68 mg kg⁻¹) y F12 (0,62 mg kg⁻¹). Para los micronutrientes no se observaron diferencias significativas entre las profundidades al ser evaluados entre las mismas fincas (Apéndice D).

Tabla 2.

pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes del suelo en la profundidad de 0-15 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

Finca	pH	% MO	P	K	S	Na	Ca	Mg
		%	mg kg ⁻¹					
F1	5,55	3,12	40.80	0.66	6.11	0.23	35.10	1.19
	(5,40:5,80)ad	(2,50: 3,43)ae	(7.31: 52.20)ad	(0.46:1.68)ac	(5.40: 6.53)bc	(0.21: 0.25)a	(25.40: 41.20)ad	(1.01: 1.50)bcd
F2	6,90	4,06	109,00	0,56	8,06	0,18	64,60	1,16
	(5,50:7,60)ac	(3,79:4,74)ac	(79.30: 121.00)a	(0.50: 0.82)ac	(3.91: 13.00)ac	(0.16: 0.21)acd	(35.60: 68.60)ad	(0.92: 1.63)bcd
F3	4,60	2,44	10,48	0,56	5,48	0,21	6,44	2,26
	(4,00:5,20)bcd	(1,71:2,72)ae	(7.31: 13.10)ae	(0.42: 0.70)ac	(5.34: 7.07)bc	(0.18: 0.27)ac	(3.00: 11.74)bde	(0.86: 2.54)ad
F4	4,80	2,16	20,40	0,95	13,80	0,21	14,77	2,01
	(4,10:5,70)ad	(1,8:3,34)ae	(15.20: 26.00)ae	(0.66: 1.09)a	(10.50:15.10)ac	(0.18: 0.27)ac	(5.24: 29.00)ae	(1.18: 2.30)ad
F5	4,35	2,57	2,06	0,78	8,21	0,16	10,32	4,34
	(4,20:4,50)bcd	(1,91:3,65)ae	(1.06: 2.21)be	(0.66: 0.85)ac	(7.53: 9.90)ac	(0.13: 0.16)acd	(8.94: 12.12)bede	(3.43: 4.63)ac
F6	4,00	1,72	2,50	0,64	12,30	0,20	5,80	2,19
	(4,00:4,60)bd	(1,55:1,88)bcde	(2.36: 5.10)bde	(0.58: 0.78)ac	(5.00: 15.70)ac	(0.18: 0.25)ac	(4.30: 10.44)bde	(1.72: 2.48)ad
F7	5,90	1,28	40,10	1,71	8,63	0,17	22,50	5,38
	(5,60:6,40)ad	(0,88:2,46)bde	(30.80: 1.88)ac	(0.82: 2.80)a	(6.51: 10.10)ac	(0.16: 0.23)acd	(20.20: 25.80)ae	(5.07: 5.70)a
F8	4,25	0,78	3,84	0,22	7,25	0,09	3,45	0,89
	(4,00:4,30)bd	(0,72:0,84)be	(3.11: 6.01)bcde	(0.15: 0.23)bc	(7.01: 7.47)ac	(0.06: 0.13)bd	(3.08: 5.70)be	(0.40: 1.30)bd
F9	4,45	1,56	8,44	1,01	19,60	0,11	10,09	5,02
	(4,20:4,70)bcd	(1,34:1,67)bcde	(4.67: 18.30)ae	(0.74: 1.56)a	(16.80:33.80)a	(0.09: 0.23)acd	(7.88: 11.14)bde	(3.56: 6.00)a

	pH	†MO	P	K	S	Na	Ca	Mg
Finca		%	mg kg ⁻¹					
F10	7,40 (7,00:7,50)a	3,59 (2,93:4,39)ad	13,85 (12,30: 18,50)ae	0,70 (0,58: 0,85)ac	16,05 (12,20: 8,70)ac	0,16 (0,13: 0,16)acd	57,20 (48,00: 66,40)ac	2,26 (1,36: 2,79)ad
F11	4,70 (4,60:5,50)ad	1,67 (1,31:1,94)bcde	11,65 (8,43: 14,10)ae	0,82 (0,66: 1,09)a	6,63 (6,24: 7,83)bc	0,13 (0,13: 0,18)acd	23,20 (21,00: 28,40)ae	1,20 (1,08: 1,70)bcd
F12	6,35 (6,10:6,50)ac	5,24 (4,10: 6,88)a	41,55 (21,60: 84,20)a	0,70 (0,62: 0,74)ac	10,90 (8,66: 12,70)ac	0,15 (0,06: 0,20)acd	63,10 (54,60: 70,20)a	1,58 (1,36: 1,93)ad

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles (25%:75%). Letras en minúscula indican diferencias significativas entre las fincas muestreadas, según análisis de Kruskal Wallis (Tukey<0,05). †Porcentaje de materia orgánica.

Tabla 3.

pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes del suelo en la profundidad de 15-30 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

	pH	†MO	P	K	S	Na	Ca	Mg
Finca		%	mg kg ⁻¹					
F1	5,65 (5,10: 5,80)af	2,17 (1,74: 2,78)ae	19,43 (6,01: 46,30)ae	0,61 (0,43: 1,01)ac	5,40 (4,26: 6,25)a	0,23 (0,21: 0,28)ad	35,30 (22,40: 42,60)ae	0,88 (0,77: 0,98)be
F2	7,25 (5,10: 7,70)ad	4,46 (3,84: 5,06)ac	81,25 (33,80: 123,00)a	0,49 (0,47: 1,17)ad	5,39 (4,50: 12,70)a	0,20 (0,16: 0,23)bcd	67,10 (29,80: 67,60)ac	1,07 (0,61: 1,67)bcde
F3	4,50 (4,10: 5,10)bcdefg	2,06 (1,70: 2,36)ae	4,92 (2,82: 9,92)ae	0,41 (0,39: 0,59)af	5,34 (5,06: 5,92)a	0,18 (0,16: 0,25)bcd	5,28 (2,58: 9,46)be	1,78 (0,72: 2,20)ae
F4	4,55 (4,00: 5,50)bcdefg	1,62 (1,16: 3,17)ae	20,55 (2,36: 26,00)ae	0,68 (0,39: 1,29)ae	12,35 (8,79: 15,30)a	0,24 (0,05: 0,28)bcd	11,48 (2,72: 28,60)ae	1,78 (0,41: 2,32)ae
F5	4,45 (4,30: 4,50)bcdefg	2,10 (1,38: 3,09)ae	2,07 (1,49: 2,93)be	0,90 (0,82: 0,94)a	9,06 (7,68: 10,90)a	0,18 (0,16: 0,23)bd	9,79 (8,94: 10,58)ae	4,40 (4,27: 4,51)ad
F6	4,35 (4,00: 4,40)befg	0,97 (0,74: 1,59)be	1,56 (1,20: 3,37)be	0,45 (0,39: 0,66)af	8,86 (2,62: 14,50)a	0,20 (0,18: 0,23)bcd	4,77 (2,92: 5,66)be	1,63 (1,54: 1,75)ae
F7	5,90 (5,90: 6,20)ae	0,99 (0,64: 1,10)bde	28,45 (11,50: 47,70)ad	0,99 (0,78: 1,48)af	7,81 (5,43: 9,21)a	0,99 (0,78: 1,48)a	21,30 (20,60: 25,00)ae	5,36 (5,34: 5,44)a
F8	4,15 (4,10: 4,30)befg	0,79 (0,70: 0,96)be	2,82 (2,53: 6,01)bcde	0,23 (0,12: 0,35)bef	5,93 (4,27: 7,93)a	0,15 (0,05: 0,18)ad	4,03 (2,82: 5,50)be	0,86 (0,34: 1,27)be
F9	4,35 (4,20: 4,50)bcdefg	1,39 (1,26: 1,69)ae	8,54 (4,85: 10,00)ae	0,94 (0,74: 1,05)bcdef	18,40 (5,49: 33,80)a	0,17 (0,14: 0,25)ac	7,50 (6,58: 10,16)bcde	4,30 (3,48: 6,05)ac
F10	7,55 (6,80: 7,80)a	2,56 (2,21: 2,79)ad	8,72 (6,69: 9,00)ae	0,59 (0,47: 0,66)bf	8,05 (3,48: 27,80)a	0,13 (0,09: 0,16)ad	52,30 (47,00: 65,60)ad	1,88 (0,73: 2,04)ae
F11	4,65 (4,50: 5,50)ag	1,28 (1,09: 1,69)bcde	11,10 (7,56: 24,00)ae	0,68 (0,51: 1,09)bcdef	6,16 (5,65: 6,51)a	0,17 (0,16: 0,25)ac	20,65 (17,50: 27,20)ae	0,76 (0,70: 1,06)be
F12	6,40 (6,30: 7,20)ac	5,46 (4,09: 6,45)a	26,75 (20,40: 59,60)ac	0,62 (0,55: 0,86)bcdef	7,99 (7,85: 8,66)a	0,17 (0,09: 0,21)ad	64,00 (61,00: 67,20)ae	1,29 (1,01: 1,69)ae

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles (25%:75%). Letras en minúscula indican diferencias significativas entre las fincas muestreadas, según análisis de Kruskal Wallis (Tukey<0,05). †Porcentaje de materia orgánica.

Tabla 4.

pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes del suelo en la profundidad de 30-45 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles

Finca	pH	†MO	P	K	S	Na	Ca	Mg
		%	mg kg ⁻¹					
F1	5,75 (5,40: 5,90)ae	1,80 (1,46: 2,09)ae	34,95 (5,72: 45,00)ae	0,62 (0,35: 0,70)ac	3,12 (2,27: 5,11)a	0,27 (0,18: 0,37)a	35,40 (22,40: 43,60)ae	0,77 (0,66: 0,88)be
F2	7,40 (4,90: 7,50)ad	3,97 (3,81: 4,41)ac	108,50 (63,10: 159,00)a	0,49 (0,47: 0,86)ac	5,09 (4,79: 12,40)a	0,18 (0,16: 0,21)a	64,00 (29,00: 67,60)ac	0,79 (0,56: 1,24)bcde
F3	4,35 (4,20: 4,90)bcde	1,79 (1,60: 1,96)ae	4,70 (3,40: 6,30)ae	0,39 (0,31: 0,51)ac	6,06 (4,48: 7,64)a	0,18 (0,16: 0,21)a	3,32 (2,10: 10,62)be	1,35 (0,41: 1,99)ae
F4	4,50 (3,90: 5,60)bcde	1,86 (1,07: 2,91)ae	16,35 (2,79: 27,00)ae	0,53 (0,51: 1,25)ac	14,50 (9,94: 20)a	0,21 (0,16: 0,28)a	10,94 (2,60: 27,40)ae	1,76 (0,44: 2,16)ae
F5	4,45 (4,30: 4,60)bcde	2,51 (1,55: 4,67)ae	2,00 (0,48: 2,36)be	0,82 (0,78: 0,94)a	9,23 (7,20: 10,20)a	0,21 (0,16: 0,23)a	8,34 (7,32: 8,48)ae	4,05 (3,85: 4,25)ad
F6	4,45 (4,00: 4,50)be	0,60 (0,50: 1,00)bde	2,21 (1,34: 5,25)be	0,45 (0,35: 0,78)ac	8,16 (1,13: 16,60)a	0,22 (0,21: 0,25)a	3,75 (2,88: 4,22)be	1,88 (1,68: 2,41)ae
F7	6,15 (5,80: 6,30)ae	0,69 (0,69: 0,83)bde	33,55 (10,50: 50,90)ad	0,86 (0,78: 1,05)a	7,11 (5,97: 8,34)a	0,23 (0,21: 0,23)a	21,60 (20,40: 23,00)ae	5,42 (5,16: 5,52)a
F8	4,10 (4,00: 4,20)be	0,50 (0,50: 0,50)be	3,12 (2,10: 7,31)bcde	0,17 (0,12: 0,23)bc	6,37 (4,27: 7,32)a	0,12 (0,07: 0,16)a	2,64 (2,32: 3,60)be	0,55 (0,37: 0,56)be
F9	4,45 (4,30: 4,50)bcde	1,05 (0,90: 1,28)ae	5,41 (2,39: 7,13)ae	0,78 (0,70: 0,90)a	15,20 (4,27: 30,40)a	0,18 (0,16: 0,32)a	6,49 (6,20: 9,94)bcde	4,13 (3,08: 6,06)ac
F10	7,75 (6,40: 7,80)a	1,85 (1,34: 2,02)ad	8,14 (4,67: 12,50)ae	0,53 (0,47: 0,62)ac	8,93 (2,39: 38,30)a	0,15 (0,09: 0,23)a	55,30 (46,00: 62,20)ad	1,63 (0,70: 1,96)ae
F11	4,60 (4,50: 5,90)ae	0,99 (0,66: 1,55)bcde	8,31 (3,95: 20,30)ae	0,62 (0,55: 0,74)ac	5,78 (2,53: 8,05)a	0,18 (0,09: 0,18)a	21,00 (15,30: 30,40)ae	0,60 (0,55: 0,66)be
F12	6,85 (6,40: 7,60)ac	4,71 (3,28: 5,41)a	28,90 (21,30: 32,10)ac	0,59 (0,47: 0,78)ac	5,30 (4,89: 7,04)a	0,12 (0,11: 0,14)a	63,80 (62,00: 65,80)a	0,89 (0,61: 1,22)ae

(25%:75%). Letras en minúscula indican diferencias significativas entre las fincas muestreadas, según análisis de Kruskal Wallis (Tukey<0,05). †Porcentaje de materia orgánica.

Tabla 5.

Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo en la profundidad de 0-15 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

Finca	B	Fe	Mn	Cu	Zn	††CIC	Textura
	mg kg ⁻¹						
F1	0,56 (0,45: 0,61)a	119,50 (84,70: 138,00)ac	2,52 (2,46: 3,06)bcde	3,62 (2,11: 4,15)ae	55,60 (45,50: 81,20)ad	24,30 (21,80: 26,60)ae	Arcilloso
F2	0,27 (0,21: 0,31)ad	19,30 (12,00: 297,00)ac	0,80 (0,74: 0,88)bde	3,67 (3,22: 4,63)ad	77,95 (71: 80)ac	28,80 (26,40: 31,40)ad	Arcilloso/Fco-Arcilloso Arenoso
F3	0,11 (0,05: 0,14)bcd	144,00 (107,00: 166,00)a	6,08 (1,84: 9,96)ae	1,08 (1,02: 1,63)bcdef	1,19 (0,90: 3,36)bdef	14,90 (11,40: 20,00)bdef	Arcilloso/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
F4	0,18 (0,07: 0,29)ad	175,00 (33,70: 184,00)ac	7,67 (6,19: 13,00)ae	1,25 (0,78: 2,00)bdef	3,98 (1,94: 6,28)bcdef	16,50 (14,00: 19,40)bcdef	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F5	0,05 (0,05: 0,13)bd	133,10 (62,20: 187,00)a	20,80 (15,90: 24,00)ad	2,02 (1,88: 2,25)af	4,40 (3,97: 5,31)af	20,20 (14,60: 21,80)af	Arcilloso
F6	0,13 (0,10: 0,14)ad	72,55 (59,60: 107,00)ac	26,05 (18,50: 29,80)ac	2,38 (2,33: 2,56)af	3,54 (2,78: 4,26)bcdef	14,50 (12,20: 17,80)bef	Arcilloso

	B	Fe	Mn	Cu	Zn	++CIC	Textura
Finca	mg kg ⁻¹					meq/100 g suelo	
F7	0,08 (0,04: 0,16)bcd	37,15 (18,60: 50,10)ac	5,98 (4,71: 7,30)ae	4,62 (2,99: 5,28)ac	3,57 (3,07: 3,98)bcdef	18,20 (16,20: 20,60)bcdef	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F8	0,10 (0,06: 0,12)bcd	43,10 (39,90: 50,00)ac	5,78 (1,92: 17,7)ae	0,71 (0,62: 0,85)bf	0,77 (0,64: 1,70)bdf	7,80 (6,20: 9,00)bf	Franco/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
F9	0,08 (0,05: 0,12)bd	90,15 (73,90: 118,00)ac	33,00 (31,50: 34,20)a	2,10 (1,80: 2,91)af	6,29 (3,72: 7,40)af	20,70 (17,20: 22,40)af	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F10	0,28 (0,25: 0,31)ac	20,65 (6,80: 27,60)bc	1,55 (0,88: 1,78)bde	2,65 (1,37: 2,92)af	21,10 (17,50: 25,80)ae	29,20 (25,20: 33,80)ac	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F11	0,12 (0,11: 0,12)bcd	122,50 (31,90: 157,00)ac	5,36 (4,20: 7,17)ae	0,69 (0,66: 1,08)bef	1,82 (1,56: 3,78)bdef	18,40 (17,00: 21,6)af	Arcilloso
F12	0,25 (0,20: 0,25)ad	47,60 (39,30: 70,10)ac	2,78 (1,15: 5,07)bde	5,52 (4,70: 8,70)a	100,00 (90,80: 130,00)a	38,50 (36,00: 41,40)a	Arcilloso

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles (25%:75%). Letras en minúscula indican diferencias significativas entre las fincas muestreadas, según análisis de Kruskal-Wallis (Tukey<0,05). ++Capacidad de intercambio catiónico.

Tabla 6.

Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo en la profundidad de 15-30 cm de doce fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

	B	Fe	Mn	Cu	Zn	++CIC	Textura
Finca	mg kg ⁻¹					meq/100 g suelo	
F1	0,51 (0,37: 0,53)a	102,00 (85,50: 116,00)ac	2,50 (2,12: 2,90)bcde	3,53 (1,93: 4,41)ae	39,95 (28,10: 76,40)ad	20,60 (15,60: 26,00)ae	Arcilloso
F2	0,24 (0,21: 0,35)ac	18,75 (16,90: 329,00)ac	0,85 (0,73: 0,92)bde	4,14 (3,53: 4,27)ad	70,10 (21,70: 86,00)ac	26,40 (24,20: 32,40)ac	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F3	0,09 (0,05: 0,14)bc	130,00 (88,70: 140,00)a	5,91 (2,84: 9,29)ae	1,05 (0,94: 1,58)bcdef	1,21 (0,92: 3,05)bef	15,00 (10,40: 17,40)bde	Arcilloso/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
F4	0,07 (0,05: 0,38)ac	127,50 (38,70: 184,00)ac	7,19 (2,69: 13,20)ae	0,85 (0,59: 2,00)bef	1,77 (1,06: 6,78)bcdef	15,30 (13,20: 18,80)bcde	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F5	0,10 (0,08: 0,12)bc	124,50 (72,10: 166,00)ac	22,25 (19,40: 23,00)ac	2,19 (2,04: 2,28)af	4,54 (3,30: 5,54)af	16,60 (15,80: 23,40)ae	Arcilloso
F6	0,13 (0,11: 0,14)ac	48,20 (44,50: 57,80)ac	20,30 (14,00: 29,10)ad	2,46 (2,24: 2,69)af	2,02 (1,48: 3,40)bdef	12,30 (10,40: 16,20)bde	Arcilloso
F7	0,14 (0,14: 0,18)ac	29,45 (19,80: 36,80)ac	5,12 (4,48: 8,05)ae	4,02 (3,29: 4,77)ac	3,09 (2,45: 4,24)af	18,50 (14,00: 21,00)ae	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F8	0,08 (0,05: 0,10)bc	30,20 (20,10: 36,40)ac	5,13 (1,67: 17,10)ae	0,72 (0,65: 0,78)bf	0,68 (0,49: 2,26)bf	8,00 (5,20: 9,60)be	Franco/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
F9	0,06 (0,04: 0,23)bc	69,45 (67,40: 77,20)ac	32,95 (20,70: 34,00)a	1,78 (1,60: 2,78)af	3,99 (3,07: 5,96)af	20,10 (15,20: 21,40)ae	Arcilloso
F10	0,22 (0,16: 0,32)ac	16,30 (4,16: 22,50)bc	1,40 (1,28: 1,53)bde	2,47 (1,40: 2,81)af	17,05 (11,80: 18,70)ae	27,70 (21,80: 32,40)ad	Arcilloso
F11	0,11 (0,06: 0,12)bc	89,10 (32,80: 117,00)ac	5,38 (4,48: 6,26)ae	0,70 (0,63: 0,84)bef	1,73 (1,26: 2,10)bef	18,50 (17,40: 21,00)ae	Arcilloso
F12	0,17 (0,12: 0,25)ac	31,95 (22,70: 44,00)ac	1,26 (0,86: 2,33)bde	5,52 (5,12: 7,80)a	80,40 (70,40: 25)a	36,70 (33,00: 40,20)a	Arcilloso

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles (25%:75%). Letras en minúscula indican diferencias significativas entre las fincas muestreadas, según análisis de Kruskal-Wallis (Tukey<0,05). ++Capacidad de intercambio catiónico.

Tabla 7.

Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo en la profundidad de 30-45 cm de 12 fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

	B	Fe	Mn	Cu	Zn	++CIC	Textura
Finca	mg kg ⁻¹						meq/100 g suelo
F1	0,47 (0,37: 0,68)a	87,30 (84,00: 91,20)ac	2,26 (1,96: 2,62)bcde	3,43 (1,91: 4,56)ae	33,8 (24,00: 67,70)ad	21,50 (17,80: 24,80)ae	Arcilloso
F2	0,34 (0,18: 0,39)ac	23,40 (15,30: 320,00)ac	0,89 (0,72: 0,97)bde	4,35 (3,89: 4,60)ad	60,75 (26,00: 119,00)ac	28,30 (25,20: 30,60)ac	Arcilloso
F3	0,07 (0,04: 0,12)bc	104,10 (62,10: 126,00)ac	4,96 (3,68: 6,76)ae	1,04 (0,88: 1,56)bcdef	1,02 (0,72: 2,68)bef	13,80 (11,00: 17,40)bcde	Arcilloso/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
F4	0,26 (0,07: 0,43)ac	130,50 (48,00: 181,00)ac	6,71 (5,52: 15,90)ae	1,07 (0,54: 1,86)bef	2,87 (1,16: 6,76)bcdef	15,70 (12,00: 18,40)bcde	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F5	0,08 (0,08: 0,13)bc	157,50 (55,50: 174,00)a	17,90 (16,90: 20,20)ac	2,17 (1,92: 2,28)af	3,31 (3,06: 3,53)af	19,10 (14,40: 22,60)ae	Arcilloso
F6	0,11 (0,08: 0,13)ac	42,90 (23,20: 67,40)ac	20,40 (19,20: 23,90)ad	2,50 (2,18: 2,55)af	1,69 (1,40: 3,52)bdef	12,70 (10,40: 17,20)bde	Arcilloso
F7	0,15 (0,12: 0,18)ac	21,80 (19,90: 24,90)ac	4,39 (3,72: 5,15)ae	3,72 (3,54: 4,39)ac	3,03 (2,21: 3,54)af	18,60 (14,00: 20,60)ae	Arcilloso/Fco-Arcilloso
F8	0,10 (0,05: 0,11)bc	19,80 (9,88: 25,00)ac	3,66 (1,80: 16,90)ae	0,62 (0,60: 0,72)bf	0,51 (0,31: 1,80)bf	8,20 (5,20: 9,60)be	Franco/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
F9	0,06 (0,04: 0,11)bc	55,90 (40,70: 62,40)ac	29,25 (21,10: 34,50)a	1,75 (1,60: 2,79)af	3,37 (2,11: 4,80)af	18,50 (15,00: 22,60)ae	Arcilloso
F10	0,18 (0,12: 0,25)ac	9,04 (2,68: 26,60)bc	1,16 (1,08: 1,51)bde	2,07 (1,39: 2,50)af	11,08 (7,54: 15,20)ae	21,60 (18,60: 24,40)acd	Arcilloso
F11	0,16 (0,13 0,18)bc	54,00 (17,40: 114,00)ac	4,09 (2,10: 4,80)ae	0,65 (0,58: 0,73)bef	1,26 (0,85: 1,62)bef	16,70 (15,60: 19,20)ae	Arcilloso
F12	0,22 (0,14: 0,26)ac	22,40 (10,80: 48,30)ac	1,04 (0,68: 1,28)bde	6,23 (5,52: 6,92)a	105,30 (50,20: 145,00)a	34,60 (32,00: 38,60)a	Arcilloso

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles (25%:75%). Letras en minúscula indican diferencias significativas entre las fincas muestreadas, según análisis de Kruskal Wallis (Tukey<0,05). ++Capacidad de intercambio catiónico.

4.2 Contenido total y disponible de Cd en el suelo

En la Tabla 8 se observa el contenido total de Cd en las tres profundidades evaluadas. El contenido total de Cd en la profundidad de 0-15 cm osciló en el rango de 0,18 a 49,90 mg kg⁻¹, las fincas con mayor contenido total de Cd fueron F12 (49,90 mg kg⁻¹), F2 (17,12 mg kg⁻¹), F1 (12,58 mg kg⁻¹) y F10 (3,56 mg kg⁻¹), mientras que las fincas con las concentraciones más bajas de Cd fueron F8 (0,18 mg kg⁻¹) y F7 (0,32 mg kg⁻¹). El contenido total de Cd en las fincas F3, F4, F5, F6, F9 y F11 fue de 0,62, 0,81, 0,94, 0,92, 0,64 y 0,68 mg kg⁻¹, respectivamente (Tabla 8). El contenido total de Cd observado en F12 fue significativamente mayor (p<0,05) que en las fincas F8, F7, F3, F9 y

F11, mientras que en F2, F1 y F10 el contenido total de Cd fue significativamente mayor que en las fincas F8 y F7 ($p < 0,05$).

El contenido total de Cd en la profundidad de 15-30 cm varió en el rango de 0,27 a 46,57 mg kg⁻¹. Las fincas con mayor contenido total de Cd fueron F12 (46,57 mg kg⁻¹), F2 (15,57 mg kg⁻¹), F1 (8,42 mg kg⁻¹) y F10 (3,50 mg kg⁻¹), mientras las fincas con la concentración más baja de Cd fueron F8 (0,27 mg kg⁻¹) y F7 (0,32 mg kg⁻¹) (Tabla 8). El contenido total de Cd en las fincas F3, F4, F5, F6, F9 y F11 fue de 0,68, 0,90, 0,78, 0,83, 0,55 y 0,56 mg kg⁻¹, respectivamente. El contenido total de Cd observado en F12 fue significativamente mayor ($p < 0,05$) que en las fincas F8, F7, F3, F9 y F11, mientras que en F2, F1 y F10 el contenido total de Cd fue mayor que en las fincas F8 y F7 ($p < 0,05$).

El rango en el contenido total de Cd fue de 0,25 a 40,86 mg kg⁻¹, en la profundidad de 30-45 cm. Las fincas con mayor contenido total de Cd fueron F12 (40,86 mg kg⁻¹), F2 (9,36 mg kg⁻¹), F1 (8,28 mg kg⁻¹) y F10 (2,88 mg kg⁻¹), mientras las fincas con la concentración más baja de Cd fueron F8 (0,25 mg kg⁻¹) y F7 (0,29 mg kg⁻¹) (Tabla 8). El contenido total de Cd en las fincas F3, F4, F5, F6, F9 y F11 fue de 0,58, 0,89, 0,90, 0,80, 0,56 y 0,64 mg kg⁻¹, respectivamente. El contenido total de Cd observado en F12 fue significativamente mayor ($p < 0,05$) que en las fincas F8, F7, F3, F9 y F11, mientras que en F2, F1 y F10 el contenido total de Cd fue mayor que en las fincas F8 y F7 ($p < 0,05$).

No se observaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido total de Cd con el aumento de la profundidad del suelo, cuando fueron consideradas de forma separada cada una de las fincas (Tabla 8). La concentración total de Cd fue mayor en la capa más superficial del suelo (0-15 cm) en 9 de las 12 fincas (F1, F2, F5, F6, F7, F9, F10, F11 y F12) y aunque no se observaron diferencias significativas entre las profundidades evaluadas, se observó una disminución del

contenido de Cd con el aumento de la profundidad, por esta razón solo se determinó y se evaluó la disponibilidad de Cd en la profundidad de 0-15 cm.

En la Tabla 9 se observa el contenido disponible de Cd en la profundidad de 0-15 cm a través de las 12 fincas cacaoteras evaluadas. El contenido disponible de Cd en la profundidad de 0-15 cm osciló en el rango de 0,04 a 46,36 mg kg⁻¹. Las fincas con mayor contenido disponible de Cd fueron F12 (46,36 mg kg⁻¹), F2 (12,42 mg kg⁻¹), F1 (7,96 mg kg⁻¹) y F10 (2,34 mg kg⁻¹), mientras las fincas con la concentración más baja de Cd fueron F8 (0,04 mg kg⁻¹), F3 (0,08 mg kg⁻¹) y F6 (0,09 mg kg⁻¹). El contenido disponible de Cd en las fincas F4, F5, F7, F9 y F11 fue de 0,14, 0,17, 0,18, 0,21 y 0,34 mg kg⁻¹, respectivamente. El contenido disponible de Cd observado en F12, F2, F1 y F10 fue significativamente mayor ($p < 0,05$) que en las fincas F8, F3 y F6.

La distribución espacial de Cd disponible en la profundidad de 0-15 cm en las fincas evaluadas, muestra que las fincas con menor concentración de Cd disponible (F8, F3 y F6) se encuentran localizadas al norte en el municipio de San Vicente de Chucurí, mientras las fincas con mayor concentración de Cd disponible (F12, F1 y F10) se encuentran localizadas al sur del área de estudio (Figura 3 - Tabla 9).

Tabla 8.

Contenido de Cd total en tres profundidades, 0-15, 15-30 y 30-45 cm de 12 fincas cacaoteras del municipio de San Vicente de Chucurí.

	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm
Finca	mg kg ⁻¹		
F1	12,58 (10,41:13,25) ac A	8,42 (6,60:14,09) ad A	8,28 (2,44:10,45) ad A
F2	17,12 (8,65:21,70) ac A	15,57 (6,93:23,59) ac A	9,36 (4,85:17,70) ac A
F3	0,62 (0,50:0,72) bcd A	0,68 (0,60:0,73) bdef A	0,58 (0,48:0,73) bdef A
F4	0,81 (0,64: 1,16) ad A	0,90 (0,75:0,99) af A	0,89 (0,60:0,91) af A
F5	0,94 (0,75:0,96) ad A	0,78 (0,66:1,05) af A	0,90 (0,84:0,97) af A
F6	0,92 (0,91:0,95) ad A	0,83 (0,73:0,91) af A	0,80 (0,77:0,87) af A

	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm
Finca	mg kg ⁻¹		
F7	0,32 (0,28:0,37) bd A	0,32 (0,19:0,35) bf A	0,29 (0,25:0,36) bf A
F8	0,18 (0,10:0,32) bd A	0,27 (0,14:0,35) bf A	0,25 (0,16:0,35) bf A
F9	0,64 (0,56:0,69) bcd A	0,55 (0,51:0,60) bcdef A	0,56 (0,53:0,73) bcdef A
F10	3,56 (2,33:4,31) ac A	3,50 (1,63:3,90) ae A	2,88 (1,02:3,68) ae A
F11	0,68 (0,57:0,80) bcd A	0,56 (0,49:0,97) bcdef A	0,64 (0,43:0,73) bcdef A
F12	49,9 (29,41:86,55) a A	46,57 (27,55:69,70) a A	40,86 (31,73:59,68) a A

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles (25%: 75%). Letras diferentes en minúscula y dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre fincas en la misma profundidad, según análisis de Kruskal Wallis (Tukey<0,05). Letras iguales en mayúscula y en la misma línea indica que no se observaron diferencias significativas entre las profundidades dentro de la misma finca, según análisis de Kruskal Wallis (Tukey<0,05).

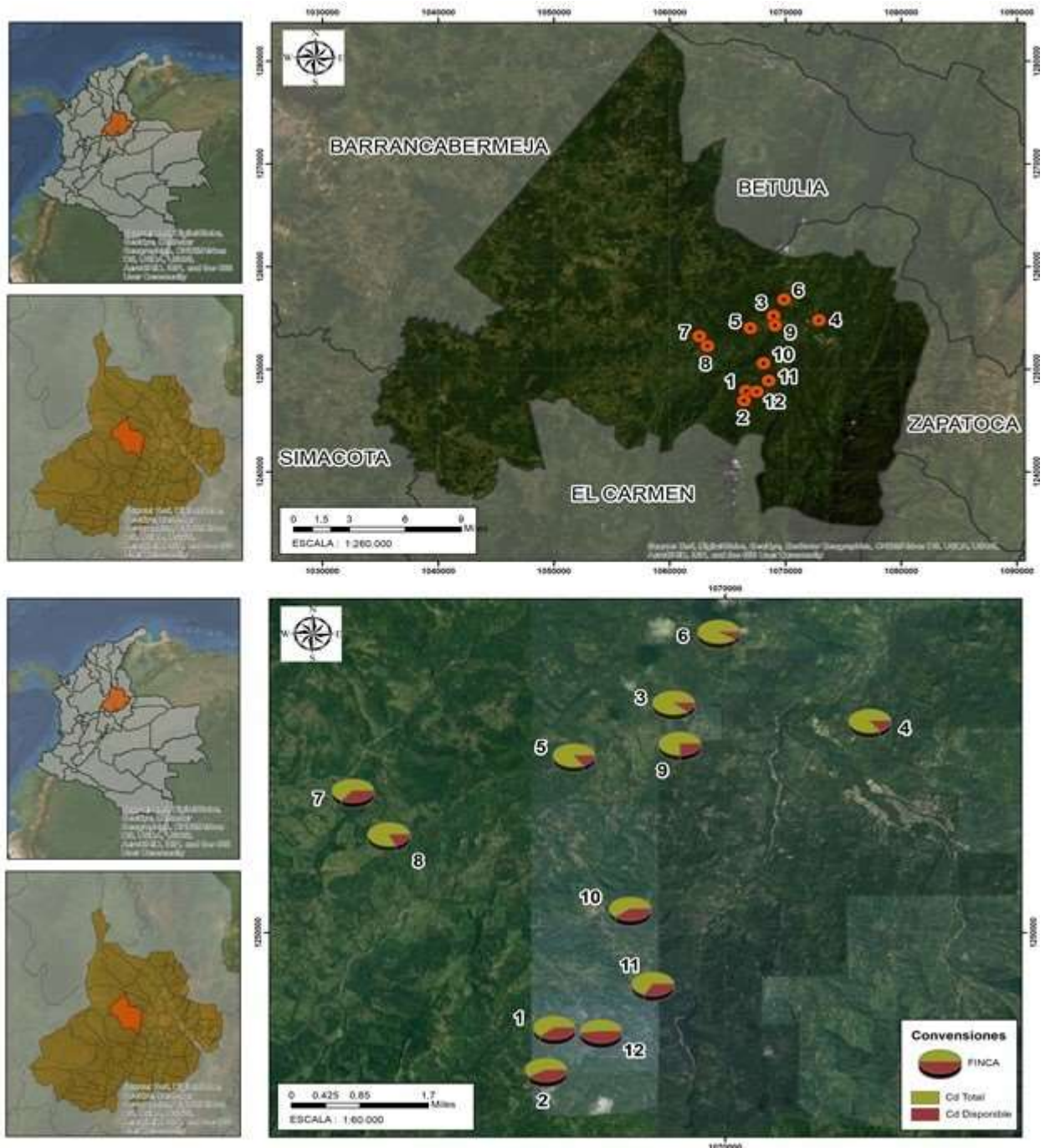


Figura 3. Localización de las 12 fincas cacaoteras y variación en el contenido de total y disponible de Cd en el área de estudio. Ver los valores de concentración de Cd total y disponible en la Tabla 9.

Tabla 9.

Contenido de Cd total y disponible en 12 fincas cacaoteras del municipio de San Vicente de Chucurí.

Finca	Cd total	Cd disponible
	mg kg ⁻¹	
F1	12,58 (10,41: 13,25) ac	7,96 (6,37: 9,36) AC
F2	17,12 (8,65: 21,70) ac	12,42 (7,44: 14,04) AC
F3	0,62 (0,50: 0,72) bcd	0,08 (0,06: 0,17) BDE
F4	0,81 (0,64: 1,16) ad	0,14 (0,14: 0,17) BCDE
F5	0,94 (0,75: 0,96) ad	0,17 (0,15: 0,25) BCDE
F6	0,92 (0,91: 0,95) ad	0,09 (0,01: 0,11) BE
F7	0,32 (0,28: 0,37) bd	0,18 (0,14: 0,20) BCDE
F8	0,18 (0,10: 0,32) bd	0,04 (0,03: 0,12) BE
F9	0,64 (0,56: 0,69) bcd	0,21 (0,19: 0,24) AE
F10	3,56 (2,33: 4,31) ac	2,34 (2,01: 3,13) AD
F11	0,68 (0,57: 0,80) bcd	0,34 (0,32: 0,38) AE
F12	49,9 (29,41: 86,55) a	46,36 (22,41: 77,05) A

Los valores observados en la tabla corresponden a las medianas (N=6) seguidas de los percentiles (25%: 75%). Letras diferentes en minúscula indican diferencias significativas en el contenido total de Cd, mientras que letras diferentes y en mayúscula indican diferencias significativas en el contenido disponible de Cd, según análisis de Kruskal Wallis (Tukey<0,05).

4.3 Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la disponibilidad de Cd.

El análisis de correlación de Spearman mostro alta correlación positiva entre el contenido disponible de Cd y %MO, Mg y Zn ($r > 0,80$, $p < 0,05$) en F12 (Tabla 10). En F2, la finca que mostró la segunda concentración más alta de Cd disponible, se observó una alta correlación ($r = 0,84$, $p < 0,05$) con el porcentaje de arena, mientras que en F10 la correlación observada fue con S ($r = 0,94$, $p < 0,05$). El contenido disponible de Cd en las fincas F6 y F8 se correlacionó positivamente con limo ($r = 0,85$, $p < 0,05$) y Zn ($r = 0,99$, $p < 0,05$). La finca F6, una de las fincas con la concentración más baja de contenido disponible de Cd en el suelo presentó alta correlación negativa entre el contenido disponible de Cd y P ($r = -0,94$, $p < 0,05$), CIC ($r = -0,88$, $p < 0,05$) y el

porcentaje de arcilla ($r = -0.85$, $p < 0.05$), mientras que el Na ($r = -0.84$, $p < 0.05$) mostró alta correlación negativa con el contenido disponible de Cd en F12 (Tabla 10). Se observó una correlación negativa entre el Cd disponible y el P ($r = -0.94$), CIC ($r = -0.94$) y el porcentaje de arcilla ($r = -0.85$).

El índice de Moran (I) fue calculado para evaluar si hay autocorrelación espacial y se encontró que las variables evaluadas presentan autocorrelación espacial al observarse que la concentración varía de acuerdo a la localización (Tabla 11).

En la *Figura 4* se observa el efecto de las variables fisicoquímicas del suelo sobre la disponibilidad de Cd. La CIC, el % MO, el contenido de Zn y la localización de la finca, son los parámetros que más influyen sobre la disponibilidad de Cd en el suelo, siendo explicado con el 78,47 % según el modelo de regresión del algoritmo randomForest (*Figura 4*).

Tabla 10.

Coefficientes de correlación de Spearman entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y el contenido disponible de Cd en la profundidad de 0-15 cm, en las 12 fincas cacaoteras evaluadas.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
pH	-0,26	0,77	0,15	0,32	0,63	0,05	0,55	0,45	0,71	0,55	-0,26	0,54
%MO[±]	-0,71	0,43	-0,72	0,81	-0,60	-0,26	0,09	0,37	-0,49	0,71	-0,38	0,94*
P	-0,09	-0,03	0,23	0,67	0,18	-0,94*	0,37	-0,67	0,26	0,89	-0,32	-0,77
K	0,14	0,46	-0,20	0,41	0,23	-0,79	-0,37	-0,54	-0,03	0,37	-0,48	0,32
S	0,20	-0,09	-0,28	-0,12	-0,08	-0,53	0,64	0,38	0,14	0,94*	0,41	0,54
Na	-0,37	0,06	0,52	0,23	0,31	-0,54	0,23	-0,79	-0,35	-0,58	0,35	-0,84*
Ca	-0,09	0,26	0,06	0,32	0,58	-0,44	0,17	-0,46	0,77	0,37	-0,12	0,77
Mg	0,52	0,77	-0,41	0,23	0,72	-0,44	0,26	-0,32	0,20	-0,09	-0,35	0,94*
B	-0,20	0,58	-0,49	0,74	0,00	-0,06	0,71	0,41	-0,49	0,60	-0,12	0,09
Fe	-0,03	-0,54	0,23	0,48	0,00	-0,62	-0,14	0,70	-0,31	-0,20	0,06	-0,77
Mn	0,83	-0,54	-0,52	0,32	0,55	-0,18	-0,83	0,55	0,66	-0,54	-0,03	-0,60
Cu	-0,09	-0,26	-0,75	0,79	-0,41	-0,40	-0,26	0,46	0,03	-0,71	-0,09	-0,77
Zn	-0,43	0,54	-0,23	0,41	0,81	-0,13	0,09	0,99*	0,09	0,37	-0,09	1,00*
CIC⁺⁺	-0,03	0,43	-0,62	0,32	-0,09	-0,88*	-0,09	-0,58	-0,71	0,31	-0,14	0,83
Arena	-0,41	0,84*	0,65	-0,13	0,02	0,09	0,64	0,00	0,56	0,58	0,60	-0,03
Limo	-0,44	0,26	-0,23	-0,13	0,80	0,85*	-0,64	0,66	0,67	0,75	-0,46	-0,26

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Arcilla	0,03	0,50	-0,49	0,12	-0,31	-0,85*	-0,82	-0,46	-0,77	-0,61	-0,33	0,15

Los datos mostrados corresponden al valor de r. *Correlaciones estadísticamente significativas. ‡Porcentaje de materia orgánica, ++Capacidad de intercambio catiónico. (N=72).

Tabla 11.

Índice de Moran del contenido disponible de Cd y las propiedades fisicoquímicas en la profundidad de 0-15 cm en el municipio de San Vicente de Chucuri.

	Cd disponible	pH	†MO	P	K	S	Na	Mg	B	Fe	Cu	Zn	CIC	Limo	Arcilla	Arena
			%	mg kg ⁻¹									meq/100g	%		
Valor observado	0,66	0,73	0,74	0,73	0,26	0,42	0,38	0,93	0,64	0,34	0,79	0,7	0,81	0,73	0,79	0,48
z-Valor	5,50	5,38	5,63	6,47	2,94	3,26	2,91	6,87	4,83	2,57	6,1	5,75	6,06	5,48	6,1	3,64
p-Valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

†Materia orgánica

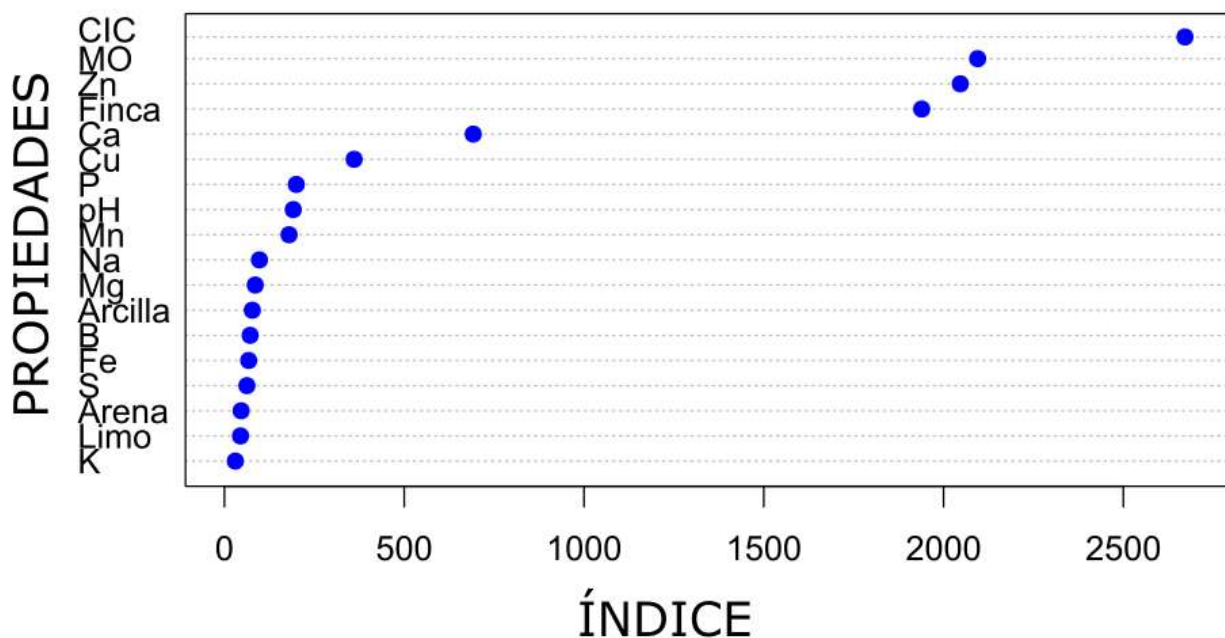


Figura 4. Efecto de las propiedades fisicoquímicas del suelo sobre la disponibilidad de Cd en la profundidad de 0-15 cm en las fincas cacaoteras de San Vicente de Chucuri

5. Discusión

En este trabajo se evaluó la variación en el contenido total y disponible de Cd en 12 fincas cacaoteras del municipio de San Vicente de Chucurí, Santander y la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la disponibilidad de este metal pesado para las plantas de cacao.

La concentración total de Cd en nueve de las 12 fincas (F1, F2, F5, F6, F7, F9, F10, F11 y F12), en la profundidad de 0-15 cm fue mayor que en las otras dos profundidades evaluadas (Tabla 8). Esto también ha sido observado en suelos cacaoteros en Ecuador (Chávez et al., 2015), Honduras (Gramlich et al. 2018) y Perú (Arévalo-Gardini et al., 2016). Albarracín y colaboradores (2019) reportaron una disminución del 18% en el contenido total de Cd con el aumento de la profundidad, en un área productora de cacao en el centro de Colombia. En las fincas F3, F4 y F8 se observó un aumento en la concentración de Cd total en la profundidad de 15-30 cm y disminuyó en la profundidad de 30-45 cm (Tabla 8).

La concentración de Cd en la solución del suelo es considerada tóxica para las plantas en concentraciones por encima de 0.001 mg L^{-1} y a nivel de la célula vegetal la concentración tóxica de Cd está por encima de 6 mg kg^{-1} (Krämer, 2010). En este trabajo, el contenido de Cd total fue mayor ($0,18$ a $49,9 \text{ mg kg}^{-1}$) al reportado en otras áreas cacaoteras en Latinoamérica. Al sur de Ecuador la concentración de Cd total osciló entre $1,51$ a $3,93 \text{ mg kg}^{-1}$ (Chávez et al. 2015); en Honduras el rango fue de $0,16$ a $0,25 \text{ mg kg}^{-1}$ (Gramlich et al., 2018) y entre $0,41$ - $1,12 \text{ mg kg}^{-1}$ y $0,26$ - $0,54 \text{ mg kg}^{-1}$, en dos áreas cacaoteras diferentes (Engbersen et al., 2019). En Venezuela fue reportada una concentración promedio de $0,28 \text{ mg kg}^{-1}$. (Martínez y Rivero, 2005). Por otro lado, en Colombia, se han reportado concentraciones de Cd total en un rango de $0,17$ - $23,60 \text{ mg kg}^{-1}$ en suelos de Yacopí y de $0,54$ - $7,05 \text{ mg kg}^{-1}$ en Nilo, en el departamento de Cundinamarca, (Rodríguez

2017). En el departamento de Santander, en el municipio de San Vicente de Chucuri, se han observado concentraciones de Cd total en el suelo que varían entre 0,33 a 6,00 mg kg⁻¹ (Martínez & Palacio, 2010) y de 0,92 a 5,13 mg kg⁻¹ (Tellez, 2010). Algunos de estos valores superan el valor crítico de 3 mg kg⁻¹ reportado para el suelo (Acevedo et al., (2005) citado por Huamani et al., (2012), indicando alta contaminación por Cd.

El contenido disponible de Cd en las fincas F12, F2 y F1 (Tabla 9), las fincas con mayor contenido disponible de Cd fue alto comparado con otras regiones cacaoteras de Latinoamérica (Chávez et al. 2015., Gramlich et al., 2018., Ramtahal et al., 2018., Engbersen et al., 2019) y de Colombia (Albarracín et al., 2019). En Ecuador la concentración de Cd disponible estuvo en un rango de 0,10–2,45 mg kg⁻¹, dependiendo del método de extracción (Chávez et al. 2015); en Honduras, ha sido observado que la concentración disponibilidad de Cd oscila entre 0,03 – 0,24 mg kg⁻¹ dependiendo del sustrato geológico, en regiones cacaoteras localizadas al norte y al oriente del país (Gramlich et al., 2018); así mismo, se han encontrado concentraciones disponibles de Cd muy bajas, que varían entre 0,00007-0,00076 mg kg⁻¹, también al norte de Honduras indicando que son suelos no contaminados por Cd (Engbersen et al., 2019). En Trinidad y Tobago la concentración de Cd extraíble estuvo en un rango de 0,30 a 1,70 mg kg⁻¹ (Ramtahal et al., 2018), mientras que en Perú, la concentración disponible de Cd estuvo en el rango de 0,31-1,52 mg kg⁻¹ (Huamani et al., 2012).

En Colombia, Rodríguez (2017), ha reportado concentraciones disponibles de Cd en la profundidad de 0-30 cm, en un rango de 0,01-16,90 mg kg⁻¹ en suelos de Yacopí y de 0,02-3,20 mg kg⁻¹ en Nilo, en el departamento de Cundinamarca. En el municipio de San Vicente de Chucuri, en el departamento de Santander, se han reportados concentraciones de Cd disponible en el rango de 0,32-4,15 mg kg⁻¹ (Martínez & Palacio, 2010), y entre 0,22-4,82 mg kg⁻¹ (Téllez, 2010) a una

profundidad de 0-20 cm. La concentración disponible de Cd en las fincas F3, F6 y F8 (0,08, 0,09 y 0,04 mg kg⁻¹) fue menor a 0,1 mg kg⁻¹, este valor indica que no hay contaminación por Cd en los suelos de estas fincas cacaoteras (Smolders & Mertens, 2013). Concentraciones de Cd similares fueron reportadas por Engbersen y colaboradores (2019) al norte de Honduras.

Propiedades del suelo como el pH (Adams et al., 2004; Degryse et al., 2009), materia orgánica, contenido de arcilla (Wang et al., 2004), contenido de Zn (Smolders & Mertens, 2013) y CIC (Chávez et al., 2015), han sido reportados previamente por afectar la dinámica del Cd en los suelos. Generalmente se observa una correlación negativa entre el pH y el contenido disponible de Cd en el suelo, es decir, en suelos ácidos, aumenta la disponibilidad de este metal pesado (Chávez et al., 2015; Albarracín et al., 2019), sin embargo, en este trabajo no se encontró una correlación entre estas variables (Figura 4), coincidiendo con lo reportado por Téllez (2010) al evaluar esta relación en la profundidad de 0-20 cm.

En este trabajo se encontró una correlación positiva entre el contenido disponible de Cd y el % MO en la F12 (Tabla 8), a diferencia de lo reportado por Téllez (2010) en la profundidad de 0-20 cm en la misma región. La disponibilidad de Cd en el suelo se ve afectada por la descomposición de la materia orgánica debido a que este proceso acidifica el suelo, formando complejos metal-ligando con el Cd y aumentando la movilidad y disponibilidad del mismo para la planta (Chávez et al., 2016).

El contenido disponible de Cd presentó alta correlación con el contenido de Zn en las fincas F8 y F12 ($r > 0,90$). Aunque las fincas F2, F1 y F10 no presentaron una correlación significativa con el contenido de Zn, en estas cuatro fincas (F12, F2, F1 y F10) se observaron las concentraciones más altas de Zn en la profundidad de 0-15 cm (Tabla 5). Martínez y Palacio (2010) mencionan que el contenido de Cd en el suelo aumenta significativamente con la presencia

de óxidos de Zn, ya que, al ser estos dos elementos del mismo grupo de la tabla periódica, poseen un comportamiento químico similar (Larramendi, (2003) citado por Jiménez, 2015). No obstante, en lo que se refiere a la absorción de Zn y Cd por la planta, estos dos elementos son considerados análogos (Smolders & Mertens, 2013), ya que la deficiencia de Zn en el suelo estimula la absorción de Cd (McKenna et al., 1993), al no estar regulada la absorción de Cd por la demanda de la planta (Smolders & Mertens, 2013). El Cd en el suelo, así como el Zn son elementos altamente solubles y móviles lo que permite su fácil absorción y acumulación en tejidos vegetales (Perfus-Barbeoch et al., 2002).

La finca F6 (Tabla 5) presento una correlación negativa con la CIC. Valores de CIC considerados medios (> 10 y < 80 meq /100 g) (FEDECACAO, 2012), como los reportados en este trabajo (Tabla 5), indican que esta propiedad facilita la movilización y disponibilidad de metales pesados en el suelo (Silvera et al, 2003). También en la finca F6 se observó una correlación altamente negativa entra el contenido disponible de Cd y la concentración de P, a diferencia de lo encontrado en suelos cacaoteros en Perú donde fue identificada una alta correlación positiva entre estas dos variables (Huauya & Huamani, 2014).

Ha sido reportado previamente que el aumento en la concentración de Cd en el suelo afecta la absorción de nutrientes como el K, Ca, Zn, P, Cu y Fe, así como la distribución de estos nutrientes dentro de los órganos de la planta (Soares et al 2005; Souza et al 2011).

Las fincas con mayor contenido total y disponible de Cd, se encuentran localizadas hacia la parte sur del municipio de San Vicente de Chucuri (*Figura 3*), esto indicaría que condiciones propias del suelo, así como algunas otras variables físicas tales como la pendiente, precipitación, temperatura del ambiente y del suelo, que no fueron evaluadas en este trabajo, podrían tener un efecto sobre la movilidad del Cd en esta zona del municipio.

San Vicente de Chucuri se encuentra localizado sobre una formación sedimentaria carbonácea, clasificada como la formación del Umir, donde el Cd está presente en altas concentraciones (Ingeominas, citado por: Martínez y Palacio (2010)). Aunque cuatro de las 12 fincas cacaoteras (F1, F2, F10 y F12), evaluadas en este trabajo presentan altas concentraciones de Cd total y disponible ($>3 \text{ mg kg}^{-1}$) ninguna de ellas se encuentra localizada en la formación de Umir (Apéndice E), a diferencia de lo reportado previamente por Martínez y Palacio (2010) y Téllez (2010). Las fincas F12 y F1 se encuentran ubicadas en la unidad litoestratigráfica suelo Coluvial (Qcol), la Finca F2 se encuentra ubicada en la unidad litoestratigráfica formación Paja (K1p) y la finca F10 se encuentra ubicada en la unidad litoestratigráfica formación Simiti (K1s) (Apéndice E). Sin embargo, la localización de las fincas F12 y F1 en la unidad litoestratigráfica de suelo Coluvial, podría significar que el alto contenido de Cd en estas dos fincas se deba a material contaminado con Cd, que ha sido transportado por el agua o por gravedad a esta zona, dado el origen del suelo coluvial.

Los suelos en la zona de San Vicente de Chucurí se caracterizan por tener baja fertilidad (Mantilla-Blanco et al., 2000), por lo que es importante considerar planes adecuados para el manejo integrado del cultivo de cacao y evitar la acumulación de Cd en los diferentes órganos de la planta. La abundante cantidad de hojarasca en el área de estudio indica el retorno de los nutrientes y contaminantes que están en la planta de cacao al suelo, proceso conocido como reciclaje de nutrientes. La estimación de la cantidad de Cd que es liberado al suelo por medio del material orgánico y el manejo de este material ayudaría a disminuir en gran porcentaje la acumulación de Cd en el suelo (Albarracín et al., 2019) y un manejo adecuado del suelo, ayudaría a disminuir la disponibilidad de este elemento para la planta de cacao.

6. Conclusiones

La concentración total de Cd en el suelo fue determinada para 12 fincas cacaoteras, en tres profundidades diferentes, siendo la profundidad de 0-15 cm la que presento mayor concentración oscilando en el rango de 0,18 a 49,90 mg kg⁻¹. La concentración disponible de Cd en el suelo, que fue evaluada en la profundidad de 0-15 cm, varió en el rango de 0,04 a 46,36 mg kg⁻¹.

La concentración total y disponible de Cd observadas en cuatro de las 12 fincas (F12, F2, F1 y F10), evaluadas superan el valor crítico de 3 mg kg⁻¹.

El %MO, la CIC, el contenido de Zn y la ubicación de la finca (unidad litoestratigráfica), son los parámetros que más influye sobre la disponibilidad de Cd en el suelo, en el municipio de San Vicente de Chucuri.

Según la distribución espacial del contenido total y disponible de Cd, las fincas F12, F2 y F1 se localizan más cercanas geográficamente que el resto de las fincas.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, A. (2018). Efecto del sulfato de cadmio en la germinación y el crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.). *RevIA*, 3(1).
- Adams, M., Zhao, F., McGrath, S., Nicholson, F., Chambers, B., (2004). Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties. *J. Environ. Qual.* 33, 532–541.
- Adriano, D., (2001). Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals/Domy C. Adriano. Springer, New York.
- Agronet MinAgricultura. (2019). Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. Recuperado de: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Albarrocín, HSR, Contreras, AED y Henao, MC (2019). Modelación de regresión espacial de suelos con alto contenido de cadmio en un área productora de cacao del centro de Colombia. *Geoderma Regional*, 16, e00214.
- Almeida A-AF, Valle RR, Mielke MS, Gomes FP (2007). Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. *Braz. J. Plant Physiol.* 2;19:83-98.
- Almeida A., Gomes L., Souza V. & Valle S. (2013). Morphophysiological, Biochemical, Ultrastructural and Molecular Responses of Cadmium Toxicity in Plants. En: m. Hasanuzzaman & M. Fujita (Ed). *Cadmium: Characteristics, Sources of Exposure, Health and Environmental* (pp. 36-76). Nueva York: Nova Science Publishers, Inc

- Ardila, N. J. M., & García, U. G. M. (Eds.). (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia: Escala 1: 100.000*. Ideam.
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81-89.
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of the Total Environment*, 605, 792-800.
- Blanco Hernández, A. L., Alonso Gutiérrez, D., Jiménez de Blas, O., Santiago Guervós, M., & Manzano, M. (1998). Estudio de los niveles de plomo, cadmio, zinc y arsénico, en aguas de la provincia de Salamanca. *Revista española de salud pública*, 72(1), 53-65.
- Bravo, I., Arboleda, C. & Y F. Martín. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*, Vol. 63, Núm. 2.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and regression trees*, Wadsworth international group, Belmont, California, USA. LHCb collaboration.
- Buccolieri, A., Buccolieri, G., Dell'atti, A., Strisciullo, G., Gagliano, R., 2010. Monitoring of total and bioavailable heavy metals concentration in agricultural soils. *Environ. Monit. Assess.* 168, 547–560.
- Caridad-Cancela, R., Paz-Gonzalez, A., Abreu, C., (2005). Total and extractable nickel and cadmium contents in natural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36, 241–252.

- Chávez, A., & Mansilla, J. (2004). Manual del cultivo de cacao. Programa para el Desarrollo de la Amazonia. Ministerio de Agricultura del Perú.
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533, 205-214.
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., & Baligar, V. C. (2016). Chemical speciation of cadmium: an approach to evaluate plant-available cadmium in Ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere*, 150, 57-62.
- Clemens, S., Palmgren, M. G., & Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in plant science*, 7(7), 309-315.
- Day, P.R. (1965). Particle fractionation and particle size analysis. En: Black CA (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part I. Agronomy*, (p. 45-78). Madison. Wisconsin. USA: ASA- SSSA.
- Degryse, F., Smolders, E., & Parker, D. R. (2009). Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: concepts, methodologies, prediction and applications—a review. *European Journal of Soil Science*, 60(4), 590-612.
- Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O., & Schulin, R. (2019). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of the Total Environment*, 678, 660-670.
- Espinoza, H., Coto, J., Herrera, J. & J. Sánchez. (2011). Determinación del contenido de metales pesados tóxicos (Cadmio y Plomo) en granos de cacao: reporte de avance. Programa de Cacao y Agroforestería Informe Técnico 2011. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola.

- ESRI. (25 de agosto de 2018). *ArcGIS 10.6 for Desktop*. Recuperado de: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>.
- Federación Nacional de Cacaotero. (2012). Caracterización química y textura de suelos de cinco municipios de Santander. *Colombia Cacaotera*. 5(14), 18. Recuperado de: https://www.fedecacao.com.co/portal/images/recourses/pub_revcolcacaotera/fedecacao-colombia-cacaotera-014.pdf.
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., Lopez, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of the Total Environment*, 612, 370-378.
- Guerra B., Muñoz J., Gutierrez E & Duarte D. (2018). Cacao: Cadmio y Biorremediación. Universidad de Santander y Federación Nacional de Cacaoteros. Recuperado de: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/cacao-cadmio-biorremediacion-t42789.htm>
- Hassan Z, Aarts MGM. (2011). Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants. *Environ. Exp. Bot.*;72:53-63.
- HuamanI-Yupanqui, H. A., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., & Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta agronómica*, 61(4).
- Huauya, M., & Huamaní, H. (2014). Macrofauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao, *Theobroma cacao* L.(Malvaceae). *The Biologist*, 12(1), 45-55.
- IDEAM. (2013). *Resolución N° 1211, 2 de julio 2013*. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/documents/51310/31376420/RESOLUCION_1211_2013.pdf

- IGAC. Instituto geográfico Agustín Codazzi. (2006). Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos, Sexta edición, Bogotá. Imprenta nacional de Colombia.
- Jackson, M.L. (1976). *Análisis Químico del Suelo*. Barcelona, España: Editorial Omega
- Jiménez Tobón, C. S. (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. *Producción+ Limpia*, 10(1), 89-104.
- Krämer U. (2010) Metal Hyperaccumulation in Plants. *Annu. Rev. Plant Biol.*; 61:517–34.
- Larramendi, J. I. R. (2003). Metales pesados y sus efectos sobre la salud. In G. P. Cañón (Ed.), *Didáctica de la Química y Vida Cotidiana* (pp. 275–282). Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- Lavid N, Barkay Z, Tel-Or E. (2001) Accumulation of heavy metals in epidermal glands of the waterlily (Nymphaeaceae). *Planta*; 212:313-322.
- Lindsay, WL, y Norvell, WA (1978). Desarrollo de una prueba de suelo DTPA para zinc, hierro, manganeso y cobre 1. *Soil Science Society of América*, 42 (3), 421-428.
- Mantilla, J., Arguello, A. L., & Méndez, H. (2000). Caracterización y tipificación de los productores de cacao del departamento de Santander. CORPOICA, Bucaramanga.
- Márquez-García B, Horemans N, Torronteras R, Córdoba F. (2012) Glutathione depletion in healthy cadmium-exposed *Erica andevalensis*. *Environ. Exp. Bot.*;75:159-166.
- Martínez, G., & Palacios, C. (2010). Determinación de metales pesados cadmio y plomo en suelos y granos de cacao fresco y fermentado mediante espectroscopia de absorción atómica de llama. Universidad industrial de Santander. Colombia.
- Martínez, Y., & Rivero, C. (2005). Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo. *Revista Ingeniería UC*, 12(3), 14-20.

- McKenna, I. M., Chaney, R. L., & Williams, F. M. (1993). The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach. *Environmental Pollution*, 79(2), 113-120.
- Mite, F., Carrillo, M., & Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de Cacao, suelos y aguas en Ecuador. En XII *Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*.
- Acevedo O. (2016). Plan de Desarrollo Municipal San Vicente de Chucuri Santander – Colombia.
- Nava-Ruiz, C., & Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 16(3), 140-147.
- Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, Forestier C. (2002). Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *Plant J.*; 32(4):539-548.
- PNUMA. (2008). Interim Review of Scientific Information on Cadmium. Geneva: United Nations Environment Program.
- Rascio, N., Navari-Izzo, F., (2011). Heavymetal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Sci.* 180, 169–181.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K., & Harrynanan, L. (2016). Relationships between cadmium in tissues of cacao trees and soils in plantations of Trinidad and Tobago. *Food and Nutrition Sciences*, 7(01), 37.
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Hamid, A., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K., & Harrynanan, L. (2018). The Effect of Liming on the Availability of Cadmium in Soils and Its Uptake in

- Cacao (*Theobroma cacao* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49 (19), 2456-2464, DOI: 10.1080/00103624.2018.1510955
- Rodríguez Albarracín, H. S. (2017). Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).
- Sahuquillo, A., Rigol, A., & Rauret, G. (2003). *Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 22(3), 152-159.
- Semarnat. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*.
- Shanina, T.M., Gelman. N.E. y Mikhailovskaya. V.S. (1967). Quantitative analysis of heterogenic compounds: Spectrophometric micro determination of boron. *J. Anal. Chem. USSR (Eng. Trans)* 22 663-667.
- Silvera, M.L.A., Alleoni, L.R.F., Gilherrme, L.R.G. (2003). Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*. 60 (4), 793-80.
- Singh BR, Soledad M. (2005) Soil pH and Calcium effects on cadmium uptake and concentration in rhizosphere soil. In: 8th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Austrália. CD-ROM.
- Smolders, E. & Mertens, J. (2013). Chapter 10 Cadmium. En: B. J. Alloway, (Ed.). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy metals in soils* (pp. 283-311). Springer, Dordrecht.

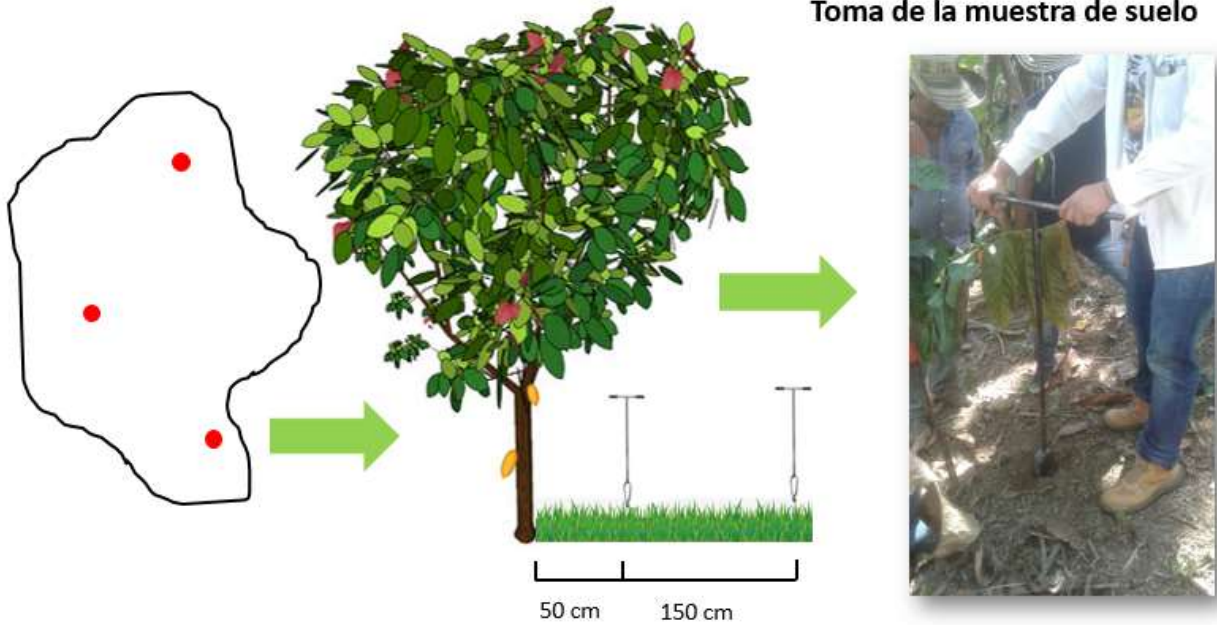
- Soares, CRFS, Siqueira JO, Carvalho JG, Moreira FMS.(2005) Fitotoxicidez de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva. *Rev. Árvore*; 29:175-183.
- Song, Y., Jin, L., & Wang, X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International journal of phytoremediation*, 19(2), 133-141.
- Souza VL, Almeida A-AF, Lima SGC, Cascardo JCM, Silva DC, Mangabeira PAO, Gomes FP.(2011) Morphophysiological responses and programmed cell death induced by cadmium in *Genipa americana* L. (Rubiaceae). *Biometals* :24:59-71.
- Téllez, A. I. G. (2010). Determinación y validación de cadmio total e intercambiable en algunos suelos cacaoteros del departamento de santander. Universidad industrial de Santander. Colombia.
- The European Commission, (2014). Commission Regulation (EU) no 488/2014 of 12 may 2014 amending regulation (EC) no 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union* 488, 75–79.
- Thomas, G.W. (1982). Exchangeable cations. En Tabatabai, M. A. *Methods of soil analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties-Agronomy Monography*.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), (2002). Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund sites.
- Vázquez S, Goldsbrough P, Carpena RO. (2006) Assessing the relative contributions of phytochelatins and the cell wall to cadmium resistance in white lupin. *Physiol. Plant.*; 128:487-495.
- Wang, X.-p., Shan, X.-q., Zhang, S.-z. & Wen, B. (2004). A model for evaluation of the phytoavailability of trace elements to vegetables under the field conditions. *Chemosphere* 55, 811–822.

- Yamaguchi, N., Mori, S., Baba, K., Kaburagi-Yada, S., Arao, T., Kitajima, N., & Terada, Y. (2011). Cadmium distribution in the root tissues of solanaceous plants with contrasting root-to-shoot Cd translocation efficiencies. *Environmental and experimental botany*, 71(2), 198-206.
- Zhang, X., Li, C & Nan, Z. (2010) Effects of cadmium stress on growth and anti-oxidative systems in *Achnatherum inebrians* symbiotic with *Neotyphodium gansuense*. *J. Haz. Mat.* 175 (1-3):703-709.

Apéndices

Apéndice A. Muestreo de suelo en un cultivo de cacao en el municipio de San Vicente de Chucuri

Toma de la muestra de suelo



Apéndice B. Muestras de suelos para análisis fisicoquímicos en el laboratorio de suelos de la Universidad Industrial de Santander



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CADMIO EN EL SUELO

Apéndice C. pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono y contenido de macronutrientes en las tres profundidades evaluadas en las fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucuri.

Finca	Profundidad	pH	MO	P	K	S	Na	Ca	Mg
	cm	mg kg ⁻¹							
F1	0-15	5.55 (5.40: 5.80)	3.13 (2.50: 3.43)	40.80 (7.31: 52.20)	0.66 (0.47: 1.68)	6.11 (5.40: 6.53)	0.23 (0.21: 0.25)	35.10 (25.40: 41.20)	1.19 (1.01: 1.50)
	15-30	5.65 (5.10: 5.80)	2.17 (1.74: 2.78)	19.43 (6.01: 46.30)	0.60 (0.43: 1.01)	5.40 (4.26: 6.25)	0.23 (0.21: 0.28)	35.30 (22.40: 42.60)	0.88 (0.77: 0.98)
	30-45	5.75 (5.40: 5.90)	1.80 (1.46: 2.09)	34.95 (5.72: 45.00)	0.62 (0.35: 0.70)	3.12 (2.27: 5.11)	0.26 (0.18: 0.37)	35.40 (22.40: 43.60)	0.77 (0.66: 0.88)
F2	0-15	6.90 (5.50: 7.60)	4.07 (3.79: 4.74)	109.00 (79.30: 12)	0.57 (0.51: 0.82)	8.06 (3.91: 13.00)	0.18 (0.16: 0.21)	64.60 (35.60: 68.60)	1.16 (0.92: 1.63)
	15-30	7.25 (5.10: 7.70)	4.46 (3.84: 5.07)	81.25 (33.80: 12)	0.49 (0.47: 1.17)	5.38 (4.50: 12.70)	0.20 (0.16: 0.23)	67.10 (29.80: 67.60)	1.07 (0.61: 1.67)
	30-45	7.40 (4.90: 7.50)	3.97 (3.81: 4.41)	108.50 (63.10: 159.00)	0.49 (0.47: 0.86)	5.09 (4.79: 12.40)	0.18 (0.16: 0.21)	64.00 (29.00: 67.60)	0.79 (0.56: 1.24)
F3	0-15	4.60 (4.00: 5.20)	2.45 (1.71: 2.72)	10.48 (7.31: 13.10)	0.57 (0.43: 0.70)	5.48 (5.34: 7.07)	0.21 (0.18: 0.28)	6.44 (3.00: 11.74)	2.26 (0.86: 2.54)
	15-30	4.50 (4.10: 5.10)	2.07 (1.71: 2.36)	4.92 (2.82: 9.92)	0.50 (0.39: 0.59)	5.34 (5.06: 5.92)	0.18 (0.16: 0.25)	5.28 (2.58: 9.46)	1.78 (0.72: 2.20)
	30-45	4.35 (4.20: 4.90)	1.79 (1.60: 1.96)	4.70 (3.40: 6.30)	0.39 (0.31: 0.51)	6.06 (4.48: 7.64)	0.18 (0.16: 0.21)	3.32 (2.10: 10.62)	1.35 (0.41: 1.99)
F4	0-15	4.80 (4.10: 5.70)	2.16 (1.81: 3.34)	20.40 (15.20: 26.00)	0.96 (0.66: 1.09)	13.80 (10.50: 15.10)	0.22 (0.18: 0.276)	14.77 (5.24: 29.00)	2.01 (1.19: 2.30)
	15-30	4.55 (4.00: 5.50)	1.62 (1.15: 3.17)	20.55 (2.36: 26.00)	0.68 (0.39: 1.29)	12.35 (8.79: 15.30)	0.24 (0.05: 0.28)	11.48 (2.72: 28.60)	1.78 (0.41: 2.32)
	30-45	4.50 (4.20: 4.90)	1.86 (1.07: 2.91)	16.35 (2.79: 27.00)	0.53 (0.51: 1.25)	14.50 (9.94: 20.00)	0.21 (0.16: 0.28)	10.94 (2.60: 27.40)	1.76 (0.44: 2.16)
F5	0-15	4.35 (4.20: 4.50)	2.58 (1.91: 3.66)	2.06 (1.06: 2.21)	0.78 (0.66: 0.86)	8.21 (7.53: 9.900)	0.16 (0.14: 0.16)	10.32 (8.94: 12.12)	4.34 (3.43: 4.63)
	15-30	4.45 (4.30: 4.50)	2.10 (1.38: 3.09)	2.07 (1.49: 2.93)	0.90 (0.82: 0.93)	9.06 (7.68: 10.90)	0.18 (0.16: 0.23)	9.79 (8.94: 10.58)	4.40 (4.27: 4.51)
	30-45	4.45 (4.30: 4.60)	2.51 (1.55: 4.67)	2.00 (0.48: 2.36)	0.82 (0.78: 0.94)	9.22 (7.20: 10.20)	0.21 (0.16: 0.23)	8.34 (7.32: 8.48)	4.05 (3.85: 4.25)
F6	0-15	4.00 (4.00: 4.60)	1.72 (1.55: 1.88)	2.50 (2.36: 5.10)	0.64 (0.59: 0.78)	12.30 (5.00: 15.70)	0.21 (0.18: 0.25)	5.80 (4.30: 10.44)	2.20 (1.72: 2.48)
	15-30	4.35 (4.00: 4.40)	0.97 (0.74: 1.59)	1.56 (1.20: 3.37)	0.45 (0.39: 0.66)	8.86 (2.62: 14.50)	0.20 (0.18: 0.23)	4.77 (2.92: 5.66)	1.63 (1.54: 1.75)
	30-45	4.45 (4.00: 4.50)	0.60 (0.50: 1.00)	2.21 (1.34: 5.25)	0.45 (0.35: 0.78)	8.16 (1.13: 16.60)	0.22 (0.21: 0.25)	3.75 (2.88: 4.22)	1.88 (1.68: 2.41)
F7	0-15	5.90 (5.60: 6.40)	1.28 (0.88: 2.46)	40.10 (30.80: 1.88)	1.72 (0.82: 2.81)	8.63 (6.51: 10.10)	0.17 (0.16: 0.23)	22.50 (20.20: 25.80)	5.38 (5.08: 5.70)
	15-30	5.90 (5.90: 6.20)	0.99 (0.64: 1.10)	28.45 (11.50: 47.7)	1.00 (0.78: 1.48)	7.81 (5.43: 9.21)	0.21 (0.16: 0.23)	21.30 (20.60: 25.00)	5.36 (5.34: 5.44)
	30-45	6.15 (5.80: 6.30)	0.69 (0.69: 0.83)	33.55 (10.50: 50.90)	0.86 (0.78: 1.05)	7.11 (5.97: 8.34)	0.23 (0.21: 0.23)	21.60 (20.40: 23.00)	5.42 (5.16: 5.52)
F8	0-15	4.25 (4.00: 4.30)	0.78 (0.72: 0.84)	3.84 (3.11: 6.01)	0.22 (0.16: 0.23)	7.25 (7.01: 7.47)	0.09 (0.07: 0.14)	3.45 (3.08: 5.70)	0.89 (0.41: 1.31)
	15-30	4.15 (4.10: 4.30)	0.79 (0.69: 0.96)	2.82 (2.53: 6.01)	0.23 (0.12: 0.35)	5.93 (4.27: 7.93)	0.15 (0.05: 0.18)	4.03 (2.82: 5.50)	0.86 (0.34: 1.27)
	30-45	4.10 (4.00: 4.20)	0.50 (0.50: 0.50)	3.12 (2.10: 7.31)	0.18 (0.12: 0.23)	6.37 (4.27: 7.32)	0.12 (0.07: 0.16)	2.64 (2.32: 3.60)	0.55 (0.37: 0.56)
F9	0-15	4.45 (4.20: 4.70)	1.57 (1.34: 1.67)	8.44 (4.67: 18.30)	1.01 (0.74: 1.56)	19.60 (16.80: 33.80)	0.12 (0.09: 0.23)	10.09 (7.88: 11.14)	5.02 (3.56: 6.00)
	15-30	4.35 (4.20: 4.50)	1.39 (1.26: 1.69)	8.54 (4.85: 10.00)	0.94 (0.74: 1.05)	18.40 (5.49: 33.80)	0.17 (0.14: 0.25)	7.50 (6.58: 10.16)	4.30 (3.48: 6.05)
	30-45	4.45 (4.30: 4.50)	1.05 (0.90: 1.28)	5.41 (2.39: 7.13)	0.78 (0.70: 0.90)	15.20 (4.27: 30.40)	0.18 (0.16: 0.32)	6.49 (6.20: 9.94)	4.13 (3.08: 6.06)
F10	0-15	7.40 (7.00: 7.50)	3.60 (2.93: 4.40)	13.85 (12.30: 18.50)	0.70 (0.59: 0.86)	16.05 (12.20: 18.70)	0.16 (0.14: 0.16)	57.20 (48.00: 66.40)	2.27 (1.37: 2.80)

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CADMIO EN EL SUELO

Finca	Profundidad	pH	MO	P	K	S	Na	Ca	Mg
cm		mg kg ⁻¹							
F11	15-30	7.55 (6.80: 7.80)	2.56 (2.21: 2.79)	8.72 (6.69: 9.00)	0.58 (0.47: 0.66)	8.05 (3.48: 27.80)	0.13 (0.09: 0.16)	52.30 (47.00: 65.60)	1.88 (0.73: 2.04)
	30-45	7.75 (6.40: 7.80)	1.85 (1.34: 2.02)	8.14 (4.67: 12.50)	0.53 (0.47: 0.62)	8.92 (2.39: 38.30)	0.15 (0.09: 0.23)	55.30 (46.00: 62.20)	1.63 (0.70: 1.96)
	0-15	4.70 (4.60: 5.50)	1.67 (1.31: 1.95)	11.65 (8.43: 14.10)	0.82 (0.66: 1.09)	6.64 (6.24: 7.83)	0.14 (0.14: 0.18)	23.20 (21.00: 28.40)	1.20 (1.08: 1.70)
	15-30	4.65 (4.50: 5.50)	1.28 (1.09: 1.69)	11.10 (7.56: 24.00)	0.68 (0.51: 1.09)	6.16 (5.65: 6.51)	0.17 (0.16: 0.25)	20.65 (17.50: 27.20)	0.76 (0.70: 1.06)
	30-45	4.60 (4.50: 5.90)	0.99 (0.66: 1.55)	8.31 (3.95: 20.30)	0.62 (0.55: 0.74)	5.78 (2.53: 8.05)	0.18 (0.09: 0.18)	21.00 (15.30: 30.40)	0.60 (0.55: 0.66)
	F12	0-15	6.35 (6.10: 6.50)	5.24 (4.10: 6.88)	41.55 (21.60: 84.20)	0.70 (0.62: 0.74)	10.90 (8.66: 12.70)	0.15 (0.07: 0.21)	63.10 (54.60: 70.20)
	15-30	6.40 (6.30: 7.20)	5.46 (4.09: 6.45)	26.75 (20.40: 59.60)	0.62 (0.55: 0.86)	7.99 (7.85: 8.66)	0.17 (0.09: 0.21)	64.00 (61.00: 67.20)	1.29 (1.01: 1.69)
	30-45	6.85 (6.40: 7.60)	4.72 (3.28: 5.41)	28.90 (21.30: 32.10)	0.59 (0.47: 0.78)	5.30 (4.89: 7.04)	0.13 (0.12: 0.14)	63.80 (62.00: 65.80)	0.89 (0.61: 1.22)

Apéndice D. Contenido de micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico y textura en las tres profundidades evaluadas en las fincas cacaoteras en el municipio de San Vicente de Chucuri.

Finca	Profundidad	B	Fe	Mn	Cu	Zn	CIC	Textura
cm		mg kg ⁻¹					meq/100 g	
F1	0-15	0.56 (0.45: 0.61)	119.50 (84.70: 138.00)	2.52 (2.46: 3.06)	3.62 (2.11: 4.15)	55.60 (45.50: 81.20)	24.30 (21.80: 26.60)	Arcilloso
	15-30	0.51 (0.37: 0.53)	2.50 (2.12: 2.90)	39.95 (28.10: 76.40)	3.52 (1.93: 4.41)	102.00 (85.50: 116.00)	20.60 (15.60: 26.00)	Arcilloso
	30-45	0.47 (0.37: 0.68)	2.26 (1.96: 2.62)	33.80 (24.00: 67.70)	3.42 (1.91: 4.56)	87.30 (84.00: 91.20)	21.50 (17.80: 24.80)	Arcilloso
F2	0-15	0.27 (0.21: 0.31)	19.30 (12.00: 297.00)	0.80 (0.74: 0.88)	3.67 (3.22: 4.63)	77.95 (71.00: 80.00)	28.80 (26.40: 31.40)	Arcilloso/Fco- Arcilloso Arenoso
	15-30	0.24 (0.21: 0.35)	0.85 (0.73: 0.92)	70.10 (21.70: 86.00)	4.14 (3.53: 4.27)	18.75 (16.90: 329.00)	26.40 (24.20: 32.40)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
	30-45	0.34 (0.18: 0.39)	0.88 (0.72: 0.97)	60.75 (26.00: 119.00)	4.34 (3.89: 4.60)	23.40 (15.30: 320.00)	28.30 (25.20: 30.60)	Arcilloso
F3	0-15	0.11 (0.05: 0.14)	144.00 (107.00: 166.00)	6.08 (1.84: 9.96)	1.08 (1.02: 1.63)	1.20 (0.90: 3.36)	14.90 (11.40: 20.00)	Arcilloso/Fco- Arcilloso Arenoso/Fco- Arcilloso
	15-30	0.09 (0.05: 0.14)	5.91 (2.84: 9.29)	1.21 (0.92: 3.05)	1.05 (0.94: 1.58)	130.00 (88.70: 140.00)	15.00 (10.40: 17.40)	Arcilloso/Fco- Arcilloso Arenoso/Fco- Arcilloso
	30-45	0.07 (0.04: 0.12)	4.96 (3.68: 6.76)	1.02 (0.72: 2.68)	1.04 (0.88: 1.56)	104.10 (62.10: 126.00)	13.80 (11.00: 17.40)	Arcilloso/Fco- Arcilloso Arenoso/Fco- Arcilloso

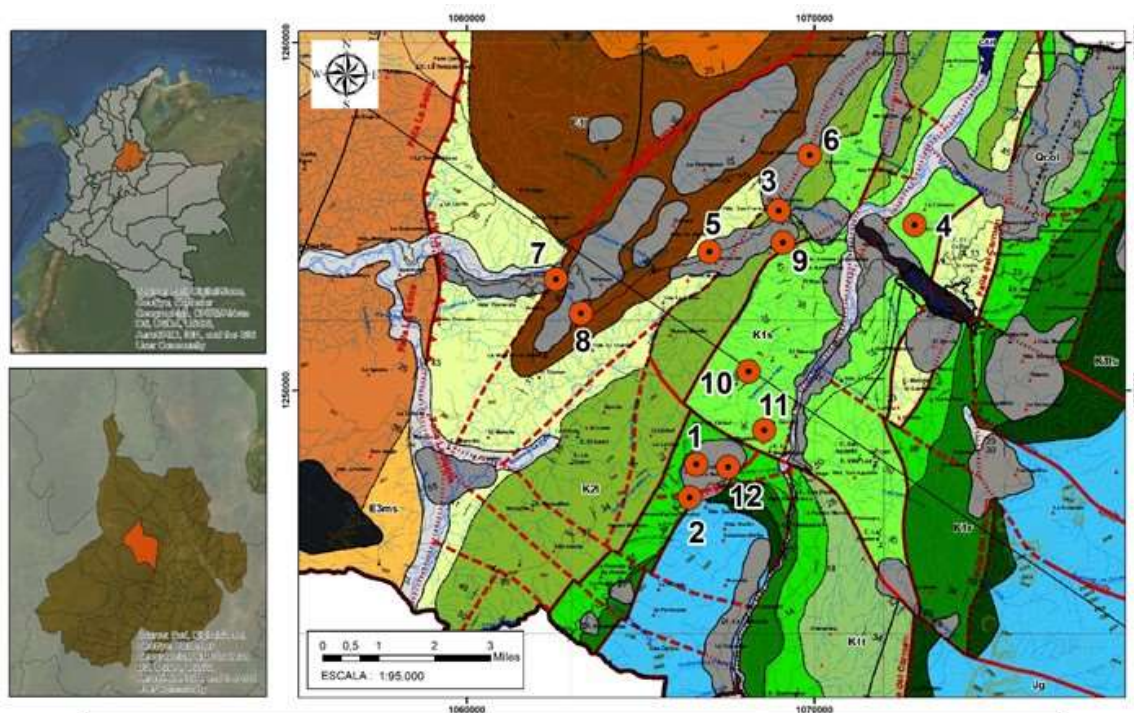
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CADMIO EN EL SUELO

Finca	Profundidad	B	Fe	Mn	Cu	Zn	CIC	Textura
		mg kg ⁻¹			meq/100 g			
cm								
F4	0-15	0.18 (0.07: 0.29)	175.00 (33.70: 18.00)	7.67 (6.19: 13.00)	1.26 (0.78: 2.00)	3.98 (1.94: 6.28)	16.50 (14.00: 19.40)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
	15-30	0.07 (0.05: 0.38)	7.19 (2.69: 13.20)	1.77 (1.06: 6.78)	0.85 (0.59: 2.00)	127.50 (38.70: 18)	15.30 (13.20: 18.80)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
	30-45	0.26 (0.07: 0.43)	6.71 (5.52: 15.90)	2.87 (1.16: 6.76)	1.07 (0.54: 1.86)	130.50 (48.00: 18.00)	15.70 (12.00: 18.40)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
F5	0-15	0.05 (0.05: 0.13)	133.10 (62.20: 187.00)	20.80 (15.90: 24.00)	2.02 (1.88: 2.25)	4.41 (3.97: 5.31)	20.20 (14.60: 21.80)	Arcilloso
	15-30	0.10 (0.08: 0.12)	22.25 (19.40: 23.00)	4.54 (3.30: 5.54)	2.19 (2.04: 2.28)	124.50 (72.10: 17)	16.60 (15.80: 23.40)	Arcilloso
	30-45	0.08 (0.08: 0.13)	17.90 (16.90: 20.20)	3.31 (3.06: 3.53)	2.17 (1.92: 2.28)	157.50 (55.50: 17)	19.10 (14.40: 22.60)	Arcilloso
F6	0-15	0.13 (0.10: 0.14)	72.55 (59.60: 107.00)	26.05 (18.50: 29.80)	2.38 (2.33: 2.56)	3.54 (2.78: 4.26)	14.50 (12.20: 17.80)	Arcilloso
	15-30	0.13 (0.11: 0.14)	20.30 (14.00: 29.10)	2.02 (1.48: 3.40)	2.46 (2.24: 2.69)	48.20 (44.50: 57.80)	12.30 (10.40: 16.20)	Arcilloso
	30-45	0.11 (0.08: 0.13)	20.40 (19.20: 23.90)	1.69 (1.40: 3.52)	2.50 (2.18: 2.55)	42.90 (23.20: 67.40)	12.70 (10.40: 17.20)	Arcilloso
F7	0-15	0.09 (0.04: 0.16)	37.15 (18.60: 50.10)	5.99 (4.71: 7.30)	4.62 (2.99: 5.28)	3.57 (3.07: 3.98)	18.20 (16.20: 20.60)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
	15-30	0.14 (0.14: 0.18)	5.12 (4.48: 8.05)	3.09 (2.45: 4.24)	4.02 (3.29: 4.77)	29.45 (19.80: 36.80)	18.50 (14.00: 21.00)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
	30-45	0.15 (0.12: 0.18)	4.39 (3.72: 5.15)	3.03 (2.21: 3.54)	3.72 (3.54: 4.39)	21.80 (19.90: 24.90)	18.60 (14.00: 20.60)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
F8	0-15	0.11 (0.06: 0.12)	43.10 (39.90: 50.00)	5.78 (1.92: 17.70)	0.71 (0.62: 0.85)	0.77 (0.64: 1.70)	7.80 (6.20: 9.00)	Franco/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
	15-30	0.08 (0.05: 0.10)	5.13 (1.67: 17.10)	0.68 (0.49: 2.26)	0.72 (0.65: 0.78)	30.20 (20.10: 36.40)	8.00 (5.20: 9.60)	Franco/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
	30-45	0.10 (0.05: 0.11)	3.65 (1.80: 16.90)	0.51 (0.31: 1.80)	0.62 (0.60: 0.72)	19.80 (9.88: 25.00)	8.20 (5.20: 9.60)	Franco/Fco-Arcilloso Arenoso/Fco-Arcilloso
F9	0-15	0.08 (0.05: 0.12)	90.15 (73.90: 118.00)	33.00 (31.50: 34.20)	2.11 (1.80: 2.91)	6.29 (3.72: 7.40)	20.70 (17.20: 22.40)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
	15-30	0.05 (0.04: 0.23)	32.95 (20.70: 34.00)	3.98 (3.07: 5.96)	1.78 (1.60: 2.78)	69.45 (67.40: 77.20)	20.10 (15.20: 21.40)	Arcilloso
	30-45	0.06 (0.04: 0.11)	29.25 (21.10: 34.50)	3.37 (2.11: 4.80)	1.75 (1.60: 2.79)	55.90 (40.70: 62.40)	18.50 (15.00: 22.60)	Arcilloso
F10	0-15	0.28 (0.25: 0.31)	20.65 (6.80: 27.60)	1.56 (0.88: 1.78)	2.65 (1.37: 2.92)	21.10 (17.50: 25.80)	29.20 (25.20: 33.80)	Arcilloso/Fco- Arcilloso
	15-30	0.22 (0.16: 0.32)	1.40 (1.28: 1.53)	17.05 (11.80: 18.70)	2.47 (1.40: 2.81)	16.30 (4.16: 22.50)	27.70 (21.80: 32.40)	Arcilloso

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CADMIO EN EL SUELO

Finca	Profundidad	B	Fe	Mn	Cu	Zn	CIC	Textura
	cm	mg kg ⁻¹				meq/100 g		
	30-45	0.18 (0.12: 0.25)	1.16 (1.08: 1.51)	11.08 (7.54: 15.20)	2.07 (1.39: 2.50)	9.04 (2.68: 26.60)	21.60 (18.60: 24.40)	Arcilloso
F11	0-15	0.12 (0.11: 0.12)	122.50 (31.90: 157.00)	5.36 (4.20: 7.17)	0.70 (0.66: 1.08)	1.82 (1.56 3.78)	18.40 (17.00: 21.60)	Arcilloso
	15-30	0.11 (0.06: 0.12)	5.38 (4.48: 6.26)	1.73 (1.26: 2.10)	0.70 (0.63: 0.84)	89.10 (32.80: 117.00)	18.50 (17.40: 21.00)	Arcilloso
	30-45	0.16 (0.13 0.18)	4.08 (2.10: 4.80)	1.26 (0.85: 1.62)	0.65 (0.58 0.73)	54.00 (17.40: 114.00)	16.70 (15.60: 19.20)	Arcilloso
F12	0-15	0.25 (0.20: 0.25)	47.60 (39.30: 70.10)	2.78 (1.15: 5.07)	5.52 (4.70: 8.70)	100.00 (90.80: 130.00)	38.50 (36.00: 41.40)	Arcilloso
	15-30	0.17 (0.12: 0.25)	1.26 (0.86: 2.33)	80.40 (70.40: 25)	5.52 (5.12: 7.80)	31.95 (22.70: 44.00)	36.70 (33.00: 40.20)	Arcilloso
	30-45	0.22 (0.14: 0.26)	1.04 (0.68: 1.28)	105.30 (50.20: 145.00)	6.22 (5.52: 6.92)	22.40 (10.80: 48.30)	34.60 (32.00: 38.60)	Arcilloso

Apéndice E. Mapa geológico de San Vicente de Chucuri mostrando la ubicación espacial de las 12 fincas evaluadas.



LEYENDA MAPA DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS						
Era	Periodo	Unidades Litoestratigráficas	Color	Convención	Área (ha)	(%)
Cenozoico	Cuaternario	Suelo Aluvial	Light Gray	Qal	5618.68 ha	4.71 %
		Suelo Coluvial	Dark Gray	Qcol	7763.31 ha	6.50 %
		Terraza Aluvial	Black	Qt	6287.89 ha	5.27 %
	Neógeno	Formación Grupo Real	Light Orange	N1r	23970.57 ha	20.08 %
		Formación Colorado	Orange	N3c	20018.81 ha	16.77 %
	Paleógeno	Formación Mugrosa Superior	Light Yellow	E3ms	996.69 ha	0.84 %
		Formación Mugrosa Inferior	Yellow	E3mi	837.17 ha	0.63 %
		Formación Esmeralda	Yellow-Orange	E2e	1560.40 ha	1.33 %
		Formación La Paz	Orange	E2l	5062.33 ha	4.24 %
		Formación Lisama	Dark Orange	E1l	6071.27 ha	5.09 %
Mesozoico	Cretácico	Formación Umir	Light Green	K2u	6428.55 ha	5.39 %
		Formación La Luna	Light Green	K2l	4582.59 ha	3.83 %
		Formación Simití	Light Green	K1s	4373.18 ha	3.66 %
		Formación Tablazo	Light Green	K1t	2193.83 ha	1.84 %
		Formación Paja	Light Green	K1p	3288.50 ha	2.76 %
		Formación Rosablanca	Light Green	K1r	3288.20 ha	2.76 %
		Formación Los Santos	Light Green	K1ls	2269.49 ha	1.90 %
	Jurásico	Formación Girón	Blue	Jg	14825.31 ha	12.42 %