



Artículo / Article

Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo

State of the essential chemical elements in the soils of natural, agroforestry and monoculture systems

Paul René Fernández Ojeda¹, David Cristóbal Acevedo², Antonio Villanueva Morales¹
y Miguel Uribe Gómez¹

Resumen

Los sistemas agroforestales son una alternativa para la producción agrícola y forestal ante la pérdida de recursos naturales, que resulta de la necesidad de producir alimentos, que propicia el aumento de la frontera agrícola, y reduce los periodos de barbecho. En dos sistemas agroforestales, un monocultivo de café y un bosque de niebla en el municipio de Huatusco, Veracruz, se recolectó un total de 36 muestras a las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm, en ellas se determinó: densidad aparente (DAP), capacidad de campo (CC), punto de marchitamiento permanente (PMP), materia orgánica (MO), N inorgánico, N total, P, bases intercambiables, pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Respecto al monocultivo, los suelos de cafetales y del bosque evidenciaron una disminución de la DAP y de la acidez del suelo; un aumento de las concentraciones de MO, N y de la CC, así como del PMP. El valor de la CIC fue muy alto en todos los suelos y en los que se tuvo mayor concentración de MO, se incrementó. P y K fueron menores en el bosque en comparación con los cafetales, en oposición al N. La humedad aprovechable fue alta en todos los sitios y la DAP tuvo un comportamiento inverso a la MO. La concentración de los elementos en los suelos estudiados demostró que hay una buena disponibilidad de nutrimentos. Los sistemas agroforestales ofrecieron condiciones edáficas similares a las del bosque y una mejor fertilidad, con respecto al monocultivo.

Palabras clave: Acidez del suelo, cafetal, capacidad de intercambio, fertilidad, materia orgánica, nitrógeno.

Abstract

Agroforestry systems are an alternative for agricultural and forest production in the face of the loss of natural resources, developed as a result of the need to produce food and favoring the expansion of the agricultural frontier and reduction of the fallow periods. A total of 36 samples were collected at depths of 0-10, 10-20 and 20-30 cm from two agroforestry systems -a coffee monoculture and a montane cloud forest- in the municipality of *Huatusco, Veracruz*. The values determined in these samples were apparent density (DAP), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), organic matter (OM), inorganic N, total N, P, exchangeable bases, pH and cation exchange capacity (CEC). The soils of the coffee monoculture and the montane cloud forest showed a decrease in PB and in acidity, and an increase in OM and N concentrations, as well as CEC and PWP. The value of the FC was very high in all soil types and increased in those areas with the highest OM concentrations. Unlike N, P and K were found to be lower in the montane cloud forest than in the coffee plantations. The usable humidity rate was high in all the sites, and the behavior of the DAP was the opposite of that of OM. The concentration of the elements in the studied soils showed that there may be a good availability of nutrients. The agroforestry systems offered similar edaphic conditions to those of the forest and evidenced a better fertility than the monoculture.

Key words: Soil acidity, coffee plantation, exchange capacity, fertility, organic matter, nitrogen.

Fecha de recepción/Received date: 23 de septiembre de 2015; Fecha de aceptación/Accepted date: 12 de abril de 2016.

¹ División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México

² Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, México. Correo-e: cristobalacevdo@yahoo.com.mx

Introducción

El aprovechamiento integral de los recursos se sustenta en el principio de que la naturaleza debe ser entendida como un todo, que los componentes agua, suelo, aire, plantas, animales y hombre interactúan entre sí y que las modificaciones a uno de ellos repercuten directa o indirectamente en el resto. Otro principio, se refiere a que se debe aumentar la diversidad de componentes de la unidad y condiciones de producción, así como las plantas y los animales; el último principio argumenta que el suelo, el agua y el aire se tienen que conservar limpios y enfatizar su mejoramiento o reciclaje con prácticas diversas (Nair, 1997). La pérdida de recursos naturales surge por la necesidad de producir alimentos para satisfacer la demanda de la población, lo que aumenta la frontera agrícola y reduce los periodos de barbecho (Young, 1990).

El suelo es muy importante para el ser humano para efectos de la producción agropecuaria, pues su estado determina las actividades por realizar y las acciones correctivas para alcanzar los niveles deseados de rendimiento. Los suelos que se desarrollan bajo una vegetación natural funcionan como sistemas en equilibrio, activos y estables, que además brindan servicios ambientales (Fisher y Binkley, 2000). Por el contrario, los de uso agrícola presentan, generalmente, algún proceso de degradación y contienen menos materia orgánica, nitrógeno total y bases intercambiables, así como una capacidad de intercambio catiónico inferior (Geissert *et al.*, 2000). La estabilidad de la estructura es diferente y se remueve el material edáfico como resultado de la erosión provocada por la labranza, la escorrentía superficial y la deflación eólica (Meza y Geissert, 2006).

Diversas propiedades físicas y químicas le confieren al suelo la calidad necesaria para albergar la vida y mantener la capacidad productiva de tierras agrícolas; funciones que se son afectadas negativamente por fenómenos de degradación como la erosión y la reducción de componentes básicos como la fertilidad y la biodiversidad (UNCCD, 1996).

A menudo, los suelos agrícolas ofrecen servicios ambientales de baja calidad y se requiere de esfuerzos técnicos y económicos para conservar o restaurar sus funciones ecológicas. Los sistemas agroforestales, como los de café bajo sombra, reúnen condiciones intermedias con respecto a los anteriores, pues están más perturbados que los bosques, pero menos que los cultivos anuales.

Según Nair (1993), las zonas arbóreas producen la biomasa que mantiene y mejora los niveles de materia orgánica; algunas especies son fijadoras de nitrógeno, mientras que otras protegen contra la erosión generada por el agua y el viento; con ello, se reduce la pérdida de nutrimentos, a la vez que favorecen un aumento de la fertilidad del suelo, a partir de que pueden tomar

Introduction

The comprehensive utilization of resources is based on the principle that nature must be understood as a whole; that the water, earth, air, plants, animal and human components interact between one another and that modifications in any one of them have direct or indirect impacts on the rest. Another principle is that the diversity of components of the unit, of the conditions of production and of animals and plants must be increased, and according to the latter principle, the earth, water and air must be kept clean, and their enhancement or recycling through various practices must be emphasized (Nair, 1997). Natural resources are lost as a consequence of the need to produce food in order to meet the demand of the population, which leads to the expansion of the agricultural frontier and the reduction of the fallow periods (Young, 1990).

The soil is very important to human beings for purposes of agricultural production, as its state determines the activities that need to be carried out and the corrections required to attain the desired levels of output. The soils that develop beneath natural vegetation function as active, stable balanced systems and provide environmental services (Fisher and Binkley 2000). On the other hand, agricultural soils usually show a degradation process and contain less organic matter, total nitrogen and exchangeable bases, as well as a lower cationic exchange capacity (Geissert *et al.*, 2000). Their structural stability is different, and the edaphic material is removed as a result of the erosion caused by tillage, surface runoff and wind deflation (Meza and Geissert, 2006).

Various physical and chemical properties lend the soil the necessary qualities to hold life and maintain the productive capacity of agricultural land -which functions are negatively affected by degradation phenomena such as erosion and the decrease of basic components like fertility and biodiversity (UNCCD, 1996).

Agricultural soils often provide low-quality environmental services, and technical and economic efforts are required to preserve or restore their ecological functions. Agroforestry systems, such as coffee plantations under shade, meet intermediate conditions compared to agricultural soils, being more disrupted than the forests, but less so than annual crops.

According to Nair (1993), the woodlands produce biomass, which maintains and enhances the levels of organic matter; certain species fix nitrogen, while others protect against water- and wind-related erosion, which reduces the loss of nutrients; at the same time, they favor an increase in soil fertility, apart from the fact that they can take nutrients from the deepest layers of the soil. Furthermore, they can enhance various physical properties, generate a favorable micro-climate beneath the tree canopy, and promote increased activity by the microorganisms in charge of breaking up organic matter.

nutrimentos de las capas más profundas del mismo. Además, mejoran diferentes propiedades físicas, generan un microclima favorable bajo el dosel de los árboles y propician un incremento en la actividad realizada por los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica.

No obstante, también existen efectos adversos por una mala planeación agroforestal, como son la competencia por el agua y nutrimentos, inhibición del crecimiento debido al exceso de sombra, y dificultad para practicar cosechas mecanizadas de cultivos (Mahecha, 2003).

En este estudio se trabajó con cuatro sistemas: uno natural, dos alternativas agroforestales y un monocultivo, pues impactan de manera diferente al recurso suelo, debido a las cubiertas vegetales en cada uno de ellos. Dichos efectos se reflejan en las propiedades físicas y químicas del sustrato, para contrastar la capacidad de la agroforestería con el bosque y el monocultivo en mantener o incrementar la fertilidad y aumentar la eficiencia en la captura del carbono y fijación del nitrógeno. Por ello, se propuso comprobar o refutar las afirmaciones en torno a la agroforestería, además de conocer la variación de los elementos esenciales conforme aumenta la profundidad del suelo en tales sistemas.

Con base en todo lo anterior, el objetivo consistió en determinar el estado de la textura, la densidad aparente (DAP), la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento permanente (PMP), materia orgánica (MO), N inorgánico (amonio, nitratos), N total, P, bases intercambiables, pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los sistemas bosque natural, dos agroforestales con café y el monocultivo de café, para establecer la eficiencia nutrimental de sus suelos, en el municipio Huatusco, Veracruz.

Materiales y Métodos

Se seleccionaron suelos en el sistema tradicional (café con árboles de uso múltiple), sistema comercial (policultivo café-macadamia-aguacate), cultivo de café pleno sol (monocultivo) y en sistema bosque de niebla o mesófilo de montaña, en el municipio Huatusco, Veracruz, que se ubica a 19° 10' 25" norte y 96° 57' 43" oeste, a una altitud de 1 345 m, en la zona centro del estado. El suelo son de los tipos Cambisol y Luvisol. El primero se caracteriza por presentar en el subsuelo aspecto de roca y susceptibilidad a la erosión; en el segundo se acumula la arcilla en el subsuelo y es particularmente propenso a la erosión. El clima es cálido-húmedo con una temperatura promedio de 19.1 °C; precipitación media anual de 1 825 mm (Cano *et al.*, 1998). A continuación se describe cada sistema.

Sistema de producción café tradicional (SPCT). Consiste en una plantación tradicional de café bajo sombra en cuya composición existe una gran diversidad de árboles nativos o de vegetación natural, así como de *Persea schiedeana* Nees.

However, adverse effects are also generated through poor agroforestry planning, such as competition for water and nutrients, inhibition of growth due to excess shade, and difficulty to practice mechanical harvesting (Mahecha, 2003).

This study utilized four systems: a natural system, two agroforestry alternatives, and a monoculture, each of which has a different impact on the soil as a result of its partial vegetative cover. These effects are reflected in the physical and chemical properties of the substrate, so that the capacity of agroforestry to maintain or increase fertility and enhance efficiency in carbon sequestration and nitrogen fixation contrasts with that of the montane cloud forest. Therefore, this research sought to prove or disprove the claims in regard to agroforestry, as well as to gain knowledge of how the essential elements vary with increasing soil depths in these systems.

Based on all of the above, the objective of this study was to determine the state of the texture, apparent density (DAP), field capacity (FC), and permanent wilting point (PWP), organic matter (OM), inorganic N (ammonium, nitrates), total N, P, exchangeable bases, pH and Cationic Exchange Capacity (CEC) of the natural forest systems, two agroforestry systems with coffee trees, and a coffee monoculture, in order to establish the nutritional efficiency of their soils, in the municipality of Huatusco, Veracruz.

Materials and Methods

Soils in the traditional system (coffee and multiple-use trees), commercial system (coffee-macadamia-avocado polyculture), sun coffee plantations (monoculture), and in the montane cloud forest or mountain mesophile system, in the municipality of Huatusco, located at the center of the state of Veracruz, at the geographical coordinates 19° 10' 25" N and 96° 57' 43" W, and at an altitude of 1 345 masl. The soil types are Cambisol and Luvisol. The former is characterized by a rocky subsoil and susceptibility to erosion; the latter has a clayey subsoil and is particularly prone to erosion. The climate is warm humid, with an average temperature of 19.1 °C; its mean annual precipitation is 1 825 mm (Cano *et al.*, 1998). Below is a description of each system.

Traditional coffee production system (TCPS). It consists of a traditional coffee plantation in the shade, which comprises a wide variety of native trees or natural vegetation, as well as *Persea schiedeana* Nees. (chinene), *Inga* spp. (inga) y *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. (grevillea). The coffee trees are distributed in a 2 x 2 m topological arrangement and have a vegetal cover with a mean carbon sequestration of 53.56 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Coffee-Macadamia-Avocado production system (CMAPS). This polyculture commercial system is characterized by the

(chinene), *Inga* spp. (inga) y *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. (grevillea). Los cafetos se distribuyen en un arreglo topológico de 2 x 2 m. Poseen una cubierta vegetal con un valor medio de captura de carbono de 53.56 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Sistema de producción Café-Macadamia-Aguacate (SPCMA). El sistema de policultivo comercial se distingue por la producción de café con especies asociadas orientadas a la comercialización, como una estrategia de diversificación productiva. Está compuesto por café (*Coffea* spp.), macadamia (*Macadamia tenuifolia* F. Muell.) y aguacate (*Persea americana* Mill.). Su cubierta vegetal tiene un valor medio de captura de carbono de 17.10 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Sistema de café a pleno sol (SCPS). Como bien lo expresa el nombre, se refiere al café sin sombra; se busca maximizar la producción de café como monocultivo pues es poco común en el país, ya que casi representa 10 %. Posee una cubierta vegetal con un valor medio de captura de carbono de 9.18 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Sistema bosque de niebla natural o mesófilo de montaña (Bosque). Esta asociación corresponde al bosque mesófilo que en la zona está sumamente perturbado por la introducción de la ganadería extensiva y el cultivo de café. La comunidad vegetal tiene tres estratos: el superior, de 28 a 30 m de altura; el intermedio entre los 18 y 20 m y el inferior de 4 a 6 m conformado por una sola especie. Los géneros predominantes son *Liquidambar*, *Quercus*, *Meliosoma*, *Cornus*, *Ilex* y *Clethra*. El área se ubica sobre tres condiciones de microrrelieve: vega de río, ladera y meseta (Pérez, 2004). Posee una cubierta vegetal con un valor medio de captura de carbono de 421.01 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Se seleccionaron cuatro sistemas, los cuales fueron considerados como niveles de un primer factor de tratamientos. Dentro de cada uno de los sistemas se eligieron aleatoriamente tres sitios, se realizaron muestreos a tres profundidades diferentes: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm, donde se evaluaron las propiedades del suelo. Los sistemas fueron: bosque de niebla o mesófilo de montaña (Bosque), sistema de producción café-macadamia-aguacate (SPCMA), sistema de producción café tradicional (SPCT), y sistema de café a pleno sol (SCPS).

Para conocer la eficiencia nutrimental en los suelos, se evaluarán las siguientes variables dependientes: textura, densidad aparente (DAP), capacidad de campo (CC), punto de marchitamiento permanente (PMP), materia orgánica (mo), nitrógeno inorgánico (amonio, nitratos), nitrógeno total, fósforo, bases intercambiables, microelementos, potencial de hidrógeno y capacidad de intercambio catiónico.

Las determinaciones de los parámetros físicos del suelo se hicieron con el propósito de caracterizar cada uno de

los sistemas de producción de café con especies asociadas orientadas a la comercialización, como una estrategia de diversificación productiva. Está compuesto por café (*Coffea* spp.), macadamia (*Macadamia tenuifolia* F. Muell.) y aguacate (*Persea americana* Mill.). Su cubierta vegetal tiene un valor medio de captura de carbono de 17.10 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Sun coffee production system (SCPS). As described by its name, this is a coffee culture without shading. It seeks to maximize the production of coffee as a monoculture, as it is rather uncommon, amounting to little less than 10 %. Its vegetal cover has a mean carbon sequestration of 9.18 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Natural montane cloud forest (Forest). This association corresponds to the cloud forest, which in the study area has been extremely disturbed by the introduction of extensive livestock and coffee plantations. This vegetal community has three strata: the higher stratum, with a height of 28 to 30 m; the intermediate stratum, with 18 to 20 m, and the lower stratum, consisting of a single species, with 4 to 6 m. The prevalent genera are *Liquidambar*, *Quercus*, *Meliosoma*, *Cornus*, *Ilex* and *Clethra*. The area includes three microrelief conditions: river lowland, mountainside and plateau (Pérez, 2004). It has a vegetal cover with a mean carbon sequestration of 421.01 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Four systems, regarded as levels of a first factor of treatments, were selected. Three sites were chosen at random within each selected system, and samplings were carried out at three different depths -0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm- in order to evaluate the properties of the soil. The systems were: montane cloud forest (Forest), coffee-macadamia-avocado production system (CMAPS), traditional coffee production system (TCPS), and sun coffee system (SCPS).

In order to determine the nutrient efficiency of the soils of the four systems, the following dependent variables were evaluated: Texture, Apparent Density (DAP), Field Capacity (FC), Permanent Wilting Point (PWP), Organic Matter (OM), inorganic Nitrogen (ammonium, nitrates), total Nitrogen, Phosphorus, Exchangeable Bases, Microelements, Hydrogen Potential and Cationic Exchange Capacity.

The physical parameters of the soil were determined in order to characterize each system; the assessments were carried out from October to December 2014, at the *Laboratorio de Física de Suelos* of the *Universidad Autónoma Chapingo*, under the standards and methods of the Mexican official norm NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002). Thus, the apparent density DAP was estimated by using the cylinder; the field capacity (FC), through water retention at 33 kPa; the permanent wilting point (PWP), at 1 500 kPa, with a pressure cooker and membranes, and the texture, using a pipette, with organic matter destruction and dispersion with sodium hexametaphosphate.

los sistemas; se llevaron a cabo de octubre a diciembre de 2014, en el Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, bajo los estándares y metodologías de la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002). Así, la densidad aparente (DAP) se calculó con el uso de cilindro; la capacidad de campo (CC), mediante retención de agua a 33 kPa; el punto de marchitez permanente (PMP) a 1 500 kPa, con olla y membranas de presión, y la textura, mediante pipeta, con destrucción de materia orgánica y dispersión con hexametáfosfato de sodio.

Las evaluaciones de los parámetros químicos del suelo se ejecutaron con la finalidad de describir a cada uno de los sistemas y establecer las condiciones nutrimentales disponibles para las plantas; se realizaron en noviembre de 2014 en el Laboratorio Central de la Universidad Autónoma Chapingo, igualmente, bajo los criterios establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002). Las muestras analizadas se secaron al aire y se tamizaron a 2 mm para calcular: potasio (K) intercambiable, extraído con acetato de amonio 1.0 n pH 7.0 por espectrofotometría de emisión de flama; calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiables, obtenidos con acetato de amonio 1.0 n pH 7.0 por espectrofotometría de absorción atómica; materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black (1934); nitrógeno total (N tot), por arrastre de vapor: Kjeldahl; nitrógeno inorgánico (N min), con cloruro de potasio 2N por arrastre de vapor, fósforo disponible (P), con Bray p⁻¹; capacidad de intercambio catiónico (CIC), con acetato de amonio 1.0N, pH 7.0 por arrastre de vapor; pH, potenciométrico en relación muestra agua 1:2 y el agua aprovechable (CC - PMP).

Los datos fueron analizados conforme a un experimento factorial de dos factores 4 x 3, correspondiente a cuatro sistemas y tres profundidades de suelo. Se consideraron tres repeticiones por cada una de las 12 combinaciones de tratamientos. El modelo estadístico correspondiente es:

$$Y_{ijt} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijt}$$

Donde:

- $\epsilon_{ijt} \sim N(0, \delta^2)$,
- ϵ_{ijt} = Mutuamente independientes
- $t = 1, \dots$
- $rij; i = 1, \dots$
- $\alpha; j = 1, \dots, b$
- Y_{ijt} = Valor de la respuesta en la replicación $t^{\text{ésimo}}$ del tratamiento con el $i^{\text{ésimo}}$ sistema de producción y la $j^{\text{ésimo}}$ profundidad del suelo
- μ = Constante (media general)
- α_i = Efecto del sistema $i^{\text{ésimo}}$
- β_j = Efecto de la profundidad $j^{\text{ésimo}}$
- $(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción para el $i^{\text{ésimo}}$ sistema y la $j^{\text{ésimo}}$ profundidad
- ϵ_{ijt} = Errores aleatorios

The purpose of the assessment of the chemical parameters of the soil was to describe each system and establish the nutritional conditions available to the plants; these assessments were carried out in November, 2014, at the *Laboratorio Central of the Universidad Autónoma Chapingo*, also according to the criteria established by the Mexican Official Norm NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002). The analyzed samples were air-dried and sifted through a 2 mm sieve in order to determine the values of: exchangeable potassium (K), extracted with ammonium acetate (1.0N pH 7.0), using flame emission spectrophotometry; exchangeable calcium (Ca) and magnesium (Mg) obtained with ammonium acetate (1.0N pH 7.0), using atomic absorption spectrophotometry; organic matter (OM), using the Walkley and Black method (1934); total nitrogen (N tot), estimated through steam distillation: Kjeldahl; inorganic nitrogen (N min), with potassium chloride (2N), using steam distillation; available phosphorus (P), with Bray p⁻¹; cationic exchange capacity (CEC), with ammonium acetate (1.0 n pH 7.0), using steam distillation; pH, through potentiometric titration in a 1:2 sample/water ratio, and available water (FC - PWP).

The data were analyzed according to a 4 x 3 factorial experiment with two factors, corresponding to four systems and three soil depths. Three repetitions for each of the 12 combinations of treatments were considered. The corresponding statistical model is the following:

$$Y_{ijt} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijt}$$

Where:

- $\epsilon_{ijt} \sim N(0, \delta^2)$,
- ϵ_{ijt} = Mutually independent
- $t = 1, \dots$
- $rij; i = 1, \dots$
- $\alpha; j = 1, \dots, b$
- Y_{ijt} = Response value in the t^{th} replication of the treatment with the i^{th} production system and at the j^{th} soil depth
- μ = Constant (overall average)
- α_i = Effect of the i^{th} system
- β_j = Effect of the j^{th} depth
- $(\alpha\beta)_{ij}$ = Effect of the interaction for the i^{th} system and the j^{th} depth
- ϵ_{ijt} = Random errors

The collected data were averaged by site and by soil depth; all the assessed characteristics were analyzed using the SAS 9.1 statistical software (2002). Variance analyses and multiple mean comparison tests were carried out using Tukey's method (Steel and Torrie, 1998) in order to determine significant differences between the four production systems and between the three different soil depths, as well as the potential interactions between these two factors.

Los datos obtenidos se promediaron por sitio y por profundidad del suelo; todas las características evaluadas se analizaron mediante el programa estadístico SAS 9.1 (2002). Se efectuaron análisis de varianza y pruebas de comparaciones múltiples de medias por el método de *Tukey* (Steel y Torrie, 1998) para determinar diferencias significativas entre los cuatro sistemas de producción y entre las tres diferentes profundidades de suelo, además de las posibles interacciones entre estos dos factores.

Resultados y Discusión

Propiedades físicas

Las concentraciones de los distintos parámetros físicos fueron significativamente diferentes en los sistemas estudiados. Las pruebas de comparación de medias para las propiedades físicas de suelos se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Prueba de comparación de medias de parámetros físicos del suelo en los sistemas estudiados en Huatusco, Veracruz, México.

Sistema	Bosque	SPCT	SPCMA	SCPS	PROF	00-10	10-20	20-30
N	9	9	9	9	N	12	12	12
Dap	0.80c	0.95b	1.03ab	1.05a	DAP	0.98a	0.97a	0.97a
CC	54.85a	54.13a	45.16b	44.68b	CC	51.46a	51.46a	48.60a
PMP	42.87a	42.38a	32.38b	30.85b	PMP	39.10a	36.25a	36.25a

Bosque = Bosque de niebla natural o mesófilo de montaña; SPCT = Sistema de producción café tradicional; SPCMA = Sistema de producción Café-Macadamia-Aguacate; SCPS = Sistema de café a pleno sol; PROF = Profundidad de suelo; N = Número de muestras; DAP = Densidad aparente; CC (%) = Capacidad de campo; PMP (%) = Punto de marchitamiento permanente; medias con la misma letra no son significativamente diferentes (*Tukey*, $\alpha \leq 0.05$).

Table 1. Mean comparison test of soil physical parameters in the studied systems in Huatusco, Veracruz, Mexico.

System	Forest	TCPS	CMAPS	SCPS	SD	00-10	10-20	20-30
N	9	9	9	9	N	12	12	12
DAP	0.80c	0.95b	1.03ab	1.05a	DAP	0.98a	0.97a	0.97a
FC	54.85a	54.13a	45.16b	44.68b	FC	51.46a	51.46a	48.60a
PWP	42.87a	42.38a	32.38b	30.85b	PWP	39.10a	36.25a	36.25a

Forest = Montane cloud forest; TCPS = Traditional coffee production system; CMAPS = Coffee-Macadamia-Avocado production system; SCPS = Sun coffee system; SD = Soil depth; N = Number of samples; DAP = Apparent density; FC (%) = Field capacity; PWP (%) = Permanent wilting point; means with the same letter are not significantly different (*Tukey*, $\alpha \leq 0.05$).

Las clases texturales de los suelos para bosque fueron franco-arenosa y en cafetales, de franca a franco-arcillosa; a todas las profundidades presentaron una textura franca con variaciones. Asimismo, son ácidos y pobres en bases intercambiables, a pesar de tener una capa superficial rica en materia orgánica.

Los análisis de varianza mostraron que para la densidad aparente (DAP), se verificaron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.0001$ en los cuatro sistemas evaluados. El sistema con una menor densidad aparente fue el Bosque, seguido por

Results and Discussion

Physical properties

Concentrations of the various physical parameters were significantly different in the studied systems. The mean comparison tests for the physical properties of the soils are shown in Table 1.

The soil texture classes were loamy-sandy in the forest, and loamy to loamy-clayey in the coffee plantations; at all depths they had a loamy texture with variations. Furthermore, they are acidic and their concentrations of exchangeable bases are low, despite having a surface layer rich in organic matter.

The variance analyses showed the presence of statistical differences ($\alpha < 0.05$) for apparent density (DAP), with $P < 0.0001$ in the four evaluated systems. The system with the

lowest apparent density was the Forest, followed by the TCPS and the SCPS. CMAPS was the system with the highest apparent density. This accounts for the fact that the Forest and the TCPS had the highest concentrations of organic matter. As is well known, systems with the highest content of carbon and organic matter have lower values of apparent density (Monroy, 2009). The vegetal cover is scarcer in the SCPS than in the CMAPS, the TCPS and the Forest, which favored a lower contribution of organic matter, and a higher oxidation thereof, since this component is closely related to apparent density and porous space. In the presence of higher contents of organic

el SPCT y el SCPS. El que reúne los valores más altos de densidad aparente fue el SPCMA. Lo anterior se explica porque el Bosque y el SPCT presentaron las máximas concentraciones de materia orgánica. Los sistemas con mayor contenido de carbono y materia orgánica tienen valores menores de densidad aparente (Monroy, 2009). La cubierta vegetal en el SCPS es más escasa, en comparación con SPCMA, SPCT y Bosque, lo que favoreció un aporte menor de materia orgánica y su mayor oxidación, pues este componente guarda una estrecha relación con la densidad aparente y el espacio poroso. Al existir mayores contenidos de materia orgánica, los suelos presentan menores densidades y, por consiguiente, condiciones físicas favorables, en comparación con densidades altas (Cavazos y Rodríguez, 1992; Carter, 2002).

A medida que se incrementó la profundidad, la densidad aparente aumentó para el Bosque, SPCMA y SPCT, lo que responde al bajo contenido de materia orgánica a mayor profundidad, donde existe menor agregación y más compactación. Sin embargo, en el caso del SCPS este comportamiento fue inverso.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de densidad aparente el Bosque y el SPCT se clasificaron dentro de suelos orgánicos y volcánicos, mientras que el SPCMA y el SCPS en los suelos minerales. Los sistemas estudiados no reflejaron cambios en la densidad aparente y las pequeñas diferencias no son atribuidas a estos; pudieran depender de la textura, los contenidos de materia orgánica y el estado de compactación del suelo (Alvarado, 2007). En el Bosque y SPCT las condiciones estructurales son mejores, debido a la relación entre la materia orgánica y la densidad aparente.

Los análisis de varianza evidenciaron que en los cuatro sistemas evaluados hay diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), para el CC o capacidad de campo, con $P = 0.0003$ y para el PMP, el punto de marchitez permanente, con $P < 0.0001$; los valores más altos se ubicaron en el Bosque, al que le sigue SPCT y SPCMA, y lo contrario ocurre en el SCPS.

En el caso del efecto de la profundidad sobre estas variables, a medida que se incrementaba, ambas disminuían para el Bosque, SPCMA y SPCT. En el SCPS su comportamiento fue variable.

Respecto a la humedad aprovechable (HA) o agua realmente disponible, en el SCPS se registraron valores superiores, mientras que en el Bosque fueron más bajos, ya que alcanzó cifras de 11.01 a 13.22 % en suelos agroforestales, de 11.37 a 12.98 % en bosque y de 13.42 a 14.17 % en café a pleno sol. Los datos de punto de marchitez permanente, considerablemente elevados, indican que una cantidad apreciable de agua

matter, the soils have lower densities and, consequently, favorable physical conditions, compared to higher densities (Cavazos and Rodríguez, 1992; Carter, 2002).

The apparent density increased in direct proportion to soil depth in the Forest, CMAPS and TCPS, due to the low content of organic matter at greater depths, where there is less aggregation and more compacting. However, the SCPS showed the opposite behavior.

According to the NOM-021-RECNAT-2000 norm, which establishes the specifications for fertility, salinity and soil classification, as well as the apparent density values, the Forest and the TCPS were classified among the organic and volcanic soils, while the CMAPS and the SCPS were classified among the mineral soils. The studied systems did not reflect changes in the apparent density, and the small differences cannot be ascribed to these; they may depend on the texture, the organic matter contents and the state of compacting of the soil (Alvarado, 2007). The structural conditions are better in the Forest and the TCPS, thanks to the relationship between organic matter and apparent density.

The variance analyses showed significant statistical differences ($\alpha < 0.05$) for the FC, or field capacity, with $P = 0.0003$, and for the PWP, the permanent wilting point, PWP, with $P < 0.0001$; the highest values were found in the Forest, followed by the TCPS and CMAPS; instead, the SCPS had the lowest values.

As depth increased, these variables diminished in the Forest, CMAPS and TCPS. Their behavior varied in the SCPS.

As for the usable humidity (UH) or actually available water, the highest values were registered in the SCPS, while the Forest had lower values, of 11.01 to 13.22 % in the agroforestry soils, 11.37 to 12.98 % in the forest, and 13.42 to 14.17 % in sun coffee plantations. The significantly high values for the permanent wilting point indicate that a considerable amount of water is retained under strong tension in the soil and cannot be absorbed by the plants.

Chemical properties

The concentrations of the various chemical elements differed significantly among the studied systems. Table 2 shows the mean comparison tests for the chemical properties of the soils.



es retenida bajo fuerte tensión en el suelo y no la pueden absorber las plantas.

Propiedades químicas

Las concentraciones de los distintos elementos químicos fueron significativamente diferentes en los sistemas estudiados. Las pruebas de comparación de medias para las propiedades químicas de suelos se presentan en el Cuadro 2.

The chemical properties of the soil were analyzed in order to characterize the nutritional condition at various depths in each of the systems.

No direct relationship was verified between the hydrogen potential (pH) and the soil depth. The variance analysis showed significant statistical differences between the four evaluated systems ($\alpha < 0.05$), with $P < 0.0001$). The system with the lowest pH was the Forest, followed by the TCPS, and the CMAPS had

Cuadro 2. Prueba de comparación de medias de parámetros químicos del suelo en los sistemas estudiados en Huatusco, Veracruz, México.

Sistema	Bosque	SPCT	SPCMA	SCPS	PROF	00-10	10-20	20-30
N	9	9	9	9	N	12	12	12
pH	5.17d	5.45c	6.14a	5.80b	pH	5.69a	5.64a	5.59a
CIC	46.68a	43.11a	42.52a	41.70a	CIC	48.41a	42.42b	39.67b
MO	14.41a	11.35b	5.34c	4.63c	MO	11.92a	8.50b	6.38b
N tot	0.72a	0.56b	0.26c	0.23c	N tot	0.59a	0.42b	0.31b
N min	32.17a	23.01b	20.24b	19.11b	N min	26.61a	23.62a	20.66a
P	5.74b	7.74b	5.97b	23.52a	P	16.97a	8.65a	6.60a
K	160.00b	296.6ab	263.1ab	366.44a	K	379.67a	237.50b	197.50b
Ca	290.0c	728.4b	1926.9a	1955.0a	Ca	1524.00a	1143.33b	1007.92b
Mg	94.89c	204.67c	1269.00a	867.44b	Mg	667.58a	583.33a	576.08a

Bosque = Bosque de niebla natural o mesófilo de montaña; SPCT = Sistema de producción café tradicional; SPCMA = Sistema de producción Café-Macadamia-Aguacate; SCPS = Sistema de café a pleno sol; PROF = Profundidad de suelo; N = Número de muestras; pH = Potencial de hidrógeno; CIC (Cmol (+) kg⁻¹) = Capacidad de intercambio catiónico; MO (%) = Materia orgánica; N tot (%) = Nitrógeno total; N min (mg kg⁻¹) = Nitrógeno mineral; P (mg kg⁻¹) = Fosforo; K (mg kg⁻¹) = Potasio; Ca (mg kg⁻¹) = Calcio; medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Table 2. Mean comparison test for chemical soil parameters in the systems studied in Huatusco, Veracruz, Mexico.

System	Forest	TCPS	CMAPS	SCPS	SD	00-10	10-20	20-30
N	9	9	9	9	N	12	12	12
pH	5.17d	5.45c	6.14a	5.80b	pH	5.69a	5.64a	5.59a
CEC	46.68a	43.11a	42.52a	41.70a	CEC	48.41a	42.42b	39.67b
OM	14.41a	11.35b	5.34c	4.63c	OM	11.92a	8.50b	6.38b
Tot N	0.72a	0.56b	0.26c	0.23c	Tot N	0.59a	0.42b	0.31b
Min N	32.17a	23.01b	20.24b	19.11b	Min N	26.61a	23.62a	20.66a
P	5.74b	7.74b	5.97b	23.52a	P	16.97a	8.65a	6.60a
K	160.00b	296.6ab	263.1ab	366.44a	K	379.67a	237.50b	197.50b
Ca	290.0c	728.4b	1926.9a	1955.0a	Ca	1524.00a	1143.33b	1007.92b
Mg	94.89c	204.67c	1269.00a	867.44b	Mg	667.58a	583.33a	576.08a

Forest = Montane cloud forest; TCPS = Traditional coffee production system; CMAPS = Coffee-Macadamia-Avocado production system; SCPS = Sun coffee system; SD = Soil depth; N = Number of samples; pH = Hydrogen potential; CEC (Cmol (+) kg⁻¹) = Cationic exchange capacity; OM (%) = Organic matter; tot N (%) = Total nitrogen; N min (mg kg⁻¹) = Mineral nitrogen; P (mg kg⁻¹) = Phosphorus; K (mg kg⁻¹) = Potassium; Ca (mg kg⁻¹) = Calcium. Measures with the same letter are not significantly different (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

El análisis de las propiedades químicas del suelo fue realizado con el fin de caracterizar la condición nutrimental en las diferentes profundidades de cada uno de los sistemas.

Para el potencial de hidrógeno (pH), no se verificó una relación directa con la profundidad del suelo. El análisis de varianza mostró que existen diferencias estadísticas significativas en los cuatro sistemas evaluados, ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.0001$. El sistema con un menor pH fue el Bosque, seguido por el SPCT y el SCPS, y SPCMA tuvo las cifras más altas; este parámetro se comportó de manera similar a la densidad aparente del suelo.

Brady y Weil (1999) refieren que la capacidad para absorber los elementos minerales de la vegetación influye de forma importante en las características de los suelos en donde se desarrolla, y que el pH afecta directamente la asimilación de los nutrimentos.

La acidez se relacionó con la baja saturación del complejo de adsorción en bases intercambiables, principalmente en calcio, pero también en potasio y magnesio. Los valores más bajos obtenidos en este estudio se explican por las diferencias en los contenidos de materia orgánica, ya que esta acidifica el suelo (Ortiz y Ortiz, 1990), como lo demuestran el Bosque y el SPCT, en el presente estudio. A partir de la NOM-021-RECNAT-2000, y a los valores de pH, todos los suelos de los sistemas se clasifican como moderadamente ácidos.

Para la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el análisis de varianza supone diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P = 0.0303$ en los cuatro sistemas. El intervalo en el presente estudio fue de 41.70 a 46.68 Cmol (+) kg⁻¹, que son muy altos, pero que disminuyeron conforme aumentó la profundidad del suelo. El que resultó con la menor capacidad fue el SCPS, al que siguieron el SPCMA y el SCPT; el de Bosque registró los valores más destacados. En consecuencia, se concluye que el ambiente químico natural de los suelos estudiados demuestra ser propicio para una buena disponibilidad de diversos nutrimentos para las plantas. La CIC depende de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica (Osman, 2013). En general, entre más arcilla y materia orgánica haya en el suelo, la capacidad de intercambio es mayor (Essington, 2004; Roy *et al.*, 2006). En este caso en los suelos donde había una concentración de materia orgánica importante, que fueron el Bosque y el SPCT la variable sobresalió.

Lo mismo sucedió con la profundidad, pues a medida que aumentó, la materia orgánica disminuyó y, por consiguiente, la capacidad de intercambio catiónico. En general, en casi todos los suelos la CIC se eleva cuando el pH se basicifica, pero en el estudio involucrado no sucedió así. Con base en la NOM-021-RECNAT-2000 y a los valores de CIC, todos los sistemas se clasificaron como "de muy alta".

the highest values; this parameter behaved similarly to the apparent density of the soil.

According to Brady and Weil (1999), the capacity of the vegetation to absorb mineral elements exerts an important influence on the characteristics of the soils where it develops, and the pH affects the assimilation of nutrients directly.

Acidity was associated with a low saturation of the adsorption complex in exchangeable bases, mainly in calcium, but also in potassium and magnesium. The lowest values obtained in the present study are accounted for by the differences in the contents of organic matter, since this acidifies the soil (Ortiz and Ortiz, 1990), as shown in the Forest and the TCPS. Based on the norm NOM-021-RECNAT-2000 and on the pH values, all the soils of the systems are classified as moderately acidic.

For the cationic exchange capacity (CEC), the variance analysis assumes significant statistical differences ($\alpha < 0.05$), with $P = 0.0303$ in the four systems. The interval in the present study was 41.70 to 46.68 Cmol (+) kg⁻¹, both of which are extremely high values, but diminished as the soil depth increased. The system with the lowest capacity was SCPS, followed by the CMAPS and the TCPS; the Forest had the highest values. Therefore, it may be concluded that the natural chemical environment of the studied soils has been proven to favor a good availability of various nutrients for the plants. The CEC depends on the texture of the soil and on its content of organic matter (Osman, 2013). In general, the more clay and organic matter there is in the soil, the higher the exchange capacity (Essington, 2004; Roy *et al.*, 2006). This variable was prominent in soils with a major organic matter concentration, namely those of the Forest and the TCPS.

The same is true of the soil depth, and therefore of the cationic exchange capacity, since lower organic matter concentrations were found as the soil depth increased. In general, the CEC increases in almost every soil type when the pH becomes alkaline; however, this was not the case in the study involved. Based on the norm NOM-021-RECNAT-2000 and on the CEC values, all the systems were classified as "extremely high".



En términos de materia orgánica (MO), el análisis de varianza reveló diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.0001$, en los cuatro sistemas evaluados. El que tuvo un menor porcentaje fue el SCPS, luego el SPCMA y el SPCT. Por el contrario, en el Bosque se obtuvieron los porcentajes superiores de esta variable, misma que se asocia con la cubierta vegetal. A medida que se avanza en profundidad, la materia orgánica disminuyó para todos los sistemas, lo que se explica porque el mayor aporte para dicha variable ocurre en la superficie (Soto *et al.*, 2007). Al respecto, se confirma la presencia de hojarasca procedente del dosel, y también refleja las prácticas de manejo de todos los sistemas, incluso el SCPS, que no han sido tan intensos como para afectar los contenidos de materia orgánica. Al aplicar la NOM-021-RECNAT-2000 a los resultados obtenidos, el SCPS y el SPCMA tuvieron un porcentaje bajo de MO, mientras que para Bosque y el SPCT ocurre lo contrario. Se identificó que a mayor intensidad de uso del suelo, la materia orgánica disminuye. La perturbación de los suelos de los bosques provoca una reducción en sus contenidos orgánicos, ya que la cobertura vegetal tiende a eliminarse, y por lo tanto, se favorece un ascenso en la temperatura y, con ello, la actividad microbiana así como una rápida mineralización del sustrato, lo que eventualmente conduce a su pérdida.

Para el nitrógeno total resultaron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.001$, en los cuatro sistemas evaluados. El sistema con el menor porcentaje de nitrógeno total fue el SCPS al que continúan en ese sentido el SPCMA y el SPCT, y lo opuesto se verificó con el Bosque, por el comportamiento de la materia orgánica. A medida que se incrementa la profundidad, el nitrógeno total disminuye considerablemente. El nitrógeno mineral tiene una mayor dinámica que el nitrógeno total, por lo que su manifestación en ocasiones difiere. Sin embargo, en el caso del suelo de Bosque coincidió que el nitrógeno mineral fue más alto que en el suelo de los otros sistemas al igual que el nitrógeno total. Esto se debió a que quien dirige las concentraciones de nitrógeno total y mineral en sistemas no tan perturbados es el contenido de materia orgánica. De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, y a los valores de nitrógeno total el SCPS reúne un porcentaje de nitrógeno total alto, mientras que el de Bosque, el de SPCMA y el de SPCT fue muy alto.

Para el nitrógeno mineral, hubo diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P = 0.0011$, en los cuatro sistemas evaluados, según el análisis de varianza. El sistema con porcentaje de nitrógeno mineral menor fue el SPCMA, al que continuaron el SCPS y el SPCT. El sistema con los valores más altos de nitrógeno mineral fue el Bosque. Se aprecia que a medida que la profundidad se incrementó el nitrógeno mineral disminuyó para el Bosque y SPCT. En SCPS y el SPCMA el comportamiento de este componente no siguió un patrón definido. En la profundidad 0-10 cm los resultados sugieren la existencia de una relación

As for the organic matter (OM), the variance analysis revealed significant statistical differences ($\alpha < 0.05$), with $P < 0.0001$, in the four assessed systems. The one with the lowest percentage was the SCPS, followed by the CMAPS and the TCPS. In contrast, the Forest registered the highest percentages for this variable, which is associated with the vegetal cover. As the soil depth increased, the organic matter diminished in all systems, since the largest input for this variable occurs at surface level (Soto *et al.*, 2007). In this case, the presence of dead leaves fallen from the canopy is confirmed, reflecting the management practices used in all the systems, the SCPS included, which have not been intense enough to affect the organic matter contents. When the NOM-021-RECNAT-2000 norm was applied to the results obtained for this variable, the SCPS and the CMAPS had a low percentage of OM, unlike the Forest and the TCSP. Organic matter diminishes with a more intense use of the soil. Forest soil disturbance reduces the organic matter contents, since the vegetal cover tends to be removed, which favors an increase in temperature and, consequently, in microbial activity, as well as a rapid mineralization of the substrate, that eventually cause its loss.

Significant statistical differences ($\alpha < 0.05$), with $P < 0.001$, were found for total nitrogen in the four evaluated systems. The system with the lowest percentage of total nitrogen was SCPS, followed by CMAPS and TCPS; the opposite is true for the Forest, due to the behavior of organic matter. As the soil depth increases, the total nitrogen diminishes considerably. The mineral nitrogen has a greater dynamic range than the total nitrogen, and therefore its manifestation varies sometimes. However, mineral nitrogen -like total nitrogen- was higher in the Forest soil than in the other systems. This is because the concentrations of mineral and total nitrogen in less disturbed systems are determined by the organic matter. According to the NOM-021-RECNAT-2000 and to the total nitrogen values, the SCPS was shown to contain a high percentage of total nitrogen, while the percentages contained in the Forest, CMAPS and TCPS were rated as extremely high.

There were statistically significant differences ($\alpha < 0.05$), with $P = 0.0011$, in the mineral nitrogen concentrations of the four assessed systems, according to the variance analysis. The system with the lowest percentage of mineral nitrogen was CMAPS, followed by the SCPS and TCPS. The system with the highest values for mineral nitrogen was the Forest. The concentrations of mineral nitrogen were observed to decrease as the soil depth increased in the Forest and the TCPS. In the SCPS and the CMAPS, the behavior of this component did not follow a clear pattern. At the depth of 0-10 cm, the results suggest the existence of an association with the organic matter and total nitrogen contents. Based on the NOM-021-RECNAT-2000, the SCPS had a low content of mineral nitrogen, while the Forest, the CMAPS and the TCPS had a medium content.

con los contenidos de materia orgánica y nitrógeno total. A partir de la NOM-021-RECNAT-2000, el SCPS tuvo un contenido de nitrógeno mineral bajo, mientras que el Bosque, el SPCMA y el SPCT, medio.

Existen diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P = 0.0054$ para el fósforo (P) en los cuatro sistemas evaluados. El sistema con una menor concentración de este elemento fue el Bosque, seguido del SPCMA y el SPCT, en contraste con el SCPS. Como en otros casos, se verifica una reacción opuesta del mismo con respecto a la profundidad para el SPCMA y el SCPS, pero para el Bosque y el SPCT, no se definió un patrón regular. Los contenidos de fósforo en todos los sistemas se clasificaron como bajos. Alvarado (2007) detectó que los contenidos de fósforo varían considerablemente de acuerdo a las condiciones climáticas en que se toman las muestras en campo. SCPS tuvo un contenido de fósforo medio, Bosque, el SPCMA y el SPCT bajo. No se estableció ninguna relación entre P y las variables de materia orgánica, densidad aparente, pH y nitrógeno. En el sistema de café a pleno sol los valores de fósforo fueron altos, debido a que en Veracruz el cafetal es intensivamente manejado, lo que incluye la aplicación de fertilizantes de forma regular, y se propician así, cambios importantes en el contenido de nutrimentos (Geissert e Ibáñez, 2008).

También se confirmaron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$) para las bases intercambiables (K, Ca, Mg); para el potasio con $P = 0.0029$, para el calcio y magnesio con $P < 0.0001$, en los cuatro sistemas evaluados. El Bosque registró la menor concentración de las tres. El sistema con los valores más altos de potasio y de calcio fue el SCPS, mientras que el SPCMA tuvo los de magnesio. El efecto de la profundidad sobre ambos elementos es inverso en todos los sistemas, sin un patrón definido y el magnesio, en particular, se verificó en el Bosque y el SPCT.

Vergara (2003) refiere que los iones intercambiables potasio, calcio y magnesio tienen una estrecha relación con el pH. En el presente estudio, dicha relación se confirma a partir de los datos del Bosque y el SPCT con los valores más bajos de pH, pero también de bases intercambiables. Estos últimos indican una pérdida de nutrimentos, arrastrados por la gran cantidad de agua de lluvia que provoca lixiviación (Geissert e Ibáñez, 2008). De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, y a los valores de potasio se identificó un contenido de potasio medio en el Bosque ($0.41 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) mientras que el SPCMA ($0.67 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), el SPCT ($0.76 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) y el SCPS ($0.93 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) se registraron cifras altas. En el Bosque ($0.74 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) se obtuvo un contenido de calcio muy bajo, mientras que el SPCT ($1.86 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) y el SPCMA ($4.94 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) fue bajo y el SCPS ($5.01 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) medio. El contenido de magnesio en el Bosque ($0.24 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) fue muy bajo, el SPCT ($0.52 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) bajo, el SPCMA ($2.22 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) medio y el SCPS ($3.25 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), alto.

There are significant statistical differences ($\alpha < 0.05$), with $P = 0.0054$, for phosphorus (P) in the four evaluated systems. The system with the lowest concentration of this element was the Forest, followed by the CMAPS and TCPS, in contrast with the SCPS. As in other cases, there is an opposite reaction of this system in regard to soil depth to that occurring in the CMAPS and SCPS; however, no regular pattern was determined for the Forest of the TCPS. The phosphorus contents in all systems were classified as low. Alvarado (2007) detected considerable variation in the phosphorus contents according to the climatic conditions in which the samples are collected in field. The SCPS had a medium content of phosphorus, while the Forest, the CMAPS and the TCPS had a low content. No relationship was established between P and the organic matter variables, apparent density, pH and nitrogen. In the sun coffee system, the values for phosphorus were high because coffee plantations in Veracruz receive extensive management, including regular application of fertilizers, which results in important changes in the content of nutrients (Geissert and Ibáñez, 2008).

Significant statistical differences ($\alpha < 0.05$) were also confirmed for exchangeable bases (K, Ca, Mg) -with $P = 0.0029$ for potassium and $P < 0.0001$ for calcium and magnesium- in the four assessed systems. The Forest registered the lowest concentration of all three. The system with the highest values for potassium and calcium was the SCPS, while the CMAPS had the highest values for magnesium. The effect of the soil depth on both elements was shown to be the reverse in all systems without a definite pattern, and magnesium concentrations particularly were verified in the Forest and the TCPS.

According to Vergara (2003), there is a close relationship between the exchangeable potassium, calcium and magnesium ions and the pH. In this study, this association is confirmed based on the data for the Forest and the TCPS with the lowest pH, but also with the lowest concentrations of exchangeable bases. These are indicative of a loss of nutrients, which are swept along by huge amounts of rain water that cause lixiviation (Geissert and Ibáñez, 2008). According to the NOM-021-RECNAT-2000 and to the values of potassium, a mean content of potassium was identified in the Forest ($0.41 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), while the CMAPS ($0.67 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), the TCPS ($0.76 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) and the SCPS ($0.93 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) had high concentrations. The calcium content was extremely low in the Forest ($0.74 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), low in the TCPS ($1.86 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) and the CMAPS ($4.94 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), and medium in the SCPS ($5.01 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$). The content of magnesium in the Forest ($0.24 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) was also extremely low; it was low in the TCPS ($0.52 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), medium in the CMAPS ($2.22 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), and high in the SCPS ($3.25 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$).



Conclusiones

El suelo del sistema con café a pleno sol registró densidades aparentes y texturas similares a los sistemas natural y agroforestal con café, y una menor capacidad de retención de agua expresada por valores reducidos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente; en contraste, el del Bosque los valores más altos de dichos parámetros; los valores intermedios correspondieron a los suelos de los sistemas agroforestales de producción café tradicional y de producción Café-Macadamia-Aguacate.

El pH del suelo bajo los sistemas de Bosque, sistemas agroforestales y monocultivo de café fue ácido, condición que se acentuó a medida que se incrementó la materia orgánica. En donde los suelos la concentraron en abundancia como resultado de una amplia cubierta vegetal, la capacidad de intercambio catiónico fue superior, pero se reduce con la profundidad.

El nitrógeno total en los sistemas estudiados resultó de alto a muy alto, lo que responde de manera directa con la presencia de la materia orgánica; el nitrógeno total se comportó de forma diferente.

De manera general, se concluye que el Bosque fue el mejor de los sistemas estudiados, seguido por el de producción café tradicional y el de producción Café-Macadamia-Aguacate; en contraste, sistema de café a pleno sol fue el más deficiente. SPCT y SPCMA propiciaron una mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, con respecto al sistema de café a pleno sol. El establecimiento del monocultivo de café favoreció una disminución de la concentración de materia orgánica y de nitrógeno, menor capacidad de retención de agua, y un aumento en las bases intercambiables.

Agradecimientos

Paul René Fernández Ojeda y David Cristóbal Acevedo agradecen a Conacyt, México por la beca otorgada al primer autor. Los autores reconocen el apoyo logístico y de infraestructura para la realización de este trabajo a la Universidad Autónoma Chapingo y al Departamento de Suelos de la misma. Asimismo expresan agradecimiento al Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales de la División de Ciencias Forestales por el financiamiento para la realización de esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Paul René Fernández Ojeda: muestreo, preparación de muestras sistematización de datos y discusión de resultados; David Cristóbal Acevedo: apoyo al muestreo preparación de muestras y revisión de resultados de los análisis de laboratorio; Antonio Villanueva Morales análisis estadístico de los datos; Miguel Uribe Gómez: redacción y discusión de resultados.

Conclusions

The soil of the sun coffee production system had similar apparent densities and textures to those of the natural and agroforestry systems with coffee trees, as well as a lower water retention capacity expressed in low field capacity and permanent wilting point; in contrast, the Forest had the highest values for these parameters; intermediate values correspond to the soils of the agroforestry and the traditional coffee and Coffee-Macadamia-Avocado production systems.

The pH of the soil under the Forest, the agroforestry systems and the coffee monocultures was found to be acidic, a condition that increased with higher contents of organic matter. In those soils where this was abundant on the surface layers as a result of a broad vegetal cover, the cationic exchange capacity was found to be greater. However, organic matter becomes less abundant at greater soil depths.

Total nitrogen in the studied systems was found to range between high and extremely high, in direct proportion to the presence of organic matter; the behavior of mineral nitrogen varied.

In general, we conclude that the Forest was the best of the four studied systems, followed by the traditional coffee and Coffee-Macadamia-Avocado production systems; conversely, the sun coffee system proved to be the most deficient. The TCPS and CMAPS enhanced the physical and chemical properties of the soil, compared to the sun coffee system. The establishment of the coffee monoculture favored a reduction of organic matter and nitrogen concentrations, as well as a lower water retention capacity and an increase in the content of exchangeable bases.

Acknowledgements

Paul René Fernández Ojeda and David Cristóbal Acevedo are grateful to Conacyt, Mexico, for the award granted to the first author. The authors wish to express their gratitude for the support received from the *Universidad Autónoma Chapingo* and its Department of Soils in terms of logistics and infrastructure, as well as to the Forestry Master's Program of the Forestry Division, for the funding of this research.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contribution by author

Paul René Fernández Ojeda: sampling, sample preparation, data systematization, and discussion of the results; David Cristóbal Acevedo: assistance in sample preparation and review of the results of the laboratory tests; Antonio Villanueva Morales: statistical analysis of the data; Miguel Uribe Gómez; drafting of the paper and discussion of the results.

End of the English version

Referencias

- Alvarado R., J. C. 2007. Sistemas de producción de café y su impacto sobre las propiedades físicas y químicas del suelo en Nueva Palestina, Jaltengo, Chiapas, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chis., México. 102 p.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 1999. The nature and properties of soil. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA. 639 p.
- Cano, V. N. y H. J. Arcos. 1998 Monografía de Huatusco. Graphic´s Huatusco, Veracruz. <http://www.buenastareas.com/ensayos/Monografia-De-Huatusco/2883190.html> (10 de agosto de 2015).
- Carter, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94 (1): 38-47.
- Cavazos, T. y O. Rodríguez. 1992. Manual de prácticas de física de suelos. Editorial Trillas- Escuela Superior de Agricultura Hermanos Escobar. Ciudad Juárez, Chih., México. 99 p.
- Essington, M. E. 2004. Soil and water chemistry, an integrative approach. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. 534 p.
- Fisher, R. F. and D. Binkley. 2000. Ecology and management of forest soils. John Wiley and Sons, Inc. New York, NY, USA. 490 p.
- Geissert, D., R. Martínez y E. Meza. 2000. Propiedades físicas y químicas de suelo volcánico bajo bosque y cultivo en Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 2(1): 31-34.
- Geissert K., D. y A. Ibáñez G. 2008. Calidad y ambiente físico-químico de los suelos. In: Manson, R. H., V. Hernández O., S. Gallina y K. Mehlreter (eds.). Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de Ecología A. C. e Instituto Nacional de Ecología (Ine-Semarnat). México, D. F., México. 348 p.
- Hernández, C., H. 2013. Carbono acumulado en dos sistemas agroforestales y en un sistema de bosque de niebla. Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Chapingo, Edo. de Méx., México. 98 p.
- Mahecha, L. 2003. Importancia de los sistemas silvopastoriles y principales limitantes para su implementación en la ganadería colombiana. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 16(1):11-18.
- Meza, E. y D. Geisser. 2006. Estabilidad de estructura en andosoles de uso forestal y cultivados. *Terra Latinoamericana* 24 (2): 163-170.
- Monroy, A. 2009. Impacto de sistemas agroforestales sobre el suelo y potencial de regeneración de la vegetación en Chiapas, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. 122 p.
- Nair, P. K. R. 1993. An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 499 p.
- Nair, P. K. R. 1997. Agroforestería. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. 543 p.
- Ortiz, B. y C. Ortiz. 1990. Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. 394 p.
- Osman, K. T. 2013. Soils, principles, properties and management. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 271 p.
- Pérez J., R. 2004. Colecciones *ex situ* de la Universidad Autónoma Chapingo en Huatusco, Ver. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. pp. 40-84.
- Roy, R. N., A. Finck, G. J. Blair and H. L. S. Tandon. 2006. Plant nutrition for food security, a guide for integrated nutrient management. FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin. Núm. 16. Rome, Italy. 349 p.
- Statistical Analysis System (SAS). 2002. The SAS System for Windows version 9.0 (versión en Español). SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. n/p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2002. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudios, muestreo y análisis. NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial de la Federación (2ª sección) (31 de diciembre de 2002). <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documents/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf> (10 de agosto de 2015).
- Soto P., L., V. Villalvazo, G. Jiménez F., N. Ramírez M., G. Montoya and F. Sinclair. 2007. The role of coffee knowledge in determining shade composition of multistrata coffee systems in Chiapas, Mexico. *Biodiversity and Conservation* 16:419-436.
- Steel, R. y J. Torrie. 1998. Bioestadística: Principios y procedimientos. Mc Graw-Hill. México, D. F., México. 622 p.
- United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). 1996. United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa. <http://www.unccd.int/lists/SiteDocumentLibrary/conventionText/conv-eng.pdf> (10 de agosto de 2015).
- Vergara S., M. A. 2003. Identificación y selección de indicadores de calidad del suelo y sustentabilidad en sistemas naturales y agrícolas de ladera en Oaxaca. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx., México. 215 p.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-37.
- Young, A. 1990. Agroforestry for soil conservation. CAB International. Wallingford, U K. 276 p.

