



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

**DIAGNÓSTICO EDÁFICO Y NUTRIMENTAL EN EL CULTIVO DEL
CAFÉ *Coffea arabica* L. EN LA FINCA CUSTEPEC, LA CONCORDIA
CHIAPAS**

RAÚL GÓMEZ GONZÁLEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2016

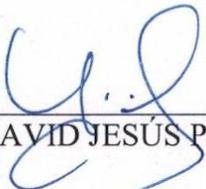
La presente tesis, titulada “**Diagnóstico edáfico y nutrimental en el cultivo del café *Coffea arabica* L. en la finca Custepec, La Concordia Chiapas**”, realizado por el alumno: Raúl Gómez González, bajo la dirección del Consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

POSTGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

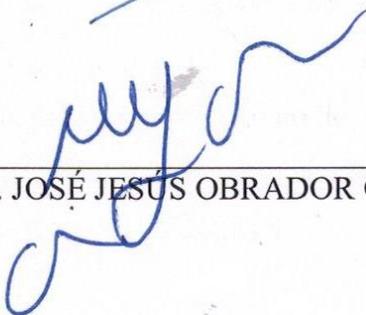
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

ASESOR:



DR. JOSÉ JESÚS OBRADOR OLÁN

ASESOR:



DR. OCTAVIO RUIZ ROSADO

H. CÁRDENAS, TABASCO, A 6 DE DICIEMBRE DEL 2016

RESUMEN

DIAGNÓSTICO EDÁFICO Y NUTRIMENTAL EN EL CULTIVO DEL CAFÉ *Coffea arabica* L. EN LA FINCA CUSTEPEC, LA CONCORDIA CHIAPAS

Raúl Gómez González, MC

Colegio de Postgraduados, 2016

En la actualidad el sector cafetalero en México juega un papel importante en la agricultura por su superficie cultivada y ser principalmente para exportación. Sin embargo, se desconoce el estado nutrimental del suelo y planta, los cuales son factores fundamentales para llevar a cabo una agricultura sostenible. El objetivo de esta investigación fue determinar el estado edáfico y nutrimental en una plantación de café en la Finca Custepepec municipio de La Concordia, Chiapas. Se caracterizaron y clasificaron los suelos en función de la pendiente, se encontró que los suelos son diferentes a lo largo de la pendiente, en la posición alta se clasificó como Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric), posición media Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic), posición baja Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic). Se determinó la DLR en forma vertical (0-20, 20-40 y 40-60 cm) y horizontal (50 y 100 cm del tronco), el comportamiento de la DLR en forma horizontal fue homogéneo. Entre cada sitio y tipo de suelo la densidad de longitud de raíces (DLR) fue similar, pero presentó diferencias significativas con la profundidad. La mayor concentración de raíces se obtuvo en la profundidad 0-20 cm con 89.85 % (6.97 km m³). Para el diagnóstico nutrimental en suelo se muestreo de 0-20 y 20-40 cm en las tres posiciones de la pendiente en dos épocas del año (septiembre y febrero), de igual forma para el muestreo foliar. En el suelo el pH varía de fuertemente ácido a moderadamente ácido, los contenidos de materia orgánica, fósforo extraíble y nitrógeno total son altos, potasio calcio y magnesio intercambiables son bajos. Los contenidos foliares indican que el calcio, magnesio y nitrógeno, se encuentran en niveles de óptimos a altos, mientras que fósforo, potasio y los micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) se consideran bajos. De las tres plantas extraídas para el estudio de biomasa y extracción nutrimental en cada sitio se encontró que del 89.03 % al 97 % de biomasa total se acumuló en tallos, hojas, ramas, raíz y yemas florales, y solo del 10.97 % al 20.73 % en grano + pulpa. La extracción total de N-P-K (kg ha⁻¹) por la planta fue de: 120.06 – 2.55 – 99.02 en la posición alta; 161 – 2.91 – 80.08 en la posición media y; 142.68 – 1.89 – 77.74 en la posición baja.

Palabras clave: Clasificación de suelos, nutrientes, enraizamiento, biomasa.

ABSTRACT

EDAPHIC AND NUTRIMENTAL DIAGNOSIS IN THE COFFEE CROP *Coffea Arabica* L. IN THE CUSTEPEC FARM, LA CONCORDIA, CHIAPAS

Raúl Gómez González, MC

Colegio de Postgraduados, 2016

At present, the coffee sector plays an important role in agriculture of Mexico because of its cultivated area and be mainly for export. However, the nutritional status of the soil and plant is unknown, being fundamental factors for sustainable agriculture. The aim of this research was to determine edaphic and nutritional status in a coffee plantation in the Finca Custepec municipality of La Concordia, Chiapas. Soils were characterized and classified according to slope, it was found that they were different along the inclination, in the high position they were classified as Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric), medium position Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic), low position Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic). DLR was determined vertically (0-20, 20-40 and 40-60 cm) and horizontally (50 and 100 cm of the trunk), the behavior of the DLR in horizontal form was homogenous. Among each site and soil type the root length density (DLR) was similar, but showed significant differences with depth. The highest root concentration was obtained in depth 0-20 cm with 89.85% (6.97 km m³). For nutrient diagnosis in soil, samples of 0-20 and 20-40 cm were collected in the three slope positions at two seasons of the year (September and February), as well as for leaf sampling. In soil the pH varies from strongly acid to moderately acid, the contents of organic matter, extractable phosphorus and total nitrogen are high, potassium calcium and magnesium exchangeable are low. Of the three plants extracted for biomass and nutrient extraction at each site, 89.03% to 97% of total biomass was accumulated in stems, leaves, branches, roots and floral buds, and only 10.97% - 20.73% in grain + pulp. The total extraction of N-P-K (kg ha⁻¹) by the plant was: 120.06 - 2.55 - 99.02 in the high position; 161 - 2.91 - 80.08 in the middle one; 142.68 - 1.89 - 77.74 in the low position.

Key words: Classification of soils, nutrients, rooting, biomass

AGRADECIMIENTO

A **Dios** fuente de toda sabiduría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Al Colegio de Postgraduados, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A mis padres: Noelia Edith González Arriaga y Billerman Nery Gómez Chávez; por el apoyo brindado durante mi estancia fuera de la familia, que me otorgó fortaleza para poder alcanzar es te logro que también es de ustedes.

A mi Esposa María Guadalupe Flores Pérez, por tu gran esfuerzo durante mi ausencia, tu confianza, apoyo y fortaleza de no dejarme caer en esos momentos de debilidad, fueron los cimientos para alcanzar este logro. Por esos momentos importantes que no pude compartir contigo, TE AMO.

A mis hermanos: Ronaldo Marín, Saira Liseth y Marilin Rocío por demostrar que la distancia no es impedimento para brindar fortaleza y apoyo. A Luis León Ruiz y Gabriel Gordillo Gordillo.

Al Dr. David Jesús Palma López por brindarme su apoyo, conocimientos y su valioso tiempo durante la realización de esta investigación.

Al Dr. José Jesús obrador Olán y Dr. Octavio Ruíz Rosado por el tiempo, apoyo brindado y valiosas aportaciones en esta investigación.

A la Finca Custepec por brindar la oportunidad de desarrollar la investigación en sus plantaciones, por las facilidades y apoyo para continuar con mis estudios de posgrado.

A Lic. Armando Pohlenz Martínez, Gerente General de Café Custepec, por su disponibilidad y apoyo durante la investigación, por su valiosa amistad.

A mis compañeros de la generación otoño 2014, por todas las vivencias que albergarán grandes recuerdos.

A Eduardo Martínez, Edna Irene Bautista, Yansi Karina Ramos, Gabriela González, y Magín González, por su valiosa amistad y apoyo durante mi estancia en el PROPAT.

DEDICATORIA

A mis hijos, Gran fuente de inspiración y motivación en mi vida

Raúl Didier

Keneth Osvaldo

Andrea Guadalupe

CONTENIDO

INTRODUCCION GENERAL	1
1 OBJETIVOS	2
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos particulares	2
2 HIPÓTESIS	2
3 REVISIÓN DE LITERATURA	3
3.1 El cultivo del café	3
3.2 Concepto de suelo.....	4
3.3 Propiedades de los suelos.....	4
3.4 Funciones de los nutrimentos en las plantas	9
3.5 Estudios realizados sobre diagnóstico edáfico y nutricional	12
4 LITERATURA CITADA	17
CAPITULO I. SUELOS Y DENSIDAD RADICAL EN CAFÉ (<i>Coffea arabica</i> L.) EN LA ZONA CAFETALERA CUSTEPEC, CHIAPAS	21
1.1 Introducción	24
1.2 Materiales y métodos	25
1.3 Resultados	27
1.4 Discusión	32
1.5 Conclusiones	37
1.6 Literatura citada	37
CAPITULO II. DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL DE SUELO Y PLANTA EN CAFÉ <i>Coffea arabica</i> L. EN LA ZONA DE CUSTEPEC, CHIAPAS	41
2.1 Introducción	44
2.2 Materiales y métodos	45
2.3 Resultados	47
2.4 Discusión	57
2.5 Conclusiones	64
2.6 Literatura citada	65
CAPITULO III. EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES POR <i>Coffea arabica</i> L. EN LA FINCA CUSTEPEC, LA CONCORDIA, CHIAPAS	72
3.1 Introducción	75
3.2 Materiales y métodos	75
3.3 Resultados	76
3.4 Discusión	79
3.5 Conclusiones	82

3.6 Literatura citada	83
5 CONCLUSIONES GENERALES	85
6 ANEXOS	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales funciones de los nutrimentos en las plantas superiores.....	11
Tabla 2. Número, posición del perfil en la pendiente y clasificación de las unidades de suelo según el IUSS Working Group WRB (2014).	27
Tabla 3. Análisis físicos y químicos de suelo en la zona cafetalera de Custepec, Chiapas en tres posiciones de la pendiente.	30
Tabla 4. Comportamiento de la densidad de longitud de raíces en tres posiciones fisiográficas (alta, media y baja), tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm), dos distancias horizontales del tronco (50 y 100 cm) y sus interacciones entre ellos.	31
Tabla 5. pH, conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO) en tres posiciones de la pendiente (alta, media y baja), en dos épocas del año a 0-20 cm de profundidad en un suelo cafetalero en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	48
Tabla 6. Nitrógeno total (N), fósforo extraíble (P) y potasio intercambiable (K) en dos épocas del año, a 0-20 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	49
Tabla 7. Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y sodio (Na) intercambiables a 0-20 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	49
Tabla 8. Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) y acidez intercambiable (Al+H) a 0-20 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	50
Tabla 9. pH, Conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO) a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	51
Tabla 10. Nitrógeno total (N), fósforo extraíble (P) y potasio intercambiable (K) a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente, en dos épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	52
Tabla 11. Calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) intercambiables a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente, en dos épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	52
Tabla 12. Capacidad de intercambio efectiva (CICe) y acidez intercambiable (Al+H) a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	53
Tabla 13. Concentración foliar (%) de nitrógeno (N), fósforo y potasio en <i>Coffea arabica</i> L. en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	54
Tabla 14. Concentración foliar (%) de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) en el cultivo del café (<i>Coffea arabica</i> L.) en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año.	55
Tabla 15. Concentración foliar (mg kg ⁻¹) de hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) en <i>Coffea arabica</i> L. en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	56

Tabla 16. Concentración foliar (mg kg^{-1}) de manganeso (Mn) en <i>Coffea arabica</i> L. en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año en la finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	56
Tabla 17. Contenido de N, P y K en el suelo y foliar en tres posiciones de la pendiente (alta, media y baja) en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	77
Tabla 18. Distribución de materia seca kg ha^{-1} y concentración de N-P-K (kg ha^{-1}), en tres posiciones de la pendiente (alta, baja y media) en un cafetal en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	25
Figura 2. Perfiles de suelos representativos en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas. a) LX-ha-ce.ct.je, b) CM-eu-se-ce.hu, c) LV-ha-lo.ct.hu	28
Figura 3. Densidad promedio de longitud de raíces finas (DLR) de <i>Coffea arabica</i> L. a tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm).	31
Figura 4. Localización del área de estudio.....	45

INTRODUCCION GENERAL

El café es un cultivo de alta importancia en México, por la gran cantidad de empleos que demanda durante la cadena productiva y las divisas que generan por su exportación. En el país se cultiva una superficie de 737,376.4 hectáreas con un rendimiento promedio de 1.67 t ha⁻¹, siendo el estado de Chiapas el principal productor con 260,129.43 hectáreas que representan el 35.2 % de la superficie nacional (SIAP 2016). La FAO (2015) indica que del año 2006 al 2013 la producción a nivel nacional decreció un 17.1%. La reducción de las cosechas puede verse influenciada por diversos factores que intervienen en los sistemas de producción y uno de ellos es el manejo nutrimental.

El manejo nutrimental que se da al cultivo en su mayoría es deficiente, reflejando bajos volúmenes de producción (Lee y Esponda 2006), el decremento en la productividad de las plantaciones en muchos suelos del mundo se debe en gran parte al exceso o deficiencia de elementos minerales, además de otros factores como la acidez, alcalinidad y la erosión, que promueven la degradación y baja fertilidad del suelo (Teixeira *et al.* 2011). Para conocer el nivel y contenido de nutrientes de un cultivo, se debe implementar un diagnóstico nutrimental, que desde el punto de vista agronómico, consiste en establecer el origen de una anomalía en nutrición (deficiencia o exceso) en los cultivos de interés agrícola (Sánchez *et al.* 2007). El análisis químico de suelo y planta en un diagnóstico ayuda a determinar el estado nutricional del cultivo, sin embargo, es conveniente recalcar que estos pueden presentar ciertas limitaciones. El análisis de suelo solo caracteriza la disponibilidad de nutrientes, mientras que el análisis de tejido brinda una indicación del estado nutrimental de la planta, de esta manera la composición mineral de las hojas puede ser influenciada por diversos factores propios de la planta o el ambiente: la variedad, etapa fenológica, edad de la planta, volumen y eficiencia del sistema radical, producción esperada, cambios climáticos, disponibilidad de agua y nutrientes, sanidad, manejo agronómico y las interacciones entre nutrientes (Prieto *et al.* 2003), el éxito en el manejo de la fertilidad del suelo depende en gran medida de la oportunidad y precisión con que se aplique un programa de diagnóstico del estado nutrimental (Etchevers y Padilla 2007) convirtiéndose en una práctica esencial para recomendaciones de fertilización equilibradas (Cleanteva *et al.* 2004), para aumentar la productividad, reducir costos de producción e incrementar los ingresos del productor.

A pesar de la importancia del café en muchas partes de nuestro país se desconoce la fertilidad de los suelos y el estado nutrimental de los cafetales. Hoy en día, muchos productores no realizan análisis de suelos, por lo cual se desconocen los estándares mínimos requeridos para el manejo de la fertilidad de forma racional y eficiente para obtener resultados ambientales y económicos positivos (Silva *et al.* 2011). En Chiapas el uso deficiente de técnicas de producción se refleja en el bajo rendimiento del café, 8 quintales ha⁻¹, atribuyéndole principalmente a la baja fertilidad del suelo (Grajales *et al.* 2008). Por su parte Medina-Meléndez *et al.* (2016) menciona que el 89 % de los caficultores no realizan un manejo adecuado de la fertilización. Por lo anterior se hace necesario conocer las características físicas y químicas de los suelos cultivados que en conjunto con otros factores del agroecosistema definen una buena producción del cultivo (Lee y Esponda 2006). El propósito de esta investigación es que a través de un diagnóstico edáfico y nutrimental en el cultivo del café, se conozca la capacidad de suministro de nutrientes del suelo, así como el estado nutrimental en que se encuentran las plantaciones, con ellos se pretende identificar los factores limitantes y de esta manera poder inferir para proporcionar las condiciones óptimas donde se puedan obtener los máximos rendimientos.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Determinar el estado edáfico y nutrimental en plantaciones de café en la Finca Custepec municipio de La Concordia, Chiapas.

1.2 Objetivos particulares

- Caracterizar los suelos en función de la pendiente y determinar la densidad de longitud de raíces (DLR) en café *Coffea arabica* L. variedad Catimor.
- Analizar la dinámica de nutrientes en dos épocas del ciclo productivo en el cultivo del café mediante el monitoreo con análisis foliares y edáficos.
- Establecer relaciones entre el estado nutricional de la biomasa y el suelo en el cultivo del café.

2 HIPÓTESIS

2.1 Las características químicas y físicas que presentan los suelos en la Finca Custepec son aptos para el desarrollo del café.

2.2 La densidad de longitud de raíces (DLR) en el café *Coffea arabica* L. variedad Catimor es similar en todos los suelos estudiados.

2.3 El estado nutricional de la biomasa en café *Coffea arabica* L. variedad Catimor incrementa conforme disminuye la posición de la pendiente.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 El cultivo del café

El cafeto es un arbusto perenne cuyo ciclo de vida en condiciones comerciales alcanza hasta los 25 años dependiendo de las condiciones o sistemas de cultivo. A libre crecimiento, la planta comienza a producir frutos en ramas a un año de edad, continua su producción durante varios años y alcanza su máxima productividad entre los 6 y 8 años. La planta puede seguir su actividad por muchos años pero con niveles de productividad bajos (Arcila 2007). Es un cultivo originario de África que posee dos tipos de crecimiento: I) ortotrópico (tallo); el tallo principal crece a partir del meristemo apical, alcanzando una altura propia de la variedad y de su manejo. Es recto erguido, cilíndrico de forma cónica, liso, con nudos situados a 5-15 cm entre ellos, y alternos por pares de donde emergen las ramas laterales. II) crecimiento plagiotrópico; las ramas de primer orden o bandolas se desarrollan en las axilas de las hojas ubicadas entre el sexto al noveno nudo del eje principal. En las bandolas hay presencia de yemas cabeza de serie con capacidad de diferenciarse en ramificación secundaria y así mismo yemas seriadas que dan origen a hojas, además de ramas secundarias o botones florales dependiendo de los factores ambientales (ANACAFE 2014). Las hojas son pecioladas verde oscuro brillante, simples, y opuestas, tiene un peciolo corto con márgenes ondulados y una superficie ligeramente arrugada, que son de 10-15 cm de largo y 4-6 cm de ancho. Tiene una prominente nervadura y venas laterales (Ecocrop-FAO 2007). Las flores del cafeto se forman en las yemas ubicada en las axilas foliares, en los nudos de las ramas, estas son completas, hermafroditas y auto fértiles, todas las variedades de *Coffea arabica* tienen del 91 a 96 % de autofecundación. El sistema radical está formado por una raíz principal llamada pivotante, raíces axilares o de sostén, raíces laterales y raíces absorbentes o raicillas. La pivotante profundiza en el suelo a más de 50 cm, junto con las raíces axiales realiza la función de sostén o anclaje de la planta. El 80 a 90 % son responsables de la absorción de agua y nutrientes, estos se encuentran en los primeros 30 cm de profundidad (ANACAFE 2014).

3.2 Concepto de suelo

El suelo es un medio dinámico donde ocurren una serie de procesos ecosistémicos (Brunel y Seguel 2011), siendo un recurso indispensable para la vida que permite el desarrollo de las plantas, los animales y el hombre (García *et al.* 2012). A lo largo de la historia ha proporcionado el sustento para la población humana (Sánchez *et al.* 2011), sin embargo, a pesar de su importancia para la vida, el suelo no ha recibido de la sociedad la atención que se merece (Bautista *et al.* 2004).

En un sentido amplio el Soil Survey Staff (2014) define al suelo como un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de las tierras, que ocupa un espacio y que se caracteriza por uno o ambos de los siguientes aspectos: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencia y transformaciones de energía y materia o, por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural.

3.3 Propiedades de los suelos

Textura

Se refiere a las fracciones de arena, limo y arcilla (Alvarado *et al.* 2013), que al combinarse generan las clases texturales (NOM-021-RECNAT-2000). Cada uno de sus componentes se clasifica de la siguiente manera: Arena; la componen partículas cuyo diámetro se encuentra entre 0.2 a 2.0 mm. Limo; comprenden las partículas cuyo tamaño varía de 0.02 a 0.002 mm. Arcillas; la constituyen partículas con dimensiones menores a 0.002 mm (Navarro y Navarro 2013), estas últimas en la cantidad que se encuentre y sus propiedades son los responsables de afectar la gran mayoría de las reacciones físicas, químicas y biológicas que ocurran en el suelo (Alvarado *et al.* 2013). El conocimiento de la textura del suelo está íntimamente relacionado, con la plasticidad, permeabilidad, infiltración, penetración de las raíces, facilidad de laboreo, sequedad, fertilidad y productividad, sin embargo, debido a la gran variación que pueda existir en la naturaleza mineralógica de las fracciones, no pueden hacerse generalizaciones amplias de los distintos suelos (Coras 2014, Navarro y Navarro 2003)

Estructura

Es la forma en que las partículas se organizan en terrones o agregados. En esta propiedad funge como elemento de unión el complejo arcillo-húmico, constituyendo los agregados del suelo que permiten la formación de poros que serán ocupados por aire y agua. El complejo arcillo húmico

reviste las paredes de los poros impidiendo que estos se destruyan; razón por la cual interviene como estabilizador de la estructura del suelo (Salgado *et al.* 2006). La forma y estabilidad de la estructura del suelo juegan un papel importante en la aireación, el almacenamiento y el flujo de agua y nutrientes, en la penetración y el desarrollo de las raíces (Meza y Geissert 2003). Por lo tanto la estructura se considera como el conjunto de las unidades elementales de diferente tamaño y nivel de organización, que presentan un arreglo específico en el espacio y una dinámica en el tiempo característica de cada tipo de suelo (Navarro *et al.* 2000).

Densidad aparente

Se define como la masa por unidad de volumen. Dicho volumen es el que ocupa la muestra en el campo. Este parámetro tiene interés desde el punto de vista del manejo del suelo, ya que informa sobre la compactación de cada horizonte, y permite inferir las dificultades para la emergencia, el enraizamiento y la circulación del agua y aire. Está directamente relacionada con la estructura y por ello depende de los mismos factores de control. El conocimiento del valor de la densidad aparente resulta indispensable para referir, a un volumen de suelo en el campo, los resultados de los análisis de laboratorio (Porta *et al.* 2003). En general, los suelos con baja Da tienen condiciones físicas favorables, mientras que aquellos con Da elevada poseen malas condiciones físicas, es decir mayor compactación (Salgado *et al.* 2012)

Materia orgánica

La materia orgánica que contiene el suelo procede de los materiales orgánicos muertos, de origen vegetal o animal y productos orgánicos que surgen durante su transformación, así como de la actividad biológica de los organismos que la contiene: lombrices, insectos de todo tipo, microorganismos, entre otros (Pérez *et al.* 2013), cabe mencionar que una pequeña parte de la fracción de la materia orgánica incluye materiales ligeramente transformados por completo, de color oscuro y alto peso molecular, llamados compuestos húmicos (Crespo 2011). La materia orgánica es un indicador químico de la calidad del suelo, debido a su papel en la regulación de diversos procesos que ocurren en el suelo. Provee de energía para la actividad biológica que actúan en los procesos de descomposición de los residuos orgánicos y la liberación de los nutrientes a las plantas (Lopes *et al.* 2014), en suelos de ambientes tropicales y subtropicales, la materia orgánica tiene gran importancia como fuente de nutrientes para los cultivos, en la retención de cationes, elementos complejos tóxicos y de micronutrientes, estabilidad de la estructura, infiltración y

retención de agua, aireación, además de servir como fuente de carbono (C) y energía a microorganismos heterotróficos (Ferreira y Sá 2013). Es un parámetro muy importante del suelo debido a que su calidad y cantidad influye directamente en sus propiedades físicas y químicas. Una de sus funciones más importantes es que actúa como reservorio de carbono (C) y nutrientes para la planta (Pulido-Moncada 2010).

Nitrógeno

El nitrógeno es el elemento que más requieren las plantas para su rendimiento (Reis *et al.* 2015), por ello juega un papel económicamente importante, debido a que los suelos tropicales son pobres en nitrógeno disponible para los cultivos, por lo que la adición de la nutrición rica en nitrógeno es fundamental para garantizar una buena productividad agrícola (Woods *et al.* 2014).

Se estima que alrededor del 95% del N total presente en el suelo se encuentra en forma orgánica y este se caracteriza por no ser disponible para la planta, al transformarse por acción de los microorganismos en su forma inorgánica o nitrógeno mineral, este es asimilable por los cultivos (Figueroa *et al.* 2011). El nitrógeno orgánico es transformado a amonio NH_4^+ , el cual posteriormente es oxidado por acción de las bacterias (Nitrosomas y Nitrobacter) convirtiéndose en nitrato NO_3^- con un producto intermedio de nitrito NO_2^- (Muñoz *et al.* 2011). El nitrógeno como nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) son las dos formas como la planta absorbe este elemento, la proporción óptima de estas dos formas difiere entre especies (Nieves *et al.* 2013). El nitrógeno es un nutrimento que incrementa el crecimiento, la duración del área foliar y la fotosíntesis del cultivo. Lo cual permite aumentar los rendimientos por unidad de superficie (Morales *et al.* 2015). En el cultivo del café este elemento es el más exigido y su manejo es muy importante debido a las pérdidas, especialmente por lixiviación en épocas de lluvias, así como por volatilización (Rodrigues *et al.* 2006; De Lima *et al.* 2015).

Fósforo

El fósforo es considerado como el elemento mineral más importante después del nitrógeno con respecto a la cantidad y requerimiento de la planta. Aunque es abundante en el suelo, tanto en su forma orgánica como inorgánica, su disponibilidad es limitada, al presentarse en gran parte en formas insolubles (Sharma 2013). El fósforo inorgánico se refiere al fósforo de naturaleza mineral, su origen es la desintegración de rocas y materiales parentales que contienen apatitas, sus formas están asociadas con sesquióxidos amorfos y cristalinos, además de compuestos calcáreos, se

considera que esta fracción representa entre el 35 y 70 % del P total del suelo. Se considera como otro aporte de este elemento a la transformación de la materia orgánica por diferentes microorganismos como bacterias y hongos a través de la mineralización del fósforo orgánico. El fósforo orgánico en los suelos se presenta como ésteres de ácido ortofosfórico, fosfato del inositol, fosfolípidos, ácidos nucleicos y azúcares fosfatados (Cisneros 2016).

Con respecto al café este nutriente juega un papel crucial en plantaciones nuevas debido a la importancia en el desarrollo inicial de la plantación, niveles insuficientes de fósforo en la planta afecta la absorción de otros elementos esenciales que son importantes para el crecimiento y desarrollo del cultivo (De Assis y Soares 2014).

El fósforo fue considerado por mucho tiempo como un elemento de baja eficiencia en el desarrollo del café. Independientemente la edad de las plantas, la absorción de este elemento es baja con respecto al nitrógeno. En suelos tropicales se presentan reacciones que disminuyen la disponibilidad de fósforo, dado el pH ácido que comúnmente ocurre en suelos cultivados el P es absorbido en su forma iónica H_2PO_4^- , este nutriente es fijado rápidamente por el Fe o el Al intercambiable formando compuestos de baja solubilidad (Jackson *et al.* 2013). En comparación con los otros nutrientes principales, el fósforo es poco móvil y disponible para las plantas en la mayoría de las condiciones del suelo (Saghir 2006)

Potasio

El potasio presente en los suelos aparece por desintegración descomposición de las rocas que contienen minerales potásicos. Los minerales que se consideran como fuentes originales de potasio son los feldspatos potásicos: $\text{Si}_3\text{O}_8\text{AlK}$, la moscovita: $(\text{SiO}_4)_3\text{H}_2\text{Al}_3\text{K}$, y la biotita: $(\text{SiO}_4)_3\text{Al}_2(\text{MgFe})_2(\text{HK})_2$. También se halla en el suelo bajo la forma de los siguientes minerales: silvinita, carnalita, kainita, ilitas, vermiculitas, cloritas y otros minerales interestratificados (Navarro y Navarro 2003).

En el suelo el potasio se encuentra de las siguientes formas: i) potasio no aprovechable; lo constituye el potasio estructural que forma parte del retículo cristalino de minerales primarios y secundarios, representa del 90 al 98 % del total en el suelo, constituye una reserva liberable mediante la intemperización. ii) potasio lentamente aprovechable; representa del 1 al 10 % del total, considerándose en esta categoría el potasio fijado en los espacios intermicelares de arcillas

tipo 2:1 como illita, vermiculita y montmorillonita. El potasio fijado constituye una reserva de este elemento, resistentes a pérdidas por lixiviación. iii) potasio fácilmente aprovechable; lo constituye el potasio hidrosoluble y el intercambiable, representando solo del 1 al 2% del total (Núñez 2007).

pH

El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de los iones hidrógeno en el suelo. Representa el grado de acidez o alcalinidad de un suelo, expresado en términos de la escala de pH, de 0 a 14 (NOM-021-RECNAT-2000), aunque en la práctica los suelos presentan típicamente valores de entre 4 y 8. Un suelo neutro tiene un pH de 7. Los índices de pH de los suelos alcalinos varían de 8 a 11 (fuertemente alcalino), mientras que los suelos fuertemente ácidos tendrán un pH inferior a 4 (Gardi 2014).

La acidez de los suelos se presenta por diversas causas, que pueden ser por origen natural o provocadas por el hombre, a través del manejo. Entre las principales causas están las precipitaciones, que provocan la lixiviación o lavado de cationes intercambiables, los altos contenidos de materia orgánica y la aplicación de fertilizantes nitrogenados de reacción ácida.

La acidez se clasifica de la siguiente forma:

Acidez activa: hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo y proveniente de diferentes fuentes.

Acidez intercambiable: hidrógeno y aluminio intercambiables (H^+ y Al^+) retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas.

Acidez no intercambiable: hidrógeno en enlace covalente en la superficie de las arcillas de carga variable.

Acidez potencial: acidez intercambiable + acidez no intercambiable (Bernier y Alfaro 2006).

Según Urbano (2008) los efectos negativos de la acidez del suelo sobre el desarrollo de los cultivos pueden explicarse desde los siguientes aspectos:

Aspectos tóxicos: se relaciona con el elevado contenido de aluminio y manganeso intercambiables y con la mayor movilidad de numerosos elementos metálicos contaminantes del suelo.

Aspectos tróficos: se refiere al bajo contenido de bases, característico de los suelos ácidos, a la posible precipitación de los fosfatos por hierro y aluminio, y a la baja disponibilidad de molibdeno. Esto no solo trae problemas en la nutrición, sino que afecta a los microorganismos edáficos.

Aspectos estructurales: afecta la estabilidad de la estructura del suelo. Procesos tan importantes como el drenaje, la humificación y mineralización de la materia orgánica del suelo, la fijación biológica del nitrógeno atmosférico, la evolución del nitrógeno, fósforo y azufre orgánicos son fuertemente frenados cuando el pH desciende por debajo de ciertos niveles.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Refleja la cantidad de cationes que pueden ser retenidos por los suelos, expresada en $\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$. A medida que la CIC es más elevada la fertilidad del suelo aumenta. En la dinámica de intercambio catiónico de un suelo influyen distintos factores: i) La cantidad de cationes retenidos. En suelos muy pobres es preciso realizar inicialmente una aportación de abonos, cuyos iones retenidos fuertemente por el complejo, para permitir que abonados de mantenimiento, más modesto, puedan actuar. ii) la fuerza de retención de los cationes de cambio. No todos los cationes son adsorbidos con la misma intensidad. La energía de fijación sigue el siguiente orden: $\text{H}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$. iii) Los componentes coloidales del suelo, la capacidad de adsorción de las arcillas y el humus condiciona la intensidad del intercambio (García-Serrano *et al.* 2009). La CIC influye en las prácticas de fertilización. Los suelos con una alta CIC presentan mayor potencial para retener cationes, que los de baja CIC. Por lo que en suelos con CIC baja, se necesitan cantidades más pequeñas de fertilizantes, aplicadas con más frecuencia, para evitar pérdidas por lixiviación, mientras que en suelos con una CIC alta, pueden aplicarse si el suelo lo requiere cantidades altas con menos frecuencia (Plaster 2005). Por lo tanto las dos propiedades principales de la capacidad de intercambio catiónico consiste en su capacidad de intercambiar y retener cationes y el porcentaje de saturación de bases (FitzPatrick 2011).

3.4 Funciones de los nutrientes en las plantas

Los elementos nutritivos que realizan funciones específicas en la vida de las plantas, pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Estructurales. Estos elementos forman parte de la molécula de uno o más compuestos orgánicos, por ejemplo: N- Aminoácidos y proteínas. Ca- pectatos (sal de ácido poligalacturónico) de la lámina media de la pared celular. Mg- Ocupa el centro del núcleo tetrapirrólico de las clorofilas.

Constituyentes de enzimas. Se trata de casos particulares del primero, que se refieren a elementos generalmente metales de transición (Mo), los cuales forman parte del grupo prostéticos de enzimas, esencial para que estas cumplan sus funciones, como es el caso del Cu, Fe, Mn, Mo, Zn y Ni.

Activadores enzimáticos. Forman parte del grupo prostético o elemento dissociable de la fracción proteínica de las enzimas; son necesarios para que estos cumplan sus funciones (Fabela *et al.* 2006).

En la Tabla 1 se describen de manera resumida las funciones de los nutrimentos según Alcántar *et al.* (2007).

Tabla 1. Principales funciones de los nutrientes en las plantas superiores.

Nutriente	Principales funciones
Carbono	Principal constituyente de la materia viva y consecuentemente de todas las biomoléculas, carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos.
Oxígeno	Se encuentra en todas las biomoléculas. Aproximadamente el 90 % del oxígeno consumido en la célula es utilizado en la respiración (fosforilación oxidativa).
Hidrógeno	Está presente en todas las biomoléculas. Es importante en el equilibrio iónico y del pH. Participa en reacciones redox y en el intercambio de energía en la célula.
Nitrógeno	Importante componente de todas las proteínas y ácidos nucleicos. Está presente en coenzimas, nucleótidos, amidas, ureidos y en la clorofila entre otros.
Fósforo	Forma parte de los ácidos nucleicos y participa en la síntesis de proteínas. Como constituyente de ATP y muchas coenzimas (NAD, FAD) interviene en todos los procesos metabólicos de transferencia de energía.
Potasio	Es activador o cofactor de más de 50 enzimas del metabolismo de carbohidratos y proteínas. Participa en el equilibrio iónico y en la regulación osmótica.
Calcio	Es importante en la división celular y en la estabilidad de la membrana y pared celular. Asociado con proteínas (calmodulinas) cumple funciones de mensajero secundario.
Magnesio	Participa como cofactor o activador en muchas reacciones enzimáticas. Se asocia al ATP en la transferencia de energía y es componente de la clorofila.
Azufre	Se encuentra presente en muchas proteínas y como el fósforo participa en reacciones de intercambio de energía.
Hierro	Es componente de muchas enzimas y juega un papel importante en la transferencia de electrones (reacciones redox), como en los citocromos, en las cadenas de transporte electrónico.
Manganeso	Es constituyente de algunas enzimas y activador de descarboxilasas y deshidrogenasas de la respiración. Cataliza la liberación de oxígeno en la fotólisis del agua.
Zinc	Componente esencial y activador de muchas enzimas. Es necesario para la biosíntesis de la clorofila y ácido indolacético.
Cobre	Componente y activador de muchas enzimas, principalmente SOD (superóxido dismutasas) y constituyente de la plastocianina.
Boro	Participa en el metabolismo y transporte de carbohidratos y en la síntesis de la pared celular.
Molibdeno	Es importante en la asimilación de nitrógeno, como constituyente de la nitrato reductasa y la nitrogenasa.
Cloro	Se requiere en fotosíntesis y en la fotólisis del agua. Participa en la división celular.
Níquel	Constituyente de la enzima ureasa.

3.5 Estudios realizados sobre diagnóstico edáfico y nutrimental

Lee y Esponda (2006) realizaron una caracterización edafo-nutrimental del sistema de producción tradicional y orgánico del café (*Coffea arabica* L.) cv Bourbon en la finca Santa Bárbara, en el municipio de Motozintla, Chiapas, con la finalidad de definir un manejo nutrimental más eficiente e integrar a un buen uso los residuos de las malezas y cultivo. Para ver la respuesta de la nutrición al cultivo aplicaron macro y micronutrientes en forma sólida y líquida en una, dos y tres frecuencias de aplicación, así como un activador orgánico de suelos y un tratamiento testigo (tres kilogramos de pulpa de café por planta). Encontraron que con la fertilización líquida, conforme se aumentó las frecuencias de aplicación, se incrementó el diámetro de las ramas principales, longitud y diámetro de las ramas secundarias, el activador orgánico sólo fue superior al testigo y similar a la fertilización sólida; cuando se adicionó a las fertilizaciones sólida y líquida, fue más eficiente. Con respecto al rendimiento de café cereza a pergamino fueron significativamente superiores con la fertilización líquida y se incrementaron conforme se aumentaron las frecuencias de aplicación; con el compuesto orgánico sólo fue superior al testigo y su adición a la nutrición sólida con una y dos frecuencias de aplicación fueron estadísticamente iguales a la fertilización líquida con tres frecuencias de aplicación. En el área experimental realizaron un perfil para la caracterización física y química del suelo; el pH es ligeramente ácido, sin problemas de sales ni de sodio, textura permeable y bajos contenidos de materia orgánica, su nivel de fertilidad fue bajo con excepción de fierro y manganeso. Es un suelo profundo con estructura granular en los dos horizontes superiores, sin problemas de compactación y buena actividad biológica.

Ramos-Hernández y Flores-Román (2008) evaluaron la función del fósforo y su problemática en relación al cultivo del café (*Coffea arabica*) en suelos de origen volcánico en la región del soconusco, Chiapas. Compararon dos fuentes de fertilizantes fosfatados (superfosfato triple, ST; roca fosfórica, RF) y abono orgánico (estiércol de equino); evaluaron el fósforo en el suelo y planta así como el efecto en cuatro épocas del año por cinco ciclos. Para los análisis químicos de suelo se tomaron muestras a 20 cm de profundidad, a 50 cm del tronco. Para las muestras foliares recolectaron hojas sobre el tercer nudo superior de la planta y del cuarto par de hojas, contando desde el ápice de la rama sin fructificación. En el suelo encontraron las siguientes características físicas y químicas; colores pardos oscuros (10YR3/3), contenido muy alto de MO (9.8%), textura franco arenosas (arena 55.8%, limo 32 % y arcilla 12.2%) alta porosidad (63%), baja densidad aparente y real (0.76 Mg m^{-3} y 2.10 Mg M^{-3}), pH ácido en agua y en KCl (5.2 y 4.5), una alta CIC

(20.7 $\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$) y moderado porcentaje de saturación de bases (52.3%), como resultado del intemperismo y lavado de bases cambiables. El P disponible (Bray I) es bajo ($5.0 \mu\text{g g}^{-1}$), lo que concuerda con el alto P fijado (96.0%). Se considera que el P disponible es muy bajo, lo que significa una clara deficiencia de ese elemento. Las respuestas de las aplicaciones crecientes de P, como ST o RF, aumentaron el nivel de P foliar. Encontraron que los valores más altos de P en el suelo (≤ 0.05) se registraron en junio y septiembre, que es la época de mayor precipitación en la zona. Los valores más bajos en diciembre y marzo representan la época seca. Los valores más altos y estadísticamente no diferentes de P foliar ocurrieron en junio y septiembre. Los valores menores y estadísticamente diferentes entre ellos y con los dos anteriores, fueron en marzo y diciembre.

Rosas *et al.* (2008) realizaron la caracterización física química de suelos cultivados con café orgánico en 78 sitios de muestreo de 625 m^2 en los estados de: Chiapas (16), Guerrero (8), Oaxaca (20), Puebla (16) y Veracruz (18), abarcando un total de 42 localidades y 19 municipios. El propósito de esta investigación fue ver la relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café. Encontraron que el 8% de los cafetales se ubicaron en terrenos con relieve plano, en lomeríos el 33%, en terrenos ligeramente inclinados el 34% y el 25% en laderas. El pH de los suelos se encuentra entre 4.7 y 5.0. Puebla y Veracruz fueron los que tuvieron el pH más bajo. Oaxaca tuvo la menor cantidad de Al^{3+} intercambiable ($1.9 \text{ cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$), mientras que Guerrero registró el promedio más alto ($2.8 \text{ cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$). El contenido de materia orgánica promedio fue de 5.4%, en todos los estados el contenido se ubicó dentro de niveles muy altos. Los contenidos de N total son clasificados como muy altos. Oaxaca tuvo el promedio más alto de N total (0.41%) mientras que Chiapas (0.33%). En cuanto al P, Oaxaca presentó el menor contenido (4.44 mg kg^{-1}) y Chiapas el más alto (29.60 mg kg^{-1}). En Veracruz encontraron 0.55 y en Guerrero $0.19 \text{ cmol kg}^{-1}$ de K intercambiable, todos los estados en nivel medio. Los autores concluyen que los suelos de cafetales cultivados con manejo orgánico tuvieron influencia sobre las características físicas del grano y sensoriales de la bebida. Encontraron que valores altos de Zn y Mn están asociados con el menor porcentaje de granos tipo planchuela.

Noriega *et al.* (2014) estudiaron los suelos donde se desarrolla la caficultura orgánica en la cuenca del Río Copalita en el extremo sur de Oaxaca, dentro de la provincia Sierra madre del Sur. Es una zona que se ha venido deteriorando debido a la erosión ocasionada por tormentas y ciclones, a lo anterior se le atribuye que la producción haya pasado de 12 qq ha^{-1} de café a 2.9 qq ha^{-1} .

Para evaluar la fertilidad de los suelos de la región se utilizaron 720 perfiles de suelos georreferenciados; de la Cuenca del Río Copalita se utilizaron 35 sitios georreferenciados. El pH fue determinado en agua, la materia orgánica mediante oxidación con dicromato de potasio, las variables químicas de N, P, K, Ca, Mg y micronutrientes fueron determinadas con base a la NOM-021-SEMARNAT-2000. Con sistemas de información geográfica se elaboraron mapas de acidez del suelo y contenido de materia orgánica, con el fin de hacer recomendaciones para la restauración de la biología del suelo. La materia orgánica la encontraron en un promedio de 5.14%. La mayoría de los suelos cafetaleros se encuentran con valores altos de materia orgánica, aunque existan altas temperaturas y alta precipitación. En la zona se cuenta con un pH de 5.44 considerado como moderadamente ácido. Los valores promedios de la relación C/N son de 11.59. Los suelos de esta región presentan un valor de fósforo asimilable de 17.68 mg kg⁻¹, considerado como moderadamente bajo. Para contrarrestar los efectos negativos del pH recomiendan aplicar como enmienda 2 t ha⁻¹ de composta con 200 kg de dolomita ha⁻¹ y 100 kg de zeolitas ha⁻¹, aplicada en banda. De igual manera consideran la aplicación de *Azotobacter* con la finalidad que contribuya a la fijación de nitrógeno (20 a 30 kg ha⁻¹ año⁻¹). Con respecto al fósforo recomiendan el uso de micorrizas, para mejorar la absorción del agua, del ión fosfato y nutrimentos como N, K, Ca, Mg, B y Fe.

Vergara-Sánchez *et al.* (2005) estudiaron las propiedades químicas asociadas con la fertilidad actual de los suelos de ladera en tres microcuencas experimentales representativas de las regiones Mazatecas, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México. Las muestras de suelo fueron tomadas de 0 a 20 y 20 a 40 cm, los resultados obtenidos se promediaron para generar un valor único para la profundidad de 0 a 40 cm, con la finalidad de caracterizar la fertilidad en la zona de máxima distribución radical. Los suelos de las tres regiones se clasificaron como ácidos; la región Mixe (pH 4.9), la región mazateca (pH 5.2) y en la región Cuicateca (pH 5.6). Los iones K, Ca y Mg intercambiables se relacionaron de forma directa con el pH ($r=0.97$; $r=0.90$; y $r=0.90$; $p\leq 0.05$). Cuando el pH fue menor, la concentración de estos iones también lo fue. En la región Cuicateca encontraron los valores más altos de Ca, K y Mg intercambiables (9.6, 0.7 y 6.5 cmol_(c) kg⁻¹), pero no fue el caso para Na intercambiable. La mayor concentración de sodio la encontraron en los suelos de la región Mazateca (0.28 cmol_(c) kg⁻¹), valor que no constituye un problema. Las concentraciones de Ca, K y Mg intercambiables en las regiones Mixe y Mazatecas se consideraron bajas. La suma de bases intercambiables para la región Cuicateca, Mazateca y Mixe fueron; 16.7

cmol_(c) kg⁻¹, 5.1 cmol_(c) kg⁻¹, 3.6 cmol_(c) kg⁻¹ respectivamente. La CICE y PSB para la microcuenca Cuicateca fue de 17.1 cmol_(c) kg⁻¹ y 95%, para la región Mazateca 7.1 cmol_(c) kg⁻¹ y 63%, mientras Mixe 7.4 cmol_(c) kg⁻¹ y 42%, respectivamente. En las tres áreas de estudio el P Olsen fue bajo (5.8, 6.0 y 4.4 mg kg⁻¹ en la áreas Mazateca, Cuicateca y Mixe). La materia orgánica para los suelos de la Mixe y Mazateca fue de 6.9% y 6.4%, valores considerados como altos, mientras que en Cuicateca fue de 3.1%, la diferencia con respecto a las otras dos regiones en el contenido de MO se le atribuye al grado de erosión que se presenta. Los autores concluyen que la fertilidad de los suelos en pendientes pronunciadas (>30%) en las regiones estudiadas se encuentran en una condición de debilidad, agravada por el escaso uso de fertilizantes orgánicos y sintéticos y el desconocimiento del encalado. Lo anterior puede resolverse mediante la adición de enmiendas calcáreas o dolomíticas y la aplicación de fertilizantes que contengan fósforo y calcio.

Castro *et al.* (2013) realizaron un levantamiento de la fertilidad de suelo en cafetales productivos ubicados en el sur de Minas Gerais, Brasil, con el propósito de verificar las condiciones de fertilidad. Para esta investigación ocuparon 2,406 análisis químicos de rutina obtenidos de muestras de suelo a una profundidad de 0 a 20 cm, del laboratorio de cooperación regional de caficultores de Guaxupé. Las muestras fueron tomadas en 2007 y 2008. Los atributos químicos utilizados para la evaluación de las muestras fueron: acidez activa (pH en CaCl₂), Fósforo disponible extraído con resina, bases intercambiables (K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺), Acidez intercambiable (Al³⁺) e índice de saturación de bases (%). Encontraron que el fósforo disponible, el pH y la saturación de bases no están en niveles adecuados en la capa arable del suelo; los niveles de Ca, Mg y Al en la primer capa del suelo en la mayoría de las áreas evaluadas están en niveles adecuados para el cultivo del café. La mayoría de las áreas presentaron niveles altos de K en el suelo. Lo anterior se le atribuye posiblemente al uso rutinario de fórmulas comerciales de fertilizantes con altos niveles de nutrientes, sin tomar en consideración los resultados de los análisis de suelo.

Oliveira *et al.* (2014), con el objetivo de conocer el número adecuado de muestras foliares para determinar el estado nutrimental del cultivo en plantaciones comerciales de café, bajo dos regímenes hídricos en el Sur de Minas Gerais, Brasil, establecieron el número de plantas a muestrear para determinar el error muestral para el diagnóstico del estado nutricional del cultivo. La investigación consistió en dos estudios, un muestreo foliar realizado en temporada de sequía y el otro irrigado. Para ambos estudios utilizaron un diseño completo al azar con cuatro tratamientos

y cinco repeticiones, la cual consistió en la colección de hojas en 5, 10, 20 y 40 plantas de café por unidad de muestreo. Los autores concluyen que para mantener un error muestral menor de 10% para los contenidos de macronutrientes, la toma de muestra foliar debe ser de cinco muestras, que consta de 10 y 20 plantas por unidad de muestra en los sistemas de riego y de secano, respectivamente. Con respecto al contenido de micronutrientes se requiere la recolección de 20 plantas en los sistemas, excepto Cu y Mn que necesitan un muestreo superior a cinco muestras, compuestas por 40 plantas, en el sistema de secano.

Da Silva *et al.* (2014) realizaron un diagnóstico nutrimental por el método DRIS en la región Norte de Paraná, Brasil, con el objetivo de formar un banco de datos para el establecimiento de normas DRIS para el cultivo de café y ajustar parámetros para una fertilización racional y equilibrada. Establecieron el experimento de febrero de 2011 a febrero de 2012. Colectaron muestras foliares de 75 lotes en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.), en 69 propiedades rurales con cultivares IAPAR59, IPR 98, IPR 99, Catuai, Mundo Novo y Tupi. Con los datos se obtuvo el establecimiento de la norma DRIS para el diagnóstico nutricional del cultivo basada en una productividad de 55 sacos ha⁻¹. Observaron que el nutriente más imitante fue el K, seguido de Cu y Zn. En cuanto a los niveles altos de nutrientes encontraron el Fe, S y Mn, estos fueron los más representativos a nivel regional. Concluyen que es necesario realizar aplicaciones de fertilizantes a base de potasio en las áreas estudiadas, esto basado y demostrado por los resultados del DRIS, teniendo en cuenta los resultados de análisis de suelo y nivel de productividad de cada lote.

Lopes *et al.* (2014) evaluaron la calidad del suelo mediante la cuantificación de los atributos físicos y químicos de un Latosol y el estado nutrimental del cultivo de café, en dos sistemas de manejo: agroforestal y convencional, en el sur de Minas Gerais, Brasil. Colectaron muestras de suelo para los análisis físicos y químicos y muestras de tejido foliar para la evaluación nutricional de las plantaciones. En los análisis químicos de suelo determinaron: pH, P, K, Ca, Mg, H+Al, Al, CIC, PSB y MO. Los atributos físicos analizados fueron: densidad del suelo, volumen total de poros, macroporosidad y proporción de macro y microporos. Para el análisis nutricional determinaron macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg y S. Al comparar los resultados consideran que el sistema agroforestal exhibe propiedades químicas más favorables que el sistema convencional, con mayores concentraciones de calcio, magnesio, saturación de bases y materia orgánica a excepción de la baja disponibilidad de fósforo. En las propiedades físicas del suelo no encontraron diferencias

entre ambos sistemas. El contenido de macronutrientes foliar en el cultivo agroforestal y convencional fueron similares, a excepción del nitrógeno y azufre. El ciclaje de nutrientes en el cultivo de café bajo el sistema agroforestal fue positivo, propiciando niveles de macronutrientes en el tejido foliar similares a los del cultivo de café convencional.

Quintão *et al.* (2010) evaluaron el estado nutrimental de cafetales en la región de Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil, utilizando el método DRIS. Para la interpretación de los análisis foliares se aplicó el potencial de respuesta a la fertilización sobre los índices DRIS y análisis de correlaciones e interacciones entre concentraciones de nutrientes en las hojas e índices DRIS. Las muestras foliares fueron colectadas en la fase fenológica de post floración retirando dos pares de hojas de cada planta en 20 plantas al azar en 59 plantaciones comerciales. Se determinaron las concentraciones de nutrientes, los cuales fueron interpretados por el método DRIS. El DRIS demuestra que los principales nutrientes limitantes para esta región son: P, Fe, K = Mn y Zn = B. los nutrientes con mayor probabilidad de respuesta en la región Alto Paranaíba son: P, B, Fe, K y Mn. Las correlaciones positivas entre los índices DRIS fueron: N (P, K Y S), P (K, Mg Y S) Y K (Mg y S), y las correlaciones negativas: N (Ca, B, Fe y Zn), P (Ca, B, Fe, Mn, y Zn) y K (Ca, B, Fe, Mn y Zn).

4 Literatura citada

- Alcántar GG, Trejo-Téllez LI, Fernández PL, Rodríguez MMN (2007) Elementos esenciales. En: Alcántar GG, Trejo-Téllez LI (Eds). Nutrición de Cultivos. Mundi-Prensa México, S.A de C.V.-Colegio de Postgraduados, Distrito Federal, México. 440 p.
- Alvarado A, Mata R, Chinchilla M (2014) Arcillas identificadas en el suelo de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense* 38: 75-106.
- Arcila PJ (2007) Crecimiento y desarrollo del café. 1ª edición. En: Arcila PJ, Farfán VF, Moreno BA, Salazar GLF, Hincapié GE. Sistema de producción de café en Colombia. FNC-Cenicafé. Chinchiná Colombia. 309 p.
- ANACAFE (2014) Guía técnica de caficultura. 2ª edición. Asociación Nacional del Café. Guatemala, Guatemala. 212 p.
- Bautista CA, Etchevers BJ, Castillo RF, Gutiérrez C (2004) La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.
- Bernier VR, Alfaro VM (2006). Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Osorno Chile. 46 p.
- Brunel N, Seguet O (2011) Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro Sur* 39: 1-12.

- Castro FV, Mantovani JR, Moreira LR, Messias MJ (2013) Levantamento da fertilidade do solo de lavouras cafeeiras em produção, no Sul de Minas Gerais. *Coffee Science* 8: 306-313.
- Cisneros RCA, Sánchez PM, Menjivar FJC (2016) Influencia de microorganismos solubilizadores de fósforo del suelo y su absorción por plántulas de café. *Bioagro* 28: 95-106.
- Cleante BO, Quaggio JA, Rodriguez DSW, Ferreira AM (2004) Diagnose nutricional do cafeeiro pelo DRIS variando-se a constante de sensibilidade de dos nutrientes de acordó com a intensidade de e frecüência de resposta na produção. *Bragantia* 63: 253-263.
- Crespo G (2011) Comportamiento de la materia orgánica del suelo en pastizales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 45: 343-347.
- Da Silva RA, Creste JE, Tiritan CS, Xavier GWE, Do Aramel EE (2014) Nutritional diagnosis by DRIS method of the cultivars coffee in the northern region of Paraná, Brazil. *Coffee Science* 10: 204-213.
- De Assis SS, Soares SLJ (2014) Spatial estimation of foliar phosphorus in different species of the genus *Coffea* based on soil properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38: 1439-1447.
- De Lima LC, Carvalho GA, Teixeira FAL, Oliveira SR, Quintão LRM (2016) Crescimento e produtividade do cafeeiro irrigado em função de diferentes fontes de Nitrogênio. *Coffee Science* 11: 97-107.
- De Oliveira CAC, Rozane DE, Natale W, Gorla SM, Barbosa JC, Chamma LMD (2014) Amostragem de plantas em cafeeiro para avaliação do estado nutricional. *Coffee Science* 10: 122-130.
- Ecocrop- FAO (2012) Ficha técnica del cultivo *Coffea arabica*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropView?id=749>. Fecha de consulta 15 de junio de 2016
- Etchevers BJD, Padilla CJ (2007) Diagnóstico de la fertilidad del suelo. En: Alcantar GG, Trejo-Téllez LI (Eds). *Nutrición de Cultivos*. Mundi Prensa México, S.A de C.V.-Colegio de Postgraduados, Distrito Federal, México. 440 p.
- Fabela ChE, Preciado RP, Benavides MA (2006) Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila. México. 145 p.
- Ferreira VE, Sá ME (2013) Impacto de sistemas agroforestais sobre a matéria orgânica do solo: modelagem de carbono e nitrogênio. *Coffee Science* 8: 354-363.
- Figueroa-Barrera A, Álvarez-herrera G, Forero FA, Salamanca C, Pinzón LP (2012) Determinación y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. *Temas Agrarios* 17: 32-43.
- FitzPatrick EA (2011) Introducción a la ciencia de los suelos. Editorial trillas. México D. F. 288 p.
- García- Serrano JP, Lucena MJJ, Ruano CS, Nogales GM (2009) Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. España. 259 p.

- García Y, Ramírez W, Sánchez S (2012) indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* 35: 125-138.
- Gardi C, Angelini M, Barcelo S, Comerma J, Cruz GC, Encina RA (2014) Atlas de suelo de América Latina y el Caribe. Unión Europea. Luxemburgo, Luxemburgo. 176 p.
- 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. 181 p.
- Jakson JSA, Guimarães RJ, Willian DA, Scalco MS, Colombo A (2014) Doses de fósforo no desenvolvimento inicial cafeeiros em solos com diferentes texturas. *Coffee Science* 9: 284-288.
- Lee RV, Esponda GRF (2006) Caracterización edafo-nutricional del sistema de producción tradicional y orgánico del café (*Coffea arabica* L.) cv Bourbon. *Quehacer científico en Chiapas* 1: 12-20.
- Lopes CD, Carvalho ND, Dias JMS, Machado LT, Nogueira NA, Manuel L (2014) Chemical and physical attributes of a Latosol and coffee crop nutrition in agroforestry and conventional management systems. *Coffee Science* 9: 122-1313.
- Morales MEJ, Morales-Rosales EJ, Díaz-López E, Cruz-Luna AJ, Medina-Arias N, Guerrero-De la Cruz M (2015). Tasa de asimilación neta y rendimiento de girasol en función de urea y urea de Liberación lenta. *Agrociencia* 49: 163-176.
- Muñoz HE, Pupiales AS, Navia EJ (2011) Evaluación del estado actual del nitrógeno en el arreglo silvopastoril aliso (*Alnus jorullensis* H B & K) Kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. Ex Chiov.). *Revista de Ciencias Agrícolas XXVIII*: 161-175.
- Núñez EP (2007) El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos. En: Alcantar GG, Trejo-Téllez LI (Eds). *Nutrición de Cultivos*. Mundi Prensa México, S.A de C.V.-Colegio de Postgraduados, Distrito Federal, México. 440 p.
- Navarro BS, Navarro GG (2014) *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Tercera edición. Mundi-Prensa. Madrid España. 508 p.
- Nieves-González F, Alejo-Santiago G, Luna-Equivel G (2013) Técnicas sustentables para el manejo de la producción del chile habanero (*Capsicum Chinense* Jacq.). *Revista Bio Ciencias* 2: 98-101.
- NOM-021-RECNAT (2002) Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la federación*. SEMARNAT. Distrito Federal, México. 85 p.
- Noriega AG, Cárcamo RB, Gómez CMA, Schwentesius RR, Cruz HS, Leyva BJ *et al.* (2013) Intensificación de la producción en la agricultura orgánica: caso café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5: 163-169.
- Prieto MHE, Scherrer MJF, Bartolomeu SR, Álvarez VVH, Gontijo GP (2003) Faixas Críticas de concentrações du nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeiros em quatro regiões de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38: 703-713.

- Pulido-Moncada M, Flores F, Rondón ST, Hernández-Hernández RM, Lozano Z (2010) Cambios en fracciones dinámicas de la materia orgánica de dos suelos: inceptisol y ultisol, por el uso con cultivos de cítricos. *Bioagro* 22: 201-210.
- Quintão LRM, De Oliveira SA, Quintão LAM, Vieira FM (2010) Levantamento do estado nutricional de plantas de *Coffea arabica* L. pelo DRIS, na região do alto Paranaíba – Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 1147-1156.
- Ramos-Hernández SG, Flores-Román D (2008) Comparación de dos fuentes fosfatadas en suelos volcánicos cultivados con café del Soconusco, Chiapas, México. *Agrociencia* 42: 391-398.
- Rodrigues DRA, Furlani JE, Buzetti S, Andreotti M (2006) Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. *Bragantia* 65: 163-171.
- Rosas AJ, 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.
- Saghir KM, Zaidi A, Wani AP (2007) Role of Phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A Review. *Agronomy for Sustainable Development* 27: 29-43.
- Sánchez GP, Molinos SC, Alcantar GG, Sandoval VM (2007) Diagnóstico nutrimental en plantas. En: Alcantar GG, Trejo-Téllez LI (Eds). *Nutrición de Cultivos*. Mundi Prensa México, S.A de C.V.-Colegio de Postgraduados, Distrito Federal, México. 440 p.
- Sánchez S, Hernández M, Ruz F (2011) alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. *Pastos y forrajes* 34: 375-392.
- Sharma SB, Riyaz ZS, Mrugesh HT, Thivakaran AG (2013) Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springer Plus* 2: 1-14.
- SIAP (2016) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>. Fecha de consulta 5 de mayo de 2016.
- Silva FGA, Moreira SF, Negrini CPA, Silva AC, De Melo CF (2012) Agricultura de precisao no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. *Coffee Science* 7: 59-67.
- Texeira AJF, Prieto MHE, Galveas LB, Tomaz MA, Fernández FEI, Damião CC (2011) Produtividade e eficiência de uso de nutrientes por cultivares de cafeeiro. *Coffee Science* 6: 65-74.
- Vergara-Sánchez MA, Etchevers-Barra JD, Padilla-Cuevas J (2005) La fertilidad de los suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 259-266.
- Woods PA, Laérico FJ, Soares VAL, Vasconcelos CB, Brendler OF, Barbosa NG (2014) Resíduo de *Brachiaria* fertilizada com nitrogênio na adubação do cafeeiro. *Coffee Science* 9: 366-373.

**CAPITULO I. SUELOS Y DENSIDAD RADICAL EN CAFÉ (*COFFEA ARABICA L.*) EN
LA ZONA CAFETALERA CUSTEPEC, CHIAPAS**

SUELOS Y DENSIDAD RADICAL EN CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN LA ZONA CAFETALERA CUSTEPEC, CHIAPAS

Resumen

Con el objetivo de caracterizar el suelo en función de la pendiente y determinar la densidad de longitud de raíces (DLR) finas en una plantación de *Coffea arabica* L. variedad Catimor en la zona de Custepec la Concordia, Chiapas, en relación a la calidad de los suelos, se realizaron tres perfiles distribuidos en diferentes posiciones fisiográficas de la pendiente (alta, media y baja) en una zona de la Finca Custepec. Los suelos se clasificaron y caracterizaron con apego a la Base referencial Mundial del Recurso Suelo y la NOM-021-RECNAT 2000. Para determinar la DLR vertical y horizontal se eligieron aleatoriamente tres plantas por cada posición fisiográfica establecidas bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial con tres niveles: posición de la pendiente (alta, media y baja), dos distancias del 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), Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic), respectivamente. Las características del suelo en las tres posiciones difieren entre sí, atribuyéndole a los procesos de erosión, lixiviación de bases, argilización e intemperismo de arcilla que sufren con el tiempo de exposición y que se acentúa a lo largo de la pendiente. Se determinó que la DLR horizontal a las dos distancias estudiadas se comporta de forma homogénea. Entre cada sitio y tipo de suelo la DRL fue similar y presentó diferencias significativas en forma vertical. La mayor concentración se obtuvo en la primer profundidad 89.95% (6.97 km m³).

Palabras clave: enraizamiento, génesis de suelo, Lixisol, Cambisol, Luvisol, manejo sustentable de suelos.

Abstract

In order to characterize the soil as a function of slope and determine the root length density (LRD) in a plantation of *Coffea arabica* L. var. *catimor* in the farm of Custepec la Concordia, Chiapas, in relation to the quality of the soils, three profiles distributed in different physiographic positions of the slope (high, medium and low) were made. The soils were classified and characterized according to the World Reference Base of the Soil Resource and the NOM-021-RECNAT 2000. To determine the vertical and horizontal DLR, three plants were chosen randomly for each physiographic position established under a completely randomized factorial arrangement with three levels: position of slope (high, medium and low), two trunk distances (50 and 100 cm) and three depths (0-20, 20-40 and 40-60 cm). In the high, medium and low slope positions the soils were classified as Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric), Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic), Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric, Humic) respectively. The characteristics of the soil in the three positions differ from each other, attributing to the processes of erosion, base leaching, argilization and weathering of clay that suffer with the exposure time and that is accentuated along the slope. It was determined that the horizontal DLR at the two studied distances behaves homogeneously. Between each site and soil type the DRL was similar and presented significant differences in vertical form. The highest concentration was obtained in the first depth 89.95% (6.97 km m³).

Key words: rooting, soil genesis, Lixisol, Cambisol, Luvisol, sustainable soil management.

1.1 Introducción

El suelo es uno de los principales recursos que brinda la naturaleza al hombre, en el crecen y se desarrollan las plantas, tanto las silvestres como las cultivadas, que sirven de alimento al hombre y a los animales (Palma-López *et al.* 2007). El establecimiento de cultivos intensivos produce alteraciones, principalmente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Cardona-Calle y Sadeghian-Khalajabadi 2005). En el estado de Chiapas los cafetales se ubican en terrenos abruptos predominando principalmente los lomeríos con fuertes pendientes (Rosas *et al.* 2008), donde varias prácticas de manejo dejan de ejecutarse y otras son adoptadas, lo que conlleva al deterioro de la calidad del suelo (Jaurixje *et al.* 2013, Lopes 2014). Los suelos pueden presentar limitaciones caracterizadas por la acidez, niveles bajos de materia orgánica, baja CIC, deficiencia generalizada de nutrientes y saturación de aluminio, estas condiciones desfavorables restringen la fructificación, resultando una baja productividad (Sini *et al.* 2013, Cirilo *et al.* 2013). Los estudios de caracterización y morfológico de suelos permite reconstruir los procesos edafogenéticos, las condiciones del medio bajo las cuales tuvieron lugar y , en muchos casos, interpretar o predecir el comportamiento de las plantas y la respuesta del suelo frente a actuaciones tecnológicas o a cambios de uso (Porta *et al.* 2003), lo anterior brinda las bases para establecer un manejo sustentable del suelo que se vea reflejado en sus condiciones óptimas para el desarrollo de cultivos (Martins y Matsumoto 2010). El conocimiento del sistema radical de una especie es de gran importancia para proporcionar un manejo adecuado cuando está asociado a factores edafoclimáticos, y fundamentalmente para la optimización de prácticas de enclado y fertilización. Destaca aquí, la importancia de cantidades de raíces, cuyo cálculo muestra la capacidad de absorción de agua y nutrientes para la planta (Delgado *et al.* 2008, Monzoli 2015, Quinto 2016). Las características del sistema radical difieren según la especie, genotipo, edad de la planta, época del año, densidad de población, estrés biótico (Partelli 2014), textura, estructura del suelo, plagas y enfermedades (Monzoli 2015), por lo tanto, el desarrollo de las plantas depende de las interacciones entre los atributos del suelo y el ambiente radicular (Carducci 2014). Por lo anterior, se hace necesario realizar estudios sobre estructura y funciones de sistemas radicales que son de gran importancia para el entendimiento del desarrollo de los cultivos (Madeira 2006). El equilibrio entre la parte aérea y sistema radicular está íntimamente relacionado con el crecimiento y productividad del café (Prieto *et al.* 2007, Manzoli 2013). La mayor concentración de raíces de un cafeto se encuentra generalmente en los primeros 20 a 30 cm de la superficie del suelo y se

distribuyen a un diámetro de 1.50 m del tronco (Damatta *et al.* 2007, Partelli 2006, Monzoli 2015). Estudios actuales que abordan características del sistema radical aun no son muy concluyentes en cuanto a la distribución en el perfil del suelo (Andrade 2007). Por lo anterior este trabajo tiene como objetivo caracterizar los suelos y determinar la densidad de longitud de raíces (DLR) en una plantación de café (*Coffea arabica* variedad Catimor) de 6 años de edad, para evaluar la capacidad productiva del agrosistema.

1.2 Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en plantaciones de café en la Finca Custepec, municipio de La Concordia Chiapas, México (Figura 1), a una altitud de 1 112 msnm. El clima es semicalido húmedo con lluvias en verano (A)C(m). La precipitación y temperatura media anual son de 2 021 mm y 18 °C (CONAGUA 2015).

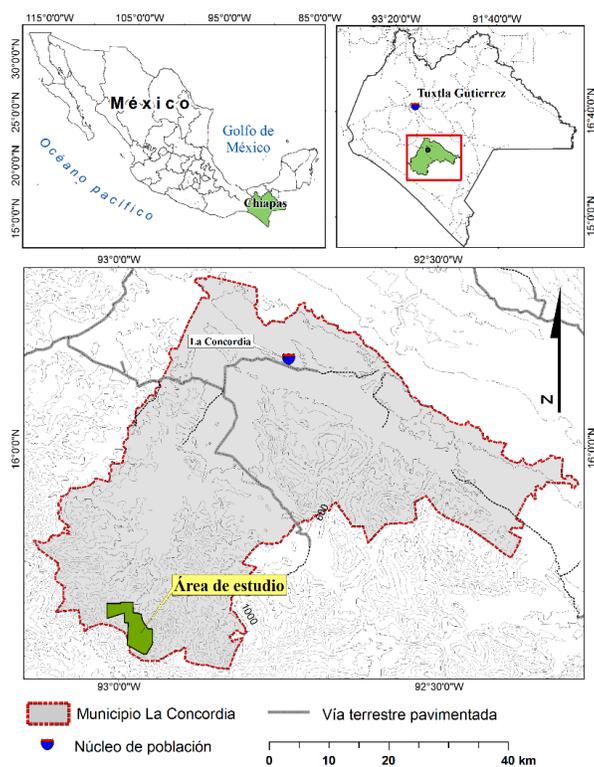


Figura 1. Localización del área de estudio.

Sitio de estudio

Para la caracterización del suelo primero se ubicó la parcela más representativa en cuanto al manejo agronómico de la Finca Custepec. En ella se eligieron tres sitios de estudio sobre tres posiciones en la pendiente del terreno, posición alta, media y baja, en forma de catena o transecto. Para el muestreo de raíces se utilizaron los mismos tres sitios sobre la pendiente. El cafetal es una renovación con 6 años de edad, variedad *Catimor* que se encuentran establecidas a doble postura y densidad de 2 500 plantas por hectárea, en terrenos con pendientes de 45 %. Son plantaciones bajo sombra introducida principalmente arboles del genero *Inga*.

Perfiles y muestreo de raíces

En cada sitio se describió un perfil (Cuanalo 1990) a una profundidad de 165 cm. En cada horizonte se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg de suelo, debidamente etiquetadas, fueron llevadas al laboratorio para secarlas a la sombra, molerlas y tamizarlas para su posterior análisis físicos y químicos, con base a la norma oficial mexicana (NOM-021-RECNAT 2000), que indica que para fines de clasificación deben realizarse las siguientes determinaciones: 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 (cationes y aniones solubles) empleando acetato de amonio 1N pH 7.0 como extractante, densidad aparente por el método de la parafina, capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}) empleando 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. Con los datos anteriores y la descripción de los suelos se procedió a la clasificación del suelo con base en el Referencial Mundial de Suelos o WRB (IUSS Working Group WRB, 2014). Para determinar la densidad de longitud de raíces (DLR) finas y la distribución horizontal y vertical, en la posición alta, media y baja de la pendiente, se seleccionaron aleatoriamente tres árboles para coleccionar las muestras de raíces a dos distancias del tallo (50 y 100 cm) y a tres profundidades (20, 40 y 60 cm), estas fueron tomadas con un cubo de acero de 500 cm³ (5x5x20 cm) de volumen, obteniendo un total de 54 monolitos, que fueron transferidas a bolsas de polietileno debidamente etiquetadas y trasladadas al laboratorio, donde fueron lavadas y separadas de la tierra por medio de tamices. Las raíces se clasificaron en tres clases: raíces finas (<1 mm), raíces medias (1-3 mm), y raíces gruesas (>3 mm) (Vargas *et al.* 2006, García *et al.*

2006). Se procedió a medir su longitud y se calculó la DLR solo para raíces finas (en km m^{-3} suelo) mediante la siguiente ecuación: $\text{DLR} = \frac{\text{Longitud de raíces}}{\text{Volumen de suelo}}$ (Moreno *et al.* 2005).

Análisis estadístico

El análisis estadístico para la densidad de longitud de raíces se realizó considerando un diseño completamente al azar con arreglo factorial con tres fuentes en el que se consideran tres posiciones de la pendiente (alta, media y baja), dos distancia al tronco (50 y 100 cm) y tres profundidades de muestreo (0-20, 20-40 y 40-60). Los resultados se sometieron a un análisis de varianza (ANVA) y prueba de comparación de medias (Tukey 0.05) realizados con el paquete estadístico SAS versión 9.13.

1.3 Resultados

Caracterización edáfica

Se identificaron tres tipos de suelo en cada una de las posiciones de la pendiente (Tabla 2), clasificándose como Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric), Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic) y Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Humic).

Tabla 2. 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

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). Presentan un horizonte árgico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo, una capacidad de intercambio catiónico $< 24 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ de arcilla en alguna parte del horizonte árgico dentro de los 50 cm debajo de su límite superior. El primer horizonte tiene una textura migajón arcillosa, cutanes por eluviación, continuos moderadamente espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos, mientras que el horizonte Bt1 y Bt2 presentan claramente un mayor contenido de arcilla, por lo cual presenta una textura arcillosa (Tabla 3),

ambos 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 $\geq 50\%$.

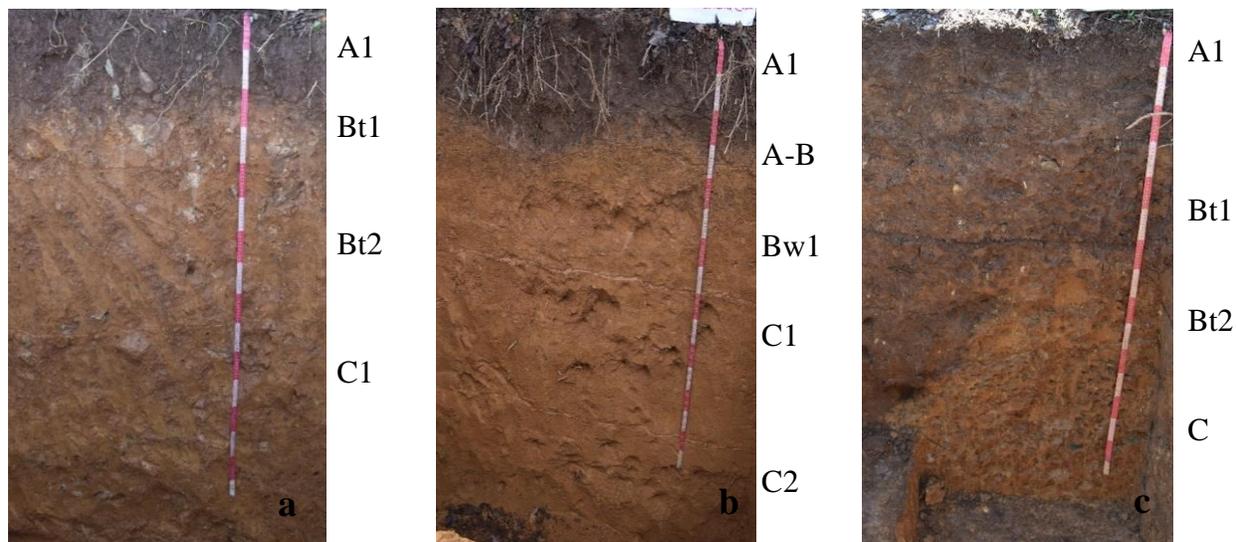


Figura 2. Perfiles de suelos representativos en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas. a) LX-ha-ce.ct.je, b) CM-eu-se-ce.hu, c) LV-ha-lo.ct.hu

El pH en los horizontes A1, Bt1 y C1 presenta los valores de 5.8, 6.4 y 6.5, respectivamente y se consideran como moderadamente ácido a excepción del horizonte Bt2 que presenta un valor neutro 6.7. La conductividad eléctrica (CE) varía en los horizontes de 0.02 a 0.09, por lo que se considera como muy ligeramente salino. La materia orgánica (MO) presenta niveles de muy alto a bajo (11.3 a 1.1 %) conforme aumenta la profundidad el contenido de materia orgánica decrece. El contenido de N total es de 0.40 a 0.03 % clasificado de muy rico a pobre. Se aprecian altos contenidos de P extraíble (49.31 a 11.81 mg kg⁻¹ de suelo). El potasio se encuentran en niveles muy bajos (0.15 a 0.10 Cmol_(c) kg⁻¹ de suelo). Los contenidos de calcio muestran uniformidad en todos los horizontes con niveles bajos de 3.06 a 3.93 Cmol_(c) kg⁻¹ de suelo). El Mg presenta niveles medios de 2.17 a 1.29 Cmol_(c) kg⁻¹. La CIC se clasifica como baja variando en los horizontes de 7.78 a 5.84 Cmol_(c) 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, el manganeso en niveles de 2.44 a 0.06 mg kg⁻¹ (Tabla 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 anterior muestra solo un

horizonte cámbico que comienza dentro de los 50 cm de profundidad. Tiene una saturación de bases ≥ 50 %. Contiene una CIC relativamente baja $< 24 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ de arcilla. La textura difiere entre horizontes; arcilla, arcilla limosa y migajón arcilloso.

El pH se clasifica como moderadamente ácido (5.7-5.9). La CE se encuentra en niveles bajos de 0.10 a $.01 \text{ dSm}^{-1}$ ligeramente salino. De muy alto a bajo se presenta la MO de 9.2 % a 1.3 %. Los contenidos de N total de .05 a .35 %, clasificándose de pobre a muy rico. El P extraíble se considera de alto a bajo (11.11 a 1.67 mg kg^{-1}). Muy baja las concentraciones de potasio ($0.10\text{-}0.05 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$). El calcio se encuentra de 2.71 a .42 siendo niveles bajos y muy bajos. Para Mg los niveles son de muy bajos a bajos ($1.26 \text{ a } 0.36 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$). La CIC de baja a muy baja ($1.95 - 6.81 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$). El hierro presenta concentraciones de 11.49 a 1.76 mg kg^{-1} , el cobre en niveles de 0.28 a 0.04 mg kg^{-1} , el zinc de 0.51 a 0.29 mg kg^{-1} y el manganeso de 2.66 a 0.02 mg kg^{-1} (Tabla 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), este suelo tiene un horizonte árgico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo. Tiene una textura migajón arcilloso arenoso sobre migajón arcilloso. Presenta cutanes por eluviación y saturación de bases ≥ 50 %.

Contiene un pH que se clasifica como moderadamente ácido (6.3–5.8). La CE todos los valores se encuentran $< 2 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ se considera ligeramente salino. La MO en niveles de bajo a muy altos (1.1–11.6). De muy rico a pobre (0.45-0.03%) el N total. En niveles muy altos se encuentra el P extraíble ($69.31\text{-}32.22 \text{ mg kg}^{-1}$). El K se encuentra en la clase baja y muy baja ($0.24\text{-}0.07 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$). El Ca en niveles, altos, medios y bajos con rangos que van de 10.19 a $4.78 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$. El Mg en niveles altos y medios ($3.82\text{-}2.19 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$). La CIC se clasifica como baja y alta con rangos de 8.75 a $27.23 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ (Tabla 3). 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} , el manganeso de 14.36 a 1.18 mg kg^{-1} .

Densidad de longitud de raíces finas (DRL)

La DLR en los tres sitios de la pendiente (alta, media y baja) y a las dos distancias del tronco (50 y 100 cm) muestra un comportamiento similar, mientras que en las tres profundidades muestreadas (20, 40 y 60 cm) se puede observar que existe diferencia significativa (Tabla 4), indicando que a mayor profundidad la DLR disminuye (Figura 3)

Tabla 3. Análisis físicos y químicos de suelo en la zona cafetalera de Custepec, Chiapas en tres posiciones de la pendiente.

Ho (cm)	pH (H ₂ O) rel. 1:2	CE (dSm ⁻¹)	MO	N	P Olsen (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	CIC	Ac. Int.	SB %	Da (g/cm ³)	Fe	Cu	Zn	Mn	Arcilla	Limo %	Arena	Textura
			%		(Cmol _e kg ⁻¹)							(mg k ⁻¹)									
Perfil 1. Posición alta, Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric) (N 15° 44' 33" y O 92° 59' 00")																					
A1 0-22(47)	5.8	0.09	11.3	0.40	49.31	0.15	3.93	2.17	0.10	7.78	6.55	96.32	1.15	6.75	1.28	1.10	2.44	31	27	43	Migajón arcilloso
Bt1 22-44	6.4	0.02	4.2	0.15	22.08	0.14	3.30	1.56	0.09	6.81	2.40	97.22	1.07	7.54	1.20	1.06	0.10	43	21	37	Arcilla
Bt2 44-91	6.7	0.03	1.3	0.06	12.78	0.12	3.25	1.32	0.09	6.81	0.75	95.17	1.03	7.24	0.52	0.80	0.08	49	29	23	Arcilla
C1 91-200	6.5	0.02	1.1	0.03	11.81	0.10	3.06	1.29	0.08	5.84	0.63	96.89	1.07	7.00	0.37	0.72	0.06	43	27	31	Arcilla
Perfil 2. Posición media, Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Loamic) (N 15° 44' 34" y O 92° 59' 00")																					
A1 0-23	5.8	0.10	9.2	0.35	11.11	0.10	2.71	1.26	0.08	6.81	5.33	94.48	1.04	11.49	0.28	0.51	2.66	47	31	23	Arcilla
A-B 23-(36-42)	5.7	0.07	4.5	0.20	9.17	0.07	2.59	0.95	0.07	4.86	2.60	91.57	1.05	8.16	0.22	0.44	2.12	45	25	31	Arcilla
Bw1 (36-42)-83	5.9	0.02	2.1	0.08	5.69	0.06	2.38	0.79	0.07	3.89	1.21	95.78	1.08	7.76	0.12	0.39	0.16	41	45	15	Arcilla limosa
C1 83-147	5.7	0.02	1.5	0.07	5.56	0.06	0.75	0.36	0.06	2.92	0.87	78.27	1.15	5.96	0.08	0.34	0.04	31	49	21	Migajón arcilloso
C2 147-200	5.8	0.01	1.3	0.05	1.67	0.05	0.42	0.59	0.03	1.95	0.75	71.27	1.17	1.76	0.04	0.29	0.02	29	51	21	Migajón arcilloso
Perfil 3. Posición baja Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutrico, Humic) (N 15° 44' 36" y O 92° 59' 00")																					
A1 0-30	5.8	0.07	11.6	0.45	69.31	0.24	10.19	3.82	0.16	27.23	0.15	99	1.17	12.45	0.76	1.76	14.36	29	23	49	Migajón arcilloso arenoso
Bt1 30-63	6.1	0.03	4.2	0.15	44.44	0.08	9.79	3.01	0.13	12.64	0.15	98.89	1.10	11.16	0.22	0.83	5.40	37	25	39	Migajón arcilloso
Bt2 63-(100-120)	6.3	0.06	1.1	0.04	34.72	0.08	5.81	2.68	0.11	9.73	0.15	98.35	1.10	7.66	0.12	0.49	3.56	37	27	37	Migajón Arcilloso
C (110-120)-165	6.2	0.03	1.1	0.03	32.22	0.07	4.78	2.19	0.10	8.75	0.44	94.23	1.13	5.71	0.06	0.44	1.18	33	29	39	Migajón Arcilloso

Tabla 4. Comportamiento de la densidad de longitud de raíces en tres posiciones fisiográficas (alta, media y baja), tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm), dos distancias horizontales del tronco (50 y 100 cm) y sus interacciones entre ellos.

FV	SC	GL	CM	F	Prob. de F
Sitio	14.79	2	7.39	0.307	0.7376
Profundidad	421.02	2	210.51	8.739	0.0008**
Distancia	11.91	1	11.91	0.495	0.4864
Sitio x Profundidad	45.71	4	11.43	0.474	0.7542
Sitio x Distancia	23.86	2	11.93	0.495	0.6135
Profundidad x distancia	15.64	2	7.82	0.325	0.7249
Sitio x profundidad x distancia	54.86	4	13.72	0.569	0.6865
Error	867.17	36	24.09		

En la Figura 3 se observa que la mayor concentración de la DLR finas se localiza en la profundidad de 0-20 cm con 6.97 km m^3 (89.95 %), siendo significativamente diferente de las profundidades 20-40 cm con $.51 \text{ km m}^3$ (7.31 %) y 40-60 cm con $.19 \text{ km m}^3$ (2.72 %).

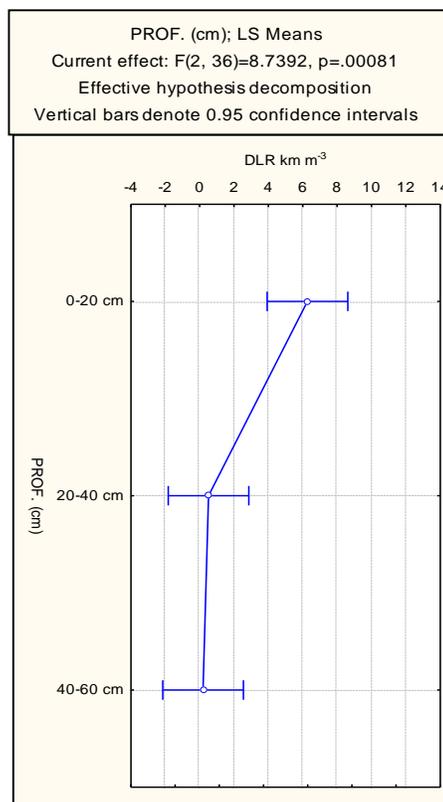


Figura 3. Densidad promedio de longitud de raíces finas (DLR) de *Coffea arabica* L. a tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm).

1.4 Discusión

Clasificación de suelos

Los suelos identificados en las diferentes posiciones fisiográficas de la pendiente difieren entre sí, en congruencia con lo encontrado por Zavala *et al.* (2014), que indican que, los tipos de relieve determinan la localización y desarrollo de los grupos de suelo. El suelo más intemperizado, el Lixisol, se localizó en la parte alta de la pendiente, se caracteriza por tener un mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en la superficie, debido a procesos pedogenéticos, especialmente a la migración de arcilla provocando la formación de un horizonte árgico en el subsuelo (IUSS Working WRB 2014). Lo anterior hace alusión al significado del nombre, derivado del latín (que significa lavar y eliminar). Principalmente se desarrollan sobre materiales no consolidados de textura fina y que ha sufrido una fuerte alteración y lavado, predominan en terrenos viejos sometidos a una fuerte erosión (Palma-López *et al.* 2007). El calificador Haplic se refiere a una expresión típica de ciertos rasgos y sólo se usa si no aplica ninguno de los calificadores previos. Para los calificadores de segundo orden: Clayic indican la presencia de texturas arcillosas dominantes en el primer metro de profundidad; Cutanic indica la presencia de revestimiento de arcillas en algunas partes de del horizonte árgico; Hypereutric denota una saturación de bases ≥ 50 % y 80 % o más en alguna capa dentro de los 100 cm (IUSS Working WRB 2014). Desde el punto de vista nutrimental presenta un pH moderadamente ácido (Salgado *et al.* 2013) sin problemas para el óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo (Melke e Ittana 2015), el valor de pH encontrado son resultado de diversos factores pero sobre todo por una precipitación promedio anual alta de 2,021 mm, los niveles de MO, N total y P extraíble son altos NOM-021-RECNAT (SEMARNAT 2002) principalmente en el primer horizonte. La cantidad de MO presente se atribuye primordialmente a los arboles de sombra en el sistema de producción, que son podados cada ciclo, así como la aportación de residuos del cultivo y malezas. Torrente y Ladino (2009), caracterizando las propiedades fisicoquímicas de los suelos de una zona cafetalera en Colombia encontraron un nivel de MO alto 8.7%, lo contrario para fósforo que en esos suelos fue bajo. El nivel de fósforo en el área de estudio puede ser efecto del plan de fertilización tradicional a través del tiempo basado en análisis de suelo de forma muy general, donde las fórmulas comerciales aplicadas contienen cantidad considerable de este elemento realizando en promedio dos aplicaciones de 70 gramos por planta, además no se considera el suministro del suelo, demanda del cultivo, ni factores como sombrero, densidad y topografía del terreno haciendo que este

elemento se acumule. El K y Ca se encuentran niveles bajos, el Mg en nivel medio. Con respecto a los micronutrientes, el Fe se clasifica como adecuado $> 4.5 \text{ mg kg}^{-1}$, el Cu adecuado $> 0.2 \text{ mg kg}^{-1}$, el Zn de adecuado $> 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ a marginal $0.5 - 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ y el Mn de adecuado $> 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ a deficiente $< 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ (NOM-021-RECNAT 2002). Rosas *et al.* (2008) registra contenidos de Fe (28.96 mg kg^{-1}) superiores a los encontrados en esta investigación en el estado de Chiapas a una profundidad de 30 cm. La asimilabilidad de microelementos se ve afectada principalmente por factores como: pH, la MO, textura, la actividad microbiana, el régimen hídrico y el drenaje, y las condiciones oxidorreducción (Salgado *et al.* 2006).

El suelo Cambisol está relacionado a la posición media de la pendiente, con un perfil bien drenado, tiene un horizonte B cámbico con $\geq 50 \%$ de saturación de bases; carecen de propiedades sálicas; no tiene propiedades gléyicas dentro de los 50 cm, ni tiene horizonte de acumulación de arcilla (árgico) a diferencia de los otros suelos estudiados. Presentan apenas un ligero desarrollo en sus horizontes subsuperficiales, por ello se considera como intermedios entre las otras unidades de suelo (Palma-López *et al.* 2007). El calificador Eutric hace referencia a una saturación de bases $\geq 50 \%$, Sideralic evidencia materiales minerales del suelo con una CIC relativamente baja $< 24 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ de arcilla. Para los calificadores de segundo orden: Clayic presenta texturas arcillosas dominantes en el primer metro de profundidad; Humic por poseer más de 1% de carbono orgánico a una profundidad de 50 cm (IUSS Working WRB 2014). Considerando sus propiedades presenta un pH moderadamente ácido, sin problemas de salinidad (Salgado *et al.* 2013), a diferencia de la MO, N total y P extraíble en los primeros horizontes que se encuentran en niveles altos y disminuyen conforme la profundidad. El K, Ca y Mg están en niveles bajos (NOM-021-RECNAT 2002). En Cuba, Pérez *et al.* (2011) 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 hojarasca, tanto por el café como por los árboles (leguminosas) utilizados como sombra, la presencia de determinadas cantidades 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. Resultados similares son reportados en Costa Rica y Chiapas con respecto a la MO y N total (Jean-Michel 2007, Pérez *et al.* 2011). La disminución del N conforme aumenta la profundidad está relacionado con la génesis del suelo y el descenso de la MO (Palma-López *et al.* 2015). Los contenidos de micronutrientes indican que el Fe se clasifica como adecuado $> 4.5 \text{ mg kg}^{-1}$ a deficiente $< 2.5 \text{ mg kg}^{-1}$, el Cu en rangos adecuados > 0.2 a deficiente $< 0.2 \text{ mg}$

kg⁻¹, el Zn de marginal 0.5 – 1.0 a deficiente < 0.5 mg kg⁻¹ y el Mn de adecuado > 1.0 a deficiente < 1.0 mg kg⁻¹.

El Luvisol fue identificado en la posición baja de la pendiente con un perfil imperfectamente drenado. Las características encontradas coinciden con las descritas por Palma-López *et al.* (2007), un horizonte B árgico con una CIC ≥ 24 Cmol (c) kg⁻¹ de arcilla y una saturación de bases ≥ 50 %. Con respecto a los calificadores Haplic se refiere al suelo con una expresión típica de ciertos rasgos usándose únicamente si no aplican los otros calificadores principales. Para los calificadores de segundo orden: Loamic indica que tiene texturas francas dominantes en el primer metro de profundidad, Cutanic indica la presencia de recubrimientos de arcilla en el horizonte árgico, Hypereutric por poseer una saturación de bases $\geq 50\%$ y 80% o más en alguna capa dentro de los 100 cm, Humic existencia de $\geq 1\%$ de carbono orgánico a una profundidad de 50 cm (IUSS Working WRB 2014). Nutritionalmente la mayoría de los parámetros evaluados son considerados en niveles altos en los primeros centímetros del suelo a excepción del K que es bajo. El hierro se clasifica como adecuado > 4.5 mg kg⁻¹, el cobre de adecuado > 0.2 mg kg⁻¹ a deficiente < 0.2 mg kg⁻¹, el Zn en niveles adecuado > 1.0 mg kg⁻¹, marginal 0.5 – 1.0 mg kg⁻¹ y deficiente < 0.5 mg kg⁻¹, el Mn adecuado > 1.0 mg kg⁻¹. (NOM-021-RECNAT 2002), lo que indica que la calidad química del suelo en el primer horizonte es buena (Palma-López *et al.* 2015), se atribuye a que al estar en la posición baja de la pendiente es un sitio receptor acumulando materiales orgánicos y minerales, presentando buen estado de conservación producto de la baja intensidad de la erosión (Zavala *et al.* 2014). Son suelos fértiles y apropiados para un rango amplio de usos agrícolas, en pendientes fuertes requiere medidas de control de la erosión (IUSS Working WRB 2014).

Los tres suelos en el primer horizonte presentan una estructura fuertemente 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 Krasilnikov (2011) no presenta evidencias de hidromorfismo y poseen un color más rojo (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 anterior atribuido principalmente por los ritmos sucesivos de acumulación (Bautista *et al.* 1998). El Cambisol posición media, considera que al encontrarse en la parte media son suelos menos erosionados (Porta *et al.* 2003), además no presenta horizonte árgico, en comparación del Luvisol que presenta alto contenido de arcilla, que se ha

intemperizado dando origen al horizonte árgico formado por iluviación, de igual forma el Lixisol posición alta presenta un horizonte árgico derivado de la migración de arcillas (Salgado-Gracia *et al.* 2015). El suelo con las mejores características nutrimentales es el Luvisol en la posición baja, atribuido posiblemente al enriquecimiento natural por minerales arrastrados desde las laderas (Chinchilla *et al.* 2011), predominan la presencia de arena, característica que proporciona drenaje rápido al suelo, a pesar de ser una zona de acumulación de sedimentos (Uribe-Gómez *et al.* 2000). Cada subunidad tiene asociaciones de procesos morfo-dinámicos determinados por los efectos de la meteorización física y química impuesta en primera instancia por el clima regional y cuyos efectos participan en el conjunto de los procesos pedogenéticos primarios que originan la diferenciación de los suelos (Bautista *et al.* 1998)

Densidad de longitud de raíces finas

Con respecto al enraizamiento en las tres posiciones fisiográficas estudiadas, aun siendo suelos diferentes, se observa un comportamiento similar. Esto indica la adaptabilidad edáfica del cultivar a las unidades de suelo encontradas. En congruencia Soares *et al.* (2008) mencionan que la dinámica del sistema radicular es de vital importancia, al ser su función básica el de sustentar a la planta al absorber agua y nutrientes, considerando que el crecimiento de las raíces puede verse afectada por factores ambientales, recursos disponibles del suelo y las variaciones edafoclimáticas, a lo anterior Bustamante *et al.* (2015) añaden el factor genético, siendo la interacción de todos ellos los que afectan 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 analizadas (50 y 100 cm) presentan un comportamiento similar, indicando que la distribución es uniforme en las longitudes consideradas, datos similares fueron registrados por Partelli *et al.* (2006), encontraron que la arquitectura horizontal a 25 y 50 cm en la primera capa del suelo tienen una distribución espacial en la que no se encuentran diferencias. Arcila (2007) menciona que las raíces del café se extiende entre 1 y 1.5 m del tronco.

La distribución vertical de la DLR finas indican que el 89.95 % de las raíces finas se encuentran de 0-20 cm, disminuyendo a los 20 – 40 cm (7.31 %) y 40 – 60 cm (2.72 %). La distribución radical del café depende en gran medida de la genética del cultivar, condiciones físicas y químicas a lo largo del 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; mayor contenido de materia orgánica, textura, aireación, humedad y mayor disponibilidad de nutrientes.

DaMatta y Cochicho (2006) mencionan que las características del crecimiento de la raíz desempeñan un papel crucial en el mantenimiento del suministro de agua y nutrientes a la planta, el vigor del sistema radicular dependerá de las características de la demanda estacional de agua, propiedades químicas y físicas, profundidad del suelo y la distribución de la estación lluviosa. Partelli *et al.* (2014), reportaron que más del 65% de las raíces finas están en los primeros 20 cm de la superficie del suelo, el 10% en 40-60 cm, indicando que la decreciente concentración de las raíces a lo largo del perfil del suelo muestra un paralelismo con la disminución de nutrientes. Por su parte Argila (2007) indica que la mayor cantidad de raíces activas del cafeto se localizan en los primeros 30 cm de profundidad, el 86% de las raíces absorbentes. Pagotto *et al.* (2015), trabajando con cuatro cultivares de *Coffea arabica* a diferentes marcos de plantación encontraron mayor abundancia de raíces finas en los primeros 10 cm de profundidad y mostró una disminución a los 40 cm. 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, atribuyéndole a la gran variación en sentido vertical de las propiedades químicas y físicas del suelo. Resultados similares son reportados en *Eucaliptus globulus* hallándose la mayor cantidad de raíces finas (65.2 y 79.2%) en la zona del perfil que presentan menor resistencia mecánica (Gaitan y Penón 2003).

A pesar que entre cada sitio y tipo de suelo no existen diferencias estadísticas, se observa un mayor enraizamiento en el suelo Cambisol ubicado en la parte media, esto puede atribuirse a que el Lixisol y Luvisol presentan un horizonte árgico mostrando una tendencia en aumento de arcilla y compactación conforme aumenta la profundidad. Esta propiedad suele ser una limitante para el desarrollo radicular al no presentar cualidades óptimas para que la planta realice una absorción efectiva de agua y nutrientes minerales (Sánchez-Díaz y Aguirreolea 2013), esta habilidad se encuentra relacionada a su capacidad de desenvolver un extenso sistema radicular que le permita explorar constantemente nuevas zonas del suelo (Taiz y Zeiger 2006). Los resultados del presente estudio permiten sugerir una profundidad de muestreo 0-20 cm, lo que permite hacer una estimación de suministro de nutrientes más cercana a la realidad sobre todo si que se considera que diversos autores (Galvêas *et al.* 2007, Rosas *et al.* 2007, López *et al.* 2016) sugieren una profundidad de muestreo 0-30 y 0-40 cm, cuando se diagnostica la fertilidad de los suelos cafetaleros.

1.5 Conclusiones

Las características del suelo en las tres posiciones de la pendiente difieren entre sí, atribuyéndole a procesos de erosión, lixiviación de bases, argilización e intemperismo de arcilla que sufren con el tiempo de exposición y que se acentúa a lo largo de la pendiente lo que trae como resultado que pertenezca a diferentes grupos. Aunque el Luvisol en la posición baja presenta un horizonte argico posee mejores condiciones de fertilidad con respecto al Lixisol de la posición alta y Cambisol posición media, siendo este último el que no tiene horizonte árgico observándose un decremento en su contenido de arcilla conforme aumenta la profundidad. La mayoría de las características identificadas de los suelos Lixisol, Cambisol y Luvisol indican que se puede llevar a cabo la caficultura con base a los requerimientos del cultivo. No obstante las prácticas agronómicas deben realizarse bajo concepto de manejo sustentable de los suelos. Los suelos en estudio, principalmente el Lixisol y Cambisol, por el bajo contenido de nutrientes (potasio, calcio y magnesio), requieren de la generación de dosis de fertilización para satisfacer la demanda del cultivo y obtener rendimientos mayores. La mayor concentración de raíces finas (89.95 %) se encontró en los primeros 20 cm, disminuyendo conforme avanza la profundidad, su comportamiento en forma horizontal es similar a 100 cm de distancia del tronco. Estadísticamente el comportamiento radical en las posiciones de la pendiente y tipos de suelos fueron similares.

1.6 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. Agronomy* 35: 461-469.
- Arcila PJ (2007) Crecimiento y desarrollo del café. En: Arcila PJ, Farfán VF, Moreno BA, Salazar GLF, Hincapié GE. (eds) Sistema de producción de café en Colombia. FNC-Cenicafé. Chinchiná Colombia. 309 p.
- 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.
- Cardona-Calle DA, Sadeghian-Khalajabadi S (2005) Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y plena exposición solar. *CENICAFE* 56: 348-364.
- 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. 49 p.
- DaMatta MF, Cochicho RJD (2006) Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Plant Physiology* 18: 55-81.
- DaMatta FM, Ronchi PC, Maestri M, Barros SR (2007) Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant physiology*. 19: 485-510.
- Delgado R, Castro L, Cabrera EB, Mújica MJ, Caniche S, Navarro L, Noguera I (2008) Relación entre propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radical del maíz, cultivado en un suelo Fluventic haplustoll de textura franco-arenosa de Maracay, Venezuela. *Agronomía Tropical* 58: 245-255.
- Gaitán JJ, Penón EA (2003) Efecto de la resistencia mecánica del suelo sobre la densidad de raíces finas de *Eucalyptus globulus*. *Investigaciones Agrarias: Recursos Forestales* 12: 125-130.
- Garcia BVC, Sakai E, Bussmeyer AF, Alvez SE, De Matos PRC (2006) Distribuição espacial do sistema radicular do cafeeiro fertirrigado por gotamento em Campinas. *Bragantia*, 65: 641-647.
- Galvêas LB, Prieto MHE, Bartolomeu SR, Álvarez VH (2007) Dinâmica de calcio e magnesio em folhas e frutos de *Coffea arabica*. *Revista Brasileira de Ciência do solo* 31: 319-329.
- 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. 181 p.
- Jaurixje M, Torres D, Mendoza B, Henríquez M, Contreras J (2013) Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quibor, estado de Lara. *Bioagro* 25: 47-56.
- Partelli FL, Monzoli CA, Goes OM, Sobreira AR, Leandro VE, Barreto SM (2014) Root system distribution and yield of “Conilon” coffee propagated by sedes or cuttings. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 49: 349-355.
- Jean-Michel H, Ávila H, Dambrine E, Skiba U, De Miguel S, Vanessa RR, Oliver R, Jiménez F, Beer J (2007) Nitrogen dynamics and nitrate retention in a *Coffea arabica-Eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica. *Biogeochemistry* 85: 125-139.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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@mbiente 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.
- NOM-021-RECNAT (2002) Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la federación. SEMARNAT. Distrito Federal, México.* 85 p.
- Pagotto RC, De Sousa JJM, Luiz AW, Silva SD, Oliveira SN, Barbosa OL, Nogueira MGA, Afonso FP (2015) Morfología radicular de cultivares de café submetidas a diferentes arranjos espaciales. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 50: 187-195.
- 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.
- 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.* 180 p.
- 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 Naturales* 2: 163-172.
- Pereira BD, William AF, Guedes CJ, Guimaraes RJ, Abdao PAM, Alves PV (2010) *Coffee Science* 3: 272-282.
- Pérez DA, Bustamante GC, Martín AGM, Rivera ERA, Viñals NR, Rodríguez CMI (2011) Fertilización nitrogenada después de la poda del café robusta en Cambisoles. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 8: 935-943.
- Pérez PE, Bonilla CS, Hernández SJAM, Partida SJG (2011) 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. 960 p.

- Prieto MHE, Silva AH, Damião CC, Woods PA, Ferreira SN (2007) Crescimiento vegetativo de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) e sua correlação com a produção em espaçamentos adensados. *Acta Scientiarum. Agronomy* 29: 481-489.
- Quinto MH, Moreno HF, Caicedo MHY, Perez LMTY (2015) 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 nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana* 26: 375-384.
- 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 McGRAE-HILL INTERAMERICANA. Madrid, España. 639 p.
- Soares FTA, Gerra BD y Araujo CJG (2008) Dinâmica de raíces 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. 687 p.
- 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.
- Vargas MAC, Nick JA, Tiemi YG, MonteSB (2006) Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raíces de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuai. *Acta Scientiarum. Agronomy* 28: 455-463.
- Zavala 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: 123-137.
- Zini RB, Floriano TJPV, De Lima JM, Evaldo SM, Ribeiro BAR, Gontijo GPT, René C (2013) Doses de Gesso em cafeeiro: influencia nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH solucao de um Latosolo vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do solo* 37: 1018-1026.

CAPITULO II. DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL DE SUELO Y PLANTA EN CAFÉ
***Coffea arabica* L. EN LA ZONA DE CUSTEPEC, CHIAPAS**

DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL DE SUELO Y PLANTA EN CAFÉ *Coffea arabica* L. EN LA ZONA DE CUSTEPEC, CHIAPAS

Resumen

Con el objetivo de analizar la dinámica de nutrientes en dos épocas del ciclo productivo de café se realizaron análisis foliares y edáficos. El diagnóstico nutrimental se realizó en plantaciones de seis años de establecidas en la Finca Custepec municipio de La Concordia, Chiapas. El muestreo de suelos se realizó en tres posiciones de la pendiente (Alta, media y baja) y a dos profundidades 0-20 y 20-40 cm, en estos mismos sitios se realizaron los muestreos foliares, ambos en dos épocas del año; septiembre y febrero. En el suelo la materia orgánica se encuentra en niveles altos, el pH varía de fuertemente ácido a moderadamente ácido. Los contenidos de fósforo y nitrógeno total son altos, mientras que el potasio, calcio y magnesio bajos. Las concentraciones foliares mostraron al fósforo y potasio en niveles bajos, el azufre de medio a bajo, el calcio y magnesio de óptimos a altos, los micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) presentaron niveles bajos. En el suelo como en las hojas los contenidos de nutrientes se presentan en niveles relativamente más altos en la primera época evaluada que coincide con el periodo de lluvias y antes de la cosecha.

Palabras clave: Dinámica nutrimental, fertilidad, materia orgánica, micronutrientes.

Abstract

In order to analyze the nutrient dynamics in two periods of the coffee production cycle, foliar and edaphic analyzes were performed. The nutritional diagnosis was carried out in established plantations of six years on the Custepec farm of Concordia, Chiapas. Soil sampling was made in three positions of the slope (high, medium and low) and at two depths (0-20 and 20-40 cm), the leaf sampling was done twice in one year (September and February) in these same sites. We found high levels of organic matter in the soil, the pH ranges were from strongly acid to moderately acidic. The contents of phosphorus and total nitrogen were high, while the potassium, calcium and magnesium were low. Foliar concentrations showed low levels of phosphorus and potassium, medium to low sulfur, calcium and magnesium from optimum to high and low levels of micronutrients (Fe, Cu, Zn and Mn). Soil and leaves present a relatively higher level of nutrient contents in the first evaluated period that concur with the rainy season and before harvest.

Keywords: nutritional dynamics, fertility. Organic matter, micronutrients

2.1 Introducción

La producción cafetalera en el estado de Chiapas posee un alto valor económico y social (Flores 2015), siendo el principal productor del país con 260 129.43 hectáreas sembradas con un rendimiento de 1.58 t ha⁻¹ de café cereza (SIAP 2016). Los bajos rendimientos obtenidos pueden ser el reflejo de un inadecuado suministro de nutrientes y el desconocimiento de las técnicas de diagnóstico nutrimental de suelo, que permite identificar problemas de carácter nutrimental, así como no nutrimentales que pudiesen estar afectando, o pudiesen afectar en el futuro (Etchevers y Padilla 2007), como respuesta a lo anterior existe el diagnóstico nutrimental del cultivo, cuyo principio se fundamenta en el hecho de que en las plantas actúan solamente aquellos elementos que fueron absorbidos por ésta, del medio exterior. El método se basa en la determinación analítica de los niveles de nutrientes en la hojas recientemente maduras con el fin de diagnosticar el estado nutrimental de hojas metabólicamente activas y más sensibles a la variación en los nutrientes del suelo (Sánchez *et al.* 2007, Hissao y Da Silva 2015), cuya concentración puede variar por diversos factores como la cantidad y distribución de las precipitaciones, la especie, en el caso del café la asociación con árboles de sombra, la variación estacional, la topografía, el tipo de suelo y las prácticas culturales (Melke y Ittana 2015). Estos factores determinan también el rendimiento y calidad de los frutos (Alves 2004). El diagnóstico nutrimental constituye una herramienta poderosa para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a escala local, regional y global, su estudio debe hacerse de forma particular, según las condiciones de cada agroecosistema (García *et al.* 2012) y debe estar enfocado a la sostenibilidad. El conocimiento de determinadas características relacionadas a la fertilidad del suelo, asociada a repuestas de producción del café, facilitan la aplicación localizada y racional de insumos, con resultados ambientales y económicos positivos (Silva *et al.* 2012, De Jesús *et al.* 2015, Da Fonseca 2015). El conocer los requerimientos nutrimentales de la planta no es condición suficiente para obtener óptimas producciones, sino que es necesario además, tener en cuenta los requerimientos según los sistemas de cultivo, las cantidades y épocas de aplicación de los nutrimentos a utilizar (Arcila y Farfan 2007). La carencia del uso de diagnósticos nutrimentales ha generado prácticas de fertilizaciones inadecuadas o nulas, generando deficiencias y desbalances nutricionales; esto aunado a la poca investigación en nuestro país sobre el sistema de producción del café constituyen factores limitantes para los rendimientos de este cultivo. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue analizar la dinámica de nutrientes en

dos épocas del ciclo productivo en el cultivo del café mediante el monitoreo con análisis foliares y edáficos.

2.2 Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en plantaciones de café en la Finca Custepec, municipio de La Concordia Chiapas, México. Las coordenadas geográficas son 15° 44' 34" de latitud Norte y 92° 59' 00" de longitud Oeste (Figura 4). El clima predominante es semicalido con lluvias en verano (A)C(m). La temperatura media anual es de 18 °C y la precipitación 2 021 mm (CONAGUA 2015).

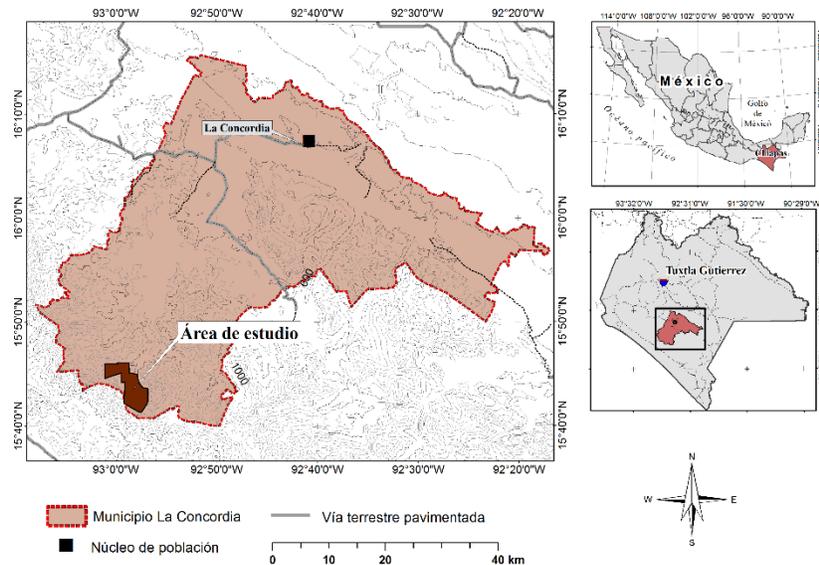


Figura 4. Localización del área de estudio.

Sitio de estudio

La plantación estudiada fue una renovación con seis años de edad variedad Catimor, establecida a doble postura con una densidad de 2 500 plantas por hectárea, en terrenos con pendientes de 45 %. Estas plantaciones se caracterizan por estar bajo sombra introducida principalmente de plantas del género *Inga*. El manejo agronómico brindado al cultivo fue con apego a lo que se realiza en la región, incluyendo la nutrición, la cual constó de dos aplicaciones al suelo de la fórmula comercial 19-04-19 la primera en el mes de junio y la segunda en agosto con 65 gramos cada una. Se realizó una aplicación de fungicida en el mes de mayo.

Muestreo de suelos

Considerando que el sitio en estudio cuenta con pendientes de 45%, se determinó realizar los muestreos en tres posiciones de la pendiente alta, media y baja, con cuatro repeticiones cada una, en parcelas de 10 x 10 m en dos épocas del año, la primera el 20 de septiembre atribuyéndole que a los 120 días después de la floración el grano ya absorbió la mayor concentración de nutrientes y la segunda el 10 de febrero correspondiente a la maduración y cosecha del grano. Se tomaron las muestras compuestas de suelo 1 kg en el área de goteo de los cafetos a dos profundidades de 0-20 y 20-40, que se formaron a partir de la mezcla de 15 submuestras tomadas en zig-zag, obteniéndose 24 muestras, las cuales fueron debidamente etiquetadas y en bolsas de polietileno fueron llevadas al laboratorio de suelo, agua y planta del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, para ser secadas a la sombra, molidas y tamizadas con malla 10 (Salgado-García *et al.* 2103, De Jesús *et al.* 2015). Con base a la NOM-021-RECNAT 2000, se determinaron los siguientes parámetros con fines de conocer la fertilidad: pH, relación suelo agua 1:2; materia orgánica (Walkey y Black); nitrógeno total (Semimicro Kjeldan); fósforo extraíble (P-Olsen); potasio, calcio, magnesio y sodio intercambiables (extracción con acetato de amonio 1 N, pH 7 cuantificación por absorción atómica); conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación por medición electrolítica (cationes y aniones solubles); acidez intercambiable por el procedimiento de cloruro de potasio. Se clasificaron las concentraciones de los parámetros evaluados según las NOM-021. Las muestras fueron tomadas en un diseño de bloques al azar con arreglo factorial con tres niveles, posición en la pendiente (alta, media y baja), dos épocas (septiembre y febrero) y dos profundidades (0-20 y 20-40 cm) con cuatro repeticiones.

Muestreo foliares

En los mismos sitios y las mismas épocas donde se realizaron los muestreos de suelo, se llevó a cabo el muestreo foliar. El muestreo se realizó de 6:00 a 9:00 AM cortando dos pares de hojas (un par de cada lado de la planta) en 25 plantas, las hojas retiradas corresponden al cuarto par de hojas, a partir del ápice, en dos ramas productivas (plagiotrópicas), a una altura media de la planta, con el cuidado de elegir ramas con alternancia en las fases de la exposición cardinal (Arizaleta *et al.* 2002, Quintão *et al.* 2010, De Oliveira 2015). Obtenidas las muestras se depositaron en papel de estraza perforadas y etiquetadas, debido a la distancia se trasladaron en una hielera ($4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$) (Salgado *et al.* 2013) al laboratorio de análisis de agua suelo y planta del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, donde fueron lavadas y enjuagadas con agua destilada, eliminando el exceso de

agua con papel absorbente. Las muestras fueron secadas a 65 °C en una estufa con circulación de aire forzado hasta peso constante, se molieron en un molino de acero inoxidable (Quintão *et al.* 2010, De Oliveira *et al.* 2015). Se determinó nitrógeno (semimicroKjeldahl) y P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, Mn y B por digestión con HNO₃ y HClO₄ (Alcántar *et al.* 1999). Los contenidos foliares se compararon e interpretaron con los propuestos por Jones *et al.* 1991 y Lima y Malavolta 2003.

Análisis estadístico

Para los contenidos de nutrientes en el suelo los parámetros se analizaron con apego a un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial donde se consideraron dos épocas (septiembre y febrero), tres posiciones fisiográficas de la pendiente (alta, media y baja) y dos profundidades (0-20 y 20-40). Para los contenidos foliares se analizaron con base a un arreglo factorial con un diseño completamente al azar, teniendo como factores dos épocas (septiembre y febrero) y tres posiciones fisiográficas de la pendiente (alta, media y baja). A los datos obtenidos se les realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey 0.05) realizado con el programa estadístico SAS versión 9.13.

2.3 Resultados

Propiedades químicas en el suelo a 0-20 cm de profundidad

Los niveles de pH en las tres posiciones fisiográficas de la pendiente son estadísticamente iguales, sin embargo, entre épocas hay diferencias significativas al presentar la primera un suelo fuertemente ácido (5.0) y la segunda moderadamente ácido (5.3) de acuerdo a la NOM-021. La conductividad eléctrica no presenta diferencias significativas entre las posiciones fisiográficas ni épocas y sus valores son bajos. Tanto con respecto a la posición de la pendiente como entre épocas, la MO presenta valores cuya diferencia no es significativa y se consideran como altos (10.38-11.05) según la norma NOM-021 (Tabla 5).

Tabla 5. pH, conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO) en tres posiciones de la pendiente (alta, media y baja), en dos épocas del año a 0-20 cm de profundidad en un suelo cafetalero en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	pH			CE (dS m ⁻¹)			MO (%)		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
1	2	1		2	1		2		
Alta	4.8b	5.28ab	5.04a	0.07a	0.06a	0.07a	11.3a	9.45a	10.38a
Media	5ab	5.15ab	5.08a	0.08a	0.12a	0.1a	11.18a	10.93a	11.05a
Baja	5.2ab	5.55a	5.38a	0.07a	0.07a	0.07a	9.13a	12.3a	10.71a
\bar{X} época	5.0b	5.33a		0.07a	0.08a		10.53a	10.89a	
CV (%)	5.82			46.19			17.24		
Prob. de F Para:									
Época (E)	0.0164*			0.6897ns			0.6404ns		
Pendiente (P)	0.0735ns			0.1146ns			0.7686ns		
Interacción E*P	0.5623ns			0.405ns			0.0402*		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p < 0.05$). *Diferencias significativas. ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

El contenido de nitrógeno entre posición de la pendiente y épocas son estadísticamente iguales, y en niveles altos (0.41 a 0.45 %). Las posiciones de la pendiente no presentan significancia para el fósforo extraíble, manifestándose con altos contenidos (48.85-67.07 mg kg⁻¹) con respecto a la NOM-021, no obstante entre épocas existen diferencias significativas, presentando mayor contenido la época uno (72.27 mg kg⁻¹) con respecto a la dos (39.69 mg kg⁻¹). Para potasio en la parte alta de la pendiente presenta mayor contenido de este elemento (0.13 Cmol_(c) kg⁻¹) siendo significativamente diferente con respecto a la posición media y baja (0.06-0.04 Cmol_(c) kg⁻¹ respectivamente). Sin embargo entre épocas no son significativamente diferentes (Tabla 6), y las concentraciones son muy bajas (0.09-0.07 Cmol_(c) kg⁻¹ para las épocas uno y dos respectivamente) de acuerdo a la NOM-021.

Tabla 6. Nitrógeno total (N), fósforo extraíble (P) y potasio intercambiable (K) en dos épocas del año, a 0-20 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	N (%)			P (mg kg ⁻¹)			K (Cmol _(c) kg ⁻¹)		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
	1	2		1	2		1	2	
Alta	0.46ab	0.37b	0.41a	57.54a	40.17a	48.85a	0.15a	0.12ab	0.13a
Media	0.46ab	0.44ab	0.45a	94.76a	39.37a	67.07a	0.04a	0.03b	0.06b
Baja	0.38ab	0.53a	0.45a	64.52a	39.52a	52.02a	0.08ab	0.05ab	0.04b
\bar{X} época	0.43a	0.45a		72.27a	39.69b		0.09a	0.07a	
CV (%)	16.44			50.93			60.44		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.6564ns			0.0118*			0.2472ns		
Pendiente (P)	0.4869ns			0.4119ns			0.0021**		
Interacción E*P	0.0079**			0.389ns			0.8542ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). * Diferencias significativas. ** Diferencias altamente significativa. ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

El calcio, magnesio y sodio intercambiables (Tabla 7), no presentan diferencias significativas entre pendientes ni épocas, presentando valores bajos, medios y bajos según la NOM-021, respectivamente. Es importante señalar que aunque no son significativamente diferentes, existe una disminución en el contenido de estos elementos en la segunda temporada con respecto a la primera.

Tabla 7. Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y sodio (Na) intercambiables a 0-20 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	Ca (Cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)			Mg(Cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)			Na (Cmol _(c) kg ⁻¹)		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
	1	2		1	2		1	2	
Alta	4.12a	3.62a	3.87a	2.14a	1.57a	1.85a	0.13a	0.08a	0.1a
Media	3.5a	3.04a	3.27a	1.9a	1.64a	1.77a	0.28a	0.13a	0.21a
Baja	4.17a	3.37a	3.77a	2.32a	1.63a	1.97a	0.28a	0.22a	0.25a
\bar{X} época	3.93a	3.34a		2.12a	1.61a		0.23a	0.14a	
CV (%)	67.99			71.79			109.17		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.5688ns			0.3636ns			0.3162ns		
Pendiente (P)	0.8738ns			0.9531ns			0.3415ns		
Interacción E*P	0.9893ns			0.9452ns			0.857ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). ns: no significativo. \bar{X} P: media de la pendiente.

En la Tabla 8 la Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (CICe) no muestra diferencias significativas entre épocas ni pendientes, lo que muestra que hay similitud a lo largo de la pendiente y en las diferentes épocas evaluadas. En cambio la acidez intercambiable (Al+H intercambiables) indica que existen diferencias significativas entre épocas. Es de destacar que a pesar de la acidez del suelo los valores de la acidez intercambiables son relativamente bajos.

Tabla 8. Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) y acidez intercambiable (Al+H) a 0-20 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	CICe			Al+H		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
	1	2		1	2	
Alta	6.71a	5.52a	6.12a	0.32a	0.22	0.27a
Media	5.86a	4.92a	5.39a	0.41a	0.22	0.32a
Baja	6.88a	5.24a	6.06a	0.32	0.19	0.25a
\bar{X} época	6.48a	5.23a		0.35a	0.21b	
CV (%)		60.44			54.4	
Prob. De F Para:						
Época (E)		0.3958ns			0.0413*	
Pendiente (P)		0.9012ns			0.6872ns	
Interacción E*P		0.9796ns			0.8226ns	

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

Propiedades químicas en el suelo a 20-40 cm profundidad.

En las posiciones de la pendiente el pH no muestra diferencias significativas, pero si entre épocas, la primera presenta un valor fuertemente ácido (4.95), mientras que la segunda época moderadamente ácido (5.36). En las épocas y posición de la pendiente la CE no muestra diferencias significativas, presentando valores bajos (0.06 – 0.09 dS m^{-1}). No se presentan diferencias significativas en la MO entre la posición de la pendiente y épocas (Tabla 9), aunque se detecta que la primera época tiene un valor menor (5.78 %) con respecto a la segunda (7.27 %), sin embargo todos los valores se consideran como altos para un suelo agrícola según la NOM-021-RECNAT 2002.

Tabla 9. pH, Conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO) a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	pH			CE (dS m ⁻¹)			MO (%)		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
1	2	1		2	1		2		
Alta	4.93a	5.2a	5.06a	0.07a	0.07a	0.07a	7.08a	6.63a	6.85a
Media	4.85a	5.25a	5.05a	0.07a	0.11a	0.09a	5.75a	8.95a	7.35a
Baja	5.08a	5.63a	5.35a	0.06a	0.05a	0.06a	4.5a	6.23a	5.36a
\bar{X} época	4.95b	5.36a		0.07a	0.08a		5.78a	7.27a	
CV (%)	7.68			58.65			33.66		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.0211*			0.5052ns			0.1133ns		
Pendiente (P)	0.2564ns			0.3435ns			0.1979ns		
Interacción E*P	0.7877ns			0.5322ns			0.2722ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p < 0.05$). * Diferencias significativas. ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

El N total no presenta significancia estadística entre las posiciones de la pendiente y épocas muestreadas (Tabla 10), no obstante estos valores son altos (NOM-021-RECNAT 2002). Se observa que en la segunda época existe un mayor contenido (0.31 %) con respecto a la primera (0.24 %). Para el fósforo extraíble presenta diferencias altamente significativas entre las pendientes, la posición media con el mayor contenido (50.99 mg kg⁻¹) es diferente de la parte alta (27.03 mg kg⁻¹) y baja (19.19 mg kg⁻¹). Las épocas evaluadas para el potasio intercambiable no presentan significancia, mientras que la posición alta (0.11 Cmol_(c) kg⁻¹) presenta diferencias significativas con respecto a la parte media (0.05 Cmol_(c) kg⁻¹) y baja (0.07 Cmol_(c) kg⁻¹), aunque todos ellos se consideran como niveles bajos (NOM-021-RECNAT 2002).

Tabla 10. Nitrógeno total (N), fósforo extraíble (P) y potasio intercambiable (K) a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente, en dos épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	N (%)			P (mg kg ⁻¹)			K (Cmol _(c) kg ⁻¹)		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
1	2	1		2	1		2		
Alta	0.28a	0.26a	0.27a	31.22a	22.85a	27.03b	0.13a	0.1a	0.11a
Media	0.24a	0.4a	0.32a	50.8a	51.18a	50.99a	0.06a	0.04a	0.05b
Baja	0.2a	0.29a	0.24a	27.01a	11.36a	19.19b	0.09a	0.05a	0.07b
\bar{X} época	0.24a	0.31a		36.34a	28.46a		0.1a	0.06a	
CV (%)	38.48			57.4			57.18		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.1006ns			0.3131ns			0.0766ns		
Pendiente (P)	0.4134ns			0.0082**			0.0301*		
Interacción E*P	0.2499ns			0.6941ns			0.9372ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). * Diferencias significativas. ** Diferencias altamente significativa. ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

Las concentraciones de calcio en cada una de las épocas y posición de la pendiente no son significativamente diferentes (Tabla 11). Con respecto al magnesio existe diferencia significativa entre posición de la pendiente, donde la parte alta tiene el contenido más alto (2.18 Cmol_(c) kg⁻¹). Entre las pendientes y épocas evaluadas el sodio no presenta diferencias significativas y muestra niveles bajos (NOM-021-RECNAT 2002).

Tabla 11. Calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) intercambiables a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente, en dos épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	Ca (Cmol _(c) kg ⁻¹)			Mg (Cmol _(c) kg ⁻¹)			Na (Cmol _(c) kg ⁻¹)		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
1	2	1		2	1		2		
Alta	3.63a	3.31a	3.47a	2.47a	1.89a	2.18a	0.21a	0.09a	0.15a
Media	3.34a	2.79a	3.06a	1.07a	0.92a	0.99b	0.33a	0.24a	0.28a
Baja	4.16a	3.38a	3.77a	1.89a	1.34a	1.62ab	0.1a	0.06a	0.08a
\bar{X} época	3.71a	3.16a		1.81a	1.38a		0.21a	0.13a	
CV (%)	44.87			55.53			103.94		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.390ns			0.2536ns			0.2574ns		
Pendiente (P)	0.6622ns			0.0481*			0.0852ns		
Interacción E*P	0.956ns			0.8665ns			0.8834ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

La CICE y la acidez intercambiable no muestran diferencias significativas para posiciones de la pendiente ni épocas a esta profundidad.

Tabla 12. Capacidad de intercambio efectiva (CICE) y acidez intercambiable (AI+H) a 20-40 cm de profundidad en tres posiciones fisiográficas de la pendiente en dos épocas del año, en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	Cice			AI+H		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
	1	2		1	2	
Alta	6.57a	5.49a	6.03a	0.34a	0.20a	0.27a
Media	4.86a	4a	4.43a	0.39a	0.27a	0.33a
Baja	6.38a	5.02a	5.7a	0.25a	0.24a	0.24a
\bar{X} época	5.94a	4.83a		0.32a	0.24a	
CV (%)		35.61			42.06	
Prob. De F Para:						
Época (E)		0.1764ns			0.0797	
Pendiente (P)		0.2399ns			0.3893	
Interacción E*P		0.9652ns			0.4491	

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

Nutrientes Foliare en el café

El contenido foliar de N entre épocas y posiciones de la pendiente no son significativamente diferentes (Tabla 13). El fósforo presenta diferencias altamente significativas entre épocas, la primera presenta un mayor contenido (0.11 %) con respecto a la segunda (0.05 %). Para potasio su contenido entre la primera época (1.06 %) y segunda (0.81 %) muestra que existen diferencias significativas, mientras que entre posición de la pendiente son iguales.

Tabla 13. Concentración foliar (%) de nitrógeno (N), fósforo y potasio en *Coffea arabica* L. en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	N			P			K		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
1	2	1		2	1		2		
Alta	3.08a	2.64a	2.86a	0.13a	0.06ab	0.09a	1.18a	0.89a	1.03a
Media	3.01a	2.81a	2.91a	0.09ab	0.03a	0.09a	0.94a	0.73a	0.83a
Baja	3.43a	2.89a	3.16a	0.11ab	0.07ab	0.06a	1.05a	0.82a	0.93a
\bar{X} época	3.17a	2.78a		0.11a	0.05b		1.06a	0.81b	
CV (%)	29.13			54.37			26.78		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.2816ns			0.0035**			0.0261*		
Pendiente (P)	0.7607ns			0.2238ns			0.3024ns		
Interacción E*P	0.9251ns			0.8133ns			0.9412ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). * Diferencias significativas. ** Diferencias altamente significativa. ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

El contenido de calcio entre épocas son significativamente diferentes, donde la primera época presenta la mayor concentración (3.4 %) con respecto a la segunda (2.37 %) (Tabla 14). Entre posición de la pendiente hay diferencias altamente significativas, teniendo la mayor concentración de este elemento la posición alta (4.78 %). Para magnesio existe diferencias altamente significativas entre épocas, la primera con 1.16 % y la segunda 0.72 %, la posición de la pendiente presentan diferencias altamente significativas con la mayor concentración en la parte baja y media (1.35 % y 1.11 %). Diferencias muy significativas se encontraron para azufre (S) en las épocas evaluadas, presentando la primera el mayor contenido en la primera época (0.11 %), que la segunda (0.08 %). Entre posición de la pendiente no existen diferencias significativas.

Tabla 14. Concentración foliar (%) de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) en el cultivo del café (*Coffea arabica* L.) en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año.

Posición pendiente	Ca			Mg			S		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
	1	2		1	2		1	2	
Alta	5.62a	4.13ab	4.87a	0.42de	0.3e	0.36b	0.11a	0.09a	0.1a
Media	2.54bc	1.8bc	2.17b	1.45ab	0.77cd	1.11a	0.11a	0.07a	0.09a
Baja	2.04bc	1.18c	1.61b	1.61a	1.09bc	1.35a	0.11a	0.09a	0.1a
\bar{X} época	3.4a	2.37b		1.16a	0.72b		0.11a	0.08b	
CV (%)	39.12			21.53			17.56		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.0378*			<0.0001**			0.0019**		
Pendiente (P)	<0.0001**			<0.0001**			0.48ns		
Interacción E*P	0.7789ns			0.0355*			0.5978ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). * Diferencias significativas. ** Diferencias altamente significativas ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

En las épocas evaluadas el hierro presenta diferencias muy significativas, teniendo la mayor concentración en la primera época (48.12 %) (Tabla 15). Entre las posiciones de la pendiente existen diferencias altamente significativas, indicando que la posición media con 62.53 mg kg⁻¹ es diferente de las posiciones alta y baja (33.7 y 21.18 mg kg⁻¹, respectivamente). El cobre presenta diferencias altamente significativas para las épocas evaluadas, la primera con 9.37 mg kg⁻¹ y la segunda con 3.0 mg kg⁻¹. Presenta además diferencias muy significativas entre las pendientes, donde la parte baja (9.58 mg kg⁻¹) es diferente de la media (3.8 mg kg⁻¹) y alta (5.18 mg kg⁻¹). El zinc entre épocas evaluadas muestra diferencias muy significativas, la primera época con 16.53 mg kg⁻¹ y la segunda con 8.9 mg kg⁻¹. Entre pendientes se encuentran diferencias altamente significativas, y la posición baja (20.9 mg kg⁻¹) es mayor que la alta (10.85 mg kg⁻¹) y media (6.4 %).

Tabla 15. Concentración foliar (mg kg^{-1}) de hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn) en *Coffea arabica* L. en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	Fe			Cu			Zn		
	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P	Época		\bar{X} P
1	2	1		2	1		2		
Alta	38.95bc	28.45bc	33.7b	6.15b	4.2b	5.18b	12.6b	9.1b	10.85b
Media	76.2a	48.85bc	62.53a	4.95b	2.65b	3.8b	7.85b	4.95b	6.4b
Baja	29.2bc	13.15c	21.18b	17a	2.15b	9.58a	29.15a	12.65a	20.9a
\bar{X} época	48.12a	30.15b		9.37a	3b		16.53a	8.9b	
CV (%)	30.41			43.32			38.13		
Prob. De F Para:									
Época (E)	0.0016**			<0.0001**			0.0012**		
Pendiente (P)	<0.0001***			0.0011**			<0.0001**		
Interacción E*P	0.3733ns			0.0001**			0.0185*		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). * Diferencias significativas. ** Diferencias altamente significativa. ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

El manganeso (Mn) no presenta diferencias significativas entre posición de la pendiente ni entre épocas, aunque se observa una mayor concentración en la primera época con respecto a la segunda.

Tabla 16. Concentración foliar (mg kg^{-1}) de manganeso (Mn) en *Coffea arabica* L. en diferentes posiciones fisiográficas y épocas del año en la finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición pendiente	Mn		
	Época		\bar{X} P
1	2		
Alta	99.65a	41.95a	70.8a
Media	53.85a	30.35a	42.1a
Baja	73.85a	47.35a	60.6a
\bar{X} época	75.781a	39.88a	
CV (%)	93.56		
Prob. De F Para:			
Época (E)	0.1215ns		
Pendiente (P)	0.5709ns		
Interacción E*P	0.7853ns		

Letras iguales dentro de hileras y columnas indica que no existe diferencia significativa (Tukey $p \leq 0.05$). ns: No significativo. \bar{X} P: Media de la pendiente.

2.4 Discusión

El pH encontrado en las profundidades estudiadas, épocas y posición de la pendiente se clasifican de fuertemente ácido (< 5.0) a moderadamente ácido (5.1-6.5) según la NOM-021-RECNAT 2002. Resultados similares reporta López *et al.* (2016), quienes estudiaron las propiedades de suelos cafetaleros en el estado de Chiapas y lo clasificaron como moderadamente ácido (5.08). En congruencia, Rosas *et al.* (2008) caracterizaron los suelos en cinco estados de la República Mexicana, y registraron valores de pH que varían de 4.7 a 5.0. Los suelos con pH inferiores a 5.1 presentan características desfavorables para el desarrollo del cultivo, como pueden ser limitada disponibilidad de K, Ca, Mg y P y aumenta la disponibilidad de Al y Mn que en niveles altos pueden ser tóxicos para las plantas (Castro *et al.* 2013, Salgado *et al.* 2015). Aunque el café es un cultivo que tolera la acidez el pH óptimo para su desarrollo es 5.5-6.0 (Melke y Ittana 2015), por ello la acidez del suelo debe corregirse con la práctica del encalado sobre el área de goteo, debido a que es el lugar donde existe mayor acidez por la aplicación de fertilizantes y absorción de bases por el cultivo. El comportamiento del pH es homogéneo en las posiciones de la pendiente, indicando que las características topográficas no interfiere en esta propiedad (Conforti *et al.* 2016), sin embargo entre épocas tiende a presentarse un pH más ácido en la primera, correspondiente al periodo de lluvias, coincidiendo con los resultados encontrados por Sánchez-López *et al.* (2016), en un suelo de sabana observaron un incremento del pH en la época de seca con respecto a la época de lluvia. Lo anterior puede atribuirse a que en la zona de contacto del suelo y la raíz el pH disminuye por las excreciones de la raíz producto de la actividad microbiana, así la formación de ácidos orgánicos por la raíz abate el pH de esta zona, aunado a las altas precipitaciones explican como el agua disuelve las bases solubles y se pierden por lixiviación a través del perfil de suelo (Noriega *et al.* 2014).

Los contenidos de materia orgánica en el primer estrato 0-20 cm tanto para las dos épocas, como para la posición en la pendiente (Tabla 5) se consideran en niveles muy altos (> 6.0 %) (NOM-021-RECNAT 2002). Para la profundidad 20-40 cm en la época uno y la posición baja (Tabla 9) el contenido de MO se clasifica como alto (3.6-6.0), mientras que para la época dos, y las posiciones alta y media pertenecen a niveles altos (> 6.0). Los porcentajes encontrados aun en el segundo horizonte indican que los contenidos de MO disminuyen pero se encuentran en rangos favorables para el cultivo. Se esperaba que la posición baja presentará un mayor contenido de MO debido al proceso de acumulación y la posición alta menor cantidad debido a la erosión

(Krasilnikov *et al.* 2005) este parámetro demuestra ser estadísticamente homogéneo a lo largo de pendiente, así como entre épocas. Ramos-Hernández y Flores-Román (2008) en suelos del Soconusco, Chiapas, reportaron niveles de MO similares (9.8 %). Estos resultados concuerdan con los encontrados por Luna-Rodríguez *et al.* (2012) evaluaron agroecosistemas cafetaleros en los primeros 40 cm del suelo en Nicaragua, y encontraron entre 7.37 y 9.35 %. La MO es uno de los más aceptados como indicador de cambios en la calidad del suelo, aunque sus cambios son sensibles a los efectos del tipo de manejo y tipo de vegetación (Pulido-Moncada *et al.* 2010), definiendo la fertilidad, estabilidad y disturbios por erosión (Bautista *et al.* 2004). La mayor cantidad de MO presente en estos suelos proviene de hojarasca producida por las plantas de café y los árboles de sombra (López *et al.* 2016, Pérez *et al.* 2011), que al mineralizarse liberan apreciables cantidades de los diferentes nutrientes mayores y menores en forma gradual y muy aprovechable para los cultivos (Pérez-López 2013), llegando a ser la principal fuente de nitrógeno (Sadeghian 2011). En la mayoría de suelos cafetaleros la mineralización de la MO es afectada por la acidez, frenando el desarrollo de las bacterias y favoreciendo la alta proliferación de hongos y nulación de la actividad bacteriana (Noriega *et al.* 2014). Según la NOM-021-RECNAT (2002) el contenido de N en la profundidad de 0-20 cm (Tabla 6) en las diferentes épocas y pendientes son muy altos (> .25 %). Para la profundidad 20-40 cm (Tabla 9) en la primera época y la pendiente baja son altos (0.15-0.25 %), en la época dos, pendiente alta y media muy altos (> 0.25 %). Estadísticamente no muestran diferencias entre posiciones de la pendiente y épocas, pero esta última tiende a observarse en menor concentración en la época uno, dicho aumento puede deberse a la dinámica y alta movilidad de este elemento en la temporada de lluvias que se pierde por los diferentes procesos como desnitrificación, lixiviación, volatilización y erosión (Noriega *et al.* 2014, Sadeghian-Khaljabadi 2011). Los datos son contundentes con los reportados por Rosas *et al.* (2008) quienes encontraron que el contenido de nitrógeno total en suelos cultivados con café en Oaxaca y Chiapas fueron 0.41 % y 0.33 % respectivamente. Las concentraciones altas de N obedecen a los elevados contenidos de materia orgánica (Tabla 5), indicando que estas variables están correlacionadas (Palma-López *et al.* 2015), por su parte Cardona-Calle y Saheghian-Khaljabadi (2005) corroboraron que la materia orgánica es un buen indicador de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo mostrando un alto coeficiente de correlación (0.96). Una parte de los requerimientos de este elemento se suplen a través de la mineralización de la materia orgánica, variando significativamente en las diferentes regiones cafetaleras, normalmente entre el 5 y 25 %

(Sadeghian 2011), dicho proceso está relacionado con el tipo de materia orgánica, condiciones ambientales, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que condicionan la actividad de los microorganismos descomponedores (Do Mar *et al.* 2003, Cerón y Aristazábal 2012). Las concentraciones foliares de N fluctúan en niveles óptimos (2.3-3.0 %), y niveles altos (> 3.0 %) (Jones *et al.* 1991, Lima y Malavolta 2003) estos resultados indican que no existe efecto por la posición de la pendiente, contrastante a lo reportado por Liu *et al.* (2016) quienes mencionan que el N tiene una alta variabilidad espacial debido a los efectos de topografía, el clima y la vegetación. Las disminuciones de los niveles de N foliar son más evidentes en febrero, coincidiendo con la etapa de madurez del fruto. Cuando los contenidos de este nutriente se encuentran en niveles óptimos en dicho periodo, indica que hubo un buen suministro de este elemento (Valarini *et al.* 2005), así como de contenidos óptimos de materia orgánica mineralizable presente. Las concentraciones de N presentan variaciones a través del tiempo, sin tener una relación con respecto al crecimiento del fruto (Sadeghian *et al.* 2012).

Los valores de la conductividad eléctrica para la profundidad 0-20 (Tabla 1) y 20-40 (Tabla 9), así como para la posición de la pendiente y épocas evaluadas son iguales estadísticamente, se encuentran en concentraciones bajas < 1 dS m⁻¹ (NOM-021-RECNAT 2002), por lo que los efectos sobre la salinidad del suelo son casi nulos (Salgado *et al.* 2013). Los contenidos de fósforo en la profundidad 0-20 cm (Tabla 6) indican que, aunque exista diferencias significativas entre épocas ambos se clasifican como altos (> 11 mg kg⁻¹) (NOM-021-RECNAT 2002), al igual que los de cada posición de la pendiente. Para 20-40 cm aunque entre posiciones de la pendiente sea significativamente diferente la posición media con respecto a la alta y baja se clasifican como altos (>11 mg kg⁻¹), quedando en este mismo intervalo las épocas (Tabla 10). Aunque numéricamente sean diferentes los resultados de fósforo (29.60 mg kg⁻¹) encontrados por Rosas *et al.* (2008) en Chiapas se clasifican como alto, mientras que en Oaxaca encontró un resultado contrastante (4.44 mg kg⁻¹) considerado como bajo. Por su parte Vergara-Sánchez *et al.* (2005) en tres regiones del norte de Oaxaca reportan rangos medios (5.8 mg kg⁻¹ y 6.0 mg kg⁻¹) y bajo (4.4 mg kg⁻¹). El mayor contenido de P encontrado en la primera época (72.27 mg kg⁻¹) coincide con el mes de mayor precipitación en la zona (septiembre), siendo un factor fundamental para solubilizar este elemento, la lluvia (Ramos-Hernández y Flores-Román 2008). La segunda época presentó menor contenido correspondiendo a un mes seco, la disminución puede atribuirse a que cuando el suelo se aproxima al punto de marchitamiento, la actividad microbiana encargada de mineralizar el fósforo llega

prácticamente a anularse (Muñoz *et al.* 2011), por lo tanto la contribución a la dinámica del fósforo en el suelo se da por fases de mineralización-inmovilización microbianos, teniendo un papel esencial especialmente en la rizósfera (Cerón y Aristizábal 2012). Los altos contenidos de P encontrados puede atribuirse a las aplicaciones continuas de fertilizantes fosfatados combinado con su baja movilidad en el suelo (Zavala *et al.* 2014, Lopes *et al.* 2014), que al paso del tiempo se va acumulando (Núñez 2007). Los contenidos foliares indican que este elemento muestra mayor concentración en la primera época relacionado al periodo lluvioso, mientras que en posición de la pendiente muestran ser homogéneos, los porcentajes encontrados se clasifican como bajos (< 0.12 %) (Jones *et al.* 1991). Esto es contradictorio ya que se esperaría que al estar en altas concentraciones en el suelo (Tabla 9) estuviese en niveles foliares óptimos. La limitación del P puede atribuirse a la aplicación inadecuada de la fertilización en términos de cantidad y calidad de las fuentes de fertilizantes, o bien en el modo de aplicación o bien esta variedad no requiere tanto fósforo. La fijación de P por óxidos de Fe y Al puede ser otro factor que este alterando la eficiencia de absorción de este nutriente (Quintão *et al.* 2010).

El potasio en la profundidad 0-20 cm (Tabla 6), mostró diferencias estadísticas entre posiciones de la pendiente, aunque las tres se clasifican como muy bajas ($< 0.2 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$), al igual que las épocas evaluadas, en esta clase se incluyen también las concentraciones encontradas de 20-40 cm (Tabla 10) (NOM-021-RECNAT 2002), el comportamiento del potasio en las posiciones de la pendiente es inusual, era de esperarse que la parte alta presentara los contenidos más bajos al estar en una parte donde se llevan a cabo procesos de erosión (Krasilnikov *et al.* 2005) que no es el caso en este estudio, el K es uno de los elementos más limitantes para estos agroecosistemas (Yépez-Pacheco *et al.* 2006), su baja concentración en la posición media y baja puede estar relacionado con las mayores tasas de infiltración se llevan a cabo en estas partes de la pendiente (Martínez y Ruíz 2003), así como por la extracción del cultivo y el bajo suministro, el comportamiento entre épocas es estadísticamente igual. Resultados similares que se consideran en el rango bajo ($0.12 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$) fueron reportados en Chinchiná, Colombia, con estos niveles se encuentra una respuesta positiva en producción del cultivo del café a la aplicación de potasio (Henao-Toro y Hernández-Guzmán 2002). Por su parte Sadeghian-Khalajabadi (2009) menciona que para niveles de $0.20 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ ó $0.30 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ existe una probabilidad de respuesta al suministro de potasio, debiendo aplicarse las máximas dosis con el propósito de incrementar su nivel en el suelo para obtener altas producciones. Las bajas concentraciones de potasio pueden ser causas por el uso

de dosis insuficientes de fertilización, lixiviación, desequilibrio entre bases, baja CICE que impide que el K se almacene y por lo tanto se lixivia (Quintao *et al.* 2010), extracción de nutrientes por el cultivo al ser uno de los elementos de mayor demanda en la fase reproductiva (Sadeghian 2003). Los contenidos foliares de K en la primera época evaluada presenta mayor concentración que la segunda, no obstante al igual que las de cada posición de la pendiente se clasifican como bajas (< 2.0 %) (Jones *et al.* 1991, Lima y Malavolta 2003) esto se le atribuye en gran medida a las bajas concentraciones en el suelo de este elemento en cada posición de la pendiente que a los tipos de suelo y características topográficas (Conforti *et al.* 2016). Resultados similares encontraron Henao-Toro y Hernández-Guzmán (2002) en Chinchiná Colombia (0.91 %), registraron que la absorción de potasio depende de la concentración de calcio y magnesio en el suelo, además se correlaciona con su disponibilidad y concentración en el suelo. Altas producciones originan gran movilización de potasio de las hojas hacia los frutos, teniendo como efecto que las hojas presenten un agotamiento y posiblemente baja concentración foliar del elemento (Arizaleta *et al.* 2002). Sadeghian *et al.* (2012) afirman que conforme aumenta el crecimiento del fruto el potasio en las hojas tiende a reducirse. Es necesaria la aplicación de fertilizantes potásicos basados en los análisis de suelo y el nivel de productividad esperada (Da silva *et al.* 2015).

Las concentraciones de calcio en las profundidades 0-20 cm (Tabla 3) y 20-40 cm (Tabla 11) para las diferentes pendientes y épocas son similares y se clasifican como bajos (2-5 Cmol_(c) kg⁻¹) (NOM-021-RECNAT 2002). Resultados similares (2.59 Cmol_(c) kg⁻¹) se encontraron para el estado de Guerrero y contrastante al de Oaxaca (7.78 Cmol_(c) kg⁻¹) (Rosas *et al.* 2008). Valores por debajo de los niveles encontrados en esta investigación son reportados por Sadeghian *et al.* (2012) en cuatro lotes de la estación experimental de Cenicafe en Colombia: 2.62, 1.30, 0.4, 2.21 Cmol_(c) kg⁻¹. A través del tiempo bajo cualquier sistema de cultivo de café (a pleno sol y agroforestal) se presenta una disminución en las concentraciones de Ca en el suelo (Farfán-Valencia 2010), la deficiencia de este elemento es característico de ambientes ácidos, como los encontrados en este trabajo (Etchevers 1999). De Jesús *et al.* 2015 en Espirito Santo, Brasil, encontraron niveles elevados para calcio (>4.0 Cmol_(c) kg⁻¹) en cafetales asociado con *Hevea brasiliensis* en un relieve convexo, normalmente este nutriente es depositado a través de las enmiendas. En este sentido, debe tenerse en cuenta al momento de las enmiendas, no generar desbalances entre Ca, K y Mg (Zini *et al.* 2013, Machado *et al.* 2003) Los contenidos de calcio no se ven afectados por la posición de la pendiente, viéndose reflejado de la misma manera en las épocas que muestran ser estables.

El magnesio a 0-20 cm, tanto en posiciones de la pendiente como en épocas se encuentran en valores medios (1.3-3.0 $\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$). En la profundidad 20-40 cm la posición media de la pendiente se considera bajo (0.5-1.3 $\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$), para las posiciones alta y baja, así como para las dos épocas se clasifican como medios (1.3-3.0 $\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$) (NOM-021-RECNAT 2002). En congruencia Farfán-Valencia (2010) en Buenavista Quindio, Colombia reporta resultados similares en la concentración de magnesio (1.1 $\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$) a una profundidad de 0-30 cm, y un nivel más bajo para 30-60 cm (0.3 $\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$), menciona que bajo cualquier sistema de producción con café, tiende a presentarse una disminución en la concentración de Mg en el suelo a través del tiempo a profundidades de 0-30 cm. Es fundamental tener en cuenta que los pobres contenidos de Mg pueden estar estrechamente relacionado a los balances con nutrientes como Ca y K (Galindo 2013). El Mg puede ser suministrado al suelo a través de enmiendas cuando es ácido (Zini *et al.* 2013), con cal dolomítica que es el material que contiene este elemento además de aportar calcio (Salgado-García *et al.* 2016) o aplicando fertilizantes que contengan este elemento para incrementar los niveles en el suelo (Sadeghian 2003). Las precipitaciones en el área de estudio tienen un efecto de lavado y por lo tanto en la remoción de bases lo que genera problemas en la nutrición del cultivo (Uribe-Gómez *et al.* 2000) esto se relaciona con la baja CICE y pH encontrado. Los contenidos foliares de calcio, magnesio y azufre tienden a estar en mayores concentraciones en la primera época relacionados con la estación lluviosa. Los niveles de calcio en la primera época y posición alta se clasifican como altos (> 2.5%), mientras que la posición media, baja y época dos medios (1.0-2.5 %). La acumulación de los nutrientes puede variar entre sitios, dependiendo de las condiciones predominantes, así como a través del tiempo sin que puedan relacionarse con el desarrollo de los frutos, estando más bien relacionados con la disponibilidad de estos elementos para la planta, asociada al aporte de los nutrientes vía fertilización y a las lluvias (Sadeghian *et al.* 2013) por su parte Lima y Malavolta (2003) consideran niveles óptimos rangos de (0.75-1.5 %). El calcio en las hojas puede mantenerse en niveles óptimos incluso aumentar, esta tendencia revela que presenta poca movilidad dentro de la planta, por lo que pueden encontrarse por encima de los niveles indicados como óptimos con los contenidos de referencia (Valarini *et al.* 2005). En concentraciones altas dificulta la absorción de K, no obstante, en niveles óptimos favorece el aumento de los micronutrientes cuando estos están presentes (Quintão *et al.* 2010). El Mg se encuentra en niveles altos (>0.40 %) (Jones *et al.* 1991), a excepción de la posición alta en nivel óptimo (0.25-0.40 %) (Lima y Malavolta 2003). El Azufre se ubica en nivel medio (0.10-0.20 %)

para la época uno, posición alta y baja, la posición media y época dos en niveles bajos ($< 0.10 \%$) (Jones *et al.* 1991). La limitación del S puede atribuirse al uso de fertilizantes que no contienen este nutriente, así como a la lixiviación quedando fuera del alcance de las raíces (Quintão *et al.* 2010) en cada una de las posiciones de la pendiente. Las concentraciones de sodio en las dos profundidades, posición de la pendiente y épocas se consideran bajas (menores a $0.3 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$) (Etcheverts y Padilla 2007), valores que no ocasionan problemas de sodicidad (Salgado-García *et al.* 20015).

Niveles por arriba de los encontrados en la CICE en esta investigación, reporta Henríquez (2005) en café cultivado en Costa Rica ($8.41 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$), y los clasifica como cercanos al nivel crítico ($5 \text{ Cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). La disminución de la CICE tiene un importante efecto en las propiedades del suelo que puede ser producto del manejo agronómico, así como la poca restitución a partir de la fertilización y enclavado, con la consecuente disminución progresiva de bases del suelo. Con respecto a la acidez intercambiable, si se calcula su porcentaje de saturación, no rebasa 5.40% , indicando que se encuentra en el intervalo deseado para café $< 25 \%$. En congruencia Sadeghian y Zapata *et al.* (2012) en tres unidades de suelos cafetaleros en Colombia reportan resultados semejantes de acidez intercambiable, Libano $4.02 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$, Chinchiná Pereira $3.80 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ y San Simón $5.77 \text{ Cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$, la concentración de aluminio disminuye conforme aumenta el pH (Vergara-Sánchez *et al.*). La poca presencia de aluminio indica que la principal causa del aumento de la acidez es el H^+ (López *et al.* 2016) derivado de las diversas fuentes del suelo y principalmente de la alta humedad en el suelo. Con base a los resultados obtenidos se observa que no existe efecto en los contenidos de la CICE y $\text{Al} + \text{H}$ en cuanto a posición de la pendiente indicando que no hay procesos de erosión o arrastre que afecten este parámetro (Nzeyimana *et al.* 2016), sin embargo para la acidez intercambiable se aprecia un ligero incremento en la primera época relacionado al periodo de lluvias, lo cual concuerda con la disminución del pH que favorece la disponibilidad del aluminio presente en el suelo (López *et al.* 2016).

Los micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) presentan una tendencia a estar en mayor concentración en la primera época relacionado con el periodo lluvioso, en congruencia de ello, los cambios detectados pueden atribuirse a las oscilaciones de estos elementos en la solución del suelo, afectadas por la lluvia, así como por la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, gobernada por la humedad y la fertilidad del suelo (Sadeghian y Salamanca 2015). Según Jones *et al.* (1991) los contenidos de hierro se consideran bajos ($< 70 \text{ mg kg}^{-1}$), aunque entre épocas y

pendientes sean estadísticamente diferentes. No se ha encontrado un patrón que pudiese relacionar las variaciones de Fe foliar con el crecimiento de los frutos, los cambios que se observan en este elemento puede atribuirse a las fluctuaciones de estos elementos en la solución del suelo, afectados por la lluvia, antes que a la demanda de fruto (Sadeghian y Salmanca 2015). El cobre se encuentra en niveles bajos ($< 10 \text{ mg}$) (Jones *et al.* 1991). Este debe ser complementado en las plantaciones de café, la mayoría presentan una deficiencia relativa, debido a que no se suministra como nutriente si no que va inmerso en productos a base de cobre para el control sanitario (Da Silva *et al.* 2015). El zinc en la época uno y posición baja se encuentra en niveles medios ($12\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$), la segunda época posición alta y media en concentraciones bajas ($< 12 \text{ mg kg}^{-1}$) (Jones *et al.* 1991). En el cultivo del café el Zn es un elemento de suma importancia por inferir directamente en el crecimiento y producción (Benedito *et al.* 2015). Aunque el manganeso no presente diferencias estadísticas en épocas y posiciones se clasifican en diferentes rangos. La época uno posición media y baja se clasifican como óptimos ($50\text{-}100 \text{ mg kg}^{-1}$) (Lima y Malavolta 2003), la época dos y posición media en niveles bajos ($< 50 \text{ mg kg}^{-1}$) (Jones *et al.* 1991). El bajo contenido de Mn en tejido foliar, probablemente se debe a las bajas concentraciones de este elemento en el suelo, al poco o nulo suministro y a los efectos del pH (Prieto *et al.* 2015).

Es importante destacar que en los datos presentados no se toman en cuenta los niveles de B, por la razón que se consideraron como niveles no detectables en los resultados de los análisis. La deficiencia de boro puede atribuirse al poco suministro de este nutriente, en épocas secas se dificulta la absorción de este elemento, es transportado principalmente por flujo de masas, además de su inmovilidad en la planta (Quintão *et al.* 2010), es un elemento que demuestra ser deficiente en años de alta productividad (Prieto *et al.* 2003). La deficiencia de boro parece afectar más fuertemente el crecimiento reproductivo que el vegetativo, tal vez porque se reprimen la síntesis de citoquininas y la germinación del polen (Gutiérrez-Soto y Torres-Acuña 2013).

2.5 Conclusiones

El pH encontrado que va de fuertemente ácido a moderadamente ácido, el cultivo puede tolerarlo, sin embargo promueve la disponibilidad de aluminio, hierro, y manganeso que en exceso suelen ser tóxicos para el cultivo, además detiene la mineralización de la materia orgánica fuente importante de nitrógeno. Es importante el uso de enmiendas.

Los nutrientes muestran una disminución conforme aumenta la profundidad de 0-20 a 20-40 cm.

Los niveles de macro y micronutrientes tanto en suelo y plantas en las posiciones de la pendiente tienden a ser homogéneos sin que se observe influencia por la topografía, sin embargo entre épocas tiende a presentarse mayor concentración en la primera época (septiembre) que coincide con las precipitaciones favoreciendo la solubilidad de los nutrientes, mientras que en la segunda época (febrero) corresponde a la etapa de madurez del fruto donde se asume que el fruto ha asimilado todos los nutrientes necesarios.

Los altos contenidos de nitrógeno en el suelo se reflejan en los óptimos y altas concentraciones foliares en las posiciones de las pendientes y épocas evaluadas, observándose una relación con los altos contenidos de materia orgánica.

Los contenidos de fósforo en el suelo aunque entre posición de la pendiente y épocas se consideran altos, presenta una mayor concentración en la primera época, contenidos que no se ven reflejados en el área foliar al considerarse como bajos en las dos épocas evaluadas, esto puede atribuirse a la poca exigencia del cultivo sobre este elemento, ya que de manera visual no se observan deficiencias en campo.

En el suelo el fósforo se encuentra en niveles altos, el nitrógeno alto, el potasio muy bajo, el calcio bajo, magnesio de bajos a medios y una Cice muy cercana al nivel crítico, mientras que las concentraciones de nutrientes foliares indican que el fósforo y potasio se encuentran en niveles bajos, de medio a bajo el azufre, de óptimo a alto el calcio y magnesio, el azufre de medios a bajos, mientras que los micronutrientes tienden hacer bajos. Estos contenidos indican que se necesita un programa de fertilización basado en los requerimientos del cultivo y oferta ambiental para satisfacer las necesidades de la plantación sin crear un desbalance nutricional en el suelo.

Los contenidos de nutrientes (suelo y foliares) entre posiciones de la pendiente tienden hacer similares.

2.6 Literatura citada

Alcántar GV, Sandoval VM (1999) Manual de análisis de químicos de tejido vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 150 p.

Alvez MFFA (2004) DRIS: concepts and applications on nutritional diagnosis in fruit crops Sci. Agric. 61: 550-560.

- Arcila PJ, Farfán VF (2007) Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en la producción de la finca. 1ª edición. En: Arcila PJ Farfán VF, Moreno BA, Salazar GLF, Hincapié GE. Sistema de producción de café en Colombia. FNC-Cenicafé. Chinchiná Colombia. p 201-232.
- Arizaleta M, Rodríguez M, Rodríguez V (2002) Relación de los índices DRIS, índices de balance de nutrientes, contenido foliar de nutrientes y el rendimiento del cafeto en Venezuela. *Bioagro* 14: 153-159.
- Bautista CA, Etchevers BJ, Castillo RF, Gutiérrez C (2004) La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.
- Benedito ST, Rotter MA, Barrufaldi SR, Brandalize VE, Pavan MA, Charmetant P, Carpintieri-Pipolo V, Protasio PL, Esteves Vieira LG, Silva DD (2015) Caracterização nutricional de acessos provenientes da etiópia de café arábica. *Coffe Science* 10:10-19.
- Cardona-Calle D, Saheghian-Khalajabadi S (2005) Evaluación de las propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé* 56: 348-364.
- Castro FV, Montavani JR, Moreira LR, Messias MJ (2013) Levantamento da fertilidade do solo de lavouras cafeeiras em produção, no sul de Minas Gerais. *Coffee Science* 8:306-313.
- Cerón RLE, Aristazábal GFA (2012) Dinámica del ciclo de nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología* XIX: 285-295.
- Conforti M, Luca F, Scarciglia F, Matteucci G, Buttafuoco G (2016) Soil Carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena* 144: 23-33.
- Da Fonseca AS, De Sousa LJS, De Assis SS, Candido XA, Pereira DA (2015) Spatial variability of the productivity and nutritional condition of Coffee canephora. *Coffee science*, 10: 420-428.
- Da Silva RA, Creste JE, Tiritan CS, Xavier GWE, Do Amarol EAE (2015) Nutritional diagnosis by DRIS method of the cultivars coffee in the northern region of Paraná, Brazil. *Coffee Science* 10: 204-213.

- De Jesús SEO, Barreto PF, De Almeida BM, Gontijo I (2015) Delineamiento de zonas de manejo para macronutrientes em lavoura de café conilon consorciada com Seringueira. *Coffee Science* 10: 309-319.
- De Oliveira CAC, Rozane DE, Natale W, Gorla SHM, Barbosa JC, Chamma LMD, (2015) Amostragem de plantas em cafeeiro para avaliação do estado nutricional. *Coffe Science* 10: 122-130.
- Do Mar G, Marchetti ME, Ferreira SLC, Gonçalves, Novelino JO (2003) fertilidade do solo e nutrição de plantas. *Bragantia* 62: 267-274.
- Etchevers BJD (1999) Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana* 17: 209-219.
- Etchevers BJD, Padilla CJ (2007) Diagnóstico de la fertilidad del suelo. En: Alcántar GG, Trejo-Téllez LI (Eds). *Nutrición de Cultivos*. Mundi Prensa México, S.A de C.V.-Colegio de Postgraduados, Distrito Federal, México. p 250-269.
- Farfán-Valencia F (2010) cambios en la fertilidad de suelo con plantaciones de café y sombrío de especies forestales. *Cenicafé* 61: 7-27.
- Flores VF (2015) La producción de café en México: Ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *ESPACIO I+D, Innovación más desarrollo* 7: 175-194.
- Galindo BHG (2013) Definición de las tendencias de fertilidad en suelos cafeteros de Charalá, Coromoro y Ocamonte (Santander). *Ciencia y agricultura* 10: 67-72.
- García Y, Ramírez W, Sánchez S (2012) Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes* 35: 125-138.
- Gutiérrez-Soto M y Torres-Acuña J (2013) Síntomas asociados a la deficiencia de boro en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana* 24: 441-449.
- Henao-Toro M, Hernández-Guzmán E (2002) Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. *Cenicafé* 53: 293-305.
- Henríquez C (2005) Sorción y desorción de fósforo en un Andisol de Costa Rica dedicado al cultivo del café, caña de azúcar y bosque. *Agronomía Costarricense* 29: 97-105.

- Hissao KC, Da Silva CJ (2015) Diagnostic leaf to evaluate the nutritional status of *Jatropha*. *Revista Ceres* 62: 607-613.
- Krasilnikov PV, García CNE, Sedov SN, Vallejo GE, Ramos BR (2005) The relationship between pedogenic and geomorphic processes in mountainous tropical forested area in Sierra Madre del Sur, México. *Catena* 62: 14-44.
- Lee RV, Esponda GRF (2006) Caracterización edafo-nutritional del sistema de producción tradicional y orgánico del café (*Coffea arabica* L.) cv Bourbon. *Quehacer Científico en Chiapas* 1: 12-20.
- Liu H, Cao L, Zeng J (2016) Spatial distribution of soil nitrogen in gully hillsides of Sejila Mountain, Southeastern Tibet. *ACTA ECOLOGICA SINICA* 36: 127-133.
- 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.
- Luna-Rodríguez FC, López-Mena JG, Larios-González R. (2012) Sistemas de manejo en café (*Coffea arabica* L.) y su efecto en la fertilidad del suelo y el rendimiento del café oro, Masatpec, Masaya. *La Calera* 12: 29-36.
- Machado DJR, Franco TCA, Salvador WPG, Mendonça SA, Lopes SJZ (2013) Níveis críticos e faixas de suficiência nutricional em laranjeira-pêra na Amazônia Central obtidas pelo método DRIS. *Acta amazônica* 43: 239-246.
- 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.
- Muñoz HE, Pupiales AS, Navia EJ (2011) Evaluación del estado actual del nitrógeno en el arreglo silvopastoril aliso (*Alnus jorullensis* H B & K) kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov.). *Revista de Ciencias Agrícolas XXVIII*: 161-175.
- NOM-021-RECNAT (2002) Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la federación. SEMARNAT. Distrito Federal, México. 85 p.

- Noriega AG, Cárcamo RB, Gómez CMA, Schwentesius RR, Cruz HS, Leyva BJ, García RE, López RUI, Martínez HA, Martínez HA (2014) Intensificación de la producción en la agricultura orgánica: caso café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5: 163-169.
- Pérez DA, Bustamante GCA, Martín AGM, Rivera ERA, Viñals NR, Rodríguez CMI (2011) Fertilización nitrogenada después de la poda del café robusta en Cambisoles. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 46: 935-943.
- Pérez-López e (2013) Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. *Revista Intersedes* 29: 6-18.
- Prieto MHE, Scherrer MJF, Bartolomeu SR, Alvarez VVH, Gontijo GPT (2003) Faixas Críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 38: 703-713.
- Pulido-Moncada M, Flores B, Rondón ST, Hernández-Hernández R, Lozano Z (2010) Cambios en fracciones dinámicas de la materia orgánica de dos suelos, Inceptisol y Ultisol, por el uso con cultivo de cítricas. *Bioagro* 22: 201-210.
- Quintão LRM, De Oliveira SA, Quintão LAM, Vieira FM (2010) Levantamento do estado nutricional de plantas de *Coffea Arabica* L. pelo DRIS, na Região do Alto Paranaíba – Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34:1147-1156.
- Ramos-Hernández SG, Flores-Román D (2008) Comparación de dos fuentes fosfatadas en suelos volcánicos cultivados con café del Soconusco, Chiapas, México. *Agrociencia* 42: 391-398.
- Rosas JA, Escamilla PE, Ruiz RO (2008) Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana* 26: 375-384.
- Sadeghian KS (2011) Respuesta de cafetales al sol y bajo semisombra a nitrógeno y su relación con la materia orgánica del suelo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 64: 5781-5791.
- Sadeghian KS y Salamanca JA (2015) Micronutrientes en frutos y hojas de café. *Cenicafé* 66:73-87.
- Sadeghian KS (2003) Efecto de la fertilización con Nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados con café. *Cenicafé* 54: 242-257.

- Sadeghian KS, Mejía MB, González OH (2013) Acumulación de nitrógeno, Fósforo y potasio en los Frutos de café (*Coffea arabica* L). *Cenicafé* 63: 7-18.
- Sadeghian KS, Salamanca JA (2015) Micronutrientes en frutos y hojas de café. *Cenicafé* 66: 73-87.
- Sadeghian KS, Zapata HRD (2012) Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiables en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 63: 79-89.
- Sadeghian S, Zapata HRD (2014) Crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) Durante la etapa de almácigo en respuesta a la salinidad generada por fertilizantes. *Revista de Ciencias Agrícolas* 31: 40-50.
- Sadeghian-Khalajabadi S (2009) calibración de análisis de suelo para N, P, K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. *Cenicafé* 60: 7-24.
- 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. 118 p.
- Salgado-Gracia 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. H. Cárdenas, Tabasco, México. 101 p.
- Salgado-García S, Palma-López DJ, Zavala-Cruz J, Córdova-Sánchez S, Castelán-Estrada M, Lagunes-Espinoza LC, *et al.* (2016) Programa de fertilización sustentable para plantaciones de cítricos en Tabasco México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3: 345-356.
- Sánchez GP, Molinos SC, Alcántar GG, Sandoval VM (2007) Diagnóstico nutrimental en plantas. En: Alcántar GG, Trejo-Téllez LI (Eds). *Nutrición de Cultivos*. Mundi Prensa México, S.A de C.V.-Colegio de Postgraduados, Distrito Federal, México. p 202-245.
- SIAP (2016) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>. Fecha de consulta 5 de mayo de 2016.

- Silva FGA, Moreira SF, Negrini CPA, Silva AC, De Melo CF (2012) Agricultura de precisao no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. *Coffee Science* 7: 59-67.
- Uribe-Gómez S, Gutiérrez-Castorena MC, Tavares 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.
- Valarini V, Cleante BO, Fazuoli LC (2005) Macronutrientes em folhas e frutos de cultivares de café arábica de porte baixo. *Bragantia* 64: 661-672.
- Vergara-Sánchez MA, Etchevers-Barra JD, Padilla-Cuevas J (2005) La fertilidad de suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 259-266.
- Yépez-Pacheco C, Estrada-Berg WJW, Pérezgrovas-Garza V, Musálem MA (2006) Evaluación de la sustentabilidad de cafetales orgánicos mediante el balance de nutrimentos, en la Unión Majomut, Chiapas, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12: 87-91.
- Zini RB, Floriano TJPV, De lima JM, Evaldo SM, Ribeiro BAR, Gontijo GPT, *et al.* (2013) Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo vermelho distrófico. *Revista Brasileira de ciência do solo* 37: 1018-1026.

**CAPITULO III. EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES POR *Coffea arabica* L. EN LA
FINCA CUSTEPEC, LA CONCORDIA, CHIAPAS**

EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES POR *Coffea arabica* L. EN LA FINCA CUSTEPEC, LA CONCORDIA, CHIAPAS

Resumen

El conocer la biomasa y extracción de nutrientes de *Coffea arabica* L. brinda las bases para un manejo sostenible de los cafetales. Con el objetivo de establecer relaciones entre el estado nutricional de la biomasa y el suelo en el cultivo del café, se evaluó la materia seca de tres cafetos en plena producción, cada una de las plantas se muestreó en diferente posición fisiográfica de la pendiente (alta, media y baja) en plantaciones de variedad Catimor, en la Finca Custepec municipio de la Concordia, Chiapas. Se extrajeron plantas completas, separándola en sus diferentes componentes: hojas, ramas, frutos (granos+pulpa), tallos, raíces y yemas florales. Se calculó la producción de fitomasa en $t\ ha^{-1}$ y se determinaron los contenidos de N, P y K en cada componente. Del 97 % al 89.03 % de la biomasa total se acumuló en tallos, hojas, ramas, raíz y yemas florales, y solo del 10.97 % al 20.73 % en grano + pulpa. El gradiente del contenido total de nutrientes en toda la planta fue $N > K > P$. Las hojas, ramas y frutos son los órganos que presentan mayor concentración de N, P y K. La extracción total ($kg\ ha^{-1}$) de N-P-K por las plantas fue; 120.06 – 2.55 – 99.02 en la posición alta; 161.37 – 2.91- 80.08 en la posición media; y 142.68 – 1.89 – 77.74 en la posición baja.

Palabras clave: Biomasa, café, ciclo de nutrientes, rendimiento de café, suelos.

Abstract

Knowing the biomass and nutrient extraction of Coffee Arabica L. provides the basis for a sustainable management of coffee plantations. The dry matter of three coffee trees in full production were evaluated in order to establish relationships between the nutritional status and the biomass, each plant was sampled in different physiographic positions of the slope (high, medium and low) in Catimor variety plantations on the Custepec farm of Concordia, Chiapas. We extracted complete plants and separate their different components: leaves, branches, fruits (grains + pulp), stems, roots and floral buds. The phytomass production was calculated in $t\ ha^{-1}$ and the contents of N, P and K in each component were determined. From 97 to 89.03% total of the biomass was accumulated in the stems, leaves, branches, roots and floral buds and only 10.97 to 20.73% in grains + pulp. The total nutrient content gradient of the plant was $N > K > P$. The leaves, branches and fruits were the organs with the highest concentration of N, P and K. The total extraction ($kg\ ha^{-1}$) of NPK by the plants were; 120.06-2.55-99.02 in the high position; 161.37-2.91-80.08 in the middle position and 142.68-1.89-77.74 in the low position.

Keywords: Biomass, coffee; nutrient cycle, coffee yield, soil.

3.1 Introducción

Una variable muy importante para caracterizar la productividad de una planta, es la producción de biomasa, reflejo del rendimiento biológico del vegetal (Bustamante *et al.* 2015). El crecimiento vegetal en los sistemas agrícolas, depende de los nutrientes del suelo, que interactúan con los genotipos para producir la biomasa vegetal de la cual se obtienen los productos económicamente aprovechables para el hombre (Riaño-Herrera *et al.* 2004). Por lo tanto un aspecto relevante a tomar en cuenta es la extracción de nutrientes por la planta durante las diferentes etapas del desarrollo del cultivo, que en conjunto con los estudios sobre la respuesta a la fertilización permiten ajustar los programas de manejo y disminuir los riesgos económicos y ambientales (Sadeghian *et al.* 2012). Así mismo la información referente a la distribución de la biomasa del cafeto entre sus órganos son importantes para que se pueda comprender como el ambiente y las labores de cultivo intervienen en su distribución y crecimiento (Poltronieri *et al.* 2006). La demanda de nutrientes del cultivo del café, no varía en función de su producción, cuando la cosecha es baja el crecimiento de ramas plagiotrópicas y la formación de hojas y ramas nuevas, sustituyen al fruto en la absorción de carbohidratos y nutrientes (Malavolta *et al.* 2002). Las cantidades de nutrientes extraídos por el cafeto se remueve del lote a través de la cosecha, mientras que el resto retorna al suelo en forma de hojas, ramas, raíces y flores que conformarán la materia orgánica del suelo (Sadeghian *et al.* 2013). Por lo anterior es imprescindible no solo considerar la cantidad de elementos exportados por los granos, sino que es necesario tener en cuenta también la cantidad de elementos minerales necesarios para el mantenimiento y la producción de nuevas ramas, hojas y raíces de la planta. El objetivo de este trabajo fue establecer relaciones entre el estado nutricional de la biomasa y el suelo en el cultivo del café.

3.2 Materiales y métodos

Área de estudio

La plantación de café estudiada pertenece a la Finca Custepec ubicada en el municipio de La Concordia, Chiapas. El clima predominante es semicalido húmedo con lluvias en verano (A)C(m). La precipitación y temperatura media anual con de 2 021 mm y 18 °C, con una altura sobre el nivel del mar de 1 112 m (CONAGUA 2015).

Sitio de estudio

El cafetal corresponde a una renovación de seis años, variedad Catimor, establecida con 2 500 plantas por hectárea a doble postura, bajo sombrío introducido principalmente de árboles del

género *Inga*, en pendientes de 45 %. Para el muestreo de biomasa vegetal, se eligieron tres plantas en etapa productiva a lo largo de la pendiente. El manejo agronómico durante el ciclo de evaluación fue conforme a lo realizado en la región, que consta principalmente de: poda de los árboles de sombra, manejo sanitario, poda del cafeto (despunte herbáceo de la planta), deshierbes, dos aplicaciones de fertilizante de 65 gramos planta⁻¹ cada una y dos deshierbes manuales durante el ciclo.

Extracción de las plantas

Para la evaluación de la biomasa se llevó a cabo la extracción completa de tres plantas, una por cada posición fisiográfica de la pendiente (alta, media y baja), considerando que las condiciones de la planta fueran representativas de cada área (vigor, luminosidad y buen estado fitosanitario). Elegidas las plantas se procedió a su extracción, removiendo el suelo con cuidado de extraer la mayor cantidad de raíces posible. Extraída la planta se separó en sus diferentes componentes; hojas, ramas, frutos, tallos y raíces, al presentar yemas florales se tomaron en cuenta. Las diferentes partes de la planta fueron lavadas con agua corriente y enjuagadas con agua destilada, el exceso de humedad fue secado con papel absorbente. Las diferentes partes de la planta se pesaron en húmedo y se tomaron muestras representativas de las mismas. La producción de fitomasa se calculó en t ha⁻¹. En laboratorio se procedió a secar las muestras a una temperatura de 70 °C hasta obtener peso constante (Bustamante *et al.* 2015). Para determinar la concentración de los tres nutrientes mayores se homogenizaron las muestras de los diferentes órganos y fueron molidas en un molino de acero inoxidable y tamizadas a 2 mm (Salgado *et al.* 2015), para realizar los análisis químicos se usaron los siguientes métodos; N (semimicro Kjeldahl), P y K (Por digestión con HNO₃ y HClO₄, respectivamente) (Alcántar *et al.* 1999).

3.3 Resultados

En la Tabla 17 se aprecian los contenidos de nitrógeno total del suelo en las tres posiciones de la pendiente, se clasifican como muy alto (> 0.25 %), el fósforo en niveles altos (> 11 mg kg⁻¹), y potasio en niveles bajos (<0.2 cmol_(c) kg⁻¹) (NOM-021-RECNAT 2002). Las concentraciones foliares indican que el nitrógeno para las tres posiciones de la pendiente se presenta en niveles medios (2.30-3.0 %), el fósforo en niveles bajos (< 0.12 %) y el potasio en niveles bajos (< 2.0 %) (Jones *et al.* 1991).

Tabla 17. Contenido de N, P y K en el suelo y foliar en tres posiciones de la pendiente (alta, media y baja) en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición de la pendiente	Suelo (0-20 cm)			Foliar (%) cuarto par de hojas.		
	N (%)	P (mg kg^{-1})	K ($\text{Cmol}_{(c)} \text{kg}^{-1}$)	N	P	K
Alta	0.37	40.17	0.12	2.64	0.06	0.89
Media	0.44	39.37	0.03	2.81	0.03	0.73
Baja	0.53	39.52	0.05	2.89	0.07	0.82

En la posición alta de la pendiente el tallo representa el mayor porcentaje de materia seca (32.51 %), procedido de las hojas (22.45 %) y raíz (17.20 %), el menor porcentaje se midió en las yemas florales (1.39 %). El total de materia seca de la planta fue de 4.232 kg, correspondiendo el 89.01 % a los órganos vegetativos y el 10.99 % al fruto (grano pergamino y pulpa), calculándose una biomasa total por hectárea de 10.580 t. En esta posición el mayor contenido de Nitrógeno se encuentra en las hojas (48.45 kg ha^{-1}), seguido de las ramas (22.24 kg ha^{-1}) y grano (14.79 kg ha^{-1}), el menor lo tiene la pulpa (3.98 kg ha^{-1}). Los mayores contenidos de fósforo se encuentra en la pulpa (0.41 kg ha^{-1}), tallos (0.34 kg ha^{-1}) y hojas (0.24 kg ha^{-1}), el menor en el grano (0.09 kg ha^{-1}). El potasio se encuentra en mayor concentración en los tallos y hojas (29.24 y 28.98 kg ha^{-1}), seguido de la raíz (16.02 kg ha^{-1}), el menor contenido en las yemas florales (1.15 kg ha^{-1}). Por hectárea todos los componentes de la planta extrajeron un total de 120.06 kg de N, fósforo 2.55 kg y 99.02 kg de K.

En la posición media de la pendiente el mayor porcentaje en los componentes de la planta lo representa el tallo (24.87 %), seguido de las hojas (23.25 %), la raíz (17.52 %) y el grano (15.66 %), presentando el menor contenido en las yemas florales (0.74 %). El total de la materia seca en la planta fue de 3.647 kg, el 79.27 % correspondió a los órganos vegetativos, mientras el 20.73 % al grano (pergamino) y pulpa. La mayor concentración de N se detecta en las hojas (50.52 kg ha^{-1}), granos (34.01 kg ha^{-1}), pulpa (22.04 kg ha^{-1}) y raíz (21.75 kg ha^{-1}) y el menor contenido las yemas florales (1.61 kg ha^{-1}). Para fósforo el grano presenta el mayor contenido (0.91 kg ha^{-1}), seguido del tallo (0.88 kg ha^{-1}), y pulpa (0.48 kg ha^{-1}), la menor concentración lo tienen las yemas (1.61 kg ha^{-1}). El potasio en tallo y hojas presentan las mayores cantidades (20 y 20.10 kg ha^{-1}), precedido de raíz (12.84 kg ha^{-1}) y el grano (12.68 kg ha^{-1}). La extracción total por hectárea en los órganos de la planta de N, P y K, son de 161.37, 2.91 y 80.08 kg ha^{-1} , respectivamente.

Tabla 18. Distribución de materia seca kg ha^{-1} y concentración de N-P-K (kg ha^{-1}), en tres posiciones de la pendiente (alta, baja y media) en un cafetal en la Finca Custepec, La Concordia, Chiapas.

Posición alta de la pendiente	Materia seca		Biomasa	Nutrientes kg ha^{-1}		
Órganos de la planta	(kg planta⁻¹)	%	t ha⁻¹	N	P	K
Tallos	1.376	32.51	3.440	11.70	0.34	29.24
Hojas	0.95	22.45	2.375	48.45	0.24	28.98
Ramas	0.654	15.45	1.635	22.24	0.16	13.08
Raíz	0.728	17.20	1.820	12.38	1.27	16.02
Yemas florales	0.059	1.39	0.148	6.53	0.03	1.15
Subtotal	3.767	89.01	9.418	101.29	2.05	88.46
Grano (pergamino)	0.348	8.22	0.870	14.79	0.09	7.13
Pulpa	0.117	2.76	0.293	3.98	0.41	3.42
Subtotal	0.465	10.99	1.163	18.77	0.50	10.56
total	4.232	100	10.580	120.06	2.55	99.02
Posición media de la pendiente	Materia seca		Biomasa	Nutrientes kg ha^{-1}		
Órganos de la planta	(kg planta⁻¹)	%	t ha⁻¹	N	P	K
Tallos	0.907	24.87	2.268	15.44	0.88	20.00
Hojas	0.848	23.25	2.120	50.52	0.35	20.10
Ramas	0.47	12.89	1.175	16.00	0.07	9.17
Raíz	0.639	17.52	1.598	21.75	0.13	12.84
Yemas florales	0.027	0.74	0.068	1.61	0.09	0.57
Subtotal	2.891	79.27	7.228	105.31	1.53	62.67
Grano (pergamino)	0.571	15.66	1.428	34.01	0.91	12.68
Pulpa	0.185	5.07	0.463	22.04	0.48	4.74
Subtotal	0.756	20.73	1.890	56.06	1.39	17.41
total	3.647	100	9.118	161.37	2.91	80.08
Posición baja de la pendiente	Materia seca		Biomasa	Nutrientes kg ha^{-1}		
Órganos de la planta	(kg planta⁻¹)	%	t ha⁻¹	N	P	K
Tallos	1.257	32.31	3.143	42.79	0.17	23.07
Hojas	0.755	19.40	1.888	32.13	0.16	16.80
Ramas	0.531	13.65	1.328	18.08	0.07	9.72
Raíz	0.897	23.05	2.243	15.27	0.19	18.12
Yemas florales	0.024	0.62	0.060	1.23	0.11	0.49
Subtotal	3.464	89.03	8.660	109.48	0.70	68.19
Grano (pergamino)	0.324	8.33	0.810	16.54	0.83	6.79
Pulpa	0.103	2.65	0.258	16.65	0.36	2.77
Subtotal	0.427	10.97	1.068	33.20	1.20	9.55
total	3.891	100	9.728	142.68	1.89	77.74

En la planta de la posición baja, con el 32 %, el tallo es el componente que mayor biomasa aporta, lo siguen la raíz (23 %), las hojas (19.40 %) y las ramas (13.65 %). El total de materia seca de la planta fue de 3.891 kg, el 89.03 % corresponde a los órganos vegetativos y el 10.97 al grano y pulpa. La biomasa por hectárea encontrada corresponde a 9.728 t ha⁻¹. El tallo presenta el mayor contenido de nitrógeno (42.79 kg ha⁻¹), las hojas 32.13 kg ha⁻¹, las ramas 18.08 kg ha⁻¹, la pulpa 16.65 kg ha⁻¹, el grano 16.54 kg ha⁻¹ y la raíz 15.27 kg ha⁻¹. El fósforo mostró su mayor acumulación en el grano (0.83 kg ha⁻¹), la pulpa (0.36 kg ha⁻¹), la raíz (0.19 kg ha⁻¹) y las hojas (0.16 kg ha⁻¹). El contenido más alto de potasio se encontró en el tallo (23.07 kg ha⁻¹), raíz (18.12 kg ha⁻¹), hojas (16.80 kg ha⁻¹) y ramas (9.72 kg ha⁻¹), teniendo el menor contenido en las yemas florales (0.49 kg ha⁻¹). El contenido total de N, P y K en los diferentes órganos de las plantas por hectárea corresponde 142.68 kg, 1.89 kg y 77.74 kg, respectivamente.

3.4 Discusión

Los resultados obtenidos de materia seca en las tres plantas son similares (Tabla 18), sin embargo los porcentajes de cada componente muestran variaciones entre sitios, al igual que los contenidos de nutrientes en los órganos evaluados. Riaño-Herrera *et al.* (2004) quienes evaluaron materia seca y extracción de nutrientes en tres localidades en la zona cafetera central de Colombia, encontraron resultados similares para biomasa seca, pero no para la distribución de los nutrimentos en los órganos de la planta, atribuyéndole esta variación al potencial productivo de cada sitio. La materia seca producida por las plantas se presentó en forma decreciente de la siguiente manera: en la posición alta; tallos > hojas > raíz > ramas > granos > pulpa > yemas florales; en la posición media tallos > hojas > raíz > granos > ramas > pulpa > yemas florales; y en la posición baja tallos > raíz > hojas > grano < pulpa > yemas florales. Los resultados encontrados no coinciden con los reportados por Poltronieri *et al.* (2006), quienes evaluaron cuatro cultivares de *coffea arabica* L. de 55 meses de establecidas y encontraron la siguiente distribución de los porcentajes de materia seca: raíces > frutos > hojas > ramas plagiotropicas > ramas ortotropicas. Por su parte Prezotti *et al.* (2013), evaluaron clones de café conilon (clon 23), encontraron resultados similares a los porcentajes de distribución de materia seca en esta investigación, en hojas 19 %, ramas 12 %, raíz 15 % y fruto 12 %, a excepción del tallo que fue mayor 42 %, esto puede atribuirse a que al ser una variedad de porte alto tiende a desarrollar mayor cantidad de materia seca en este órgano de la planta. Por su parte Bragança *et al.* (2010), evaluaron materia seca de café conilon a los seis

años de establecida, y reportan que el mayor porcentaje fue acumulado en el tallo + ramas ortotrópicas (46 %) seguido de hojas (17 %), raíces (17 %) y ramas plagiotrópicas (12 %).

Los contenidos de nutrientes en cada órgano de la planta muestran cierta variabilidad, aunque se puede observar que el mayor contenido de nitrógeno en la planta de la posición alta (48.45 kg ha^{-1}) y media se encuentra en las hojas (50.52 kg ha^{-1}), a excepción de la posición baja, que se encuentra en el tallo (42.79 kg ha^{-1}), estos resultados son similares a los reportados por Prezotti *et al.* (2013), quienes detectaron los mayores niveles de N en hojas. La absorción de este elemento en grano + pulpa en las posiciones alta, media y baja fue de 18.77, 56.06 y 33.20 kg ha^{-1} , respectivamente. El nitrógeno es el nutriente esencial requerido por el café en mayores cantidades (Melke y Ittana 2015). Los contenidos de N en el suelo reportados en el área de estudio son altos y los niveles encontrados en las hojas se consideran óptimos, lo cual indica que la planta tiene un suministro adecuado de este nutriente (Tabla 17).

La extracción de fósforo indica que en el grano + pulpa se encuentra los mayores contenidos para la planta de la posición media (1.39 kg ha^{-1}) y baja (1.20 kg ha^{-1}), lo cual es diferente a lo que ocurre en la parte alta donde el mayor valor corresponde a la raíz (1.27 kg ha^{-1}). La absorción de este elemento es baja con respecto al N y K, indicando que la planta tiene baja eficiencia en su extracción (Espinoza *et al.* 2016). Según la NOM-O21 los niveles de fósforo extraíble en el suelo son altos ($> 11 \text{ mg kg}^{-1}$), sin embargo, en las hojas se encuentra en nivel bajo ($< 0.12 \%$) (Tabla 17), se deduce que al realizar el muestro foliar al final del ciclo, los bajos contenidos se atribuyen a que este nutriente se traslocó a los frutos, ya que este componente (fruto + pulpa) es el que absorbe más fósforo (Tabla 18).

Los contenidos de K muestran que los tallos y las hojas, en las tres posiciones de la pendiente, presentan los mayores niveles de este elemento, aunque otro órgano que muestra tener contenidos considerables es la raíz. Resultados similares reportan Lima y Malavolta (2003) en plantas de variedad catuai amarillo, las concentraciones de K que se encontraron fueron; en las hojas (54 %-64 %), ramas + yemas florales (20 %-21 %) y raíces (30 %-41 %). Las concentraciones en el grano + pulpa en la posición alta, media y baja corresponden a 10.56, 17.41 y 9.55 kg ha^{-1} , respectivamente. Sin embargo, el potasio tiene implicaciones fundamentales para la producción de granos, especialmente la regulación de la pérdida de agua, llenado de grano y maduración (Deleon *et al.* 2015). Al respecto se conoce que la extracción y contenido de nutrientes por los diferentes órganos de la planta puede presentar variabilidad en diferentes lugares de una zona cafetalera como

consecuencia de las condiciones de suelo, clima y genotipo evaluado (Sadeghian-Khalajabadi 2006), así como por la producción de materia seca de los materiales (Poltronieri *et al.* 2006). El comportamiento en la fragmentación de los asimilados depende en gran medida de la relación fuente – vertedero. El potencial productivo de la planta puede tener acumulación de materia seca similares en sitios diferentes, aunque se observaran cambios en la distribución de los nutrientes en los diferentes órganos (Riaño-Herrera *et al.* 2001). Lo anterior puede estar relacionado con la bianualidad del cultivo, donde se observa que, en años de alta producción de frutos, el crecimiento vegetativo del café es bastante reducido o viceversa (Poltronieri *et al.* 2006). Ante una baja fructificación, el crecimiento de las ramas plagiotrópicas y la formación de nuevas hojas reemplazan a los frutos como vertederos de carbohidratos y nutrientes (Malavolta *et al.* 2002). Por otro lado, los contenidos de este elemento en el suelo son bajos, y se ve reflejado en los deficientes niveles foliares (< 2.0 %) (Tabla 17).

El total de extracción de nutrientes por hectárea en el grano coinciden con la relación mencionada por Sadeghian-Khalajabadi *et al.* (2006), con el N en mayor concentración, seguido del K y sumamente bajo el P, mientras que los contenidos en la pulpa son diferentes el más alto el K, en segundo lugar el N y en menor cantidad el P, caso contrario a lo estimado en esta investigación donde el N se encuentra más alto, seguido de K y por último el P.

El total de extracción de NPK por hectárea son similares en los sitios de estudio, siendo congruentes en la relación que se encuentran los nutrientes en la biomasa. La relación de extracción determinada es similar con los registrados por Riaño-Herrera *et al.* (2004), $N > K > P$, pero los contenidos calculados por hectárea en los tres sitios de estudio no coinciden con los encontrados en esta investigación, Naranjal; 48.6 kg N, 3.35 kg P, 48.36 kg K, Paraguacito; 75.62 kg N, 10.59 kg P, 98.75 kg K, Santa Helena; 33.4 kg N, 2.26 kg P, 29.84 kg K, puede atribuirse que las plantas, de este trabajo, fueron evaluada en una etapa más temprana (650 días). La cantidad total de elementos removidos del suelo por una cosecha se incrementan conforme aumentan la producción, debido a que los frutos no retornan al suelo por medio del ciclaje de nutrientes como ocurre con las raíces, hojas y ramas (Sadeghian-Khalajabadi 2006). Esto resalta la necesidad de realizar fertilizaciones que compensen la extracción de nutrientes durante el aprovechamiento, especialmente en este caso que incluye la remoción del fruto (grano + pulpa) fuera del sistema (Merino *et al.* 2003), en la fase reproductiva los frutos de café son las principales salidas de nutrientes del sistema (Bragança *et al.* 2010), por lo tanto, los cálculos de fertilización, deben

realizarse con base a la producción potencial de granos, considerando la cantidad de nutrientes necesarios para la producción de biomasa de frutos (Prezotti y Bragança 2013). Esto se conoce como demanda nutrimental, considerando el suministro del suelo y la eficiencia de los fertilizantes (Etchevers 1999), con esto se logra elevar la eficacia de uso de los nutrientes y mejora de la rentabilidad del sistema (Bertsch 2005).

3.5 Conclusiones

Los porcentajes de biomasa indican que las plantas bajo las condiciones de estudio presentan del 79.27 % a 89.03 % en tallos, hojas, ramas, raíz, y yemas florales y de 10.97 % a 20.73 % en grano + pulpa, por lo que la biomasa está concentrada principalmente en tejido no productivo, principalmente los tallos, hojas y raíces.

El orden de absorción de los nutrientes en toda la planta fue $N > K > P$. En general los órganos que mayor extracción de nutrientes presentan son las hojas, ramas y frutos.

Los altos contenidos de N en el suelo se reflejan en los contenidos óptimos en las hojas. La alta concentración de fósforo en el suelo, no se ve proyectada en los niveles foliares, al considerarse esta como bajos. Los bajos niveles de potasio en el área foliar obedecen a la baja presencia de K intercambiable en el suelo.

Es necesario realizar una fertilización razonada supliendo la cantidad de nutrientes extraída por los frutos.

3.6 Literatura citada

- Alcántar GV, Sandoval VM (1999) Manual de análisis de químicos de tejido vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 150 p.
- Bertsch F (2005) estudios de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. Instituto de la potasa y el fósforo (INPOFOS). Informaciones agronómicas No 57. Quito, Ecuador. 16 p.
- Bragança SM, Prieto MHE, García LH, Pereira SL, Lani JA, Sigueyuki SC, Alvares VVH (2010) Acumulação de materia seca pelo cafeeiro conilon. *Ceres* 57: 48-52.
- Bustamante GC, Pérez DA, Viñals R, Martins AGM, Rivera R, Rodríguez MI (2015) producción de fitomasa por *Coffea canephora* Pierre ex Froehner en dos ciclos productivos. *Cultivos tropicales* 36: 29-35.
- Deleon ML, De Zousa ML, Toma MA, Teixeira AJF (2015) The nutritional efficiency of *coffea spp.* A Review. *African Journals of Biotechnology* 14: 728-734.
- Espinoza SJO, Salgado GS, Sánchez SC, Estrada MC, Rodríguez VNJ, Santos ARG (2016) Diagnóstico nutricional de once variedades de caña de azúcar (*sacharum spp.*) en el ingenio Azuremex Tenosique, Tabasco. *Agroproductividad* 9: 54-59.
- Etchevers BJD (1999) Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana* 17: 209-219.
- Lima FOF, Malavolta E (2003) Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv Catuai vermelho). LXIV. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. *Brazilian Journal of Biology* 63: 481-490.
- Malavolta E, Láercio FJ, Malavolta M, Pereira CC, Heinrichs R, Machado SJS (2002) Reparticao de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37: 1017-1022.
- Melke A, Ittana F (2015) Nutritional requirement and management of arabica coffee (*Coffea arabica* L.) in Etiopia: National and global perspectives. *American Journal of Experimental Agriculture* 5: 400-418.
- Poltronieri NY, Prieto MHE, Texeira AJF, Bartolomeu SR, Rigueira DD (2006) Productividad y acumulación de materia seca, N, P y K por cultivares de *Coffea arabica* L. *Coffe Science* 1: 156-167.
- Prezotti LC, Bragança SM (2013) Acúmulo de massa seca, N, P e K em diferentes materiais genéticos de café Conilon. *Coffee Science* 8: 284-294.
- Riaño- Herrera NM, Arcila-Pulgarín J, Jaramillo-Robledo A, Chávez-Cordova B (2004) Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por *Coffea arabica* L. cv. Colombia en tres localidades de la zona Cafetera Central. *Cenicafé* 55: 265-276.
- Sadeghian KS, Mejía MB, González OH (2013) Acumulación de calcio, magnesio y azufre en los frutos de café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo. *Cenicafé* 64: 7-18.
- Sadeghian KS, Mejía MB, González OH, (2012) Acumulación de Nitrógeno, Fósforo y Potasio en los frutos de café (*Coffea arabica* L.). *Cenicafe* 63: 7-18.

Sadeghian-Khalajabadi S, Mejia-Muñoz B, Arcila-Pulgarin (2006) Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. Cenicafé 57: 251-261.

5 CONCLUSIONES GENERALES

Los suelos cafetaleros en las posiciones fisiográficas estudiadas a través de la pendiente, muestran características diferentes entre sí, lo que hace que pertenezcan a diferentes grupos, lo cual resalta la heterogeneidad de los suelos. El suelo Luvisol relacionado con la posición baja presenta mejores condiciones de fertilidad comparado con el Lixisol de la posición alta y Cambisol posición media. La mayoría de las características encontradas en estos suelos comparadas con los requerimientos del cultivo indican que son suelos aptos para practicar la cafecultura bajo un sistema de manejo sostenible de suelos.

La densidad de longitud de raíces (DLR) en las posiciones fisiográficas de la pendiente y tipos de suelo fueron similares. El comportamiento horizontal demostró ser homogéneo a un metro de distancia del tronco, mientras que en forma vertical se apreciaron diferencias estadísticas con la mayor concentración de raíces finas (89.95 %) en los primeros 20 cm.

Los contenidos de nutrientes en el suelo y foliar entre posiciones de la pendiente tienden a ser similares, caso contrario entre épocas, donde la primera época relacionada con la estación lluviosa mostró mayor concentración de nutrientes tanto en suelo como foliar. En el suelo los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y fósforo se consideran en niveles altos, mientras que las bases (potasio, calcio y magnesio) en niveles bajos.

Solo del 10.97 % al 20.73 % de la biomasa se acumuló en grano + pulpa. El gradiente del contenido total de nutrientes en la planta completa fue $N > K > P$, lo cual se manifiesta en la extracción total de N-P-K (kg ha^{-1}) por la planta que fue de: 120.06 – 2.55 – 99.02 en la posición alta; 161 – 2.91 – 80.08 en la posición media y; 142.68 – 1.89 – 77.74 en la posición baja.

6 ANEXOS

Anexo 1. Perfil 1: Posición alta, Haplic Lixisol (Clayic, Cutanic, Hypereutric)

Descrito por: Dr. David Jesús Palma López; Ing. Raúl Gómez González

Fecha: 03/11/15

Localidad: Finca Custepec, la Concordia Chiapas.

Localización: N 15° 44' 33" y O 92° 59' 00"

Elevación: 1112 msnm

Relieve: Convexa-cóncava

Pendiente: 45%

Drenaje del sitio: Donador

Material parental: Complejo metamórfico Prebatolítico.

Flora cultivada: Cafetal (renovación de 6 años) bajo sombra: chalum (*Inga xalapensis* Benth.), Pishquín (*Albizia carbonaria* Britton), capulín blanco y caspirol (*Inga tetraphylla* Marthz)

Flora nativa: Selva alta perennifolia

Fauna: Ardillas y aves pequeñas.

Aplicación de abonos orgánicos o fertilizantes: 2 fertilizaciones edáficas al año.

Condición climática del día: Parcialmente nublado, con lluvias ligeras el día anterior.

Drenaje del perfil: Bien drenado.

Observaciones: Presencia de pedregosidad superficial de un 15%.



	Ho	Prof. cm.	Descripción del perfil
	A1	0-22 (47)	Transición marcada irregular; húmedo; color pardo oscuro (2.5 Y 3/3); textura franca arcillosa; ligeramente pedregoso, pequeñas y medias de forma subangular, probablemente de calizas; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares finos, medios y grandes; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos, moderadamente espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos; numerosos poros, muy finos, finos y medios, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces abundantes, finas, delgadas, medias y gruesas; fauna hormigas y lombrices; pH 6.0.
	Bt1	22-44	Transición tenue horizontal; húmedo; color pardo amarillento (10 YR 5/6); textura arcillosa; pedregoso, pequeñas, medias y grandes de forma subangular, probablemente de calizas; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, finos y medios; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos, espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro; numerosos poros, muy finos, finos y medios, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces abundantes, delgadas, medias y gruesas; pH 6.0.
	Bt2	44-91	Transición tenue horizontal; húmedo; color pardo amarillento (10 YR 5/8); textura arcillosa; pedregoso, pequeñas, medias y grandes de forma subangular, probablemente de calizas; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, finos, medios y grandes; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y muy plástico; cutanes por eluviación, continuos, espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro; muy pocos nódulos, muy pequeños, negros de forma elipsoide, blandos de óxidos de magnesio; poros frecuentes, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad moderada; pocas raíces, finas y delgadas; pH 6.5.
	C1	91-200	Transición tenue horizontal; húmedo; color pardo amarillento (10 YR 5/8); textura arcillosa; pedregoso, pequeñas, medias y grandes de forma subangular, probablemente de calizas; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, finos, medios y grandes; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos, espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro; pocos nódulos, muy pequeños, negros de forma elipsoide y prismáticos, subangulares, blandos de óxidos de magnesio; poros frecuentes, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad moderada; raíces pocas y finas; pH 6.5.

Ho (cm)	pH (H2O) rel. 1:2	CE (dSm ⁻¹)	MO	N	P Olsen (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	CIC	Da (g/cm ³)	Fe	Cu	Zn	Mn	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación textural
			(%)			(cmol kg ⁻¹)						(mg k ⁻¹)					(%)		
A1 0-22(47)	5.8	0.09	11.3	0.40	49.31	0.15	3.93	2.17	0.10	7.78	1.15	6.75	1.28	1.10	2.44	31	27	43	Arcilla franca
Bt1 22-44	6.4	0.02	4.2	0.15	22.08	0.14	3.30	1.56	0.09	6.81	1.07	7.54	1.20	1.06	0.10	43	21	37	Arcilla
Bt2 44-91	6.7	0.03	1.3	0.06	12.78	0.12	3.25	1.32	0.09	6.81	1.03	7.24	0.52	0.80	0.08	49	29	23	Arcilla
C1 91-200	6.5	0.02	1.1	0.03	11.81	0.10	3.06	1.29	0.08	5.84	1.07	7.00	0.37	0.72	0.06	43	27	31	Arcilla

Anexo2. Perfil 2: Posición media, Eutric Sideralic Cambisol (Clayic, Humic)

Descrito por: Dr. David Jesús Palma López; Ing. Raúl Gómez González.

Fecha: 03/11/15

Localidad: Finca Custepec, la Concordia Chiapas.

Localización: N 15° 44' 34" y O 92° 59' 00"

Elevación: 1085 msnm

Relieve: convexa-cóncava

Pendiente: 35-45%

Drenaje del sitio: normal

Material parental: Complejo metamórfico Prebatolítico.

Flora cultivada: cafetal bajo sombra (renovación de 6 años): chalum (Inga xalapensis Benth), Pishquín (Albizia carbonaria Britton), capulín blanco y caspirol (Inga tetraphylla Marthz)

Flora nativa: Selva alta perennifolia

Fauna: ardillas y aves pequeñas.

Aplicación de abonos orgánicos o fertilizantes: 2 fertilizaciones edáficas al año.

Condición climática el día: parcialmente nublado, con lluvias ligeras el día anterior

Drenaje del perfil: bien drenado.



	Ho	Prof. cm.	Descripción del perfil
	A1	0-23	Transición media horizontal; húmedo; color pardo oscuro (10 YR 3/3); textura franco-arcillo-arenoso; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, finos y delgados; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos, en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro; numerosos poros, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces abundantes, finas, delgadas y medias; fauna lombrices; pH 5.5
	A-B	23- (36-42)	Transición media ondulada; húmedo; color pardo(10 YR 5/3); textura franco-arcilloso; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, muy finos y delgados; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo pegajoso y plástico; numerosos poros, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados,tubulares; permeabilidad rápida; raíces abundantes, finas, delgadas y medias; pH 5.5
	Bw1	(36-42)-83	Transición tenue horizontal; húmedo; color pardo fuerte (7.5 YR 5/6); textura arcillosa; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, muy finos y delgados; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos, en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro; poros frecuentes, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces comunes, finas y delgadas; pH 5.0.
	C1	83-147	Transición tenue horizontal; húmedo; color amarillo parduzco (10 YR 6/8); moteado tenue, comunes, finísimas y muy fina de color amarillo rojizo (5 YR 6/8); textura franco-arcillo-limoso; estructura moderadamente desarrollada en bloques subangulares, muy finos, delgados y medios; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos y moderadamente espesos, en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro; poros frecuentes, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces comunes, finas y delgadas; pH 5.0.
	C2	147-200	Transición tenue horizontal; húmedo; color amarillo parduzco (10 YR 6/8); moteado tenue, comunes, finísimas y muy fina de color amarillo rojizo (5 YR 6/8); textura franco-arcillo-limoso; estructura moderadamente desarrollada en bloques subangulares de tamaño muy finos y medios; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; cutanes por eluviación, continuos moderadamente espesos, en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos de hierro; poros frecuentes, muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces comunes, finas y delgadas; pH 5.0.

Ho (cm)	pH (H ₂ O) rel. 1:2	CE (dSm ⁻¹)	MO	N	P Olsen (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	CIC	Da (g/cm ³)	Fe	Cu	Zn	Mn	Arcilla	Limo	Arena	Textura
			(%)																
A1 0-23	5.8	0.10	9.2	0.35	11.11	0.10	2.71	1.26	0.08	6.81	1.04	11.49	0.28	0.51	2.66	47	31	23	Arcilla
A-B 23-(36-42)	5.7	0.07	4.5	0.20	9.17	0.07	2.59	0.95	0.07	4.86	1.05	8.16	0.22	0.44	2.12	45	25	31	Arcilla arenosa
Bw1 (36-42)-83	5.9	0.02	2.1	0.08	5.69	0.06	2.38	0.79	0.07	3.89	1.08	7.76	0.12	0.39	0.16	41	45	15	Franco arcillo arenoso
C1 83-147	5.7	0.02	1.5	0.07	5.56	0.06	0.75	0.36	0.06	2.92	1.15	5.96	0.08	0.34	0.04	31	49	21	Franco arcillo arenoso
C2 147-200	5.8	0.01	1.3	0.05	1.67	0.05	0.42	0.59	0.03	1.95	1.17	1.76	0.04	0.29	0.02	29	51	21	Franco arcillo arenoso

Anexo 3. Perfil 3: Posición baja, Haplic Luvisol (Loamic, Cutanic, Hypereutric Humic)

Descrito por: Dr. David Jesús Palma López; Ing. Raúl Gómez González.

Fecha: 04/11/15

Localidad: Finca Custepec, la Concordia Chiapas.

Localización: N 15° 44' 36" y O 92° 59' 00"

Elevación: 1046 msnm

Relieve: Convexa-cóncava

Pendiente: 45%

Drenaje del sitio: donador

Material parental: Complejo metamórfico Prebatoáltico.

Flora cultivada: cafetal bajo sombra (renovación de 6 años): chalum (*Inga xalapensis* Benth.), Pishquín (*Albizia carbonaria* Britton), capulín blanco y caspirol (*Inga tetraphylla* Marthz)

Flora nativa: Selva alta perennifolia

Fauna: ardillas y aves pequeñas.

Aplicación de abonos orgánicos o fertilizantes: 2 fertilizaciones edáficas al año.

Condición climática el día: parcialmente nublado, con lluvias ligeras el día anterior.

Drenaje del perfil: imperfectamente drenado.

Observación: en el tercer y cuarto horizonte se presenta intrusión de material diferente al que forman al horizonte de color pardo oscuro con presencia de texturas arenosas probablemente ocasionadas por la descomposición de una roca con minerales diferentes al resto.



	Ho	Prof. cm.	Descripción del perfil
	A1	0-30	Transición tenue horizontal; húmedo; color pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4); textura franco arcillosa; ligeramente pedregoso, tamaño de gravas y pequeñas de formas subangulares, diversas rocas sedimentarias; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares y grumosas, fina y muy fina; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos, moderadamente espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; nódulos muy pocos, pequeños de color rojo y forma prismática, blandos de óxidos de hierro; poros numerosos, muy finos, finos y medianos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad rápida; raíces abundantes, finas, delgadas y medias; fauna presencia de lombrices y evidencias de fuerte actividad biológica en los primeros diez centímetros con formación de estructura grumosa; pH 6.0.
	Bt1	30-63	Transición marcada horizontal; húmedo; color pardo (7.5 YR 4/4); motas color pardo (7.5 YR 4/2), marcadas, pocas, finísimas y muy finas; textura arcillosa; pedregoso, piedras pequeñas y medias, subangulares, muy intemperadas; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, fina y media; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos, moderadamente espesos en poros y caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; pocos nódulos, pequeños de color rojo, prismáticos, blandos de óxidos de hierro; poros numerosos, medianos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados y de forma tubular; permeabilidad rápida; raíces comunes, finas y delgadas; pH 6.0.
	Bt2	63-(100-120)	Transición marcada irregular; húmedo; color amarillo pardusco (10 YR 6/8); motas color pardo (7.5 YR 4/2), tenue, comunes pocas, muy fina y fina; textura arcillosa con más arena; pedregoso, gravas, piedras pequeñas y medias de forma subangulares, sedimentarias muy intemperizadas; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, muy finos y finos; consistencia en húmedo friable y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos en caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; poros frecuentes muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad moderada; pocas raíces, finas y delgadas; pH 6.0.
	C	(110-120)-165	Húmedo; color pardo amarillento (10 YR 5/8); motas color negro (5 Y 2.5/1), marcada, comunes, muy fina y fina; textura arcillosa; ligeramente pedregoso, gravas, piedras pequeñas y medias de forma subangulares, probablemente lutitas muy intemperizadas; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares, muy finos y finos; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos en caras de agregados de minerales arcillosos con óxidos e hidróxidos de hierro; poros frecuentes muy finos y finos, continuos, caóticos dentro y fuera de agregados, tubulares; permeabilidad moderada; pH 6.0.

Ho (cm)	pH (H ₂ O) rel. 1:2	CE (dSm ⁻¹)	MO	N	P Olsen (mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	Na	CIC	Da (g/cm ³)	Fe	Cu	Zn	Mn	Arcilla	Limo	Arena	Textura
			(%)																
A1 0-30	5.8	0.07	11.6	0.45	69.31	0.24	10.19	3.82	0.16	27.23	1.17	12.45	0.76	1.76	14.36	29	23	49	Arcilla franca
Bt1 30-63	6.1	0.03	4.2	0.15	44.44	0.08	9.79	3.01	0.13	12.64	1.10	11.16	0.22	0.83	5.40	37	25	39	Arcilla franca
Bt2 63-(100-120)	6.3	0.06	1.1	0.04	34.72	0.08	5.81	2.68	0.11	9.73	1.10	7.66	0.12	0.49	3.56	37	27	37	Arcilla franca
C (110-120)-165	6.2	0.03	1.1	0.03	32.22	0.07	4.78	2.19	0.10	8.75	1.13	5.71	0.06	0.44	1.18	33	29	39	Arcilla franca