



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**



**Fertilidad de suelo y nutrición de plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en  
Tabasco**

**TESIS**

**Que para obtener el Grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS**

**PRESENTA**

**Ing. Agr. Jean Jacques Donatien**

**DIRECTOR**

**Dr. Rufo Sánchez Hernández**

**CO-DIRECTOR**

**Dr. Gelacio Alejo Santiago**

Villahermosa, Tabasco. Junio de 2020.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE  
CIENCIAS AGROPECUARIAS**



**ASUNTO: El que se indica.  
OFICIO: DACA-012**

Villahermosa, Tabasco, a 28 de mayo de 2020

**C. Jean Jacques Donatien  
EGRESADO DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS  
PRESENTE**

Por este conducto y de acuerdo a su solicitud de autorización de impresión de Tesis, informo a ud. que sobre la base del Artículo 26 del reglamento de Posgrado de esta Universidad, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión de su trabajo recepcional** bajo la modalidad de Tesis titulada "Fertilidad de suelo y la nutrición de plantas de cacao (Theobroma cacao L.) en Tabasco."

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

**ATENTAMENTE**

**PH.D. ROBERTO ANTONIO CANTÚ GARZA  
DIRECTOR**

U.J.A.T.



DIVISIÓN ACADÉMICA DE  
CIENCIAS AGROPECUARIAS  
DIRECCIÓN

E.c.p.- Archivo.

Miembro CUMEX desde 2008

**Consortio de  
Universidades  
Mexicanas**  
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Km 25, Carret. Villahermosa-Teapa  
Ra. La Huasteca, 2ª sección, 86298, Centro, Tabasco, México  
Tel. (+52 993) 358-15-85 y 142-9150

Correos electrónicos: [dirección.daca@ujat.mx](mailto:dirección.daca@ujat.mx), [daca.direccion@gmail.com](mailto:daca.direccion@gmail.com)

[www.ujat.mx](http://www.ujat.mx)

[www.facebook.com/ujat.mx](https://www.facebook.com/ujat.mx) | [www.twitter.com/ujat](https://www.twitter.com/ujat) | [www.youtube.com/UJATmx](https://www.youtube.com/UJATmx)

## CARTA DE AUTORIZACIÓN

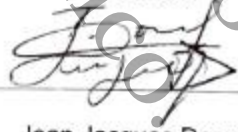
El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco que utilice tanto físico como digitalmente la tesis de grado denominada "**Fertilidad de suelo y nutrición de plantas de cacao (*Theobroma cacao L.*) en Tabasco**", de la cual soy autor y titular de los derechos de autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitada para subirla a la red abierta de biblioteca digital (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la universidad tenga relación institucional.

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

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 03 días del mes de junio del año 2020.

Autoriza



Jean Jacques Donatien

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante los estudios de maestría.

Al Dr. Rufo Sánchez Hernández como Director de tesis y al Dr. Gelacio Alejo Santiago como Codirector.

Agradezco de manera especial al Dr. Rufo Sánchez Hernández y al M.C. Ulises López Noverola por sus asesoramientos, apoyos, conocimientos, motivación y la confianza que fueron parte esencial para la realización y la finalización de la investigación.

A cada uno de los integrantes del comité de revisor: Dr. Cesar Márquez Quiroz, Dra. Laura Mercedes Lagunés Gálvez, Dr. Rufo Sánchez Hernández, Dr. Efraín de la Cruz Lázaro y al Dr. Aldenamar Cruz Hernández, por realizar la revisión de la tesis, por compartir conocimientos y por guiar este trabajo a buen camino.

Al maestro Arturo Enrique Priego Ramírez y al Dr. Eusebio Martínez Moreno (†), por los consejos y su humildad.

A mis compañeros de generación: Ing. Agr. Ephesien Zidor, Ing. Agr. Jean Wildort Félix, I.Q. Ignacio Brindis Concepción y a I.Q. Isaac Abraham Reyes Cruz quienes formaron parte en este arduo camino. A todos mis compañeros integrantes de la Maestría en Ciencias Agroalimentarias: Ing. Agr. M.C. Felson Florvil, Ing. Agr. Elson Santo, Ing. Agr. M.C. David López Morales, entre otros por compartir momentos felices.

A Dolores Sánchez Hernández y María Guadalupe Altunar Hernández, por sus ayudas en la realización de los trabajos de campo y laboratorio.

## DEDICATORIAS

### A DIOS

Por haberme permitido vivir hasta este día, guiarme a lo largo de mi vida, por permitirme sonreír ante todos mis logros que son resultados de su ayuda. Por haberme dado fortaleza para seguir adelante y terminar una escala más en mis estudios.

### A MIS PADRES

A mi papá Jacob Donatien, a mi mamá Marie Damante Dosthene y a la esposa de mi papá Jacqueline Cléophat que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, la cual me ha ayudado a salir adelante en momentos más difíciles. Sabiendo que jamás existirá una forma de agradecer una vida de lucha, sacrificio y esfuerzo constante; sólo deseo que entiendan que el logro mío es logro suyo; que el esfuerzo está inspirado en ustedes y que el único ideal es ser una persona de provecho, excelente profesionalista y como ser humano.

### A MIS QUERIDOS

Youdeline Donatien por su apoyo de siempre, a Joanne Donatien, Ruth Donatien, Vanessa Donatien, Jean Woody Laurent, Jerry Ozil y Tara Ozil, ellos son parte de este logro y mi triunfo es también suyo.

Lucine Diaéla Donatien por ser la fuente de motivación de mis esfuerzos, te quiero.

Tamara Lizbeth Alejo González por ser parte de mi vida. Por su amor, apoyo, comprensión, consejos, por sus palabras de aliento y sobre todo por decirme siempre “si puedes”, este logro es también tuyo.

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	ii
<b>RESUMEN</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. JUSTIFICACIÓN</b> .....	3
<b>III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....	5
3.1 Objetivo general .....	5
3.2 Objetivos específicos .....	5
3.3 Hipótesis .....	5
<b>IV. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	6
4.1 Origen y distribución del cacao .....	6
4.2 Producción de cacao a nivel mundial, nacional y estatal .....	6
4.3 Requerimientos climáticos para el cultivo de cacao .....	7
4.4 Requerimientos edáficos para el cultivo de cacao .....	8
4.4.1 Requerimientos de la fertilidad edáfica para el cultivo de cacao .....	8
La importancia de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....	11
4.5 Importancia de la nutrición de la planta del cacao .....	11
<b>V. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	13
5.1 Localización y descripción del área de estudio .....	13
5.2 Épocas climáticas en Tabasco .....	13
5.3 Diseño de muestreo .....	14
5.3.1 Selección de productores cooperantes, plantaciones y árboles productores .....	15
5.3.2 Descripción y manejo de las plantaciones .....	15

5.3.3	Georreferenciación de las plantaciones .....	16
5.4	Colecta y procesamiento de muestras de suelos y de tejidos foliares .....	17
5.5	Caracterización de la fertilidad edáfica y diagnóstico nutrimental de las plantas de cacao en Tabasco.....	18
5.6	Análisis estadístico de los datos .....	20
<b>VI.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>21</b>
6.1	Suelos identificados en las plantaciones de cacao estudiadas en Tabasco ..	21
6.2	Caracterización física de los suelos en los agrosistemas de cacao en Tabasco .....	22
6.3	Propiedades químicas de suelos en los agrosistemas de cacao en Tabasco	24
6.3.1	Contenidos de pH, CE, MO, Nt, P y CIC en las parcelas de cacao estudiadas .....	24
6.3.2	Contenidos de cationes intercambiables y suma de bases (SB) .....	28
6.3.3	Contenidos de micronutrientes .....	31
6.4	Contenido de nutrimentos en los tejidos foliares de cacao en Tabasco.....	33
6.4.1	Nitrógeno y fósforo.....	33
6.4.2	Potasio y sodio.....	35
6.4.3	Calcio y magnesio.....	38
6.4.4	Hierro y manganeso.....	41
6.4.5	Cobre y zinc.....	44
6.5	Tendencia del estado nutrimental de la planta de cacao durante las épocas climáticas en las zonas productoras de Tabasco.....	46
6.6	Relación entre las variables de tejidos foliares en cada época.....	48
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>52</b>
<b>VIII.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>IX.</b>	<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Extracción nutrimental de árboles de cacao para producir una tonelada de cacao seco (Puentes <i>et al.</i> , 2016). .....	11
<b>Cuadro 2.</b> Ubicación, identificación y localización de las plantaciones.....	17
<b>Cuadro 3.</b> Propiedades físicas y los grupos de suelos en las plantaciones de cacao en Tabasco.....	23
<b>Cuadro 4.</b> Contenido de pH, CE, MO, Nt, P-Olsen disponible y CIC en los agrosistemas de cacao en Tabasco. ....	28
<b>Cuadro 5.</b> Valores de las medias de cationes intercambiables y suma de bases en los agrosistemas cacao en Tabasco. ....	30
<b>Cuadro 6.</b> Contenido de Fe, Mn, Cu y Zn en los agroecosistemas de cacao en Tabasco.....	32
<b>Cuadro 7.</b> Contenidos de N y P en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.....	35
<b>Cuadro 8.</b> Contenido de K y Na en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.....	38
<b>Cuadro 9.</b> Contenidos de Ca y Mg en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.....	41
<b>Cuadro 10.</b> Contenidos de Fe y Mn en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.....	44
<b>Cuadro 11.</b> Contenidos de Cu y Zn en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.....	46
<b>Cuadro 12.</b> Correlación entre los elementos en tejidos foliares durante la época de nortes.....	49
<b>Cuadro 13.</b> Correlación entre los elementos en tejidos foliares durante la época seca. ....	50
<b>Cuadro 14.</b> Correlación entre los elementos en tejidos foliares durante la época de lluvias.....	51



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Medias de precipitaciones mensuales en la Subregión Sierra y Subregión Chontalpa durante el ciclo 2018-2019 (CONAGUA, 2019).....	14
<b>Figura 2.</b> Contenidos de macronutrientes en tejidos foliares de cacao durante las épocas climáticas en Tabasco.....	34
<b>Figura 3.</b> Contenidos de micronutrientes en tejidos foliares de cacao durante las épocas climáticas en Tabasco.....	48

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## RESUMEN

Se realizó una investigación con el objetivo de relacionar la fertilidad edáfica y el contenido nutrimental en plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) durante las épocas climáticas de nortes, seca y lluvias en el estado de Tabasco, México. Se seleccionaron plantaciones en producción con morfotipo forastero, de municipios de la subregión Centro, Chontalpa y Sierra. Se realizó un muestreo de suelo inicial en diciembre (época de nortes) de 2018, para determinar la textura, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, N total, P, K, Ca, Mg, Na, capacidad de intercambio catiónico, suma de bases, Fe, Mn, Cu y Zn. En los tejidos foliares se determinó el contenido de N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn, durante las tres épocas del año. Los resultados de los análisis de suelo y de tejidos foliares se procesaron mediante análisis de varianza, comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) y de correlaciones entre las variables de nutrición de cada época del año. En función de las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados, las parcelas establecidas en Fluvisols (FL) tuvieron mejor fertilidad edáfica, mientras que en Cambisols, Arenosols y Luvisols se tuvo la menor fertilidad edáfica, en tanto que los Gleysols y algunos Cambisols mostraron condiciones intermedias de fertilidad. El contenido de elementos en las hojas es diferente entre parcelas y épocas del año, el mayor contenido de N y de P se registró en los FL durante la época de lluvias y el contenido de K y Mg durante los nortes. Sólo los contenidos de Ca y Zn fueron suficientes en todas las parcelas durante todas las épocas, el resto de elementos minerales varió según la época climática.

**Palabras clave:** Trópico húmedo, propiedades edáficas, disponibilidad de nutrientes, nutrición vegetal, frutales tropicales.

## ABSTRACT

An investigation was carried out with the objective of relating edaphic fertility and nutritional content in cocoa plants (*Theobroma cacao* L.) during the northern, dry and rainy seasons in Tabasco, Mexico. Plantations in production were selected from the municipalities of Center, Chontalpa and Sierra Subregion. An initial soil sampling was carried out in December 2018 to determine the texture, apparent density, pH, electrical conductivity, organic matter, total N, P, K, Ca, Mg, Na, cation exchange capacity, base sum, Fe, Mn, Cu and Zn. In the foliar component, the content of N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn was determined during the aforementioned climatic periods. The data collected in both components were processed by analysis of variance, comparison of Tukey means ( $p \leq 0.05$ ), and the nutrition variables of each season were correlated. Based on the physical and chemical properties of the studied soils, the plots established in Fluvisols (FL) presented the best soil fertility, while the plots established in Cambisols, Arenosols and Luvisols presented the worst fertility conditions, and finally, the plots established in Gleysols and some Cambisols showed intermediate fertility conditions. The concentrations of elements in the leaves were differentiated between plots and between seasons, the highest content of N and P was recorded in the FL during the rainy season and the content of K and Mg during northern. It was observed that only the Ca and Zn contents were sufficient in all the plots during all the seasons, the rest of the mineral elements varied according to the climatic season.

**Key words:** Humid tropics, edaphic properties, nutrient availability, plant nutrition, tropical fruit trees.

## I. INTRODUCCIÓN

El suelo representa una fuente natural de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de las plantas, conocer la disponibilidad de elementos en el suelo es importante para lograr buenos rendimientos. Los agrosistemas de cacao se caracterizan por suministrar hojarasca al suelo, aunque dichos aportes no siempre mejoran las propiedades edáficas, por lo que ocasionalmente, los niveles de la fertilidad en los agrosistemas de cacao son bajos (Barrezueta-Unda y Paz-González, 2017), como consecuencia, las plantas de cacao no disponen de suficientes nutrientes para una adecuada nutrición y para sostener adecuados rendimientos, por lo que es necesario aportar fertilizantes (Puentes *et al.*, 2016; Furcal-Beriguete, 2017).

Las regiones Sureste y Suroeste de México son las principales zonas productoras de cacao del país, en particular los estados de Tabasco, Chiapas y Guerrero (Espinosa-García *et al.*, 2015), en donde el sistema agroforestal de cacao es uno de los más importantes, debido a su rol en la economía de la región (Salvador *et al.*, 2017). No obstante, durante el periodo de 1997 a 2017, la superficie sembrada de cacao registró una disminución de 33.19 %, mientras que en la producción se redujo 40.52 % (SIAP, 2017).

En Tabasco, específicamente en la subregión Chontalpa, los bajos rendimientos en el cultivo de cacao se atribuyen a la baja fertilidad edáfica, y a problemas de plagas y enfermedades, como la moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif & Par) (Díaz-José *et al.*, 2013). De acuerdo con Pascual-Córdova *et al.* (2017), los suelos en las plantaciones de cacao en esa subregión de Tabasco presentan bajos niveles de magnesio y potasio, por lo que los rendimientos apenas alcanzan los 500 kg ha<sup>-1</sup> de grano seco (SIAP,

2018), muy por debajo de los 770 kg ha<sup>-1</sup> que se requieren para que el cultivo de cacao sea rentable (Espinosa-García *et al.*, 2015). Según Puentes *et al.* (2016), para lograr un buen crecimiento y rendimiento en el cultivo, es necesario comprender las relaciones entre nutrientes que afectan la nutrición de las plantas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## II. JUSTIFICACIÓN

El cacao es un cultivo importante en la economía del estado de Tabasco, ya que es uno de los cultivos agrícolas de mayor arraigo, al cual se dedican en su mayoría, pequeños productores que basan su sustento económico en este cultivo (Ramírez-González *et al.*, 2008; Díaz-José *et al.*, 2013). Sin embargo, a pesar de que el 59 % de la superficie del trópico mexicano tiene potencial para producir cacao (Espinosa-García *et al.*, 2015), desde el año 2000, disminuyó la producción y la productividad, por lo que se convirtió en un país importador, llegando a ingresar alrededor de 17,013 t de grano de cacao (SIAP, 2018).

Según Puentes *et al.* (2016), el potencial de producción depende de interacciones ambientales, manejo del cultivo, así como del suministro de nutrientes. Asimismo, el rendimiento de los cultivos está determinado por la disponibilidad de nutrientes en el suelo, su absorción y distribución en las plantas (López-Lefebre *et al.*, 2002). Respecto, al factor nutrimental Córdova-Ávalos *et al.* (2001) y Palma-López *et al.* (2007) indican que el inadecuado manejo de la fertilización es uno de los factores que provocan la baja productividad del cacao, debido a que los suelos no aportan suficientes nutrientes para satisfacer los requerimientos de las plantas. Por su parte, Amores (1992) señala que, si bien la nutrición de las plantas es básica para el crecimiento y la producción rentable de los cultivos, también el clima es un aspecto que requiere atención para lograr respuestas más integrales al momento de manejar la fertilización. En este sentido Cruz-Sánchez *et al.* (2018) señalan que, en el estado de Tabasco, México, se identifican tres épocas del año con respecto al régimen pluviométrico, las cuales son: épocas de nortes (noviembre-febrero), seca (marzo-

mayo) y lluviosas (junio-octubre). Al respecto, Díaz-José *et al.* (2013), indican que en México no existe información suficiente acerca de la dinámica de la producción de cacao vinculada con la disponibilidad de nutrientes durante las diferentes épocas del año. Por lo tanto, un diagnóstico nutrimental en las plantaciones de cacao durante dichas épocas podría permitir la comprensión del vínculo entre la fertilidad edáfica, nutrición vegetal y el rendimiento del cultivo, y con ello generar información útil para la toma de decisiones sobre el manejo de la fertilización del cultivo para mejorar la producción y la productividad. Estudios previos realizados por Salvador-Morales *et al.* (2019) indicaron que las plantaciones de cacao en el estado de Tabasco se establecen en más de 90 % sobre suelos Fluvisols, Cambisols, Vertisols y Gleysols, por lo que el presente estudio contempló profundizar los estudios en estos suelos, incluyendo suelos que pudieron ofrecer condiciones distintas de fertilidad, como Arenosols en la zona costera o Luvisols en valles intermontanos de la zona sierra de Tabasco, donde también se distribuyeron plantaciones de cacao.

### III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 3.1 Objetivo general

Conocer la fertilidad edáfica y el estado nutricional de las plantas de cacao en las diferentes épocas climáticas del año en las subregiones productoras de cacao de Tabasco y la relación que hay entre la fertilidad y la época del año.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la fertilidad de los suelos cultivados con cacao en las subregiones Centro, Chontalpa y Sierra en Tabasco.
- Determinar el estado nutricional de las plantas de cacao en plantaciones de las subregiones Centro, Chontalpa y Sierra en Tabasco durante las épocas de nortes, seca y lluvias.
- Determinar la relación entre la fertilidad edáfica y el estado nutricional de los árboles de cacao durante las épocas de nortes, seca y lluvias.

#### 3.3 Hipótesis

El estado nutrimental de las plantas de cacao en las subregiones productoras de Tabasco depende de la fertilidad de los suelos y de la época climática del año.



## IV. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Origen y distribución del cacao

El cacao es un cultivo perenne, nativo de las regiones tropicales húmedas del Sur y Centro de América (Hipólito-Romero *et al.*, 2017), específicamente de los bosques aledaños a los ríos Amazonas, Orinoco y sus afluentes (Batista, 2009). En México, su cultivo fue practicado por los Mayas, quienes usaron las semillas del cacao para elaborar el chocolate (Mendoza-López *et al.*, 2011), de ahí que su cultivo se distribuya en regiones donde afloraron esas culturas prehispánicas, principalmente Tabasco y Chiapas, siendo estos los estados con mayor producción y superficie en la actualidad, aunque también se cultiva en Oaxaca, Guerrero y Veracruz (Salas y Hernández, 2015).

### 4.2 Producción de cacao a nivel mundial, nacional y estatal

La producción mundial de grano seco de cacao durante el ciclo 2016-2017 fue de 4.74 millones de toneladas (ICCO, 2018). En este ámbito, África aporta la mayor parte de la producción con el 69.5 %, seguido de América, Asia y Oceanía con 15.5, 13.9 y 1 %, respectivamente, durante este periodo, los 10 principales países productores fueron: Costa de Marfil, Ghana, Indonesia, Nigeria, Camerún, Brasil, Ecuador, Perú, República Dominicana y Colombia (FAO, 2019).

En México durante el periodo de 2003-2016, la producción de cacao registró una caída en el rendimiento (SAGARPA, 2017), por lo que para el 2017 ocupó el 13° lugar como productor a nivel mundial, con una superficie de 60 mil ha sembradas y una producción de 27,287 t, de las cuales 1,037 t fueron exportadas, mientras que la cantidad importada fue de 41,333 t, lo que significó una pérdida de 85.5 millones de

dólares (SIAP, 2018). De la producción antes mencionada, el estado de Tabasco fue el mayor productor con 40,884 ha sembradas de las cuales 40,710 ha fueron cosechadas, de donde se generó una producción de 17,430.20 t, cuyo valor económico fue de 696.6 millones de pesos (SIAP, 2018).

#### **4.3 Requerimientos climáticos para el cultivo de cacao**

El crecimiento y desarrollo del cacao está determinado por factores hereditarios intrínsecos y ambientales, como temperatura, luz, precipitación, humedad relativa, entre otros. De estos factores, los más importantes que controlan el crecimiento son la temperatura y la lluvia (Hardy, 1961; Almeida y Valle, 2007). La temperatura es un elemento climático importante para los frutales de las regiones tropicales (Chávez-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017), debido a que afecta al crecimiento, la floración y fructificación, regula la absorción de agua y nutrientes, y la evapotranspiración (Suárez *et al.*, 2015; Yoroba *et al.*, 2019). La temperatura anual adecuada para el cultivo del cacao oscila entre 23 y 28 °C (López, 2011), con media anual de alrededor de 25 °C, temperaturas fuera de este rango pueden reducir el crecimiento vegetativo, la floración, el desarrollo y la velocidad de maduración de los frutos (Paredes, 2003). La temperatura afecta fisiológicamente a las plantas, así como a otros procesos que ocurren en el sistema de producción. Según Hardy (1961), la floración se presenta normalmente a temperaturas mayores de 22.5 °C, por lo que temperaturas menores inhiben la formación de flores, además de que favorecen la incidencia y diseminación de enfermedades, como la pudrición negra de la mazorca (*Phytophthora palmivora*), mientras que las altas temperaturas provocan una rápida descomposición de los residuos vegetales, ocasionando una mayor pérdida de materia, con respecto al

ingreso y acumulación de la misma. Por su parte, la interacción entre la cantidad de lluvia y su distribución a lo largo del año, junto con las propiedades físicas y profundidad del suelo, afectan la disponibilidad de agua de la zona radicular y el crecimiento del árbol de cacao (Hardy, 1961). Los niveles adecuados de precipitación en las regiones cacaoteras del mundo, oscilan entre 1,200 - 2,500 mm (Batista, 2009), en plantaciones con niveles inferiores a 1,200 mm año<sup>-1</sup> se requieren el uso de riego complementario, ya que baja la floración y el rendimiento (Suárez *et al.*, 2015). Por el contrario, en regiones con más de 4,000 mm año<sup>-1</sup>, se requiere mantener suelos bien drenados para evitar excesos de humedad (Batista, 2009).

#### **4.4 Requerimientos edáficos para el cultivo de cacao**

El cultivo de cacao requiere de suelos profundos, de texturas medias y ricos en nutrientes para desarrollar un buen sistema radicular (Dostert *et al.*, 2011). En suelos que presentan pedregosidad superficial, el desarrollo de la planta es limitado, por lo que estas tierras no se consideran aptas para su cultivo (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2011), ya que la estructura del suelo influye sobre los factores de crecimiento de las plantas, al controlar la disponibilidad de aire, agua, calor y nutrientes (de Souza *et al.*, 2019). Este último se considera un atributo químico que, junto con atributos físicos y biológicos, permiten definir indicadores para estimar la calidad de un suelo (Estrada-Herrera *et al.*, 2017).

##### **4.4.1 Requerimientos de la fertilidad edáfica para el cultivo de cacao**

Un suelo fértil aporta suficiente agua, nutrientes y sostén para las plantas; la fertilidad es uno de los atributos conectados con la sustentabilidad del suelo y permite

el mantenimiento de la productividad mediante un manejo adecuado (Astier-Calderón *et al.*, 2002), de tal modo que permite que el suelo cumpla múltiples funciones relacionadas con su calidad y conservación (McBratney *et al.*, 2013). Al respecto, Furcal-Beriguete (2017) y Correndo y García (2017), señalan que los suelos presentan diferentes potencialidades para suministrar nutrientes a los cultivos, de la disponibilidad de dichos nutrientes depende un 40 - 60 % del rendimiento, el resto es atribuible a factores de radiación, temperatura, nutrientes y agua.

La textura, es una propiedad del suelo que influye en la fertilidad, así como en la capacidad de retención de agua y materia orgánica (Espinoza *et al.*, 2018). El cacao requiere suelos bien estructurados, con porosidad de entre 10 a 66 % y buena retención de humedad, por lo que la mejor textura para el cultivo de cacao son los suelos francos, franco arcilloso, franco limoso, franco arenoso y arenas francas finas y muy finas de 30 a 40 % de arcilla, 50 % de arena y 10 a 20 % de limo (López, 2011), por ello, Batista (2009) denomina malos, a aquellos suelos con alto contenido de arena, ya que impide la retención de humedad.

El pH de la solución del suelo es un buen indicador de la disponibilidad de nutrientes, por ejemplo, un pH menor de 5.5 unidades indica la presencia de iones de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ , los cuales son determinantes de la solubilidad de las sales (fosfatos, sulfatos, molibdatos) y microelementos (hierro, manganeso, cobre, zinc); también indican la escasez de las bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio, sodio) en el suelo (Osorio, 2012). Las plantas de cacao toleran un pH del suelo entre 5.0 - 7.5 con óptimo 6.5 - 7.5 que se ubican entre suelos ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos, aunque en suelos muy ricos en nutrientes, pueden tolerar un pH más bajo (Dostert *et al.*, 2011).

La materia orgánica (MO), es un indicador de la fertilidad del suelo, debido a que actúa como una reserva de nutrimentos y mejora las condiciones de la estructura edáfica por su influencia en la formación de agregados; además, incrementa la capacidad de retención de humedad de los suelos arenosos y mejora la densidad de los arcillosos (Castillo *et al.*, 2007). El cacao requiere suelos con contenidos de MO mayores a 3 %, con relación carbono/nitrógeno (C/N) no menor a 9 (López *et al.*, 2011).

Los macronutrientes nitrógeno (N) y fósforo (P) son muy demandados por el cultivo de cacao, por lo que también son contemplados como indicadores de la fertilidad. De acuerdo con Van *et al.* (2017) los niveles de déficit de N total en suelos cultivados con cacao oscilan de 0.6 a 2.0 %, sin embargo, la rápida fluctuación del N en el suelo dificulta indicar su deficiencia. Por su parte, el P es uno de los nutrientes limitantes para la producción debido a su baja disponibilidad y por presentar una baja tasa de movilidad (Souchie *et al.*, 2006), por esa razón, el P tiende a ser deficiente debido a la elevada extracción observada particularmente en plantaciones muy viejas (Hartemink, 2005). En suma, una relación nitrógeno/fósforo (N/P) menor a 5 disminuye de manera importante el rendimiento del cacao, mientras que a una relación de 9 se obtiene los mayores rendimientos (Puentes *et al.*, 2016).

Las bases intercambiables como el calcio, magnesio y potasio definen gran parte de la fertilidad edáfica (Molina, 2007), en suelos cacaoteros, el contenido de esos elementos debe encontrarse entre los rangos de media a alta, por lo tanto, las plantas de cacao requieren niveles de fertilidad de suelos de media a alta, con contenidos de calcio, magnesio y potasio mayores a 8.0, 2.0 y 0.24  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$  de suelo, respectivamente y una saturación de bases mayor a 35 % (López, 2011).

La importancia de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), radica en que amortigua cambios violentos en el pH y en las concentraciones de cationes en el suelo (Astier-Calderón *et al.*, 2002), para el cultivo de cacao, la CIC debe ser superior a 12  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$  de suelo en la superficie y más de 5  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$  en el sub-suelo (López, 2011).

#### 4.5 Importancia de la nutrición de la planta del cacao

La extracción nutrimental se relaciona con el crecimiento y desarrollo de los órganos de la planta (Castillo-González *et al.*, 2011). Al respecto, Puentes *et al.* (2016) señalan que la extracción nutrimental por unidad de rendimiento depende del material genético que se utilice, en el Cuadro 1 se presentan los resultados de un estudio realizado en Colombia, donde se determinan las concentraciones nutrimentales que extraen diferentes materiales de cacao que se cultivan.

**Cuadro 1.** Extracción nutrimental de árboles de cacao para producir una tonelada de cacao seco (Puentes *et al.*, 2016).

Material genético	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn
	----- (g $\text{kg}^{-1}$ ) -----						----- (mg $\text{kg}^{-1}$ ) -----				
THS-565	16.9	1.35	10.7	24.5	7.1	2.1	39.0	73.0	547.0	195.7	34.0
ICS-39	15.94	1.20	9.1	24.6	5.2	2.0	24.9	29.5	496.1	346.5	50.0
ICS-95	18.39	1.42	12.7	22.9	4.4	2.0	27.5	15.9	354.1	184.0	42.4
CCN-51	17.46	1.90	12.3	16.9	6.0	2.3	32.3	19.8	452.7	227.3	62.1

Al respecto, Schachtman *et al.* (1998) mencionan que, aunque el P en la biomasa es relativamente pequeño, su función es importante en la formación del ADN. Dado que se combina con otras sustancias intermedias en la fotosíntesis y en la respiración celular, además que los átomos de P son la base para formar enlaces de alto potencial energético como el ATP. Por su parte, el potasio (K) es el elemento más consumido por el cacao, regula la respiración, la fotosíntesis, la formación de clorofila y el movimiento del agua (Gattward *et al.*, 2012). Según Puentes *et al.* (2016), la concentración de nutrientes en las hojas de cacao, así como el rendimiento, se incrementan al aumentar la concentración de nutrientes en la solución del suelo debido al aporte de fertilizantes. Furcal-Beriguete (2017) señaló que la remoción de nutrientes por los frutos de cacao aumenta, conforme se incrementa la concentración nutrimental en las hojas.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Localización y descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el estado de Tabasco, localizado entre 90° 59'15" - 94° 07'48" LO y los 17°15'03" - 18°39'03" LN; específicamente sobre la llanura costera del Golfo de México, con una extensión territorial de 24,738 km<sup>2</sup> que representan el 1.3 % del territorio nacional (INEGI, 2017). El clima predominante es cálido húmedo Am(f) (i) g con abundantes lluvias en verano, precipitación promedio entre 2,500 y 3,000 mm con temperatura media anual de 25 °C (Ruiz-Álvarez *et al.*, 2012). Los suelos del estado de Tabasco engloban 19 grupos, de los cuales los Gleysols, Histosols, Fluvisols, Acrisols, Leptosols y Vertisols son los predominantes, de estos, los primeros tres representan el 44.3 % de la superficie estatal (Palma-López *et al.*, 2017).

### 5.2 Épocas climáticas en Tabasco

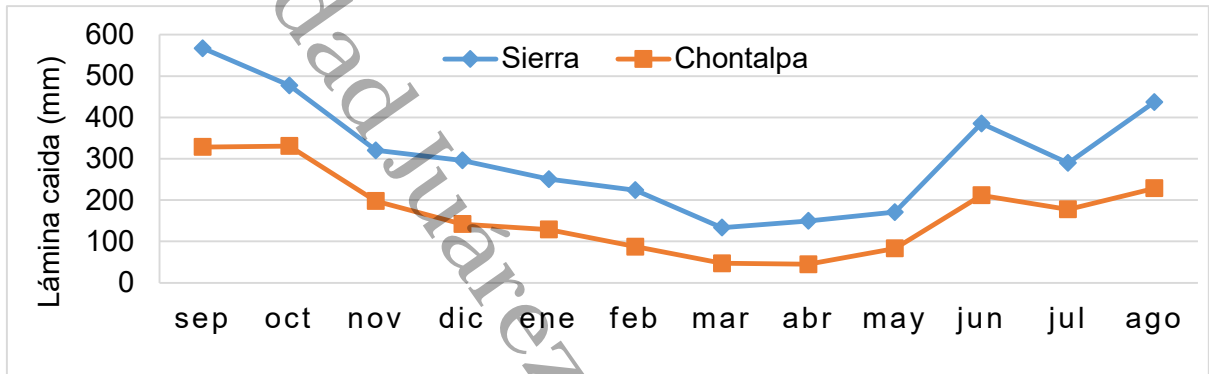
Según Maldonado *et al.* (2006), en Tabasco la interacción entre temperatura, precipitación, nubosidad y evaporación da lugar a tres épocas climáticas en el año:

**Nortes.** Se extiende de octubre a febrero, esta época se caracteriza por una tendencia decreciente de la precipitación (Figura 1), temperaturas mínimas de hasta menos 18 °C en enero, alrededor de un 70 % de nubosidad, por ende, un aumento en la humedad relativa y una disminución en la evapotranspiración.

**Seca.** Abarca de marzo a mayo, son los meses con menor precipitación (Figura 1), alta temperatura que favorece la evaporación, presencia de vientos secos y con más de 66 % de días soleados.



**Lluvias.** Empieza en junio con una duplicación de cantidad de lluvias caídas (Figura 1), en julio durante la denominada canículas, y termina en septiembre con su máximo volumen. En esta época ocurre hasta un 46 % de las precipitaciones del año con entre 15 a 30 días lluviosos por mes.



**Figura 1.** Medias de precipitaciones mensuales en la Subregión Sierra y Subregión Chontalpa durante el ciclo 2018-2019. (CONAGUA, 2019).

### 5.3 Diseño de muestreo

Se utilizó un muestreo no aleatorio de selección experta, donde el investigador seleccionó a los sujetos en base a su propio conocimiento, juicio y a través de su criterio profesional (Rodrigo, 2000). Esto ante la necesidad de seleccionar a productores cooperantes que conocieran el historial de manejo y edad de la plantación, además que identificaron los morfotipos de las plantas de cacao cultivadas; con su ayuda se seleccionaron plantaciones lo más homogéneas posible en cuanto a su genética, manejo y edad de producción.

### 5.3.1 Selección de productores cooperantes, plantaciones y árboles productores

Se realizaron recorridos de campo en cinco municipios que se dedican al cultivo de cacao, se consultaron a productores, a quienes se les expuso el objetivo y la importancia del estudio. Con ayuda de los productores, se seleccionaron nueve plantaciones sembradas con el morfotipo de cacao forastero en etapa de producción. Se identificaron las plantaciones con clave según su ubicación y su orden en el municipio correspondiente (Cuadro 2). Como unidades experimentales se consideraron cinco árboles en cada plantación, los cuales fueron marcados con esmalte acrílico en aerosol de color fluorescente para su posterior ubicación.

### 5.3.2 Descripción y manejo de las plantaciones

Las plantaciones varían en superficies como en edad, desde pequeñas superficies de menos de media hectárea hasta más de 32 hectáreas, mientras que en edad, van desde plantaciones nuevas de menos de 5 años con plantas injertadas, que iniciaron la producción antes el tercer año de sembradas, hasta plantaciones viejas de 50 años, que han sido renovadas con podas y plantas injertadas. Dichas plantaciones generalmente incluyen árboles de sombra como: cocotero (*Cocos nucifera* L.), cítricos (*citrus* spp.), plátano (*Musa paradisiaca* L.), caoba (*Swietenia macrophylla* King), macuilli (*Tabebuia rosea* Bertol.), guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.), carambola (*Averrhoa carambola* L.), cocoite (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp.), cedro (*Cedrela odorata* L.), tatúan (*Colubrina arborescens* Mill Sarg.), papaya (*Carica papaya* L.), aguacate (*Persea americana* Mill.), pimienta (*Schinus molle* L.), jagua (*Genipa americana* L.), palma real (*Roystonea regia* HBK Cook), pan de sopa (*Artocarpus altilis*

(S. Park) Fosgerg), guanábana (*Anona muricata* L.), mango (*Manguifera indica* L.), jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.).

En general el manejo del cultivo incluye prácticas manuales para controlar malezas en forma de chapeos, podas de mantenimiento a los arboles de cacao y sombra una vez al año. Las plagas se controlan aplicando cipermetrina conforme se detectan problemas; mientras que las antracnosis o mancha negra (*Phytophthora* sp.), se controla con la aplicación de caldo bórdeles (mezcla de sulfato de cobre y cal), mientras que el ataque de insectos minadores (*Xyleborus* spp. Heichhoff) y mal de machete (*Ceratocystis fimbriata* Ellis & Halsted) se realizan por medio de podas sanitarias.

### **5.3.3 Georreferenciación de las plantaciones**

Las plantaciones seleccionadas se georreferenciaron con un GPS (marca Garmin®, modelo GPSMAP® 62s). Posteriormente, mediante algebra de mapas, las coordenadas se colocaron sobre un mapa digitalizado de suelos del estado de Tabasco, en formato shape escala 1: 250,000 elaborado por Jiménez-Ramírez (2013), sobre dicho mapa se identificaron los grupos de suelos de los sitios experimentales.

**Cuadro 2.** Ubicación, identificación y localización de las plantaciones.

<b>Municipio</b>	<b>Parcela</b>	<b>Clave*</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>
Cárdenas	1	Ca01	93°37'10.887"	18°10'09.222"
Cárdenas	2	Ca02	93°37'20.919"	18°03'34.448"
Comalcalco	1	Co01	93°11'45.762"	18°18'45.975"
Comalcalco	2	Co02	93°15'09.055"	18°13'51.658"
Jalpa de Méndez	1	Ja01	93°04'29.945"	18°12'08.439"
Paraíso	1	Pa01	93°14'06.125"	18°22'13.667"
Paraíso	2	Pa02	93°13'12.081"	18°21'49.784"
Paraíso	3	Pa03	93°19'51.334"	18°26'05.341"
Teapa	1	Te01	92°54'11.331"	17°32' 42.686"

\*Código que identifica cada parcela.

#### **5.4 Colecta y procesamiento de muestras de suelos y de tejidos foliares**

Las colectas de muestras de suelos y de tejidos foliares se realizó en las plantaciones seleccionadas. Al inicio del estudio (diciembre 2018), se muestreó al pie del árbol, a distancia de 1 m en los cuatro puntos cardinales, para lo cual se removieron los residuos orgánicos no descompuestos. Se tomaron cuatro submuestras con una barrena, a profundidad de 0 - 30 cm, las cuales se mezclaron para obtener una muestra compuesta de un kilogramo. En total se obtuvieron 45 muestras, las cuales se secaron al aire y a la sombra y se guardaron en bolsas plásticas hasta los análisis correspondientes.

Durante la etapa de la floración (diciembre de 2018), en comienzo y plena maduración (abril de 2019), e inicio de botón floral y floración (agosto de 2019) se realizaron muestreos foliares. Los cuales correspondieron a las épocas de nortes, seca y lluvias respectivamente (Cruz-Sánchez *et al.*, 2018). En las copas de los árboles, a una altura no menor a 2 m, se colectaron 25 hojas recién llegadas a la madurez (Carrillo, 2006). Las muestras se colocaron en bolsas de papel, y se trasladaron al laboratorio, donde se lavaron con agua destilada, se secaron a 60 °C durante 48 horas en un horno de secado con circulación de aire forzado marca Riossa® modelo HnCF.41, ya secas las muestras se molieron en un molino marca Thomas Cientific® modelo 3383-L10 y se guardaron en frascos de plástico herméticamente sellado hasta los análisis correspondientes.

### **5.5 Caracterización de la fertilidad edáfica y diagnóstico nutrimental de las plantas de cacao en Tabasco**

El procesamiento de las muestras tanto de suelos como foliares que se destinaron a la caracterización de la fertilidad edáfica y al diagnóstico del estado nutrimental de las plantas, se realizó en el Laboratorio de Suelos y Plantas (LSP) del Centro de Investigación de Ciencias Agropecuarias (CICA) de la División Académica de Ciencias Agropecuarias (DACA) ubicado en la carretera Villahermosa-Teapa Km. 25, de la ranchería La Huasteca, municipio del Centro, Tabasco, México.

Las variables determinadas a las muestras edáficas fueron las recomendadas en la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2002). Las cuales son: textura por el método Bouyoucos; pH en relación suelo:agua 1:2; conductividad eléctrica (CE)

relación suelo-agua 1:5; materia orgánica del suelo (MO) por el método Walkley y Black; bases intercambiables mediante extracción con acetato de amonio 1.0 N y pH 7.0; potasio (K) y sodio (Na), se cuantificaron por espectrometría de emisión de flama, calcio (Ca) y magnesio (Mg) a través de un equipo de espectrometría de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo AAnalyst 100® y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó utilizando cloruro de sodio como elemento extractante del amonio; nitrógeno total (Nt) mediante un digestor marca VELP DKL-12 modelo F30110190 y destilación Kjeldahl marca VELP Scientifica SCRUBBER SMS Modelo F30210120; fósforo (P) disponible por el método de Olsen, lectura en absorbancia a 882 nm en un espectrofotómetro de luz visible de marca Génesis 10 UV. Los micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) se extrajeron con ácido del dietilen-triaminopentaacético (DTPA) y se cuantificaron en el espectrómetro de absorción atómica. La densidad aparente (DA) se determinó según la metodología del cilindro de volumen conocido propuesta por Blake y Hartage (1986).

El diagnóstico nutrimental se realizó en base a la concentración de los elementos en tejido vegetal (Leiva-Rojas y Ramírez-Pisco, 2017). El N se determinó mediante el método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos, por medio de la digestión de 0.1 g de materia seca en ácido sulfúrico-salicílico a 370 °C. Para la determinación de los otros elementos se digirió una muestra de 0.5 g de materia seca en ácido nítrico-perclórico en relación 1:2 a 205 °C en el digestor; el P se determinó por colorimetría de luz visible con molibdato de amonio, mientras que el contenido de K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn por espectrofotometría de absorción atómica en un espectrofotómetro marca Perkin Elmer Meyer modelo AAnalyst 100®. Todos los

análisis se realizaron de acuerdo al manual de procedimientos analíticos de suelos y plantas de Álvarez-Sánchez y Marín-Campos (2011).

## **5.6 Análisis estadístico de los datos**

Las variables edáficas se analizaron mediante análisis de varianza y comparación de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ ). mientras que la información sobre contenido nutrimental foliar se agrupó para realizar comparaciones con base en: parcelas por épocas, entre épocas dentro de cada plantación y entre épocas en todas las plantaciones, para luego realizar análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), además correlación entre las variables foliares para cada época climática. Todos los análisis se realizaron bajo un diseño completamente al azar con el paquete estadístico SAS para Windows versión 9.1 (SAS, 2004).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Suelos identificados en las plantaciones de cacao estudiadas en Tabasco

Al sobreponer las coordenadas de las parcelas de cacao sobre el mapa de suelo elaborado por Jiménez-Ramírez (2013), las parcelas se ubican en cinco grupos de suelos. Las parcelas Ca01 y Ca02 se ubican sobre suelos Cambisols (CM); mientras que las parcelas Co01, Co02, Pa01 y Pa02 se ubican en suelos Fluvisols (FL); la parcela Pa03 en Arenosols (AR), la parcela Ja01 en suelos Gleysols (GL) y la parcela Te01 en suelos Luvisols (LV).

Los LV son suelos con arcillas de alta actividad y de alta saturación de bases; los AR son suelos muy profundos con alto porcentaje de arenas, muy bajos contenidos de nutrientes, bajos contenidos de materia orgánica, alta permeabilidad y muy poca humedad aprovechable para los cultivos. Los FL están formados por sedimentos estratificados de origen fluvial, marinos y lacustres; los CM son suelos de desarrollo mediano, profundos con texturas medias a arcillosas y nutrimentos que varían de medianos a rico y los GL son suelos afectados por agua freática, subacuáticos y de áreas mareas (IUSS Working Group WRB, 2015; Palma-López *et al.*, 2017).



## 6.2 Caracterización física de los suelos en los agrosistemas de cacao en Tabasco

La densidad aparente (DA) de los suelos estudiados osciló entre 1.04 y 1.25 Mg m<sup>-3</sup>, el nivel más alto se registró en la Pa03 establecida sobre el AR, con 1.25 Mg m<sup>-3</sup>, mientras que la más baja en la parcela Pa02 con suelo FL, con 1.04 Mg m<sup>-3</sup> (Cuadro 3). Esos rangos de DA se pueden considerar como cercanos a los óptimos para el cultivo de cacao, ya que, en suelos arcillosos, el nivel restrictivo para el crecimiento radicular ocurre con DA entre 1.4 y 1.6 Mg m<sup>-3</sup> en suelos arenosos; los valores entre 1.0 - 1.06 Mg m<sup>-3</sup> se consideran normales en suelos arcillosos, y entre 1.2 - 1.8 Mg m<sup>-3</sup> en arenosos (Aubertin y Kardos, 1965). De acuerdo con Chaudhari *et al.* (2013), el contenido de arena influye en el aumento de la DA, debido a que los suelos arenosos presentan una menor porosidad con respecto a los arcillosos, la porosidad del suelo es la relación entre el volumen de los poros con respecto al volumen total del suelo, por consiguiente, la DA del suelo está inversamente relacionada con la porosidad.

**Cuadro 3.** Propiedades físicas y los grupos de suelos en las plantaciones de cacao en Tabasco.

Clave	DA	Arena	Limo	Arcilla	Textura	Suelo
	(Mg m <sup>-3</sup> )	----- (%)-----				
Pa03	1.25±0.02 <sup>a*</sup>	79.1±2.7 <sup>a</sup>	8.2±0.8 <sup>d</sup>	12.7±2.0 <sup>e</sup>	Ca	AR
Ca01	1.10±0.01 <sup>b</sup>	26.7±7.1 <sup>cde</sup>	42.8±4.2 <sup>ab</sup>	30.5±3.0 <sup>d</sup>	Cr	CM
Ca02	1.12±0.02 <sup>b</sup>	16.2±0.7 <sup>ef</sup>	45.3±1.3 <sup>a</sup>	38.5±1.1 <sup>bc</sup>	CrI	CM
Co01	1.13±0.01 <sup>b</sup>	16.5±3.5 <sup>d<sup>ef</sup></sup>	36.2±2.5 <sup>abc</sup>	47.3±3.0 <sup>a</sup>	R	FL
Co02	1.11±0.02 <sup>b</sup>	28.8±2.3 <sup>bcd</sup>	35.1±5.3 <sup>bc</sup>	36.1±3.0 <sup>cd</sup>	Cr	FL
Pa01	1.12±0.03 <sup>b</sup>	11.0±1.1 <sup>f</sup>	40.3±1.2 <sup>abc</sup>	48.7±0.1 <sup>a</sup>	R	FL
Pa02	1.04±0.03 <sup>c</sup>	30.0±8.5 <sup>bc</sup>	32.7±5.8 <sup>c</sup>	37.3±2.9 <sup>c</sup>	Cr	FL
Ja01	1.12±0.01 <sup>b</sup>	27.7±5.1 <sup>bcd</sup>	36.8±4.6 <sup>abc</sup>	35.5±2.3 <sup>cd</sup>	Cr	GL
Te01	1.13±0.02 <sup>b</sup>	39.1±3.4 <sup>b</sup>	17.2±2.9 <sup>d</sup>	43.7±2.0 <sup>ab</sup>	R	LV
Media	1.12±0.06	30.6±20.1	32.7±12.2	36.7±10.8		

DA= densidad aparente; R= arcillosa, Ca= franca arenosa, Cr= franco arcilloso, CrI= franco arcillo limosa. La clasificación textural según FAO (2009). AR= Arenosols, CM= Cambisols, FL= Fluvisols, GL= Gleysols, LV= Luvisols. \*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

El análisis mecánico de suelos indica que la parcela Pa03 con suelo AR presentó el contenido más alto de arena, mientras que las parcelas Pa01, Ca02 y Ca01 tuvieron los menores contenidos de arena. Los porcentajes de limo oscilan entre 8.2 - 45.3 %, las parcelas con suelos CM presentaron los niveles más altos, mientras que

las parcelas con suelos AR y LV tuvieron los más bajos. Para el contenido de arcilla, los rangos oscilaron entre 12.7 % en la parcela Pa03 del suelo AR, hasta un 48.7 % en la parcela Pa01 con suelo FL. En términos generales prevalecieron las texturas franco arcillosas y arcillosas en las parcelas evaluadas. El contenido más alto de arena en la parcela Pa03 se debe a que es un suelo formado a partir de material de origen marino depositado en el Cuaternario reciente (IUSS Working Group WRB, 2015; Palma-López *et al.*, 2017). En el caso de las parcelas que presentan los contenidos menores de arena son de grupos FL y CM, estos suelos tienen su origen de sedimentos fluviales y aluviales, respectivamente; siendo los suelos FL de textura media o media sobre gruesa y los CM de textura media a arcillosa.

### **6.3 Propiedades químicas de suelos en los agrosistemas de cacao en Tabasco**

#### **6.3.1 Contenidos de pH, CE, MO, Nt, P y CIC en las parcelas de cacao estudiadas**

Los contenidos de pH, CE, MO, Nt, P disponible y CIC se presentan en el Cuadro 4. Los suelos presentaron valores de pH entre 5.1 y 6.2, por lo que se clasifican como moderadamente ácidos (SEMARNAT, 2002), los cuales se mantienen dentro de los rangos tolerables para el cultivo de cacao (Dostert *et al.*, 2011). Tanto los suelos CM del municipio de Cárdenas, como el LV del municipio de Teapa, presentaron la mayor acidez; la acidificación del suelo es un proceso natural que se debe a la presencia de materiales parentales derivado de rocas ácidas, alta precipitación, lavado de bases, la vegetación, así como por la actividad humana, que provoca cambios en la composición de la vegetación y el uso de fertilizantes acidificantes como azufre y nitrógeno. La acidificación trae como consecuencia la liberación de formas móviles de Al y otros elementos potencialmente tóxicos (Richter, 1986; Kazda y Zvacek, 1989).

En condiciones naturales, la mayoría del Al liberado está ligado a complejos orgánicos, mientras que la acidificación antropogénica es una fuente mucho más peligrosa debido a que los aportes de S y N no son capaces de formar complejos. En cualquier caso, la toxicidad provocada por la acidez, afecta el crecimiento radicular y disponibilidad de nutrientes, así como el transporte de carbono y nutrientes dentro de la raíz y tallos (Sierra *et al.*, 2003). Por su parte, los valores de CE se clasifican como con efectos despreciables de salinidad (SEMARNAT, 2002), en condiciones de alta precipitación como Tabasco, las sales son lavadas y lixiviadas hacia el subsuelo sobre todo en suelos arenosos, lo que es evidente en la parcela Pa03, ya que a pesar de su ubicación cerca de la costa tiene un nivel bajo de salinidad (Alcudia-Aguilar *et al.*, 2017). Los porcentajes de MO se ubicaron como medios a altos, ya que los porcentajes oscilaron entre 1.90 y 4.11 %, el mayor contenido se registró en la parcela Te01, este alto contenido de MO puede ser resultado de una mayor descomposición de residuos provocado por mayor pluviosidad en la subregión sierra (Teapa), la cual favorece la descomposición de los residuos que provocan un mayor ingreso de MO al suelo (Abera *et al.*, 2012), así como una mayor protección de dicha MO al interactuar con un mayor contenido de arcilla (West y Marland, 2003). Los contenidos de Nt oscilaron entre 0.127 y 0.260 %, los que ubica a las parcelas con niveles que van de medios hasta muy alto (> 0.25 %) (SEMARNAT, 2002). El contenido más alto se tuvo en la parcela Te01 (0.260±0.047 %). De acuerdo con Pascual-Córdova *et al.* (2017), la descomposición de la hojarasca en el sistema agroforestal de cacao es una fuente importante de N. La descomposición de C y la mineralización del N depende del grado de saturación de C, del nivel de MO en el suelo, y en cierto modo del porcentaje de textura fina del suelo (limo + arcilla) (Matus *et al.*, 2000; Ajwa y Tabatabai, 1994). Por lo que Watts *et al.*

(2007) ordenaron las texturas de mayor a menor grado de mineralización del N en franco limo > franco > franco arenoso. De acuerdo con la SEMARNAT (2002), valores menores a  $5.5 \text{ mg kg}^{-1}$  son bajos, de  $5.5$  a  $11 \text{ mg kg}^{-1}$  son medios y más de  $11 \text{ mg kg}^{-1}$  son altos, con base en esta escala, la mayoría de las parcelas se ubicaron con contenidos medios, presentando los menores niveles las parcelas Ca02 y Te01, mientras que el mayor contenido registró en las parcelas Ca01 y Pa01. Sin embargo, para el caso específico del cultivo de cacao, Wessel (1971) y Van *et al.* (2017) señalan que los valores críticos son mayores a  $12 \text{ mg kg}^{-1}$  en suelos arenosos y más de  $24 \text{ mg kg}^{-1}$  para suelos arcillosos, lo que significa que más 88 % de las parcelas presentan déficits de P. Al respecto, Simpson *et al.* (2015) señalaron que las deficiencias de P en suelos de zonas tropicales son uno de los mayores obstáculos para producir alimentos. En ecosistemas naturales, las mayores fuentes de P provienen de la mineralización de rocas fosfatadas, que al meteorizarse se descomponen y liberan los fosfatos, los cuales son translocados a las plantas y posteriormente a los animales a través de la ingesta, para de nueva cuenta regresar al suelo a través de las excretas, dichas excretas al ser descompuestas por los microorganismos se vuelven a convertir en ion ortofosfatos ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), los cuales son aprovechados por las plantas para formar fosfato orgánico (biomasa vegetal), y de nueva cuenta regresar al suelo después del proceso de mineralización (Ruttenberg, 2003). Para una eficiente absorción del P en suelo deficiente la planta necesita un sistema radicular que abarca importante longitud, radio y superficie (Sequera y Ramírez, 2013). La CIC varió de 7.9 a  $33.1 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ , con excepción de la parcela Pa03 que presentó una CIC de  $7.9 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ , todos los demás sitios presentaron valores superiores al requerimiento mínimo de  $12 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$  que reportó López (2011). La capacidad de intercambio catiónico se relaciona con el

contenido de MO, cantidad y calidad de la arcilla, debido a que estos últimos facilitan al suelo una mayor adsorción de iones; una arcilla de tipo 2:1 tiene mayor CIC que una de tipo 1:1 (Pérez-Rosales *et al.*, 2017). Un mayor porcentaje de partículas tamaño arena facilita el lixiviado y disminuye la capacidad de intercambiar cationes (Salazar *et al.*, 2015).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

**Cuadro 4.** Contenido de pH, CE, MO, Nt, P-Olsen disponible y CIC en los agrosistemas de cacao en Tabasco.

	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>MO</b>	<b>Nt</b>	<b>P</b>	<b>CIC</b>
<b>Clave</b>	(1:2 agua)	(dS m <sup>-1</sup> )	(%)	(%)	(mg kg <sup>-1</sup> )	(cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup> )
Pa03	5.7±0.2 <sup>abc</sup>	0.11±0.007 <sup>b</sup>	2.3±0.50 <sup>cd</sup>	0.13±0.021 <sup>d</sup>	8.5±1.7 <sup>bc</sup>	7.9±1.7 <sup>g</sup>
Ca01	5.1±0.3 <sup>c</sup>	0.05±0.004 <sup>c</sup>	1.9±0.09 <sup>d</sup>	0.13±0.015 <sup>cd</sup>	14.0±1.8 <sup>ab</sup>	12.8±0.8 <sup>fg</sup>
Ca02	5.3±0.0 <sup>bc</sup>	0.06±0.007 <sup>bc</sup>	2.0±0.35 <sup>d</sup>	0.14±0.021 <sup>cd</sup>	4.3±0.8 <sup>c</sup>	18.5±0.3 <sup>de</sup>
Co01	6.2±0.3 <sup>a</sup>	0.11±0.008 <sup>b</sup>	3.4±0.25 <sup>abc</sup>	0.21±0.017 <sup>ab</sup>	8.4±1.9 <sup>bc</sup>	28.6±0.1 <sup>ab</sup>
Co02	5.9±0.4 <sup>ab</sup>	0.10±0.022 <sup>bc</sup>	2.4±0.14 <sup>bcd</sup>	0.15±0.006 <sup>bcd</sup>	6.0±1.5 <sup>c</sup>	22.3±3.4 <sup>cd</sup>
Pa01	5.9±0.5 <sup>ab</sup>	0.11±0.029 <sup>b</sup>	3.4±0.89 <sup>abc</sup>	0.20±0.036 <sup>abc</sup>	9.7±2.3 <sup>abc</sup>	33.1±1.1 <sup>a</sup>
Pa02	6.2±0.3 <sup>a</sup>	0.17±0.050 <sup>a</sup>	3.6±0.62 <sup>ab</sup>	0.21±0.029 <sup>ab</sup>	14.4±2.7 <sup>a</sup>	26.7±3.9 <sup>bc</sup>
Ja01	5.8±0.3 <sup>abc</sup>	0.07±0.013 <sup>bc</sup>	2.3±0.23 <sup>cd</sup>	0.16±0.017 <sup>bcd</sup>	12.0±3.6 <sup>ab</sup>	19.6±2.4 <sup>de</sup>
Te01	5.1±0.2 <sup>c</sup>	0.07±0.011 <sup>bc</sup>	4.1±0.70 <sup>a</sup>	0.26±0.047 <sup>a</sup>	4.9±0.9 <sup>c</sup>	15.0±0.9 <sup>ef</sup>
Media	5.7±0.4	0.09±0.039	2.8±0.81	0.18±0.050	9.1±3.7	20.5±8.0

pH= potencial Hidrógeno; CE= conductividad eléctrica, relación 1:5 suelo:agua, MO= materia orgánica, Nt= nitrógeno total, CIC= capacidad de intercambio catiónico.

\*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

### 6.3.2 Contenidos de cationes intercambiables y suma de bases (SB)

Los contenidos de K, Ca Mg, Na y SB presentaron diferencias estadísticas entre las plantaciones (Cuadro 5). Para el caso del K, que es el elemento que más consume la planta de cacao después del nitrógeno (Gattward *et al.*, 2012). Los contenidos de K con excepción de la parcela Ca01, son superiores al requerimiento mínimo que es de

0.20  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$  (Wessel, 1971; Van *et al.*, 2017), lo que se debe a que el K del suelo proviene de la meteorización de los minerales y de la mineralización de los residuos orgánicos (Maldonado *et al.*, 2006) por lo que los suelos FL al ser de origen fluvial tiene una textura fina y mayores contenidos de MO, además de mayor contenido de K.

El contenido de Ca variaron de 2.56 a 15.90  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$  para clasificarse como de contenido bajo, medio o alto. Por lo que las parcelas Te01, Pa03 y Ca01 registraron contenidos dentro del rango 2 - 5  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$  clasificado como bajo. Mientras que las parcelas Ca02 y Ja01 presentaron contenidos medios (5 - 10  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ ), y las demás parcelas presentaron contenidos altos, mayores a 10  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ . Los bajos contenidos se pueden deber a la meteorización y lixiviación del suelo en condiciones de bajo pH (Maathuis, 2009). Por su parte el Mg se encontró en niveles bajos 0.71  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$  en la parcela Te01, de medios en Ca01 (1.87  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) y Pa03 (2.76  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ ), mientras que las demás parcelas tuvieron valores mayores de 3.0  $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$ , los cuales se consideran altos (SEMARNAT, 2002). Los menores contenidos de pH se detectaron en Te01 y Ca01, con valores de 5.5, lo que favorece la reacción del agua con los iones de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{NO}_3$  liberando  $\text{H}^+$  a la solución; lo que provoca la saturación de una alta proporción de los sitios de intercambio con  $\text{Al}^{3+}$ , lo que genera problemas de toxicidad y baja disponibilidad de nutrientes, y afecta la adsorción de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Ca}^{2+}$  (Rosas-Patiño *et al.*, 2017).



**Cuadro 5.** Valores de las medias de cationes intercambiables y suma de bases en los agrosistemas cacao en Tabasco.

Clave	K	Ca	Mg	Na	SB
	cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup>				
<b>Pa03</b>	0.29±0.04 <sup>b*</sup>	3.41±0.68 <sup>d</sup>	2.76±0.75 <sup>cd</sup>	0.47±0.07 <sup>abc</sup>	6.93±1.28 <sup>d</sup>
<b>Ca01</b>	0.14±0.03 <sup>b</sup>	3.51±0.18 <sup>d</sup>	1.87±0.42 <sup>de</sup>	0.28±0.07 <sup>c</sup>	5.81±0.56 <sup>d</sup>
<b>Ca02</b>	0.21±0.05 <sup>b</sup>	6.57±0.46 <sup>cd</sup>	4.66±0.16 <sup>bc</sup>	0.44±0.09 <sup>bc</sup>	11.48±0.72 <sup>cd</sup>
<b>Co01</b>	0.59±0.06 <sup>a</sup>	15.90±2.43 <sup>a</sup>	6.27±0.53 <sup>b</sup>	0.40±0.06 <sup>bc</sup>	23.28±3.04 <sup>a</sup>
<b>Co02</b>	0.20±0.02 <sup>b</sup>	13.33±2.39 <sup>ab</sup>	4.56±0.93 <sup>bc</sup>	0.49±0.07 <sup>ab</sup>	18.58±3.29 <sup>ab</sup>
<b>Pa01</b>	0.73±0.17 <sup>a</sup>	15.48±0.95 <sup>a</sup>	8.54±0.29 <sup>a</sup>	0.66±0.14 <sup>a</sup>	25.41±0.86 <sup>a</sup>
<b>Pa02</b>	0.74±0.12 <sup>a</sup>	13.78±4.01 <sup>ab</sup>	5.22±0.92 <sup>b</sup>	0.31±0.04 <sup>bc</sup>	20.05±4.91 <sup>ab</sup>
<b>Ja01</b>	0.23±0.03 <sup>b</sup>	9.70±2.56 <sup>bc</sup>	4.38±1.18 <sup>bc</sup>	0.40±0.06 <sup>bc</sup>	14.72±3.51 <sup>bc</sup>
<b>Te01</b>	0.26±0.04 <sup>b</sup>	2.56±0.57 <sup>d</sup>	0.71±0.14 <sup>e</sup>	0.41±0.06 <sup>bc</sup>	3.93±0.72 <sup>d</sup>
<b>Media</b>	0.38±0.24	9.47±5.51	4.33±2.35	0.42±0.12	14.60±7.81

SB= suma de bases. \*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

Las parcelas de cacao evaluadas presentaron contenidos de Na que van de 0.28 a 0.66 cmol<sup>(+)</sup> kg<sup>-1</sup>, por lo que los suelos no causan problema a las raíces de la planta por la absorción de K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> (Alcudia-Aguilar *et al.*, 2017). Al respecto, Mengel y Kirkby (1987) mencionan que en condiciones de baja concentración de K<sup>+</sup>, el Na<sup>+</sup> aumenta el rendimiento de grano. De acuerdo con Molina (2007), una SB menor a 5 cmol<sup>(+)</sup> kg<sup>-1</sup> se consideran baja, de 5 a 12 cmol<sup>(+)</sup> kg<sup>-1</sup> media, y más de 12 cmol<sup>(+)</sup> kg<sup>-1</sup>

alta, con base en esto la parcela Te01 tuvo una baja SB ( $3.93 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ ), mientras que las parcelas Pa03 y Ca01 tuvieron valores medios, y las demás parcelas presentaron valores altos. Las parcelas con mayor SB son se encuentran en los municipios de Comalcalco y Paraíso, por lo que su mayor SB se deba a que dichos suelos son recientes con respecto a los demás, por lo tanto, han tenido una menor exposición al intemperismo, una de las razones por las cuales ocurre el lavado de bases, particularmente en regímenes de alta pluviosidad y con suelos de textura gruesa que facilita la lixiviación (Palma-López *et al.*, 2007).

### 6.3.3 Contenidos de micronutrientes

Los micronutrientes son esenciales para las plantas superiores, les ayudan a resistir contra enfermedades y el estrés radicular, a pesar de que sus concentraciones son pequeñas en tejidos vegetales (Welch y Shuman, 1995). En el Cuadro 6, se muestran los contenidos de Fe, Mn, Cu y Zn, en el que se observan diferencias estadísticas entre las parcelas, aunque es importante señalar que a pesar de dichas diferencias se clasifican dentro de la misma categoría, con excepción de la parcela Co02 con  $0.9 \pm 0.1 \text{ mg kg}^{-1}$  que tuvo un contenido bajo del adecuado de  $1.0 \text{ mg kg}^{-1}$  indicado en la Norma Oficial Mexicana (NOM-SEMARNAT-2000). Los micronutrientes se relacionan con el contenido de MO del suelo, ya que de acuerdo con el contenido de MO pueden disminuir o estar no disponibles (Shiwakoti *et al.*, 2019). Mientras que el contenido de  $0.9 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn disponible en la parcela Co02 puede deberse al contenido de MO, de igual forma su movilidad en el suelo es importante en relación a su disponibilidad (Mengel y Kirkby, 1987).

**Cuadro 6.** Contenido de Fe, Mn, Cu y Zn en los agroecosistemas de cacao en Tabasco.

Clave	Fe	Mn	Cu	Zn
	mg kg <sup>-1</sup>			
<b>Pa03</b>	85.7±13.1 <sup>cd*</sup>	22.8±2.8 <sup>c</sup>	0.4±0.1 <sup>d</sup>	1.5±0.2 <sup>abc</sup>
<b>Ca01</b>	137.7±37.8 <sup>bc</sup>	125.4±16.5 <sup>a</sup>	5.6±1.5 <sup>bc</sup>	2.5±0.7 <sup>a</sup>
<b>Ca02</b>	300.0±22.0 <sup>a</sup>	17.4±4.6 <sup>c</sup>	3.2±0.1 <sup>cd</sup>	1.0±0.1 <sup>bc</sup>
<b>Co01</b>	70.9±15.5 <sup>d</sup>	62.2±12.3 <sup>b</sup>	5.3±0.8 <sup>bc</sup>	2.3±0.4 <sup>a</sup>
<b>Co02</b>	92.5±15.8 <sup>bcd</sup>	29.2±6.8 <sup>c</sup>	20.5±2.3 <sup>a</sup>	0.9±0.1 <sup>c</sup>
<b>Pa01</b>	115.0±22.4 <sup>bcd</sup>	27.2±5.1 <sup>c</sup>	5.9±0.5 <sup>bc</sup>	1.6±0.4 <sup>abc</sup>
<b>Pa02</b>	73.8±10.5 <sup>cd</sup>	63.7±6.2 <sup>b</sup>	6.0±1.7 <sup>bc</sup>	2.4±0.5 <sup>a</sup>
<b>Ja01</b>	94.3±23.2 <sup>bcd</sup>	81.6±13.1 <sup>b</sup>	3.9±0.5 <sup>bc</sup>	2.0±0.5 <sup>ab</sup>
<b>Te01</b>	152.0±44.6 <sup>b</sup>	14.2±4.3 <sup>c</sup>	6.3±1.35 <sup>b</sup>	1.1±0.2 <sup>bc</sup>
<b>Media</b>	124.7±71.3	49.3±37.2	6.3±5.6	1.7±0.6

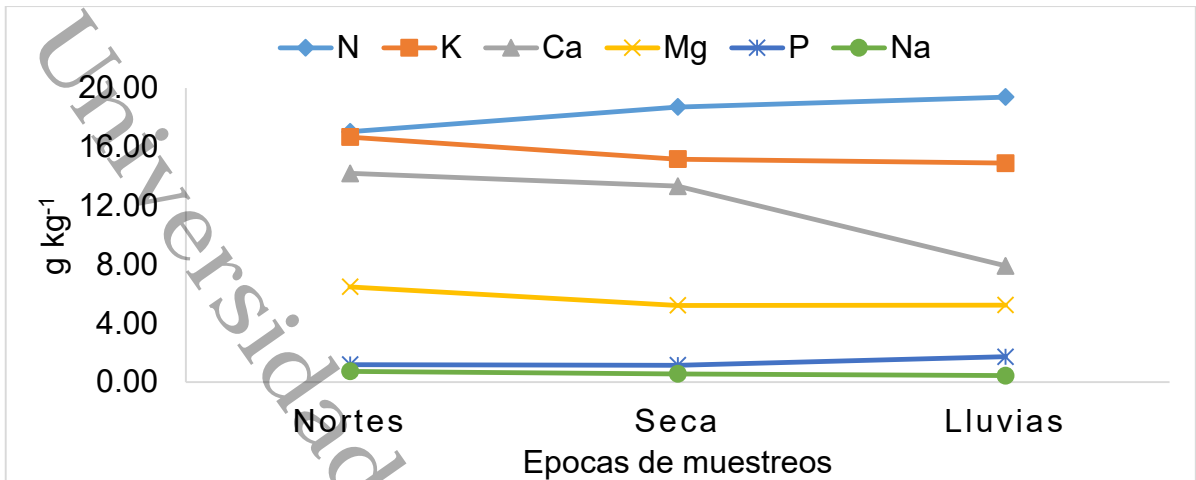
\*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

#### 6.4 Contenido de nutrimentos en los tejidos foliares de cacao en Tabasco

Los contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn) en el follaje dentro de las épocas climáticas tuvo diferencias estadísticas para las diferentes parcelas evaluadas, con excepción del Ca que no presentó diferencias en la época de lluvias.

##### 6.4.1 Nitrógeno y fósforo

En el Cuadro 7 se presentan los contenidos de N y P en tejidos foliares, ambos fueron deficitarios en todos los sitios en las tres épocas climáticas; en el caso del N, el contenido de entre 13.89 y 22.13 g kg<sup>-1</sup> fue inferior al rango de concentración considerado como nivel óptimo de N en materia seca foliar, el cual se ubica entre 15 y 40 g kg<sup>-1</sup> (White y Brown, 2010). Solamente las parcelas Ca01, Ca02 (en época de seca y lluvias) y la parcela Ja01 (en la época de lluvias) tuvieron contenidos suficientes con niveles entre 20 y 25 g kg<sup>-1</sup>. El valor más alto se registró en la parcela Ca01 durante las lluvias, mientras que el más bajo en la parcela Co02 en la época de nortes, más del 66 % de las parcelas tuvieron contenidos entre 15.94 y 18.39 g kg<sup>-1</sup>, lo que coincide con lo reportado por Puentes *et al.* (2016) para plantaciones de cacao de Colombia. Los contenidos de N foliar de todas las parcelas tuvieron una tendencia ascendente con respecto a las épocas (Figura 2), lo que puede deber a la variación en la disponibilidad de nitratos por déficit o exceso de humedad en el suelo y su efecto sobre la absorción del ion nitrato por la planta (Mengel y Kirkby, 1987).



**Figura 2.** Contenidos de macronutrientes en tejidos foliares de cacao durante las épocas climáticas en Tabasco.

Como se observa en la Figura 2, los contenidos de P oscilaron entre 0.82 y 2.50 g kg<sup>-1</sup> que se pueden considerar como deficitarias, tomando como base la escala propuesta por Jones *et al.* (1991); por lo que sólo las parcelas Co01, Pa02 y Ja01 presentaron contenidos suficientes de P foliar durante la época de Lluvias. Dichos resultados fueron cercanos a los rangos de 1.3 - 2.0 g kg<sup>-1</sup> reportados por Leiva-Rojas *et al.* (2017). Los mayores contenidos de P se presentaron en la época de Lluvias, en las parcelas Co01 y Ja01 con 2.50 y 2.34 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Éstas últimas parcelas son las únicas que superaron el nivel crítico de 2 g kg<sup>-1</sup>, equivalente a 0.2 % que reportó Aikpokpodion (2010). Mientras que, el menor contenido de P se analizó en la parcela Te01 en la época seca. Los contenidos de P en todas las parcelas durante la época seca son menores en 3.48 y 49.57 % a los de las épocas de nortes y lluvias, respectivamente (Figura 2). De acuerdo con Bouma (1967) el P presenta una alta variabilidad en planta, por lo que las concentraciones de fosfatos son altamente variables entre las hojas viejas y nuevas; por su parte Mengel y Kirkby (1987) señalan

que la concentración de P depende también del estado fenológico (inicio de botón floral y floración) etapa crítica en cual la planta requiere un mayor suministro de P (Aburto *et al.*, 2017).

**Cuadro 7.** Contenidos de N y P en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.

Clave	N (g kg <sup>-1</sup> )			P (g kg <sup>-1</sup> )		
	Nortes	Seca	Lluvias	Nortes	Seca	Lluvias
<b>Ca01</b>	18.75±0.70 <sup>a*</sup>	21.34±0.58 <sup>a</sup>	22.13±3.15 <sup>a</sup>	0.95±0.19 <sup>d</sup>	0.93±0.20 <sup>bc</sup>	1.26±0.03 <sup>d</sup>
<b>Ca02</b>	17.96±2.04 <sup>a</sup>	21.34±1.79 <sup>a</sup>	21.91±1.67 <sup>a</sup>	0.98±0.22 <sup>cd</sup>	1.11±0.10 <sup>abc</sup>	1.26±0.09 <sup>d</sup>
<b>Co01</b>	15.75±1.12 <sup>ab</sup>	19.65±1.21 <sup>abc</sup>	17.87±0.97 <sup>ab</sup>	1.22±0.19 <sup>abcd</sup>	1.37±0.20 <sup>ab</sup>	2.58±0.33 <sup>a</sup>
<b>Co02</b>	13.89±1.55 <sup>b</sup>	17.50±1.03 <sup>bc</sup>	18.30±3.27 <sup>ab</sup>	1.07±0.19 <sup>bcd</sup>	1.16±0.19 <sup>abc</sup>	1.27±0.07 <sup>d</sup>
<b>Pa01</b>	18.18±1.56 <sup>a</sup>	17.05±1.41 <sup>bc</sup>	19.76±2.20 <sup>ab</sup>	1.40±0.22 <sup>abc</sup>	0.97±0.00 <sup>bc</sup>	1.38±0.12 <sup>cd</sup>
<b>Pa02</b>	17.19±1.12 <sup>ab</sup>	17.87±2.11 <sup>abc</sup>	17.11±0.44 <sup>b</sup>	1.64±0.15 <sup>a</sup>	1.55±0.20 <sup>a</sup>	1.86±0.18 <sup>bc</sup>
<b>Pa03</b>	15.70±1.41 <sup>ab</sup>	17.84±0.70 <sup>abc</sup>	15.81±0.70 <sup>b</sup>	1.46±0.28 <sup>ab</sup>	1.27±0.23 <sup>abc</sup>	1.74±0.20 <sup>cd</sup>
<b>Te01</b>	16.26±1.68 <sup>ab</sup>	16.09±1.31 <sup>c</sup>	19.48±0.34 <sup>ab</sup>	1.04±0.05 <sup>bcd</sup>	0.82±0.20 <sup>c</sup>	1.24±0.19 <sup>d</sup>
<b>Ja01</b>	18.91±1.11 <sup>a</sup>	19.85±1.21 <sup>ab</sup>	21.82±1.63 <sup>a</sup>	1.00±0.08 <sup>cd</sup>	1.09±0.21 <sup>abc</sup>	2.34±0.36 <sup>ab</sup>
<b>Media</b>	16.95±1.68	18.73±1.14	19.35±2.30	1.20±0.25	1.14±0.23	1.66±0.51

\*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

#### 6.4.2 Potasio y sodio

En el Cuadro 8 se presentan los contenidos de K y Na en tejidos foliares de cacao en las diferentes parcelas evaluadas en las tres épocas climáticas. Los

contenidos de K se mantienen con pocas variaciones durante todo el año, y son ligeramente más bajas en la época de lluvias. De acuerdo con Jones *et al.* (1991), los niveles bajos se encuentran entre 10 - 12.9 g kg<sup>-1</sup>, suficientes entre 13 - 22 g kg<sup>-1</sup> y altos > 22 g kg<sup>-1</sup>. La mayor concentración la tuvo la parcela Pa01 durante las lluvias con 29.77 g kg<sup>-1</sup>, mientras que el menor contenido lo presentó la parcela Pa03 en la misma época con 2.19 g kg<sup>-1</sup>. De igual modo, los valores de la parcela Pa02 en época seca y de lluvias, y la parcela Te01 en lluvias tuvieron las menores concentraciones, dichas parcelas junto con la parcela Pa03 en lluvias, se ubicaron por debajo del rango crítico de 5 - 40 g kg<sup>-1</sup> de K en tejidos foliares reportados por White y Brown (2010). La absorción de K por la planta depende de su disponibilidad en el suelo, por lo que el régimen de humedad almacenado por la arcilla permite una mayor integración de la MO, mayor contenido de K disponible y mayor absorción por la planta (Maldonado *et al.*, 2006). Los contenidos de K en los tejidos foliares para todas las plantaciones tuvieron una tendencia decreciente con respecto a las épocas climáticas (Figura 2) aun sin presentar diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ), con  $R^2 = 0.04$  y  $p\text{-valor} = 0.156$ .

Los contenidos del Na en todas las parcelas en las tres épocas climáticas oscilaron entre 0.14 y 1.81 g kg<sup>-1</sup>, pero se observó que el contenido de Na para parcelas aumentó en la época seca. En la época de nortes, la parcela Pa03 registró 1.81 g kg<sup>-1</sup>, valor que es mayor con respecto a los demás sitios, aunque dicho valor es menor que el nivel de 2 - 5 g kg<sup>-1</sup>, reportado por White y Brown (2010) como nivel crítico para plantas no tolerables a condiciones de salinidad. Durante la época de lluvias, se registró el segundo valor más alto, el cual correspondió a la parcela Ja01 (1.22 g kg<sup>-1</sup>), seguido de la parcela Co01 (0.82±0.14 g kg<sup>-1</sup>), ambas parcelas se diferenciaron estadísticamente entre sí y con respecto a las demás parcelas que

presentaron los menores contenidos de Na. Los altos contenidos de la parcela Ja01 durante la época de lluvias, es un caso de excepción que se dio por acumulación de sales de sodio cerca la superficie radicular al aumentar el nivel freático de los Gleysols en las épocas de lluvias (IUSS Working Group WRB, 2015). De manera general, los mayores contenidos fueron encontrados en la época de nortes seguido de la de seca (Figura 2). Al llegar la época de nortes, la precipitación decrece hasta alcanzar su menor cantidad en la época seca, lo que provoca una mayor concentración de Na en el suelo (Palma-López *et al.*, 2007).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.



**Cuadro 8.** Contenido de K y Na en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.

Clave	K (g kg <sup>-1</sup> )			Na (g kg <sup>-1</sup> )		
	Nortes	Seca	Lluvias	Nortes	Seca	Lluvias
<b>Ca01</b>	7.51±1.27 <sup>c</sup>	15.90±2.02 <sup>ab</sup>	22.15±6.01 <sup>b</sup>	0.77±0.16 <sup>b</sup>	0.55±0.04 <sup>bcd</sup>	0.31±0.10 <sup>c</sup>
<b>Ca02</b>	11.74±1.78 <sup>bc</sup>	21.79±2.31 <sup>a</sup>	22.82±2.30 <sup>ab</sup>	0.50±0.03 <sup>b</sup>	0.37±0.04 <sup>de</sup>	0.15±0.01 <sup>c</sup>
<b>Co01</b>	16.33±2.45 <sup>b</sup>	21.31±1.86 <sup>a</sup>	6.04±1.68 <sup>c</sup>	0.57±0.04 <sup>b</sup>	0.50±0.06 <sup>bcd</sup>	0.82±0.14 <sup>b</sup>
<b>Co02</b>	8.04±1.14 <sup>c</sup>	14.20±2.85 <sup>b</sup>	17.34±1.53 <sup>b</sup>	0.56±0.07 <sup>b</sup>	0.43±0.06 <sup>cde</sup>	0.16±0.02 <sup>c</sup>
<b>Pa01</b>	29.23±4.70 <sup>a</sup>	17.84±2.21 <sup>ab</sup>	29.77±1.90 <sup>a</sup>	0.66±0.10 <sup>b</sup>	0.65±0.14 <sup>ab</sup>	0.21±0.02 <sup>c</sup>
<b>Pa02</b>	27.44±5.35 <sup>a</sup>	2.24±0.08 <sup>c</sup>	2.45±0.05 <sup>c</sup>	0.78±0.11 <sup>b</sup>	0.70±0.10 <sup>b</sup>	0.15±0.01 <sup>c</sup>
<b>Pa03</b>	18.76±3.99 <sup>b</sup>	13.89±2.25 <sup>b</sup>	2.19±0.15 <sup>c</sup>	1.81±0.55 <sup>a</sup>	0.95±0.09 <sup>a</sup>	0.36±0.04 <sup>c</sup>
<b>Te01</b>	17.78±1.18 <sup>b</sup>	14.63±2.84 <sup>b</sup>	2.36±0.18 <sup>c</sup>	0.32±0.06 <sup>b</sup>	0.19±0.04 <sup>e</sup>	0.14±0.03 <sup>c</sup>
<b>Ja01</b>	12.27±1.69 <sup>bc</sup>	14.68±3.71 <sup>b</sup>	16.32±4.44 <sup>b</sup>	0.75±0.11 <sup>b</sup>	0.67±0.15 <sup>ab</sup>	1.22±0.33 <sup>a</sup>
<b>Media</b>	16.57±7.76	15.16±5.70	13.49±10.50	0.75±0.43	0.56±0.22	0.50±0.68

\*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

### 6.4.3 Calcio y magnesio

En el Cuadro 9 se presentan los contenidos de Ca y Mg en los tejidos foliares en las tres épocas climáticas evaluadas. Estos cationes cumplen roles fundamentales en la planta; son constituyentes de órganos estructurales y participan en funciones catalizadoras (Maathuis, 2009). Los contenidos de Ca oscilaron entre 6.19 y 20.16 g kg<sup>-1</sup>, valores que se encuentran dentro del rango de 5 a 30 mg g<sup>-1</sup>, establecidos por Mengel y Kirkby (1987) como adecuados, y clasificados como suficientes (> 5 g kg<sup>-1</sup>)

en tejidos foliares de cacao (Jones *et al.*, 1991). Se observó que los mayores contenidos se registraron en la época de nortes, particularmente en la parcela Ca02 con 20.16 g kg<sup>-1</sup>, en la parcela Co02 con 19.91 y en la parcela Ja01 con 18.77 g kg<sup>-1</sup>, los menores contenidos se tuvieron en la época de lluvias en las parcelas: Te01 con 6.19 g kg<sup>-1</sup>, Pa03 con 6.57 g kg<sup>-1</sup> y Ca01 con 6.66 g kg<sup>-1</sup>; aun sin presentar diferencias entre las parcelas para esa época. Generalmente, las concentraciones de Ca en los tejidos foliares mostraron una tendencia decreciente con respecto a las épocas climáticas (Figura 2), la menor disponibilidad Ca<sup>2+</sup> en la solución en condiciones de lluvias, ya que las raíces de la planta absorben menos calcio debido a que; en la época de lluvias el Ca<sup>2+</sup> se lixivia fácilmente y como consecuencia hay menor absorción por la planta.

El Mg se encuentra ubicado en el centro de la molécula de la clorofila, su importancia radica en la fotosíntesis y su participación en el metabolismo de las proteínas en la planta (Acevedo-Chávez y Sánchez-Chávez, 2017). Los contenidos de Mg para las parcelas en todas las épocas climáticas presentaron rangos de concentraciones de 4.11 a 9.05 g kg<sup>-1</sup>, lo que resulta ligeramente superiores a los 5 g kg<sup>-1</sup> considerado como el nivel crítico (Mengel y Kirkby, 1987; Jones *et al.*, 1991). Esos contenidos se ven afectados por las épocas de muestreos, los mayores contenidos de Mg se presentaron durante la época de nortes en las parcelas Co02, Ca01 y Ca02 con 9.05±0.10, 8.35±0.40, 7.75±0.60 y 7.16±1.22 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente; entre los cuales no hubo diferencias significativas. Mientras que los menores contenidos de Mg se presentaron en las parcelas Pa01, Pa02 y Te01 con 4.11±0.43, 5.00±0.99 y 5.17±0.77 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, en esta misma época; siendo generalizados estos menores contenidos de Mg para todos los sitios en las épocas de seca y lluvias, entre los que

no se presentaron diferencias significativas, con excepción de la parcela Ja01 para la época de seca y las parcelas Ja01 y Co01 ( $5.72 \pm 0.24$  y  $5.64 \pm 0.42$  g kg<sup>-1</sup>) en la época de lluvias.

El Mg absorbido por la planta de la solución del suelo se repone lentamente, debido a que su liberación depende de la duración e intensidad de la meteorización, la humedad y pH del suelo y de la actividad microbiana de la raíz, y parte del Mg liberado se pierde por lixiviación y sobre todo en suelos arenosos (Senbayram *et al.*, 2016).

México.

Autónoma de Tabasco.

**Cuadro 9.** Contenidos de Ca y Mg en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.

Clave	Ca (g kg <sup>-1</sup> )			Mg (g kg <sup>-1</sup> )		
	Nortes	Seca	Lluvias	Nortes	Seca	Lluvias
<b>Ca01</b>	19.79±2.36 <sup>a*</sup>	10.15±1.01 <sup>bc</sup>	6.66±0.88 <sup>a</sup>	8.35±0.40 <sup>ab</sup>	4.47±0.29 <sup>ab</sup>	4.92±0.40 <sup>ab</sup>
<b>Ca02</b>	20.16±3.36 <sup>a</sup>	8.74±0.01 <sup>c</sup>	9.70±3.00 <sup>a</sup>	7.75±0.60 <sup>abc</sup>	4.11±0.05 <sup>b</sup>	5.23±0.49 <sup>ab</sup>
<b>Co01</b>	13.64±0.88 <sup>abc</sup>	13.88±1.86 <sup>abc</sup>	8.08±1.59 <sup>a</sup>	5.97±0.38 <sup>cde</sup>	4.86±0.46 <sup>ab</sup>	5.72±0.24 <sup>a</sup>
<b>Co02</b>	19.91±0.53 <sup>a</sup>	14.03±3.78 <sup>abc</sup>	8.42±1.41 <sup>a</sup>	9.05±0.10 <sup>a</sup>	5.81±0.77 <sup>ab</sup>	5.40±1.02 <sup>ab</sup>
<b>Pa01</b>	9.45±2.85 <sup>c</sup>	17.36±3.83 <sup>ab</sup>	8.67±1.34 <sup>a</sup>	4.11±0.43 <sup>e</sup>	5.50±0.71 <sup>ab</sup>	4.47±0.29 <sup>b</sup>
<b>Pa02</b>	8.12±2.37 <sup>c</sup>	10.32±2.48 <sup>abc</sup>	7.31±0.95 <sup>a</sup>	5.17±0.77 <sup>de</sup>	4.98±0.93 <sup>ab</sup>	5.23±0.26 <sup>ab</sup>
<b>Pa03</b>	10.11±1.81 <sup>bc</sup>	7.60±0.83 <sup>c</sup>	6.57±0.51 <sup>a</sup>	7.16±1.22 <sup>abc</sup>	5.54±0.40 <sup>ab</sup>	5.40±0.45 <sup>ab</sup>
<b>Te01</b>	11.23±2.09 <sup>bc</sup>	15.56±4.09 <sup>abc</sup>	6.19±0.79 <sup>a</sup>	5.00±0.99 <sup>de</sup>	5.17±0.53 <sup>ab</sup>	4.88±0.20 <sup>ab</sup>
<b>Ja01</b>	16.86±4.10 <sup>ab</sup>	18.77±5.12 <sup>a</sup>	9.36±0.95 <sup>a</sup>	6.69±1.03 <sup>bcd</sup>	6.15±0.95 <sup>a</sup>	5.64±0.42 <sup>a</sup>
<b>Media</b>	14.36±4.89	12.93±3.93	7.87±1.30	6.58±1.66	5.18±0.65	5.21±0.40

\*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

#### 6.4.4 Hierro y manganeso

En el Cuadro 10, se presentan los contenidos de Fe y Mn, los contenidos de Fe se mantuvieron entre 35.4 y 161.6 mg kg<sup>-1</sup>. De acuerdo con Jones *et al.* (1991), los contenidos menores de 50 mg kg<sup>-1</sup> de Fe en la materia seca se consideran muy bajos, de 50 - 59 mg kg<sup>-1</sup> como bajos, y de 60 - 200 mg kg<sup>-1</sup> como suficiente, de tal manera que el 55.56 % de las parcelas presentaron niveles suficientes de este nutriente. De

acuerdo con Rout y Sahoo (2015) una de las causas del desabasto de Fe en la nutrición de los cultivos, es que la mayor parte del hierro del suelo se encuentra en la forma  $Fe^{+3}$ , como oxihidróxido, un polímero de muy baja solubilidad; o incluso puede ser absorbido por la planta y presenta baja contenido en hojas fisiológicamente maduras, debido a su removilización de hojas a otros órganos sobre todo nuevos brotes (Connorton *et al.*, 2017). El mayor contenido de Fe se registró en la parcela Pa02, tanto en la seca, como en las lluvias, aunque en general, el 77.78 % de las parcelas evaluadas durante la época de lluvias se mantienen dentro del rango de suficiente. El menor contenido de Fe lo presentó la parcela Ca01 durante época de lluvias. Aunque se observan algunos repuntes temporales en el contenido del Fe, en la mayoría de los casos, los contenidos tanto en los sitios, como en las épocas, los niveles son menores a los reportados por Aikpokpodion (2010), y sólo el 14.81 % de dichos contenidos se encuentran dentro del rango reportado por Arévalo-Gardini *et al.* (2017). Se puede observar que el Fe aumenta en un 42.61 % durante la época de seca, y disminuye durante las épocas de nortes y lluvias (Figura 3), las altas temperaturas de la época seca puede ser una razón, puesto a que Lahav y Turner (1984) observaron mayor absorción de Fe por planta de Banana Cavendish AAA con temperaturas 37/30 °C (día/noche), mientras que el bajo contenido registrado en época de lluvias puede deberse al antagonismo con el K (Mengel y Kirkby, 1987) por la solubilidad y mayor absorción de K en época de lluvias.

Las bajas concentraciones de Mn se presentaron en las parcelas Co01, Co02 y Pa01 durante las lluvias con contenidos de 35.1, 31.4 y 32.2 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, de igual modo la parcela Pa01 en nortes presentó bajo contenido. Mientras que los contenidos más altos los registraron la parcela Ca01 durante los nortes con 666.6 mg

kg<sup>-1</sup>. De acuerdo con la escala propuesta por Jones *et al.* (1991), las parcelas Co01, Co02 en la época de lluvias y la parcela Pa01 en épocas de lluvias y nortes registraron bajos contenidos de Mn, al no superar los 49 mg kg<sup>-1</sup> de dicha escala. Los contenidos de las parcelas Ca01 en épocas de lluvias, Ca02 en épocas seca y lluvias, y Te01 en épocas de nortes y lluvias fueron suficientes por mantenerse dentro del rango de 50 - 300 mg kg<sup>-1</sup>. Mientras que las demás parcelas tuvieron altos contenidos superando los 300 mg kg<sup>-1</sup>. De estos valores, sólo un 18.51 % son superiores a los contenidos reportados por Huamani-Yupanqui *et al.* (2012) que van de 17.08 a 264.8 mg kg<sup>-1</sup>. El mayor contenido de Mn se presentó en la parcela Ca01 en nortes, ya que los 512±70.2 mg kg<sup>-1</sup> que se registraron se encuentran dentro del rango de los contenidos (584 - 869 mg kg<sup>-1</sup>) de Mn en tejido foliar seco de cacao reportados por Sodr e *et al.* (2012). Como se puede apreciar en la Figura 3, durante la época seca hay una ligera disminución en la concentración de Mn en los tejidos foliares con respecto a la época de nortes, la cual puede significar una reducción de más de la mitad de las concentraciones, esto se debe a que, bajo condiciones de sequías en el suelo, el Mn no se solubiliza y no está disponible para su absorción por las raíces de las plantas (Mengel y Kirkby, 1987).

**Cuadro 10.** Contenidos de Fe y Mn en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.

Clave	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )			Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Nortes	Seca	Lluvias	Nortes	Seca	Lluvias
<b>Ca01</b>	49.7±9.7 <sup>ab*</sup>	43.8±9.0 <sup>b</sup>	35.4±3.6 <sup>c</sup>	666.6±30.6 <sup>a</sup>	512.0±70.2 <sup>a</sup>	193.4±51.0 <sup>a</sup>
<b>Ca02</b>	79.4±20.5 <sup>a</sup>	62.6±15.2 <sup>b</sup>	53.3±14.2 <sup>c</sup>	305.6±91.7 <sup>b</sup>	135.5±41.1 <sup>bc</sup>	150.9±28.6 <sup>ab</sup>
<b>Co01</b>	38.2±0.1 <sup>b</sup>	45.9±10.3 <sup>b</sup>	36.7±7.1 <sup>c</sup>	83.8±16.2 <sup>de</sup>	53.3±13.0 <sup>c</sup>	35.1±8.0 <sup>c</sup>
<b>Co02</b>	59.4±2.7 <sup>ab</sup>	50.1±5.8 <sup>b</sup>	43.6±8.7 <sup>c</sup>	73.0±11.8 <sup>de</sup>	69.9±7.9 <sup>bc</sup>	31.4±4.1 <sup>c</sup>
<b>Pa01</b>	63.5±23.8 <sup>ab</sup>	65.7±16.2 <sup>b</sup>	76.4±1.6 <sup>b</sup>	41.5±30.2 <sup>e</sup>	70.2±21.5 <sup>bc</sup>	32.2±4.3 <sup>c</sup>
<b>Pa02</b>	75.0±13.8 <sup>a</sup>	161.6±14.4 <sup>a</sup>	102.4±7.3 <sup>a</sup>	73.9±20.5 <sup>de</sup>	82.8±18.6 <sup>bc</sup>	53.2±10.2 <sup>c</sup>
<b>Pa03</b>	65.6±12.4 <sup>ab</sup>	60.8±4.9 <sup>b</sup>	43.5±4.7 <sup>c</sup>	130.0±22.9 <sup>de</sup>	108.0±21.9 <sup>bc</sup>	74.6±6.6 <sup>c</sup>
<b>Te01</b>	55.9±11.4 <sup>ab</sup>	61.2±11.2 <sup>b</sup>	39.8±2.9 <sup>c</sup>	261.5±27.3 <sup>bc</sup>	464.8±117.6 <sup>a</sup>	165.3±46.8 <sup>a</sup>
<b>Ja01</b>	64.9±14.7 <sup>ab</sup>	72.5±12.1 <sup>b</sup>	52.6±0.8 <sup>c</sup>	172.28±52.7 <sup>cd</sup>	201.2±15.0 <sup>b</sup>	84.9±19.4 <sup>bc</sup>
<b>Media</b>	61.3±12.5	69.4±35.9	53.7±22.1	200.9±196.5	188.6±176.0	91.2±62.7

\*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

#### 6.4.5 Cobre y zinc

En el Cuadro 11 se muestran los contenidos de Cu y Zn en tejidos foliares. Los resultados mostraron mayores diferencias estadísticas entre algunas parcelas en la época de lluvias para el Cu, incluso en seca la parcela Ja01 fue la única que difirió con  $17.9 \pm 3.7$  (mg kg<sup>-1</sup>). Los contenidos de Cu variaron entre 4.0 mg kg<sup>-1</sup> (parcela Co02 en seca) a 20.8 mg kg<sup>-1</sup> (parcela Ja01 en nortes), al respecto Jones *et al.* (1991) indica

que valores de 4 - 7 mg kg<sup>-1</sup> se clasifican bajos, de 8-12 mg kg<sup>-1</sup> como suficientes y mayores de 12 mg kg<sup>-1</sup> como altos. Por lo que la parcela Ja01 fue la única que presentó alto contenido de Cu en todas las épocas de muestreos. Las parcelas Ca01 y Co02 presentaron altos valores durante las épocas de nortes y lluvias. Pero en general los contenidos de Cu están dentro del rango de los resultados reportados por Sodré *et al.* (2012) y Huamani-Yupanqui *et al.* (2012).

Los contenidos de Zn de las parcelas oscilaron entre 21.9 mg kg<sup>-1</sup> en la parcela Ja01 durante la época de seca, a 74.8 mg kg<sup>-1</sup> en la parcela Co02 durante los nortes. Al respecto estos contenidos se clasifican como suficientes en tejidos foliares de cacao, ya que se mantienen dentro del rango de 20 - 100 mg kg<sup>-1</sup> reportados por Jones *et al.* (1991). Con excepción de la parcela Ja01 que tuvo niveles inferiores a 30 mg kg<sup>-1</sup> durante las tres épocas (Noulas *et al.*, 2018). Pero más del 50 % de las parcelas evaluadas presentan contenidos de Zn inferiores a los reportados por Arévalo-Gardini *et al.* (2017) en plantaciones de Perú. En la Figura 3 se puede observar que la mayor acumulación de Zn en los tejidos foliares ocurre en la época de nortes, como resultado de un aumento en el suministro derivado de una mayor tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo, particularmente motivado por las condiciones climáticas, específicamente por la precipitación (Cakmak y Kutman, 2018).



**Cuadro 11.** Contenidos de Cu y Zn en tejidos foliares de cacao en diferentes suelos y épocas climáticas en Tabasco.

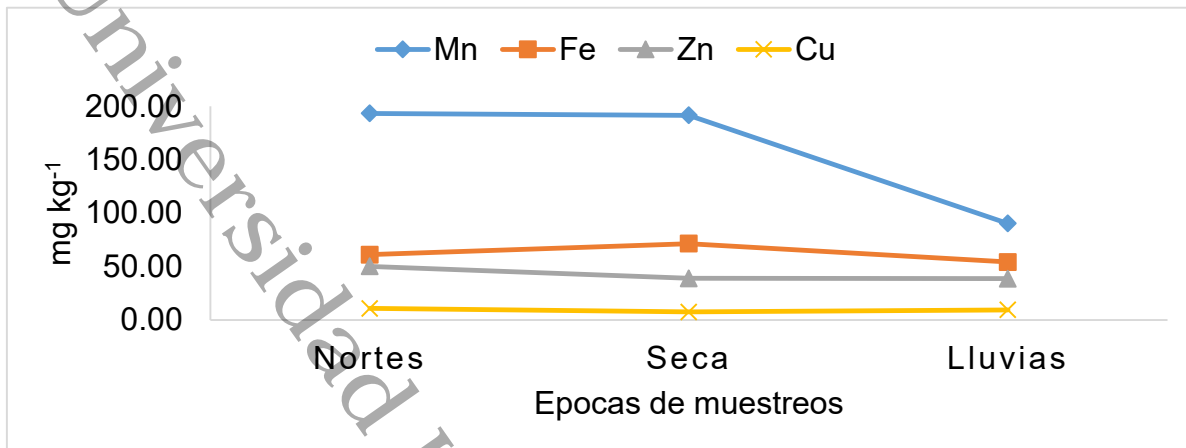
Clave	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )			Zn (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Nortes	Seca	Lluvias	Nortes	Seca	Lluvias
<b>Ca01</b>	16.7±4.3 <sup>ab*</sup>	7.1±1.0 <sup>b</sup>	7.0±1.1 <sup>bc</sup>	54.6±5.8 <sup>abc</sup>	34.8±1.9 <sup>ab</sup>	40.0±2.5 <sup>ab</sup>
<b>Ca02</b>	6.3±0.5 <sup>c</sup>	6.8±0.8 <sup>b</sup>	6.8±1.4 <sup>bc</sup>	55.6±12.5 <sup>abc</sup>	42.5±4 <sup>a</sup>	39.4±9.1 <sup>ab</sup>
<b>Co01</b>	6.5±0.7 <sup>c</sup>	5.0±1.0 <sup>b</sup>	9.3±1.8 <sup>abc</sup>	39.5±10.2 <sup>bc</sup>	46.6±6.9 <sup>a</sup>	39.8±6.9 <sup>ab</sup>
<b>Co02</b>	5.7±0.8 <sup>c</sup>	4.0±0.5 <sup>b</sup>	14.1±2.2 <sup>a</sup>	74.8±18.2 <sup>a</sup>	33.8±8.7 <sup>ab</sup>	39.5±8.3 <sup>ab</sup>
<b>Pa01</b>	9.9±1.2 <sup>c</sup>	4.7±1.4 <sup>b</sup>	4.7±0.1 <sup>c</sup>	41.1±10.6 <sup>bc</sup>	35.8±3.9 <sup>ab</sup>	37.3±4 <sup>ab</sup>
<b>Pa02</b>	9.4±1.6 <sup>c</sup>	5.9±0.6 <sup>b</sup>	9.9±0.7 <sup>ab</sup>	52.0±8.9 <sup>abc</sup>	45.1±2.5 <sup>a</sup>	46.0±4.9 <sup>a</sup>
<b>Pa03</b>	7.2±0.8 <sup>c</sup>	4.4±1 <sup>b</sup>	6.6±1.8 <sup>bc</sup>	56.4±7.8 <sup>abc</sup>	45.4±10.7 <sup>a</sup>	38.6±1.4 <sup>ab</sup>
<b>Te01</b>	10.2±1.7 <sup>bc</sup>	5.8±1.5 <sup>b</sup>	11.2±1.9 <sup>ab</sup>	60.9±16.4 <sup>ab</sup>	45.4±12.5 <sup>a</sup>	40.4±8.8 <sup>ab</sup>
<b>Ja01</b>	20.8±4.6 <sup>a</sup>	17.9±3.7 <sup>a</sup>	12.5±3.2 <sup>a</sup>	29.2±4.9 <sup>c</sup>	21.9±5.8 <sup>b</sup>	29.1±3.7 <sup>b</sup>
<b>Media</b>	10.2±5.1	6.9±4.3	9.1±3.1	51.6±13.4	39.0±8.2	38.9±4.4

\*Medias con una misma letra dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

### 6.5 Tendencia del estado nutrimental de la planta de cacao durante las épocas climáticas en las zonas productoras de Tabasco

En términos generales, las concentraciones nutrimentales en tejidos foliares de cacao mostraron el orden siguiente: N > K > Ca > Mg > P > Na > Mn > Fe > Zn > Cu (Figuras 2 y 3). Con base en otros estudios las plantaciones de cacao en el estado de Tabasco, en su mayoría tienen niveles adecuados de N durante la época de nortes, y

suficientes durante seca (22.22 %) y lluvias (33.33 %) (Jones *et al.*,1991). Mientras que el P es deficitario en el 77.78 % de las parcelas evaluadas, y en el resto es suficiente. El K tuvo un nivel suficiente en el 89 % de las parcelas durante la época de seca, mientras que el 56 % de esas parcelas presentaron niveles de suficientes a altos durante las épocas de nortes y seca. El Mg es un elemento que presentó niveles de suficientes en un 78, 56 y 67 % durante las épocas de nortes, seca y lluvias, respectivamente. En cuanto al Fe, el 56 % de las plantaciones presentaron niveles suficientes en la época de nortes, 67 % en seca y sólo un 22 % en épocas de lluvias. El Mn se registró en niveles de suficientes a altos en el 89 y 100 % de las plantaciones durante las épocas de nortes y seca respectivamente, mientras que en la época de lluvias estos niveles suficientes se presentaron en el 67 % de las plantaciones. El Cu presentó contenidos de suficientes a altos en el 56 % de las parcelas durante las temporadas de nortes y lluvias, mientras que, en seca, solo el 11 % de las parcelas tuvieron niveles altos contenido en seca, y por el contrario, en el 89 % de las plantaciones los contenidos fueron bajos. Finalmente, las concentraciones de Ca y Zn fueron suficientes en todos los sitios estudiados durante todas las épocas.



**Figura 3.** Contenidos de micronutrientos en tejidos foliares de cacao durante las épocas climáticas en Tabasco.

### 6.6 Relación entre las variables de tejidos foliares en cada época

En los Cuadros 12, 13 y 14 se presentan los resultados del análisis de correlación entre los elementos del tejido foliar en las plantaciones de cacao. Considerando las correlaciones altas y las muy altas, se pudo observar correlaciones significativas ( $p \leq 0.01$ ). Durante la época de nortes el K se correlacionó de forma positiva con P, mientras que el Ca presentó correlaciones negativas con P y K, al respecto Nguyen *et al.* (2017) reportan antagonismos del Ca con el P y K y el Cu se correlacionó positivamente con el N. En seca hubo correlaciones negativas de Fe con K y positiva entre Mn y P. Mientras que en la época de lluvias hubo alta correlación entre Na y P y por último Mg presentó correlación negativa con K en nortes, Pedraza y Henao (2008) observaron lo mismo en planta de menta (*Menta spicata* L.) y correlaciones positivas con Ca durante las épocas de nortes y seca.

**Cuadro 12.** Correlación entre los elementos en tejidos foliares durante la época de nortes.

Elementos	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
<b>N</b>	1.00									
<b>P</b>	-0.21	1.00								
<b>K</b>	0.07	0.77**	1.00							
<b>Ca</b>	0.08	-0.74**	-0.84**	1.00						
<b>Mg</b>	-0.14	-0.47**	-0.80**	0.81**	1.00					
<b>Na</b>	0.03	0.41*	0.12	-0.21	0.16	1.00				
<b>Fe</b>	0.18	0.07	0.13	-0.10	0.06	0.17	1.00			
<b>Mn</b>	0.32	-0.49**	-0.53	0.49**	0.41*	-0.11	-0.10	1.00		
<b>Cu</b>	0.64**	-0.28	-0.20	0.23	0.04	-0.00	0.01	0.38*	1.00	
<b>Zn</b>	-0.59**	0.10	-0.12	0.13	0.34	-0.05	0.15	0.16	-0.45**	1.00

\*Correlación significativa al ( $p \leq 0.05$ )

\*\*Correlación altamente significativa al ( $p \leq 0.01$ )

**Cuadro 13.** Correlación entre los elementos en tejidos foliares durante la época seca.

Elementos	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
<b>N</b>	1.00									
<b>P</b>	0.17	1.00								
<b>K</b>	0.36*	-0.32	1.00							
<b>Ca</b>	-0.20	-0.029	0.09	1.00						
<b>Mg</b>	-0.24	-0.02	-0.18	0.62**	1.00					
<b>Na</b>	0.09	0.39*	-0.25	-0.09	0.31	1.00				
<b>Fe</b>	-0.15	0.45**	-0.74**	-0.10	-0.03	0.30	1.00			
<b>Mn</b>	-0.01	-0.61**	0.00	0.04	-0.12	-0.42*	-0.26	1.00		
<b>Cu</b>	0.28	-0.08	-0.03	0.49**	0.41*	0.12	0.04	0.13	1.00	
<b>Zn</b>	-0.14	0.33	-0.00	-0.42*	-0.49**	-0.16	0.12	-0.09	-0.59**	1.00

\*Correlación significativa al ( $p \leq 0.05$ )

\*\*Correlación altamente significativa al ( $p \leq 0.01$ )

**Cuadro 14.** Correlación entre los elementos en tejidos foliares durante la época de lluvias.

Elementos	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
<b>N</b>	1.00									
<b>P</b>	-0.07	1.00								
<b>K</b>	0.57	-0.31	1.00							
<b>Ca</b>	0.10	0.15	0.43*	1.00						
<b>Mg</b>	-0.22	0.49	-0.24	0.47**	1.00					
<b>Na</b>	0.18	0.69**	0.03	0.37*	0.50	1.00				
<b>Fe</b>	-0.20	0.00	-0.01	0.11	-0.15	-0.20	1.00			
<b>Mn</b>	0.42*	-0.45**	0.07	-0.19	-0.20	-0.21	-0.35*	1.00		
<b>Cu</b>	0.06	0.32	-0.29	-0.01	0.23	0.19	-0.11	-0.09	1.00	
<b>Zn</b>	-0.43**	-0.15	-0.30	0.05	0.09	-0.53**	0.17	-0.56	-0.15	1.00

\*Correlación significativa al ( $p \leq 0.05$ )

\*\*Correlación altamente significativa al ( $p \leq 0.01$ )

## VII. CONCLUSIONES

Se observa una falta generalizada de nitrógeno con excepción de los suelos CM y GL que poseen las condiciones y reservas de MO necesarias para suministrar la demanda de este elemento en plantas de cacao. Aunque pueden presentarse deficiencias en alguna época del año, debido a la disminución de la tasa de mineralización que está sujeta a la disposición de la humedad y temperatura principalmente. El contenido de P está por debajo de su nivel de suficiencia en las plantas de cacao, con la excepción de tres parcelas que presentaron suficiencia en una sola época del año; por lo que debe considerarse la deficiencia de P en todas las parcelas analizadas. Para el caso de K, en todas las parcelas se presentó suficiencias en al menos una época del año, esto se debe a la alta movilidad de este elemento en el suelo. Por otro lado, debe considerarse también que se encuentra por debajo del nivel de suficiencia en una o dos épocas del año. Otro elemento, que presentó una deficiencia generalizada en las parcelas y en todas las épocas del año fue el Cu, con excepción de la parcela Ja01 ubicada en un GL, que presentó contenidos suficientes de este elemento en las tres épocas del año. En general, los demás elementos se encuentran en niveles apropiados en los tejidos vegetales y en los suelos analizados. La fertilidad edáfica y las épocas del año influyen en el estado nutricional de la planta de cacao.

## VIII. RECOMENDACIONES

Con base a los resultados del presente trabajo se recomienda implementar un programa de fertilización inorgánico u orgánico, que considere la aplicación de N en todas las parcelas estudiadas con excepción de las establecidas en el suelo CM y GL. Asimismo, se debe suministrarse P a todas las parcelas estudiadas dado el bajo nivel foliar encontrado lo que correlaciona con el bajo nivel de fósforo en el suelo. De la misma manera, se recomienda aplicar una dosis de mantenimiento de K en todas las parcelas. Otro elemento que debe considerarse en el programa de fertilización orgánica y/o inorgánica es la aplicación de Cu por su bajo nivel encontrado en las plantas. El programa de fertilización debe considerar como mínimo, un rendimiento esperado, el historial de manejo y el seguimiento anual del mismo.



## IX. LITERATURA CITADA

- Abera, G., Wolde-Meskel, E., Sheleme, B. y Bakken, L.R. 2012. Nitrogen mineralization dynamics under different moisture regimes in tropical soils. *International Journal of Soil Science*, 7(4): 132-145.
- Aburto-González, C.A., Alejo-Santiago, G., Ramírez-Guerrero, L.G. y Sánchez-Hernández, R. 2017. Concentración foliar de macronutrientes en diferentes etapas fenológicas del litchi cv. Brewster. *Interciencia*, 42: 441-445.
- Acevedo-Chávez, J. y Sánchez-Chávez, E. 2017. Eficiencia del uso de portainjerto sobre el rendimiento y dinámica nutricional foliar de macronutrientes en pimiento morrón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3): 685-693.
- Aikpokpodion, P.E. 2010. Nutrients dynamics in cocoa soils, leaf and beans in Ondo State, Nigeria. *Journal of Agricultural Science*, 1(1): 1-9.
- Ajwa, H.A., y Tabatabai, M.A. 1994. Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 18(3): 175-182.
- Alcudia-Aguilar, A., Van Der Wal, H., Suárez-Sánchez, J., Álvarez-Solis, D., y Tovilla-Hernández, C. 2017. Salinidad, composición botánica y crecimiento de especies frutales en huertos familiares de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10): 1-12.
- Almeida, A.A. y Valle, R. 2007. Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4): 425-448.
- Álvarez-Sánchez, M.E. y Marín-Campos, A. 2011. Manual de procedimientos analíticos para suelo y planta. Laboratorio de Química, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. 65p.

- Amores F. 1992. Clima, suelos, nutrición y fertilización de cultivos en el litoral ecuatoriano. Manual Técnico No. 26. INIAP, IMPOFOS. Ecuador. 47p.
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C.O., Baligar, V.C. y 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.
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M. y Etchevers-Barra, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5): 605-620.
- Aubertin, G.M. and Kardos, L.T. 1965. Root growth through porous media under controlled conditions: I. Effect of pore size and rigidity. *Soil Science Society of America Journal*, 29(3): 290-293.
- Avendaño-Arrazate, C.H., Villarreal-Fuentes, J.M., Campos, R.E., Gallardo-Mendez, R.A., Mendoza, L.A., Aguirre-Medina, J.F., Sandoval, E.A. y Espinosa, Z.S. 2011. Diagnóstico del cacao en México. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Texcoco, México. 1a ed. en español, 2011. 80p.
- Barrezueta-Unda, S. y Paz-González, A. 2017. Estudio comparativo de la estructura elemental de materia orgánica de suelo y mantillo cultivados de cacao en El Oro, Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 5(1): 54-62.
- Batista, L. 2009. El Cultivo de Cacao. Santo Domingo, República Dominicana: CEDAF. 232p.
- Blake, G.R. and Hartage, K.H. 1986. Bulk Density. In: A Klute (ed.) *Methods of soil analysis, Part I. Second edition*. American Society of Agronomy, Madison, Agronomy, 9: 363-375.

- Bojórquez, I., Hernández, A., García, D., Nájera, O., Flores, F., Madueño, A. y Bugarín, R. 2007. Características de los suelos Cambisoles y Fluvisoles de la llanura costera norte del estado de Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, 28(1): 19-24.
- Bouma, D. 1967. Nutrient uptake and distribution in subterranean clover during recovery from nutritional stresses. *Australian Journal Biological Sciences*, 20: 601-612.
- Cakmak, I. y Kutman, U.B. 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69 (1): 172-180.
- Carrillo, M.Z. 2006. El muestreo foliar en cacao. Instituto Nacional Autónomo de Ciencias Agropecuarias (INIAP). Quevedo, Los Ríos, Ecuador 6p.
- Castillo, D.I., Corral, J.A.R., Garnica, J.G.F. y Eguiarte, D.R.G. 2007. Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 25(2): 187-194.
- Castillo-González, A.M., Hernández-Maruri, J.A., Avitia-García, E., Pineda-Pineda, J., Valdéz-Aguilar, L.A. y Corona-Torres, T. 2011. Extracción de macronutrientes en banano Dominicano (*Musa spp.*). *Phyton*, 80(1): 65-72.
- Chaudhari, P.R., Ahire, D.V., Ahire, V.D., Chkravarty, M. y Maity, S. 2013. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(2): 1-8.
- Chávez-Barrantes, N.F. y Gutiérrez-Soto, M.V. 2017. Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamérica*, 28(1): 255-271.

- Connorton, J.M., Balk, J., and Rodríguez-Celma, J. 2017. Iron homeostasis in plants—a brief overview. *Metallomics*, 9(7): 813-823.
- Córdova-Ayalos, V., Sánchez-Hernández, M., Estrella-Chulím, N.G., Macías-Layalle, A., Sandoval-Castro, E., Martínez-Saldaña, T. y Ortiz-García, C.F. 2001. Factores que afectan la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el ejido Francisco I. Madero del plan Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 17(34): 93-100.
- Correndo, A. y García, F. 2017. Métodos de diagnóstico nutricional en cultivos extensivos en Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 26: 3-12.
- Cruz-Sánchez, O.E., Cruz-Hernández, A., Gómez-Vázquez, A., Chay-Canul, A.J., Joaquín-Cansino, S., De la Cruz-Lázaro, E., Márquez-Quiroz, C., Osorio-Osorio, R. y Hernández-Garay, A. 2018. Producción de forraje y valor nutritivo del pasto mulato II (*Bracharia* híbrido 36087) a diferentes régimen de pastoreo. *Agroproductividad*, 11(5): 18-23.
- de Souza, L.T.C., Cruz, P.J., Bezerra, de M.S., Silva, de O.V.N., Oliveira, B.R., Fernandes, G.J.E. y da Cunha, M.E. 2019. Characterization of Physical-Chemical and Structural Soil Attributes in the Semiarid Region of the Rio Grande do Norte State, Brazil. *Journal of Agricultural Science*, 11(3): 359-369.
- Díaz-José, O., Aguilar-Ávila, J., Rendón-Medel, R. y Santoyo-Cortés, V.H. 2013. Current state of and perspectives on cocoa production in Mexico. *Ciencia Investigación Agraria*, 40(2): 279-289.

- Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M.I. y Weigend, M. 2011. Hoja Botánica: Cacao. Traducido por Federico Luebert. Hoja botánica. 1ª ed. Impreso por: Giacomotti Comunicación Gráfica S.A.C. Lima - Perú, junio del 2012. 20p.
- Espinosa-García, J.A., Uresti-Gil, J., Vélez-Izquierdo, A., Moctezuma-López, G., Inurreta-Aguirre, H.D. y Góngora-González, S.F. 2015. Productividad y rentabilidad potencial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el trópico mexicano. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6(5): 1051-1063.
- Espinoza, I.D.N., Zenteno, M.D.C., Chávez, J.C., Moreiral, V.N., Solarte, K.E.A. y Intriago, F.L.M. 2018. Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Temas Agrarios, 23(2): 177-187.
- Estrada-Herrera, I.R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, S.J.J., Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J.D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. Agrociencia, 51: 813-831.
- FAO, 2019. Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Consultado en línea en marzo 2019 en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>
- FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 99p.
- Fernández, L.J.C., Bohórquez, S.W. y Rodríguez, A. 2016. Dinámica nutricional del cacao bajo diferentes tratamientos de fertilización con N, P y K en vivero. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 10(2): 367-380
- Furcal-Beriguete, P. 2017. Extracción de nutrientes por los frutos de cacao en dos localidades en Costa Rica. Agronomía Mesoamérica, 28(1): 113-129.

- Gattward, J.N., Almeida, A.A.F., Souza, J.J.O., Gomes, F.P. and Kronzucker, H.J. 2012. Sodium–potassium synergism in *Theobroma cacao*: stimulation of photosynthesis, water-use efficiency and mineral nutrition. *Physiologia Plantarum*, 146(3): 350-362.
- Hardy, F. 1961. Manual de Cacao (No.10). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica. Biblioteca Orton, IICA/CATIE. Consultado en febrero 2020 en [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=sh4PAQAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=Hardy,+F.+1961.+Manual+de+cacao+&ots=J0AoiluU9h&sig=-tjihjmR0kMIGIqzTbjRvp1eFJg&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Hardy%2C%20F.%201961.%20Manual%20de%20cacao&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=sh4PAQAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=Hardy,+F.+1961.+Manual+de+cacao+&ots=J0AoiluU9h&sig=-tjihjmR0kMIGIqzTbjRvp1eFJg&redir_esc=y#v=onepage&q=Hardy%2C%20F.%201961.%20Manual%20de%20cacao&f=false)
- Hartemink, A.E. 2005. Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: a review. *Advances in Agronomy*, 86: 227-253.
- Hipólito-Romero, E., Carcaño-Montiel, M.G., Ramos-Prado, J.M., Vázquez-Cabañas, E.A., López-Reyes, L. y Ricaño-Rodríguez, J. 2017. Efecto de inoculantes bacterianos edáficos mixtos en el desarrollo temprano de cultivares mejorados de cacao (*Theobroma cacao* L.) en un sistema agroforestal tradicional del norte de Oaxaca, México. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4): 356-365.
- Huamani-Yupanqui, H.A., Huauya-Rojas, M.A., Mansilla-Minaya, L.G., Florida-Rofner, N. and Neira-Trujillo, G.M. 2012. Presence of heavy metals in organic cacao (*Theobroma cacao* L.) crop. *Acta Agronómica*, 61(4): 309-314.

- ICCO, 2018. International Cocoa Organization. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics. Vol. XLIV, No. 4, Cocoa year 2017/18. Consultado en línea en marzo 2019 en <https://www.icco.org/about-us/icco-news/389-may-2018-quarterly-bulletin-of-cocoa-statistics.html>
- INEGI, 2017. Anuario estadístico y geográfico de Tabasco 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. 440p.
- IUSS. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. Working Group WRB. FAO, Roma.
- Jiménez-Ramírez, R. 2013. Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico. M.Sc. Tesis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Cárdenas Tabasco, México. 158p. Disponible en línea en [http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2213/Jimenez\\_Ramirez\\_R\\_MC\\_Produccion\\_Agroalimentaria\\_Tropico\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2213/Jimenez_Ramirez_R_MC_Produccion_Agroalimentaria_Tropico_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Jones, J.J.B., Wolf, B. and Mills, H.A. 1991. Plant analysis handbook: A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Micro-Macro Publishing, Inc. Athens, Georgia, USA.
- Kazda, M. y Zvacek, L. 1989. Aluminium and manganese and their relation to calcium in soil solution and needles in three Norway spruce (*Picea abies*, L. Karst.) stands of Upper Austria. Plant and Soil, 114(2): 257-267.

- Lahav, E., y Turner, D.W. 1984. The effect of temperature on the iron content of banana suckers. *Journal of Plant Nutrition*, 7(1-5), 725–731. doi:10.1080/01904168409363237
- López, A.P. 2011. Paquete Tecnológico Cacao (*Theobroma cacao* L.) Producción de planta. Programa Estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región Sur-Sureste de México: Trópico Húmedo 2011. INIFAP. 10p.
- López-Lefebvre, L.R., Rivero, R.M., García, P.C., Sánchez, E., Ruiz, J.M. and Romero, L. 2002. Boron effect on mineral nutrients of tobacco. *Journal of Plant Nutrition*, 25(3): 509-522.
- Maathuis, F.J.M. 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3): 250-258.
- Maldonado M.F., Jasso, M.J., Palma-López, D.J., Salgado, G.S. y González, H.V.A. 2006. Dinámica de materia orgánica, P y K en suelos de sistemas agroforestales 'cedro-plátano' en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(3): 223-230.
- Matus, F.J., Maire, G. y Christian, R. 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2): 112-126.
- McBratney, A.B., Field, D.J. y Koch, A. 2013. The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213: 203-213.
- Mendoza-López, A., Gallardo-Méndez, R.A. y Avendaño-Arrazate, C.H. 2011. El mundo del cacao (*Theobroma cacao* L.) kawa (Maya) cacahuatl (Náhuatl). *Agroproductividad*, 2: 18-26.



- Mengel, K. y Kirkby, E.A. 1978. Principio de nutrición vegetal. 4ta edición, 1ra en español. Traducido por Melgar, R.J. Instituto Internacional de la Potasa Basilea, Suiza-2000. 608p.
- Molina, E. 2007. Análisis de suelos y su interpretación. Centro de Investigaciones Agronómicas, CIA-UCR-Amino Grow International, San José, Costa Rica. 8p.
- Nguyen, H.H., Maneepong, S. y Suraninpong, P. 2017. Effects of potassium, calcium and magnesium ratios in soil on their uptake and fruit quality of pummelo. *Journal of Agricultural Science*, 9(12): 110-121.
- Noulas, C., Tziouvalekas, M. and Karyotis, T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 49: 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>
- Osorio, N.W. 2012. pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4): 1-4.
- Palma-López D. J., Cisneros D.J., Moreno C.E. y Rincón-Ramírez, J.A. 2007. Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Post-Graduados-Isprotab-Fundacion Produce Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 214p.
- Palma-López, D.J., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi-Reyes, F. y Palma-Cancino, D.Y. 2017. Actualización de la Clasificación de Suelos de Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12): 29-35.
- Paredes, A.M. 2003. Manual de cultivo del cacao. Programa para el Desarrollo de la Amazonia (PROAMAZONIA). Perú: Ministerio de Agricultura. 100p.

- Pascual-Córdova, G., Obrador-Olán, J.J., García- López, E., Carrillo-Ávila, E., Sánchez-Soto, S., Guerrero-Peña, A. y Ortiz-García, C.F. 2017. Evaluación del sistema agroforestal cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante indicadores de calidad de suelo en Tabasco, México. *Agroproductividad*, 10(12): 36-42.
- Pedraza, R. y Henao, M.C. 2008. Composición del tejido vegetal y su relación con variables de crecimiento y niveles de nutrientes en el suelo en cultivos comerciales de menta (*Mentha spicata* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(2): 186-196.
- Pérez-Rosales, A., Galvis-Spínola, A., Bugarín-Montoya, R., Hernández-Mendoza, T.M., Vázquez-Peña, M.A. y Rodríguez-González, A. 2017. Capacidad de intercambio catiónico: descripción del método de la tiourea de plata (AgTU+n). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1): 171-177.
- Puentes, P.Y.J., Gómez, C.A. y Menjivar, F.J.C. 2016. Influence of the relationship among nutrients on yield of cocoa (*Theobroma cacao* L.) clones. *Acta Agronómica*, 65(2): 176-182.
- Ramírez-González, S.I. 2008. La moniliasis un desafío para lograr la sostenibilidad del sistema cacao en México. *Tecnología en Marcha*, 21(1): 97-110.
- Richter, D.D. 1986. Sources of acidity in some forested adults. *Soil Science Society of America Journal*, 50(6): 1584-1589.
- Rodrigo, P.L. 2000. Encuestas probabilísticas vs. no probabilísticas. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco Distrito Federal, México. *Política y Cultura*. 13: 263-276.

- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y.J. y Menjivar-Flores, J.C. 2017. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3): 529-541.
- Rout, G.R. y Sahoo, S. 2015. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*, 3: 1-24.
- Ruiz-Álvarez, O., Ortega-Ramírez, R., Vásquez-Pena, M.A., Ontiveros-Capurata, R.E. y López-López, R. 2012. Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 2: 1-14.
- Ruttenberg, K.C. 2003. The global phosphorus cycle. *Treatise on Geochemistry*, 8: 585-643. doi:10.1016/b0-08-043751-6/08153-6
- SAGARPA, 2017. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Agricultura. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. México. 63p.
- Salas, T.J. y Hernández, S.L.Y. 2015. Cacao, una aportación de México al mundo. *Ciencia*, 66(3): 32-39.
- Salazar, L.A.L., Valencia, N.R. y Khalajabadi, S.S. 2015. Disponibilidad de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> en función de las propiedades del suelo, zona cafetera central de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1): 29-42.
- Salvador, P.M., Sánchez, H.R., Sánchez, G.D., López, N.U., Alejo, S.G., Valdés, V.E. y Gallardo, L.J.F. 2017. Evolution of soil organic carbon during a chronosequence of transformation from cacao (*Theobroma cacao* L.) plantation to grassland. *Acta Agronómica*, 65(4): 525-530.

- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabrales, L.D.C., Martínez-Sánchez, J.L., Sánchez-Hernández, R. y Valdés-Velarde, E. 2019. Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y bosques*, 25(1): 1-14.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Intitute Inc. 5136p.
- Schachtman, D.P., Reid, R.J. and Ayling, S.M. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiology*, 116(2): 447-453.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana. Nom-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificacion de suelos, estudio, muestreo y analisis. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 85p.
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V. y Thiel, H. 2016. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. *Crop and Pasture Science*, 66(12): 1219-1229.
- Sequera, O. y Ramírez, R. 2013. Roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio como fuente de fósforo para frijol en dos tipos de suelo. *Bioagro*, 25(1): 39-46.
- Shiwakoti, S., Zheljazkov, V.D., Gollany, H.T., Xing, B. y Kleber, M. 2019. Micronutrient concentrations in soil and wheat decline by long-term tillage and winter wheat-pea rotation. *Agronomy*, 9(7): 359.
- SIAP, 2017. Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera. Cierre de la producción agrícola por cultivo. Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultado en línea en octubre 2018 en <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SIAP, 2018. Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera. Atlas Agroalimentario 2018. Consultado en línea en marzo 2019 en [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2018/Atlas-](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018)

Agroalimentario-2018

Sierra, J., Noël, C., Dufour, L., Ozier-Lafontaine, H., Welcker, C. y Desfontaines, L. 2003. Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity. *Plant and Soil*, 252(2): 215-226.

Simpson, R.J., Stefanski, A., Marshall, D.J., Moore, A.D. y Richardson, A.E. 2015. Management of soil phosphorus fertility determines the phosphorus budget of a temperate grazing system and is the key to improving phosphorus efficiency. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 212: 263-277.

Sodré, G.A., Lima, M.P.C., Rodrigues, M.R. y M. Valle, R.R. 2012. Estado nutricional e transporte de nutrientes em mudas enxertadas de cacaueiro. *Agrotropica*, 24(2): 73-78.

Souchie, E.L., Azcón, R., Barea, J.M., Saggin-Júnior, O.J., and Silva, E.M.R.D. 2006. Phosphate solubilization and synergism between P-solubilizing and arbuscular mycorrhizal fungi. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(9): 1405-1411.

Suárez, V.G.M., Soto, C.F., Garea, L.E. y Solano, O.O.J. 2015. Caracterización agroclimática del macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa, en función de la zonificación agroecológica para el cacao (*Theobroma cacao* L.). *Cultivos Tropicales*, 36(1): 23-28.

Van, V.J.A., Slingerland, M. and Giller, K.E. 2017. Mineral nutrition of cocoa: a review. In *Advances in Agronomy*, 141: 185-270. Academic Press.

- Watts, D.B., Tobert, H. y Prior, S.A. 2007. Mineralization of nitrogen in soils amended with dairy manure as affected by wetting/drying cycles. *Communications in soil science and plant analysis*, 38(15-16): 2103-2116.
- Welch, R.M. y Shuman, L. 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 14(1): 49-82. doi:10.1080/07352689509701922
- Wessel, M. 1971. Fertilizer requirements of cacao (*Theobroma cacao* L.) in South-Western Nigeria. Koninklijk Instituut voor de Tropen, Amsterdam. 104p.
- White, P.J. and Brown, P.H. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105: 1073-1080.
- Yoroba, F., Kouassi, K.B., Diawara, A., Yapo, A.M.L., Kouadio, K., Tiemoko, D.T., Kouadio, Y.K., Koné, I.D. y Assamoï, P. 2019. Evaluation of Rainfall and Temperature Conditions for a Perennial Crop in Tropical Wetland: A Case Study of Cocoa in Côte d'Ivoire. *Advances in Meteorology*, 2019: 1-10.