

Densidad radical y tipos de suelos en los que se produce café (*Coffea arabica* L.) en Chiapas, México

Root density and soil types in which coffee (*Coffea arabica* L.) is produced in Chiapas, Mexico

Raúl Gómez-González¹, David Jesús Palma-López^{1*}, José Jesús Obrador-Olan¹, Octavio Ruiz-Rosado²

¹Colegio de Postgraduados - Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n, CP. 86500. H Cárdenas, Tabasco, México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. 91700 Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: dapalma@colpos.mx

Artículo científico **recibido:** 15 de noviembre de 2016 **aceptado:** 06 de octubre de 2017

RESUMEN. Con el objetivo de determinar la densidad de longitud de raíces (DLR) finas en una plantación de café variedad Catimor en la zona de Custepec en la Concordia, Chiapas, se ubicaron los suelos en función de la pendiente mediante tres perfiles en diferentes posiciones fisiográficas de la pendiente. Los suelos se clasificaron y caracterizaron con la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo y la NOM-021-RECNAT 2000. La DLR vertical y horizontal se determinó por medio de la selección aleatoria de tres plantas por cada posición fisiográfica, las cuales se distribuyeron bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial con tres niveles: posición de la pendiente (alta, media y baja), dos distancias al tronco (50 y 100 cm) y tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm). En la posición alta, media y baja de la pendiente los suelos se clasificaron como Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric), Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic) y Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic), respectivamente. Las características del suelo en las tres posiciones difieren, debido a la erosión, lixiviación de bases, argilización e intemperismo de la arcilla. La DLR horizontal a las dos distancias evaluadas se comporta de forma homogénea; en cada sitio y cada tipo de suelo la DLR fue similar, solo presentó diferencias significativas en forma vertical entre sitios y tipos de suelo. La mayor concentración de raíces 89.95% se tuvo con DRL de 6.97 km m⁻³ en los primeros 20 cm de profundidad.

Palabras clave: Cambisol, Lixisol, Luvisol, manejo sustentable

ABSTRACT. In order to determine fine root length density (RLD) in a Catimor variety coffee plantation in the Custepec area of Concordia, Chiapas, soils were characterized according to slope by three profiles in different physiographic slope positions. The soils were classified and characterized with the World Reference Base for Soil Resource and NOM-021-RECNAT 2000. The vertical and horizontal RLD was determined by randomly selecting three plants for each physiographic position, which were distributed under a completely randomized design with a factorial arrangement with three levels: slope position (high, medium and low), two distances to the trunk (50 and 100 cm) and three depths (0-20, 20-40 and 40-60 cm). In the high, medium and low position of the slope, the soils were classified as Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric), Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic) and Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic), respectively. The soil characteristics in the three positions differ due to erosion, base leaching, argilization and weathering of the clay. The horizontal RLD at the two distances evaluated behaves in a homogeneous way; in each site and each type of soil, the RLD was similar; significant differences were only shown vertically between sites and soil types. The highest concentration of roots, 89.95%, was found with a RLD of 6.97 km m⁻³ in the first 20 cm of depth.

Key words: Cambisol, Lixisol, Luvisol, sustainable management

INTRODUCCIÓN

En el estado de Chiapas los cafetales se ubican en terrenos abruptos, principalmente en lomeríos con pendientes pronunciadas (Rosas *et al.* 2008). Por lo que varias prácticas de manejo dejan de ejecutarse y otras se adaptan a las condiciones del terreno, lo que lleva al deterioro de la calidad del suelo y del enraizamiento de las plantas (Lopes *et al.* 2014). Además de que estos suelos presentan problemas de acidez, niveles bajos de materia orgánica, baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), deficiencia de elementos nutritivos y saturación de aluminio; condiciones desfavorables que pueden restringir el enraizamiento y la fructificación, lo que provoca baja productividad (Cirilo *et al.* 2013).

El conocimiento del sistema radical de una especie es de gran importancia, y fundamental para la optimización de prácticas de encalado y fertilización (Salgado-García *et al.* 2010). Por lo que es importante determinar la cantidad de raíces, para estimar la capacidad de absorción de agua y elementos nutritivos de la planta (Quinto *et al.* 2016). Las características del sistema radical de las plantas difiere con la especie, genotipo, edad, época del año, densidad de población, estrés biótico (Partelli *et al.* 2014), textura, estructura del suelo, plagas y enfermedades (Monzoli *et al.* 2015); por lo que el desarrollo de las plantas depende de las interacciones entre el suelo y el ambiente radicular (Carducci *et al.* 2014). El equilibrio entre la parte aérea y el sistema radicular está relacionado con el crecimiento y la productividad del café (Monzoli *et al.* 2013). La mayor concentración de raíces de un cafeto se encuentran entre los 20 y 30 cm de profundidad del suelo y en un diámetro de 1.50 m del tronco (Monzoli *et al.* 2015).

Los estudios que abordan características del sistema radical no son concluyentes en su distribución en el perfil del suelo (Andrade *et al.* 2013). Por lo anterior, se requieren realizar estudios sobre la estructura y las funciones de los sistemas radicales de los cultivos (Santos *et al.* 2006). Por ello el objetivo fue determinar la densidad de longitud

de raíces (DLR) en suelos con plantación de café (*Coffea arabica*) variedad Catimor, en función de las características del tipo de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en una plantación de café de la Finca Custepec, municipio de La Concordia, Chiapas, México (Figura 1). La plantación se ubica a una altitud de 1 112 msnm, con clima semicálido húmedo con lluvias en verano (A)C(m). La precipitación y temperatura media anual es de 2 021 mm y 18 °C (INEGI 2016).

Sitio de estudio

Para la caracterización del suelo y muestreo de raíces se ubicó la parcela más representativa en manejo agronómico de la Finca, en la que se eligieron en forma de catena o transecto tres sitios de estudio en las posiciones alta (1 112 msnm), media (1 085 msnm) y baja (1 046 msnm) de la pendiente. El cafetal es una renovación con 6 años de edad, variedad Catimor que se encuentra establecido a doble postura (2 x 1 m) con densidad de 2 500 plantas por hectárea, plantadas bajo sombra de árboles del género *Inga*, en terrenos con pendientes de 45%.

Perfiles de suelo y muestreo de raíces

En cada sitio se describió un perfil de 165 cm de profundidad (Cuanalo 1990). De cada horizonte se tomó una muestra (sin repeticiones) de aproximadamente 1 kg de suelo que se etiquetó y llevó al laboratorio para secarla a la sombra, molerla y tamizarla para su análisis. Los análisis se realizaron de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT 2000 (SEMARNAT 2002), se determinó el contenido de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black, pH mediante potenciometría en agua (relación 1:2), textura por el método de Bouyocous, Conductividad Eléctrica (CE) del extracto de saturación por medición electrolítica, densidad aparente por el método de la parafina, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases

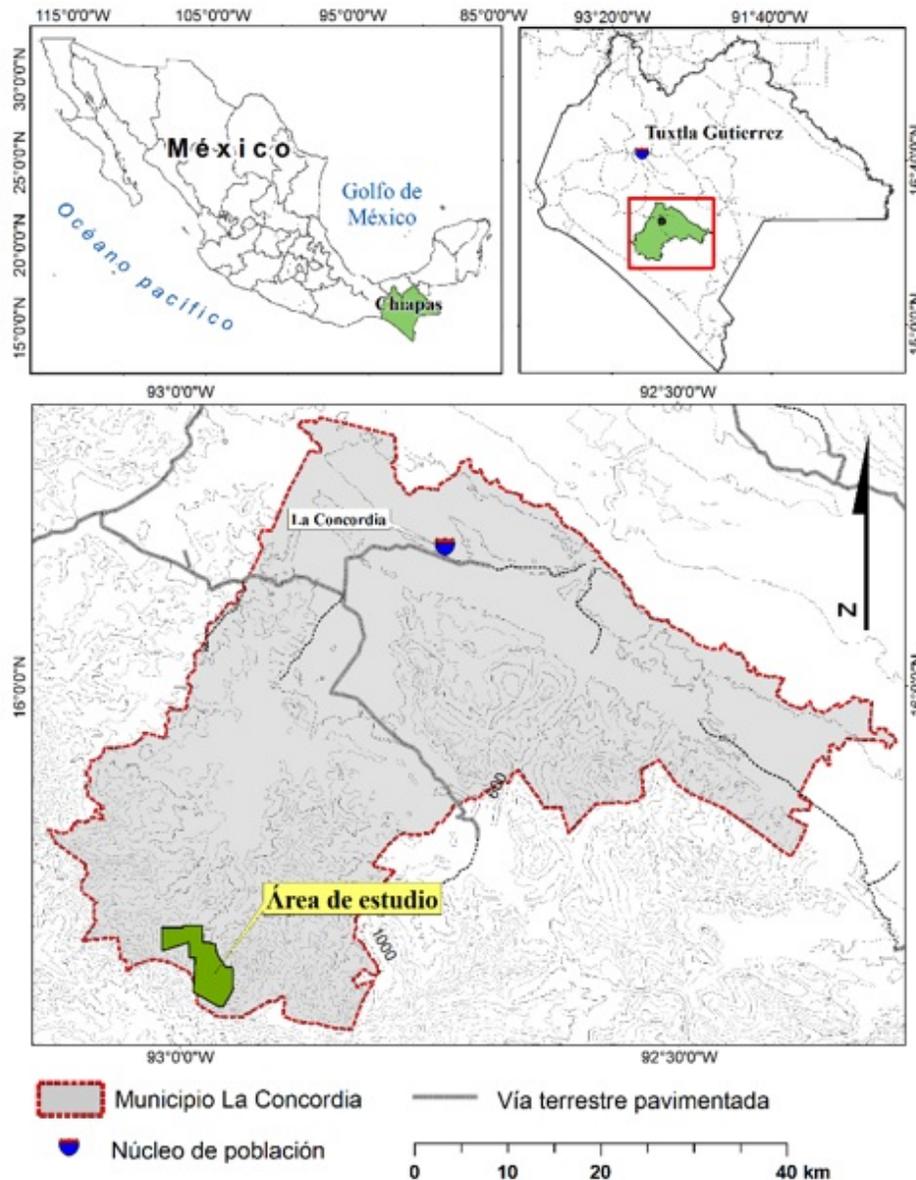


Figura 1. Localización del área de estudio en la Finca Custepec, municipio de la Concordia, Chiapas.

intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}) por acetato de amonio 1N, pH 7.0 como solución extractante, acidez intercambiable por el procedimiento de cloruro de potasio y fósforo (P) extractable por el método Olsen. Los suelos se clasificaron de acuerdo con IUSS Working Group WRB (2014).

Para determinar la densidad de longitud de raíces (DLR) finas y su distribución horizontal y

vertical, en la posición alta, media y baja de la pendiente, se seleccionaron de forma aleatoria tres árboles para coleccionar tres repeticiones de muestras de raíces a distancias del tallo de 50 y 100 cm, a profundidades de 20, 40 y 60 cm, que se obtuvieron con un cubo de acero de 500 cm^3 ($5 \times 5 \times 20 \text{ cm}$) de volumen, con lo que se obtuvieron 54 monolitos. Los cuales se colocaron en bolsas de polietileno

para trasladarse al laboratorio, donde se lavaron y se separó la tierra por medio de tamices. Las raíces se clasificaron en raíces finas (<1 mm), raíces medias (1-3 mm), y raíces gruesas (>3 mm) (Vargas et al. 2006). Para luego medir su longitud y calcular la DLR para raíces finas en kilómetros por metro cúbico de suelo mediante la ecuación de Moreno et al. (2005):

$$DLR = \frac{\text{Longitud de raíces}}{\text{Volumen de suelo}}$$

Análisis de datos

El análisis estadístico para la DLR se realizó con un diseño completamente al azar con arreglo factorial con tres fuentes de variación, en el que se consideraron: las posiciones de la pendiente (alta, media y baja), dos distancias al tronco (50 y 100 cm) y las profundidades de muestreo (0-20, 20-40 y 40-60 cm). Los resultados se analizaron por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), que se realizaron con el paquete estadístico SAS versión 9.1.3.

RESULTADOS

Caracterización edáfica

Se identificaron diferentes tipos de suelo en cada una de las posiciones de la pendiente (Tabla 1), los cuales fueron Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric), Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic) y Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Humic). En el caso del Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric) en el primer horizonte se aprecia un color pardo oscuro (2.5 Y 3/3), seguido de colores pardo amarillento en los horizontes subyacentes (10 YR 5/6 y 10 YR 5/8) (Figura 2). Presenta un horizonte Árgico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo, capacidad de intercambio catiónico menor de 24 $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$ de arcilla en partes del horizonte Árgico dentro de los 50 cm debajo de su límite superior. El horizonte A tiene una textura migajón arcillosa, cutanes por eluviación, continuos, moderadamente espesos, en poros y caras de agregados de minerales arcillosos, mientras que los

horizontes Bt1 y Bt2 presentan un mayor contenido de arcilla, lo que ocasiona textura arcillosa, con cutanes por eluviación, continuos, espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro. La saturación de bases en el horizonte Árgico es mayor del 50%. El pH en los horizontes A1, Bt1 y C1 presenta los valores de 5.8, 6.4 y 6.5, respectivamente, por lo que se considera como moderadamente ácido, con excepción del horizonte Bt2 que presenta un valor de pH neutro de 6.7. La conductividad eléctrica (CE) varía en los horizontes de 0.02 a 0.09 dS m^{-1} , por lo que no se considera como salino. La materia orgánica (MO) presenta valores de 11.3 a 1.1%, con el aumento de la profundidad, el contenido de materia orgánica disminuye. El contenido de N total varía de 0.40 a 0.03%, clasificándose como de muy rico a pobre. Se observan contenidos de P extraíble de 49.31 a 11.81 mg kg^{-1} de suelo. Mientras que el potasio se encuentra en valores de 0.15 a 0.10 $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$ de suelo. Los contenidos de calcio muestran uniformidad en todos los horizontes con niveles bajos de 3.06 a 3.93 $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$ de suelo. El Mg presenta niveles medios de 2.17 a 1.29 $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$. La CIC se clasifica como baja, variando en los horizontes de 7.78 a 5.84 $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$ de suelo. El Fe presenta contenidos de 6.75 a 7.54 mg kg^{-1} , el cobre de 1.28 a 0.37 mg kg^{-1} , el zinc de 1.10 a 0.72 mg kg^{-1} , y el manganeso tuvo niveles de 2.44 a 0.06 mg kg^{-1} (Tablas 2 y 3).

El Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic) presenta colores que difieren entre los horizontes; pardo oscuro (10 YR3/3), pardo (10 YR 5/3), pardo fuerte (7.5 YR 5/6) y amarillo parduzco (10 YR 6/8) conforme aumenta la profundidad (Figura 2). A diferencia del Lixisol que se describió en el párrafo anterior, este Cambisol muestra solo un horizonte Cámbico que comienza dentro de los 50 cm de profundidad. El suelo Cambisol tiene una saturación de bases mayor del 50%, una CIC menor de 24 $\text{cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$ de arcilla y su textura difiere entre horizontes: arcillosa, arcillo limosa y migajón arcillosa. El pH varía de 5.7 a 5.9, por lo que se clasifica como moderadamente ácido. La CE se encuentra en niveles bajos de 0.10 a 0.01 dS m^{-1} por lo que se clasi-

Tabla 1. Número, posición del perfil en la pendiente y clasificación de las unidades de suelo según el IUSS Working Group WRB (2014).

Perfil	Posición en la pendiente	Subunidad	Clave de suelo
1	Alta	Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric)	LX-ha-ce.ct.je
2	Media	Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic)	CM-eu-se-ce.hu
3	Baja	Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric Humic)	LV-ha-lo.ct.hu

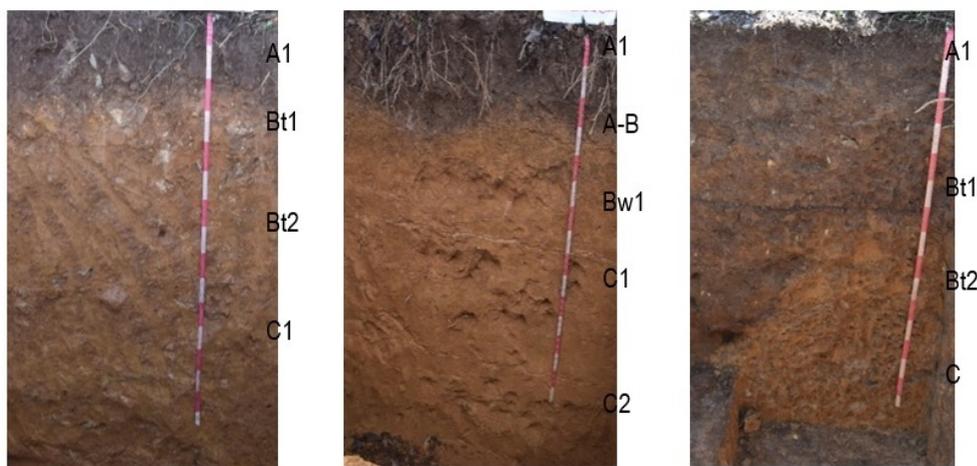


Figura 2. Perfiles de suelos representativos de las tres posiciones de la pendiente (alta media y baja) en la Finca cafetalera Custepec, municipio de la Concordia, Chiapas.

Tabla 2. Análisis físicos y químicos de tres perfiles de suelo en la Finca cafetalera Custepec, Chiapas.

Ho (cm)	pH (H ₂ O) rel. 1:2	CE (dSm-1)	MO %	N %	Da (g/cm ³)	Arcilla	Limo %	Arena	Textura
Perfil 1*									
A1 0-22(47)	5.8	0.09	11.3	0.40	1.15	31	27	43	Migajón arcilloso
Bt1 22-44	6.4	0.02	4.2	0.15	1.07	43	21	37	Arcilla
Bt2 44-91	6.7	0.03	1.3	0.06	1.03	49	29	23	Arcilla
C1 91-200	6.5	0.02	1.1	0.03	1.07	43	27	31	Arcilla
Perfil 2*									
A1 0-23	5.8	0.10	9.2	0.35	1.04	47	31	23	Arcilla
A-B 23-(36-42)	5.7	0.07	4.5	0.20	1.05	45	25	31	Arcilla
Bw1 (36-42)-83	5.9	0.02	2.1	0.08	1.08	41	45	15	Arcilla limosa
C1 83-147	5.7	0.02	1.5	0.07	1.15	31	49	21	Migajón arcilloso
C2 147-200	5.8	0.01	1.3	0.05	1.17	29	51	21	Migajón arcilloso
Perfil 3*									
A1 0-30	5.8	0.07	11.6	0.45	1.17	29	23	49	Migajón arcilloso arenoso
Bt1 30-63	6.1	0.03	4.2	0.15	1.1	37	25	39	Migajón arcilloso
Bt2 63-(100-120)	6.3	0.06	1.1	0.04	1.1	37	27	37	Migajón Arcilloso
C (110-120)-165	6.2	0.03	1.1	0.03	1.13	33	29	39	Migajón Arcilloso

* Perfil 1: Posición alta, Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric) (15° 44' 33" LN y 92° 59' 00" LO); Perfil 2: Posición media, Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Loamic) (15° 44' 34" LN y 92° 59' 00" LO); Perfil 3. Posición baja Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic) (15° 44' 36" LN y 92° 59' 00" LO)

fica como no salino. La MO varía de 9.2 a 1.3%, lo que indica que va de muy alto a bajo. Los contenidos de N total fueron de 0.05 a 0.35%, por lo que se clasifican como pobre a muy rico. El P extraíble se considera de alto a bajo con valores de

11.11 a 1.67 mg kg⁻¹. La concentración de potasio fue de 0.10 a 0.05 cmol_(c) kg⁻¹, mientras que el calcio se encuentra de 2.71 a 0.42 que se clasifican como niveles bajos a muy bajos, en tanto que el Mg se encontró en los niveles de 1.26 a 0.36 cmol_(c)

Tabla 3. Análisis químicos de tres perfiles de suelo en la Finca cafetalera Custepec, Chiapas en diferentes posiciones de la pendiente.

Ho (cm)	K	Ca	Mg (Cmol _(c) kg ⁻¹)	Na	CIC	Ac. Int.	SB %	P Olsen	Fe (mg k ⁻¹)	Cu	Zn	Mn
Perfil 1*												
A1 0-22(47)	0.15	3.93	2.17	0.10	7.78	6.55	96.32	49.31	6.75	1.28	1.10	2.44
Bt1 22-44	0.14	3.30	1.56	0.09	6.81	2.40	97.22	22.08	7.54	1.20	1.06	0.10
Bt2 44-91	0.12	3.25	1.32	0.09	6.81	0.75	95.17	12.78	7.24	0.52	0.80	0.08
C1 91-200	0.10	3.06	1.29	0.08	5.84	0.63	96.89	11.81	7.00	0.37	0.72	0.06
Perfil 2*												
A1 0-23	0.10	2.71	1.26	0.08	6.81	5.33	94.48	11.11	11.49	0.28	0.51	2.66
A-B 23-(36-42)	0.07	2.59	0.95	0.07	4.86	2.60	91.57	9.17	8.16	0.22	0.44	2.12
Bw1 (36-42)-83	0.06	2.38	0.79	0.07	3.89	1.21	95.78	5.69	7.76	0.12	0.39	0.16
C1 83-147	0.06	0.75	0.36	0.06	2.92	0.87	78.27	5.56	5.96	0.08	0.34	0.04
C2 147-200	0.05	0.42	0.59	0.03	1.95	0.75	71.27	1.67	1.76	0.04	0.29	0.02
Perfil 3*												
A1 0-30	0.24	10.19	3.82	0.16	27.23	0.15	99	69.31	12.45	0.76	1.76	14.36
Bt1 30-63	0.08	9.79	3.01	0.13	12.64	0.15	98.89	44.44	11.16	0.22	0.83	5.40
Bt2 63-(100-120)	0.08	5.81	2.68	0.11	9.73	0.15	98.35	34.72	7.66	0.12	0.49	3.56
C (110-120)-165	0.07	4.78	2.19	0.10	8.75	0.44	94.23	32.22	5.71	0.06	0.44	1.18

* Perfil 1: Posición alta, Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric) (15° 44' 33" LN y 92° 59' 00" LO); Perfil 2: Posición media, Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Loamic) (15° 44' 34" LN y 92° 59' 00" LO); Perfil 3: Posición baja Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic) (15° 44' 36" LN y 92° 59' 00" LO).

kg⁻¹. La CIC tuvo valores de 1.95 a 6.81 cmol_(c) kg⁻¹, mientras que el hierro tiene concentraciones de 11.49 a 1.76 mg kg⁻¹, en tanto que el cobre se encontró en niveles de 0.28 a 0.04 mg kg⁻¹, el zinc en niveles de 0.51 a 0.29 mg kg⁻¹ y el manganeso de 2.66 a 0.02 mg kg⁻¹ (Tablas 2 y 3).

El suelo Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic) tiene horizontes que presentan colores pardo amarillento oscuro (10 YR4/4), pardo (7.5 YR 4/4), amarillo parduzco (10 YR 6/8) y pardo amarillento (10 YR 5/8), con la profundidad (Figura 2). Estos suelos tienen un horizonte Árgico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo, con textura migajón arcillo arenosa sobre migajón arcillosa. Presenta cutanes por eluviación y saturación de base superior al 50%. Su pH se clasifica como moderadamente ácido (6.3-5.8). La CE tiene valores menores de 2 dS m⁻¹, por lo que no es salino, mientras que el contenido de MO osciló de 1.1 a 11.6%, los cuales se consideran como bajos y muy altos. En tanto que el contenido de N fue de muy rico a pobre (0.45-0.03%). En niveles muy altos se encuentra el P extraíble (69.31-32.22 mg kg⁻¹), en tanto que el K se encuentra de bajo a muy bajo con valores de 0.24 a 0.07 cmol_(c) kg⁻¹, mientras que el Ca tiene niveles, altos, medios y

bajos con valores de 10.19 a 4.78 a cmol_(c) kg⁻¹. El Mg estuvo en valores de altos a medios de 3.82-2.19 cmol_(c) kg⁻¹. La CIC se clasifica como baja y alta con rangos de 8.75 a 27.23 cmol_(c) kg⁻¹. El Fe presenta contenidos de 12.45 a 5.71 mg kg⁻¹, el cobre de 0.76 a 0.06 mg kg⁻¹, el zinc de 1.76 a 0.44 mg kg⁻¹ y el manganeso de 14.36 a 1.18 mg kg⁻¹ (Tablas 2 y 3).

Densidad de longitud de raíces finas

La DLR en los tres sitios de la pendiente y las dos distancias del tronco no tuvo diferencias significativas, mientras que las profundidades muestreadas si tuvieron diferencias estadísticas. En la Figura 3 se observa que la mayor concentración de la DLR finas se localiza en la profundidad de 0 a 20 cm con 6.97 km m⁻³ (89.95%), valor que es significativamente diferente de las profundidades de 20 a 40 cm, y de 40 a 60 cm, con 0.51 km m³ (7.31%) y 0.19 km m³ (2.72%), respectivamente. Con respecto a la DRL entre los diferentes tipos de suelos, se observó que el suelo con mayor DRL fue el Cambisol con 8.4 km m⁻³ en el horizonte de 0 a 20 cm, seguido por el Lixisol con 6.8 km m³ y el Luvisol con 4.2 km m³.

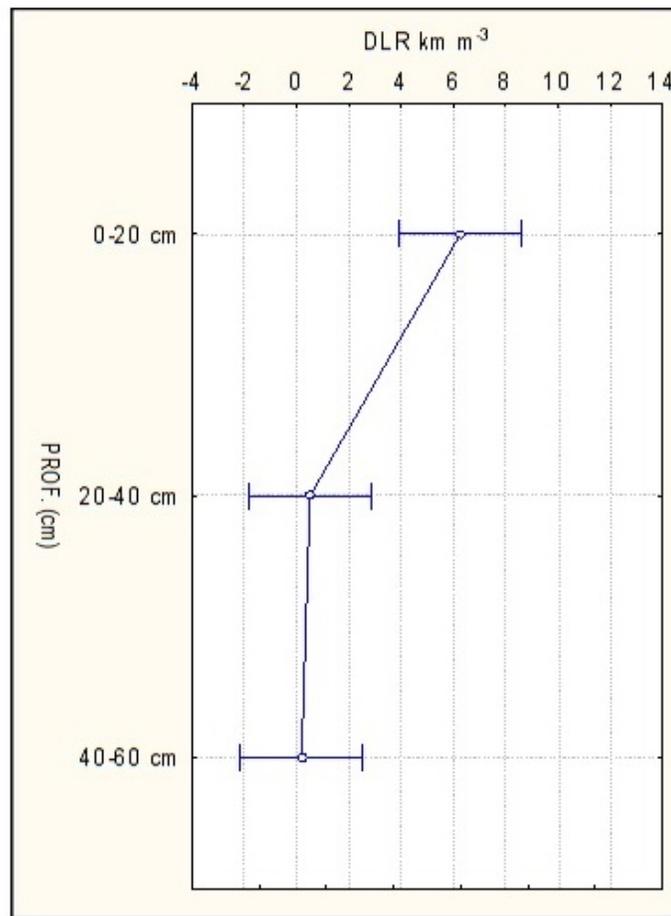


Figura 3. Densidad de longitud de raíces finas (DLR) de *C. arabica* L. a tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60).

DISCUSIÓN

Caracterización edáfica

Los suelos identificados en las diferentes posiciones de la pendiente difieren entre sí, lo que coincide con lo encontrado por Zavala-Cruz *et al.* (2014), quienes indican que los tipos de relieve determinan la localización y desarrollo de los grupos de suelo. El suelo más intemperizado fue el Lixisol, se localiza en la parte alta de la pendiente, con mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en la superficie, debido a procesos pedogenéticos, como la migración de la arcilla que provoca la formación de un horizonte Árgico en el subsuelo (IUSS Working Group WRB 2014). De acuerdo con Palma-López

et al. (2007) estos horizontes se desarrollan sobre materiales no consolidados de textura fina, que tienen una fuerte alteración y lavado, predominando en terrenos viejos sometidos a erosión. El calificador Haplic se refiere a una expresión típica de ciertos rasgos, que se usa si no aplica ninguno de los calificadores previos. El calificador de segundo orden Clayic, indica la presencia de texturas arcillosas dominantes en el primer metro de profundidad, mientras que Cutanic indica la presencia de revestimiento de arcillas en algunas partes del horizonte Árgico, asimismo, el Hypereutric denota saturación de bases mayor o igual a 80% en alguna capa dentro de los 100 cm (IUSS Working Group WRB 2014). Desde el punto de vista nutricional

presenta un pH moderadamente ácido, lo que no indica problemas para el óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo del café (Salgado *et al.* 2013, Melke e Ittana 2015), el pH es resultado de diversos factores, pero sobre todo por elevada precipitación promedio anual de 2 021 mm. Los niveles de MO, N total y P extraíble son elevados en el primer horizonte (SEMARNAT 2002). La gran cantidad de MO presente se atribuye a los árboles de sombra en el sistema de producción, que son podados cada ciclo, así como a la aportación de residuos de cultivo y malezas. Al respecto Torrente y Ladino (2009), reportan que los suelos cafetaleros tienen contenidos de MO altos (8.7%), mientras que el fósforo en esos suelos es bajo. El alto nivel de fósforo puede ser efecto del plan de fertilización tradicional aplicado, con fórmulas comerciales que contienen cantidades considerables de este elemento. Al comparar los valores de las propiedades de este suelo con los rangos que establece la norma oficial mexicana NOM-021 (SEMARNAT 2002), se infiere que el K y Ca se encuentran en niveles bajos y el Mg en nivel medio. Con respecto a los micro-elementos nutritivos el Fe se clasifica como adecuado mayor de 4.5 mg kg^{-1} , el Cu adecuado mayor de 0.2 mg kg^{-1} , el Zn de adecuado mayor de 1.0 mg kg^{-1} a marginal $0.5 - 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ y el Mn adecuado mayor de 1.0 mg kg^{-1} . Al respecto Rosas *et al.* (2008) registraron contenidos de Fe (28.96 mg kg^{-1}) superiores a los encontrados, aunque ellos trabajaron suelos con mayor tiempo de intemperismo.

El suelo Cambisol se localizó en la posición media de la pendiente, con perfil bien drenado, horizonte B Cámbico con más del 50% de saturación de bases; carece de propiedades sálicas, no tiene propiedades gléyicas dentro de los 50 cm, ni horizonte de acumulación de arcilla. Presenta un ligero desarrollo en sus horizontes subsuperficiales, por ello se considera como intermedio entre otros Grupos de suelo (Palma-López *et al.* 2007). El calificador Eutric hace referencia a una saturación de bases mayor de 50%, Sideralic evidencia materiales minerales del suelo con una CIC relativamente baja o menor de $24 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ de arcilla. Para los calificadores de segundo orden: Clayic representa texturas arcillosas

dominantes en el primer metro de profundidad; Humic por poseer más de 1% de carbono orgánico a profundidad de 50 cm (IUSS Working Group WRB 2014). Considerando sus propiedades presenta un pH moderadamente ácido y no tiene problemas de salinidad (Salgado *et al.* 2013). La MO, N total y P extraíble en los primeros horizontes se encuentran en niveles altos y disminuyen con la profundidad, mientras que el K, Ca y Mg están en niveles bajos (SEMARNAT 2002). Al respecto Pérez *et al.* (2011a) reportan cafetales establecidos en Acrisoles, donde los niveles de MO encontrados desempeñan un papel importante en la calidad del suelo, debido probablemente a los aportes de la hojarasca, tanto del cafeto como por los árboles utilizados como sombra; la presencia de N mineral en el suelo permite altos niveles de descomposición del material carbonado, al posibilitar una adecuada relación C/N en el protoplasma microbiano; valores similares de MO y N total fueron reportados por Pérez *et al.* (2011b). La disminución del N con la profundidad se relaciona con la génesis del suelo y el descenso de la MO (Palma-López *et al.* 2015). Los contenidos de micro-elementos nutritivos comparados con los rangos que establece la NOM-021 (SEMARNAT 2002), indican que el Fe se clasifica de adecuado a deficiente, el Cu tiene rangos adecuados con valores mayores a 0.2 a deficiente menores a 0.2 mg kg^{-1} , el Zn va de marginal $0.5 - 1.0$ a deficiente menor de 0.5 mg kg^{-1} y el Mn de adecuado con más de 1.0 a deficiente menor de 1.0 mg kg^{-1} .

El tipo de suelo Luvisol se localizó en la posición baja de la pendiente con perfil inadecuadamente drenado, sus características coinciden con las descritas por Palma-López *et al.* (2007), un horizonte B Árgico con una CIC mayor de $24 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ de arcilla y una saturación de bases mayor de 50%. Con respecto a los calificadores, el término Haplic se usa cuando un suelo no presenta otro calificador principal e indica que sus características principales no se apartan de las que definieron al grupo de suelo Luvisol. Para los calificadores de segundo orden: Loamic indica que tiene texturas francas dominantes en los primeros 100 cm de profundidad, Cutanic la presencia de recubrimientos de

arcilla en el horizonte Árgico, Hypereutric por tener saturación de bases mayor al 50% y 80% o más en alguna capa dentro de los 100 cm, Humic tiene más del 1% de carbono orgánico a una profundidad de 50 cm (IUSS Working Group WRB 2014). La mayoría de los parámetros evaluados se consideran altos en los primeros centímetros del suelo con excepción del K que es bajo. De acuerdo con la SEMARNAT (2002) el hierro se clasifica como adecuado con valores mayores de 4.5 mg kg^{-1} , el cobre varía de alto mayor de 0.2 mg kg^{-1} a deficiente con menos de 0.2 mg kg^{-1} , el Zn varía de adecuado con más de 1.0 mg kg^{-1} , hasta deficiente con menos de 0.5 mg kg^{-1} y el Mn se clasifica como adecuado mayor de 1.0 mg kg^{-1} . Lo anterior, indica que la calidad química del suelo en el primer horizonte es buena (Palma-López *et al.* 2015), lo que se explica por qué al estar en la posición baja de la pendiente, es un sitio receptor de materiales orgánicos y minerales, presentando buen estado de conservación y baja intensidad de la erosión (Zavala-Cruz *et al.* 2014). Son suelos fértiles y apropiados para un rango amplio de usos agrícolas, con pendientes fuertes que requieren medidas de control de la erosión (IUSS Working Group WRB 2014).

Los tres suelos en el primer horizonte presentan una estructura desarrollada en bloques subangulares, siendo una expresión de la influencia de la actividad biológica (Uribe-Gómez *et al.* 2000). El Lixisol al ubicarse en la parte alta de la pendiente coincide con lo mencionado por Zavala-Cruz *et al.* (2014) de que no presenta evidencias de hidromorfismo y poseen un color pardo oscuro, característico de suelos en la parte superior de la catena, mientras que en la posición baja el Luvisol presenta un color más oscuro, lo que se atribuye a los ritmos sucesivos de acumulación de materiales erosionados de las partes altas. El Cambisol ubicado en la posición media de la pendiente, es un suelo menos erosionado (Porta *et al.* 2003), no presenta un horizonte Árgico, en comparación con el Luvisol que presenta altos contenidos de arcilla, intemperizadas que dan origen al horizonte Árgico, formado de iluviación; de igual forma el Lixisol en la posición alta presenta un horizonte Árgico derivado

de la migración de arcillas (Salgado-García *et al.* 2015). El suelo con las mejores características nutrimentales es el Luvisol ubicado en la posición baja, atribuido al enriquecimiento natural por minerales arrastrados de las laderas. En este suelo predomina la presencia de arena, característica que proporciona drenaje rápido, a pesar de ser una zona de acumulación de sedimentos (Uribe-Gómez *et al.* 2000). Cada unidad de suelo tiene asociaciones de procesos morfo-dinámicos determinados por los efectos de la meteorización física y química del clima que tiene efectos en los procesos pedogenéticos primarios.

Densidad de longitud de raíces finas (DRL)

Con respecto al enraizamiento en las tres posiciones fisiográficas estudiadas, se observa un comportamiento similar sin diferencias significativas entre los diferentes tipos de suelo. Lo que indica la adaptabilidad edáfica del café Catimor a las unidades de suelo del área de estudio. Al respecto Soares *et al.* (2008) mencionan que la dinámica del sistema radicular es de vital importancia, al ser su función básica sustentar a la planta, absorber agua y elementos nutritivos, aunque el crecimiento de las raíces puede afectarse por factores ambientales, recursos disponibles del suelo y las variaciones edafoclimáticas. Al respecto, Bustamante *et al.* (2015) añaden el factor genético, siendo la interacción de todos ellos lo que afecta la longitud, distribución, arquitectura, profundidad y la eficiencia de las múltiples y vitales funciones que desarrollan las raíces finas. La distribución horizontal en las dos distancias del tronco, no mostraron diferencias significativas, por lo que presentan un comportamiento similar, lo que indica que la distribución es uniforme en las longitudes consideradas, lo que coincide con Partelli *et al.* (2006), quienes determinaron que la arquitectura horizontal, a 25 y 50 cm, en la primera capa del suelo tienen una distribución espacial en las que no se encuentran diferencias. Al respecto, Arcila (2007) menciona que las raíces del cafeto se extienden entre 1 y 1.5 m del tronco por lo que es normal no encontrar diferencias horizontales.

La distribución vertical de la DLR finas indican que el 89.95% de las raíces finas se encuentran

de 0-20 cm, disminuyendo de los 20-40 cm (7.31%) y 40 - 60 cm (2.72%). La distribución radical del cafeto depende en gran medida del cultivar y de las condiciones físicas y químicas en el perfil del suelo. Por ello la abundancia de las raíces finas en el primer horizonte se puede atribuir a la influencia de las características edáficas favorables que prevalecen en el suelo; como los buenos contenidos de materia orgánica, textura, aireación, humedad y disponibilidad de elementos nutritivos. Al respecto DaMatta y Cochicho (2006) indican que las características del crecimiento de la raíz desempeñan un papel importante en el mantenimiento del suministro de agua y de elementos nutritivos para la planta, el vigor del sistema radicular depende de las características de la demanda estacional de agua, propiedades químicas y físicas, profundidad del suelo y de la distribución de la estación lluviosa. Mientras que Partelli *et al.* (2014), reportan que más del 65% de las raíces finas están en los primeros 20 cm de la superficie del suelo, el 10% de 40-60 cm, lo que indica que la decreciente concentración de las raíces, a lo largo del perfil del suelo, muestra un paralelismo con la disminución de elementos nutritivos. Al respecto Arcila (2007) indica que el 86% de las raíces activas del cafeto se localizan en los primeros 30 cm de profundidad. Sin embargo, Pagotto *et al.* (2015), reportaron mayor abundancia de raíces finas en los primeros 10 cm de profundidad. Estudiando la distribución horizontal y vertical de la fertilidad del suelo y raíces en café variedad Catimor, Vargas *et al.* (2006) encontraron la mayor densidad de raíces finas en los primeros 20 cm del suelo, lo que atribuyeron a la variación en sentido vertical de las propiedades químicas y físicas del suelo.

Se tuvo mayor enraizamiento en el suelo Cambisol ubicado en la parte media, lo que puede atribuirse a que los suelos Lixisol y Luvisol presentaron un horizonte Árgico con aumento de arcilla y compactación conforme incrementa la profundidad, con menores valores de DRL en el Luvisol ubicado en

la parte baja de la pendiente. Esta propiedad es una limitante para el desarrollo radicular al no presentar características óptimas para que la planta realice una absorción efectiva de agua y elementos nutritivos minerales (Sánchez-Díaz y Aguirreolea 2013). La habilidad se encuentra relacionada con su capacidad de desenvolver un extenso sistema radicular que le permita explorar nuevas zonas del suelo (Taiz y Zeiger 2006). Una profundidad de muestreo de 0-20 cm, permite hacer una estimación de suministro de elementos nutritivos cercana a la realidad, aunque autores como Rosas *et al.* (2008) y López *et al.* (2016) sugieren una profundidad de muestreo 0-30 y 0-40 cm, cuando se diagnostica la fertilidad de los suelos cafetaleros.

CONCLUSIONES

Las características del suelo difieren en las tres posiciones de la pendiente, lo que se atribuye a procesos de erosión, lixiviación de bases, argilización y al intemperismo y posterior pérdida de las arcillas, que sufren con el tiempo de exposición, que se acentúa con la pendiente y trae como resultado diferentes grupos de suelos. La mayor concentración de raíces finas se encontró en los primeros 20 cm, disminuyendo conforme avanza la profundidad. El enraizamiento no varió horizontalmente con respecto a la distancia del tallo del café. La presencia de buenas cantidades de MO, Nt y P, así como una textura equilibrada y un pH no limitativo, aunado a la adaptabilidad del café cultivar Catimor, influyó en la falta de diferencias en el enraizamiento entre los sitios.

AGRADECIMIENTOS

Al Lic. Armando Pohlenz por las facilidades y apoyo brindado para realizar la investigación en la Finca Custepec municipio de la Concordia, Chiapas.

LITERATURA CITADA

Andrade JS, Sobreira AR, Romais SE, Partelli FL, Gava FA, Luiz MA (2013) Comparison between grafting and cutting as vegetative propagation methods for Conilon coffee plants. *Acta Scientiarum.* 35: 461-469.

- Arcila PJ (2007) Crecimiento y desarrollo de la planta de café. En: Arcila PJ, Farfán VF, Moreno BA, Salazar GLF, Hincapié GE. (eds.) Sistema de producción de café en Colombia. FNC-Cenicafé. Colombia. pp. 21-60.
- Bustamante GC, Pérez DA, Viñals R, Martín AM, Rivera R, Rodríguez MI (2015) Producción de fitomasa por *Coffea canephora* Pierre ex Froehner en dos ciclos productivos. Cultivos Tropicales 36: 29-35.
- Carducci CE, De Oliveira GC, Lima JM, Rossoni DF, Da Costa AL, Oliveira LM (2014) Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois latossolos sob manejo conservacionista. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18: 270-278.
- Cirilo CLC, Moreira SF, Silva FGA, Castro SF, Strcieri J (2013) Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e característica agronômica da cultura do café. Coffee Science 8: 265-275.
- Cuanalo CH (1990) Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de edafología. Chapingo, Mexico. Colegio de Postgraduados. México. 49p.
- DaMatta MF, Cochicho RJD (2006) Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. Plant Physiology 18: 55-81.
- INEGI (2016) Anuario Estadístico y Geográfico de Chiapas 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía y Gobierno del Estado de Chiapas. Aguascalientes, México. 742p.
- IUSS Working Group WRB (2014) World reference base for soil resource. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO. Rome, Italy. 181p.
- Lopes CD, Cavalho ND, Souza MJ, Machado LT, Nogueira NA, Manuel L (2014) Chemical and physical attributes of Latosol and coffee crop nutrition in agroforestry and conventional management systems. Coffee Science 9: 122-131.
- López BW, Castro MI, Salinas CE, Reynoso SR, López MJ (2016) Propiedades de los suelos cafetaleros en la reserva de la biosfera el triunfo, en Chiapas, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 7: 607-618.
- Melke A, Ittana F (2015) Nutritional requirement and management of arabica coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia: National and global perspectives. American Journal of Experimental Agriculture 5: 400-418.
- Monzoli CA, Partelli LF, Gontijo I, Zucoloto M (2015) Distribuição do sistema radicular de cafeeiro conilon irrigado e não irrigado. Pesquisa Agropecuária Brasileira 50: 1006-1016.
- Monzoli CA, Partelli LF, Luiz MA, Aparecida DM (2013) Crecimiento e desenvolvimento inicial de genotipos de café Conilon. Revista Agro@ambiente On-line 7: 193-202.
- Moreno G, Obrador JJ, Cubera E, Dupraz C (2005) Fine root distribution in dehesas of Central-Western Spain. Plant and Soil 277: 153-162.
- Pagotto RC, De Sousa JJM, Luiz AW, Silva SD, Oliveira SN, Barbosa OL, et al. (2015) Morfología radicular de cultivares de café submetidas a diferentes arranjos espaciales. Pesquisa Agropecuária Brasileira 50: 187-195.
- Palma-López DJ, Cisneros DJ, Del Rivero BN, Triano SA, Castañeda CR (2007) Hacia un desarrollo sustentable del uso de suelos de Tabasco. Vol. II. 2ª Reimpresión. En: Palma-López DJ, Triano SA (Comps). Plan de uso de los suelos de Tabasco, volumen 2. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. pp. 9-37.

- Palma-López DJ, Salgado-García S, Martínez SG, Zavala-Cruz J, Lagunes-Espinoza LC (2015) Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2(5): 163-172
- Partelli FL, Monzoli CA, Goes OM, Sobreira AR, Leandro VE, Barreto SM (2014) Root system distribution and yield of “Conilon” coffee propagated by seeds or cuttings. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 49: 349-355.
- Partelli FL, Duarte VH, Ribeiro SA, Guerra BD (2006) Produção e desenvolvimento radicular de plantas de café “Conilon” propagadas por sementes e por estacas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 41: 949-954.
- Pérez DA, Bustamante GC, Martín AGM, Rivera ERA, Viñals NR, Rodríguez CMI (2011a) Fertilización nitrogenada después de la poda del cafeto robusta en Cambisoles. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 8: 935-943.
- Pérez PE, Bonilla CS, Hernández SJAM, Partida SJG (2011b) Estrategia de mejoramiento de la producción cafetalera de la organización campesinos ecológicos de la Sierra Madre de Chiapas: Caracterización de la bebida del café. *Revista Geografía Agrícola* 46-47: 7-18.
- Porta CJ, López-Acevedo RM, Roquero LC (2003) Edafología para la agricultura y medio ambiente. 3ª edición. Mundi-Prensa. Madrid España. 960p.
- Quinto MH, Moreno HF, Caicedo MHY, Perez LMTY (2016) Biomasa de raíces finas y fertilidad del suelo en bosques pluviales tropicales del Pacífico colombiano. *Colombia Forestal* 19: 53-66.
- Rosas JA, Escamilla PE, Ruiz RO (2008) Relación de los nutrientes del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana* 26: 375-384.
- Salgado-García S, Palma-López DJ, Zavala-Cruz J, Lagunes-Espinoza LC, Córdova-Sánchez S, Castelan-Estrada M, Ortiz-García CF, Rincón-Ramírez JA (2015) Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en palma de aceite (SIRDF): región Ríos de Tabasco. Colegio de Postgraduados, campus Tabasco. H Cárdenas, Tabasco, México. 118p.
- Salgado-García S, Palma-López DJ, Castelán EM, Lagunés-Espinoza LC, Ortiz LH (2013) Manual para el muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretación de análisis para la producción sostenible de alimentos. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco, México. 101p.
- Salgado-García S, Palma-López DJ, Lagunés-Espinoza LC, Devernardi de la VH, Núñez ER (2010) El suelo y la nutrición de los cultivos. En: Salgado-García S y Núñez ER (Coords.) Manejo de fertilizantes químicos y orgánicos. Colegio de Postgraduados y Mundi Prensa. México. México. pp. 5-25.
- Sánchez-Díaz M, Aguirreolea J (2013) Absorción de agua por la raíz y transporte por el xilema. Balance Hídrico de la planta. 2ª edición. En: Azcón -Bieto J, Talón M. (eds). *Fundamentos de Fisiología vegetal*. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Madrid, España. 639p.
- Santos JAM, Pereira CS, Soares MÂ (2006) Comparação entre sistemas radiculares de mudas de *Coffea arabica* L. Obtenidas por estaquia e por sementes. *Coffee Science* 1: 14-20.
- SEMARNAT (2002) NOM-021-RECNAT Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la federación. SEMARNAT. México. 85p.
- Soares FTA, Gerra BD, Araujo CJG (2008) Dinâmica de raízes de espécies arbóreas: Visão da literatura. *Ciencia Forestal* 18: 133-142.

- Taiz L, Zeiger E (2006) Fundamentos de fisiología vegetal. 3ª edición. Editorial ARTMED. Sao Paulo. Brasil. 687p.
- Torrente TA, Ladino PA (2009) Caracterización fisicoquímicas de los suelos de la zona cafetera del municipio de Isnos con el fin de establecer su aptitud de uso y manejo. *Revista Ingeniería y Región* 6: 77-82.
- Uribe-Gómez S, Gutiérrez-Castorena MC, Tavarez Espinoza C, Turrent-Fernández A (2000) caracterización y clasificación de suelos de ladera manejados con terrazas de muro vivo en los Tuxtlas Veracruz. *Agrociencia* 34: 403-412.
- Vargas MAC, Nick JA, Tiemi YG, Monte SB (2006) Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuai. *Acta Scientiarum. Agronomy* 28: 455-463.
- Zavala-Cruz CJ, Salgado GS, Marín AA, Palma-López DJ, Castelán EM, Ramos RR (2014) Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1(2): 123-137

