

CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO Y RETENCIÓN DE AGUA EN SUELOS DE UN BOSQUE DE NIEBLA EN MICHOACÁN, MÉXICO

ORGANIC CARBON CONTENT AND WATER RETENTION IN SOILS OF A CLOUD FOREST IN MICHOACÁN, MÉXICO

Carlos A. Anaya^{1,2*}, Manuel Mendoza¹, Mercedes Rivera³, Rosaura Páez¹, L. Daniel Olivares-Martínez²

¹Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro Núm. 8701, Colonia ExHacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México (carlosanaya.m@gmail.com). ²Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro Núm. 8701, Colonia ExHacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México. ³Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio "R", Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

Los bosques de niebla (BN) de Michoacán, México, enfrentan fuertes presiones de extracción forestal y cambio de uso de suelo a agricultura, las cuales pueden afectar las funciones ecológicas de los suelos. En este estudio se identificaron los principales suelos de un BN en Michoacán, y se evaluaron sus contenidos de carbono orgánico (COS) y capacidad de retención de agua. El diseño del muestreo fue estratificado, considerando diferentes posiciones de ladera. Ocho perfiles de suelo de 1 m de profundidad se caracterizaron con métodos estándar. Los grupos de suelo identificados, Andosol, Alisol, Umbrisol, mostraron un grado de intemperismo relativamente alto, acidez de alta a neutra y saturación de bases baja. El contenido de COS osciló de 92 a 152 Mg ha⁻¹, el 55 % se distribuyó en los primeros 30 cm, y no hubo diferencias de contenido entre grupos de suelo. La retención de agua a tensión alta (TA, 1500 kPa) y baja (TB, 30 kPa) varió de 98 a 284 L m⁻² y de 249 a 510 L m⁻², respectivamente. A 60 cm de profundidad, donde las raíces finas se concentran, el agua disponible (AD) osciló de 107 a 167 L m⁻², sin diferencias entre grupos de suelos. La retención de agua a TA tuvo correlación negativa con la proporción de arenas y la densidad aparente, mientras que a TB tuvo correlación positiva con la concentración de COS y negativa con la densidad aparente. El AD tuvo correlación positiva con la concentración de COS. El estudio confirma la importancia del BN en el almacenamiento de COS, e indica que el COS es determinante en la disponibilidad de agua. Dada la acumulación de COS en el suelo superficial, la retención de carbono y agua pueden ser muy sensibles a las perturbaciones antropogénicas.

ABSTRACT

Cloud Forests (CFs) in Michoacan, Mexico, face strong pressures due to logging and the change of land use to agriculture, which can affect the ecological functions of the soil. This study identifies the main soils of a CF in Michoacan, and evaluates its contents of Soil Organic Carbon (SOC) and water-retention capacity. The sampling design was stratified, considering different slope positions. Eight profiles of soils of 1 m in depth were characterized using standard methods. The soil groups identified, Andosol, Alisol, Umbrisol, displayed high degrees of weathering, high to neutral acidities, and a low saturation of bases. The SOC content fluctuated between 92 and 152 Mg ha⁻¹; 55 % of this was distributed in the first 30 cm, and no differences were observed between soil groups. Water retention at high tension (HT, 1500 kPa) and low tension (LT, 30 kPa) varied from 98 to 284 L m⁻², and from 249 to 510 L m⁻², respectively. At a depth of 60 cm, where fine roots concentrate, the available water (AW) fluctuated between 107 and 167 L m⁻², with no differences between soil groups. Water retention at HT had a negative correlation with the proportion of sands and the bulk density, whereas LT had a positive correlation with the concentration of SOC, and a negative one with bulk density. The AW had a positive correlation with the SOC concentration. The study confirms the importance of the CF in the storage of SOC and indicates that the SOC is determinant in the availability of water. Given the accumulation of SOC on the soil surface, carbon and water retention can be very sensitive to anthropogenic disturbances.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2015. Aprobado: octubre, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 50: 251-269. 2016.

Key words: Mountain cloud forest, soil organic carbon, soil moisture, ecosystem services, Trans-Mexican Volcanic Belt.

Palabras clave: Bosque mesófilo de montaña, carbono orgánico del suelo, humedad del suelo, servicios ecosistémicos, Sistema Neovolcánico Transversal.

INTRODUCCIÓN

El bosque de niebla (BN) o bosque mesófilo de montaña ocupa cerca del 1 % del territorio de México (8800 km²; INEGI, 2007). No obstante esta pequeña superficie, el BN es considerado de gran importancia biológica y ecológica para el país porque alberga una alta biodiversidad y tiene una función determinante en los ciclos biogeoquímicos del agua, carbono y nutrientes (CONABIO, 2010). Paradójicamente, este bioma enfrenta una fuerte presión de extracción de recursos maderables y no maderables, así como de cambio de uso de suelo a agricultura, que afectan su capacidad de proveer servicios ecosistémicos (Martínez *et al.*, 2009). Por ejemplo, más del 50 % de la superficie original del BN fue remplazada por cultivos agrícolas, potreros, plantaciones de café y otros usos del suelo (CONABIO, 2010; Toledo-Aceves *et al.*, 2011). Dado este panorama, es necesario aumentar nuestro conocimiento sobre aspectos ecológicos de este bioma para entender su funcionamiento y proponer opciones de uso sustentable o justificar su conservación.

El BN se define por su ubicación en regiones montañosas y por la persistencia o alta frecuencia de nubes a nivel del dosel durante el año (Hamilton *et al.*, 1995). En México, este bioma se distribuye de manera discontinua en las vertientes de los océanos Pacífico y Atlántico y en el Sistema Neovolcánico Transversal (SVT), a altitudes entre 1200 y 2500 msnm, con climas templados y tropicales húmedos y subhúmedos (CONABIO, 2010). El conocimiento sobre el BN en México es relativamente amplio en cuanto a su estructura y composición florística (Rzedowski, 1996; CONABIO, 2010; Villaseñor, 2010; González-Espinosa *et al.*, 2011), pero es exiguo en cuanto al suelo, entre otros componentes. Esta deficiencia ha limitado una visión más integral del BN.

El suelo es un componente fundamental en los ecosistemas que da soporte a las plantas, provee hábitats para una gran diversidad de organismos y es un subsistema donde se desarrollan diversos procesos asociados a los flujos de materia y energía. Como resultado de estos procesos, el suelo provee una serie de servicios ecosistémicos vitales para el desarrollo de la

INTRODUCTION

Cloud forests (CFs) or montane wet temperate forest cover approximately 1 % of Mexico's territory (8800 km²; INEGI, 2007). Despite this small surface, CFs are considered biologically and environmentally very important for the country, since they harbor a large biodiversity and play a predominant part in the water, carbon, and nutrient biogeochemical cycles (CONABIO, 2010). Paradoxically, this biome faces a strong pressure due to logging and extraction of other resources, as well as the change of land use to agriculture, which affects its capacity to provide ecosystem services (Martínez *et al.*, 2009). For example, agricultural fields, pasturelands, coffee plantations, and other land uses have replaced over 50 % of the original surface of the CF (CONABIO, 2010; Toledo-Aceves *et al.*, 2011). Given this outlook, there is a need to increase our knowledge on environmental aspects of this biome in order to understand how it works and propose options for its sustainable use or justify its conservation.

The CF is defined by its location in mountainous regions and by the persistent or frequent presence of clouds at a canopy level throughout the year (Hamilton *et al.*, 1995). In Mexico, this biome is distributed in a discontinuous manner in the Pacific and Atlantic watersheds and in the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), at altitudes of 1200 to 2500 masl, with temperate climates, and humid and sub-humid tropical climates (CONABIO, 2010). The knowledge about the CF is relatively broad in terms of its structure and floristic composition (Rzedowski, 1996; CONABIO, 2010; Villaseñor, 2010; González-Espinosa *et al.*, 2011), although it is meager in terms of soil and other components. This deficiency has limited the possibility of having a more comprehensive vision of the CF.

Soil is a crucial component in the ecosystems that provides support to plants, it provides habitats for a large diversity of organisms, and is a subsystem where several processes take place, all related to the flows of matter and energy. As a result of these processes, soil provides a series of vital ecosystemic services for the development of life on the planet, such as the regulation of the water cycle and carbon sequestration (Palm *et al.*, 2007). For example, the carbon stored in the first meter of soil depth is known to duplicate the

vida en el planeta, como la regulación del ciclo hidrológico y el secuestro de carbono (Palm *et al.*, 2007). Por ejemplo, el carbono almacenado en el primer metro de profundidad del suelo de los ecosistemas terrestres duplica el contenido de C en la atmósfera, y la reducción de dicho almacén, por las actividades humanas es una fuente de CO₂ a la atmósfera que puede intensificar el efecto invernadero y, en consecuencia, el cambio climático (Prentice *et al.*, 2001).

El desarrollo de los suelos depende de la conjugación de diferentes atributos de los sitios, incluyendo el material parental, el relieve, el clima, la vegetación y el tiempo (Binkley y Fisher, 2013). Dado el clima húmedo o subhúmedo y la vegetación boscosa, los suelos de los BN pueden presentar características comunes entre sí. Por ejemplo, dadas las condiciones de alta humedad atmosférica y baja evapotranspiración, los suelos de los BN son influenciados por la abundancia de humedad a lo largo del año, la cual promueve altas tasas de intemperismo químico de la fracción mineral y el desarrollo de condiciones anaeróbicas que generan suelos ácidos con alta acumulación de materia orgánica (Bruijnzeel y Proctor, 1995; Kitayarna, 1995; Benner *et al.*, 2010). No obstante, estos bosques también tienden a exhibir una considerable heterogeneidad espacial en sus características edáficas debido a su ubicación en regiones montañosas con relieves heterogéneos (Cotler, 2003). En una catena, por ejemplo, los suelos exhiben variaciones en su profundidad, textura y pedregosidad asociada al relieve (Birkeland, 1984), las cuales condicionan la retención de agua (Saxton y Rawls, 2006) y materia orgánica (Amundson, 2001; Lützow *et al.*, 2006), así como la aptitud de sus usos (Cotler, 2003).

En Michoacán, México, el BN se ubica principalmente sobre el SVT, en fragmentos aislados, ocupando cañadas y laderas donde la humedad atmosférica se concentra (CONABIO, 2010; Santana *et al.*, 2014). Estos bosques enfrentan una fuerte presión de extracción de recursos maderables y cambio de uso de suelo hacia cultivos de aguacate que generan su degradación y pérdida de superficie (CONABIO, 2010; Mendoza *et al.*, 2011; Bravo-Espinosa *et al.*, 2012). Por lo tanto, es necesario estudiar los fragmentos remanentes de estos bosques para analizar sus aptitudes de uso de suelo y evaluar las consecuencias ecológicas de su conservación o transformación. El objetivo de este estudio fue determinar el contenido

C content in the atmosphere, and that the reduction of this storage due to human activities is a source of CO₂ for the atmosphere that can intensify the greenhouse effect, and consequently, climate change (Prentice *et al.*, 2001).

Soil development depends on the conjugation of different characteristics of the locations, including the parent material, the relief, climate, vegetation, and time (Binkley and Fisher, 2013). Given the humid or sub-humid climate and the forest vegetation, CF soils may display common characteristics between them. For example, given the conditions of high humidity in the atmosphere and the low evapotranspiration, CF soils are influenced by the abundance of humidity throughout the year, which promotes high rates of chemical weathering of the mineral fraction and the development of anaerobic conditions that bring about acidic soils with a high accumulation of organic matter (Bruijnzeel and Proctor, 1995; Kitayarna, 1995; Benner *et al.*, 2010). However, these forests also tend to display a considerable spatial heterogeneity in the characteristics of their soils, due to their location in mountainous regions with heterogeneous reliefs (Cotler, 2003). In a catena, for example, soils display variations in their depths, textures, and rockiness related to the relief (Birkeland, 1984), which condition water retention (Saxton and Rawls, 2006) and organic matter (Amundson, 2001; Lützow *et al.*, 2006), as well as the aptitude for their uses (Cotler, 2003).

In Michoacan, Mexico, the CF is located mainly on the TMVB, in isolated fragments, covering ravines and hillsides where humidity in the air concentrates (CONABIO, 2010; Santana *et al.*, 2014). These forests face strong pressure due to logging and changes in land use use to avocado plantations, which are leading to their degradation and loss of surface (CONABIO, 2010; Mendoza *et al.*, 2011; Bravo-Espinosa *et al.*, 2012). Given this scenario, there is a need to study the remnant forest fragments to analyze their land use aptitudes and evaluate the environmental consequences of their conservation or transformation. The aim of this study was to determine the content of carbon in, and the water retention of, a CF in the central section of the TMVB in Michoacan. Likewise, due to the lack of information on the soil for the forest studied, soils were classified at a second level in scarce detail.

de carbono y la capacidad de retención de agua de los suelos de un BN de la porción central del SVT en Michoacán. Asimismo, dada la carencia de información edáfica para el bosque de estudio, los suelos se clasificaron en un segundo nivel con poco detalle.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en un BN ubicado en los municipios de Villa Madero y Tacámbaro, Michoacán, entre marzo y junio del 2013. Este bosque abarca una superficie aproximada de 16.6 km² (INEGI, 2007) y se encuentra en la parte central del SVT, entre 19° 22' y 19° 16' N y 101° 19' y 101° 23 O (Figura 1). El área forma parte de un conjunto de domos y conos volcánicos con una gran depresión hacia el sur, hacia la depresión del Balsas, originada por el colapso de una caldera volcánica (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). Las estructuras volcánicas de la zona forman una sierra con pendientes irregulares de inclinaciones medias (10-15°) a muy pronunciadas o escarpadas de 40-70° (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). La litología es de composición intermedia (dacítica-andesítica) proveniente del vulcanismo anterior y posterior a la formación de la caldera, en el Mioceno medio y tardío (Gómez-Tuena, *et al.*, 2005). Según INEGI (2007), el grupo de

MATERIALS AND METHODS

Study site

The study was carried out in a CF located in the municipal areas of Villa Madero and Tacámbaro, Michoacan, between March and June 2013. This forest covers an area of approximately 16.6 km² (INEGI, 2007) and is located in the central area of the TMVB, coordinated 19° 22' and 19° 16' N and 101° 19' and 101° 23W (Figure 1). The area is part of a group of volcanic domes and cones with a large depression towards the South, towards the depression of the river Balsas, caused by the collapse of a caldera (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). The volcanic structures of the area form a range with irregular slopes of medium (10-15°) to high steepness 40-70° (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). The lithology has an intermediate composition (dacitic-andesitic) resulting from the previous volcanism, and after the formation of the caldera, in the middle and late Miocene (Gómez-Tuena, *et al.*, 2005). According to INEGI (2007), the predominant soil group in the area is Acrisol. The climate is temperate sub humid with summer rainfall. Weather stations in Tacambaro (No. 16123) and Villa Madero (No. 16140) from the IMTA database (2013), located 10 km from the area studied, record average annual rainfalls and temperatures (1960-2010) of 1153 and 1194 mm, and 18.5 and 15.8 °C, respectively.

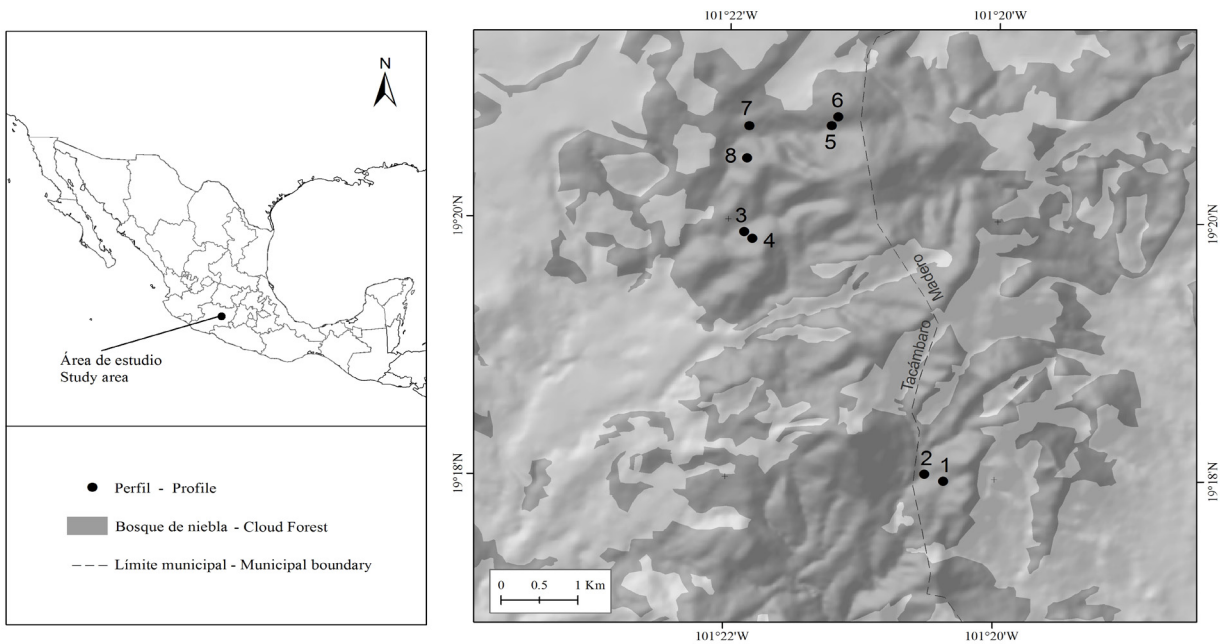


Figura 1. Ubicación del bosque de niebla de estudio. Los puntos indican la ubicación de los perfiles de suelo y su etiqueta de identificación.

Figure 1. Location of the cloud forest studied. Dots indicate the location of the soil profiles and their labels.

suelo predominante en la zona es Acrisol. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano. Las estaciones meteorológicas de Tacámbaro (No. 16123) y Villa Madero (No. 16140) de la base de datos del IMTA (2013), ubicadas a 10 km del área de estudio, registran precipitaciones y temperaturas promedio anual (1960-2010) de 1153 y 1194 mm y 18.5, y 15.8 °C, respectivamente.

En la región, el BN se ubica entre 2000 y 2650 msnm, en laderas y cañadas en donde la humedad se concentra, rodeado de bosques de pino y pino-encino (CONABIO, 2010; Santana *et al.*, 2014). Además de la fragmentación natural, el BN exhibe una fragmentación asociada al cambio de uso de suelo hacia cultivos agrícolas, particularmente cultivos de aguacate (Mendoza *et al.*, 2011; Santana *et al.*, 2014). Las áreas forestales presentan cierto grado de perturbación asociado a tala selectiva ilegal y extracción de resina. Entre las especies de árboles más abundantes se incluyen *Alnus acuminata* Kunth, *Clethra mexicana* DC., *Quercus laurina* Bonpl., *Quercus rugosa* Née y *Styrax argenteus* (C. Presl.) Miers (Santana *et al.*, 2014).

Muestreo de suelos

En el área de estudio se seleccionaron ocho sitios, distribuidos en cuatro zonas de muestreo de acuerdo con la posibilidad de accesos al bosque (incluido el consentimiento de los propietarios). Dentro de cada zona se seleccionaron dos sitios de muestreo, ubicados en diferentes posiciones de ladera: alta, media, baja, o en pie de ladera (Cuadro 1), geoformas en las que predomina el BN. En cada uno se recolectaron ocho muestras de mantillo de un área circular de 25 cm de diámetro cada una, y se cavó una calicata en el suelo de 1 m de profundidad (o hasta encontrar una capa o material limitante) para la descripción de un perfil del suelo y la toma de muestras por horizonte. Una profundidad de 1 m se eligió porque allí se concentra la mayor proporción del carbono orgánico (Amundson, 2001), y se estudia y reporta la retención de agua (Batjes, 1996; Malone *et al.*, 2009). En cada perfil se hizo una descripción de rutina (FAO, 2009) con métodos estándar (Siebe *et al.*, 2006). En cada horizonte del suelo se determinó *in situ*: 1) pH, con un medidor de pH Spectrum IQ-150; 2) pedregosidad, mediante una tablas de referencia; 3) presencia de carbonatos, de la efervescencia por reacción al HCl al 10 %; y 4) presencia de aluminio activo, con reacción a fluoruro de sodio (NaF) 1N usando fenolftaleína al 1 % como indicador. De cada capa de suelo se tomó una muestra de 2 kg para determinar de sus propiedades físicas y químicas en laboratorio. Asimismo, para determinar la densidad aparente del suelo, de cada capa se tomaron dos núcleos de suelo inalterados con anillos metálicos de 40 cm³.

In the region, the CF is found between 2000 and 2650 masl, in ravines and hillsides where humidity concentrates, surrounded by pine and pine-oak forests (CONABIO, 2010; Santana *et al.*, 2014). Along with natural fragmentation, the CF displays a fragmentation related to the change in land use to agriculture, particularly avocado plantations (Mendoza *et al.*, 2011; Santana *et al.*, 2014). The forested areas display a certain degree of disturbance related to illegal selective logging and the extraction of resin. Some of the most abundant tree species include *Alnus acuminata* Kunth, *Clethra mexicana* DC., *Quercus laurina* Bonpl., *Quercus rugosa* Née, and *Styrax argenteus* (C. Presl.) Miers (Santana *et al.*, 2014).

Soil sampling

Eight sites were chosen in the area of study, which were distributed into four sampling areas according to the possibilities of accessing the forest (including the consent of owners). Inside each area, two sampling sites were selected, located in different positions of the slope: high, medium, low, or foot (Table1), geoforms in which the CF predominates. In each one, eight surface litter samples were taken from circular areas, each one 25 cm in diameter, and a one meter-deep test pit was dug (or until reaching a limiting layer or limiting material) for a soil profile description and the extraction of samples by horizon. A depth of 1 m was chosen, since this is the depth in which the highest concentration of organic carbon is found (Amundson, 2001) and in which water retention is most commonly studied and reported (Batjes, 1996; Malone *et al.*, 2009). For each profile a routine description was performed (FAO, 2009) with standard methods (Siebe *et al.*, 2006). For each soil horizon, the following were determined on the spot: 1) pH, using a Spectrum IQ-150 pH meter; 2) stoniness, estimated using reference charts; 3) presence of carbonates, found with the effervescence due to the reaction with HCl at 10 %; and 4) presence of active aluminum, determined by the reaction with sodium fluoride (NaF) 1N using phenolphthalein at 1 % as an indicator. A 2 kg sample was taken from each soil layer to determine its physical and chemical properties in the laboratory. Likewise, to determine the bulk density, two unaltered soil cores were taken from each layer using 40 cm³ rings.

Lab analysis

The soil cores were oven dried at 105 °C, until a constant weight was obtained. The bulk density (AD) was calculated by dividing the soil weight by the core volume; values were corrected by the weight and volume of the gravels (Elliott *et al.*,

Cuadro 1. Ubicación y características topográficas de los sitios de muestreo del bosque de niebla en Michoacán, México.**Table 1. Location and topographic characteristics of the sampling sites in the cloud forest in Michoacan, Mexico.**

Perfil	Coordenadas [†]			Posición [§]	Exposición de ladera	Pendiente (grados)
	N	O	Z			
1	254147	2135650	2130	LA	Noroeste	10 - 15
2	253902	2135752	2170	LB	Noroeste	15 - 20
3	251560	2139230	2298	PL	Norte	0 - 2
4	251665	2139133	2369	LM	Norte	15 - 20
5	252783	2140872	2530	LM	Sur	15 - 20
6	252700	2140747	2525	LB	Sur	10 - 15
7	251627	2140745	2454	LM	Sur	10 - 15
8	251601	2140285	2456	PL	Norte	2 - 5

[†]N: longitud norte (UTM); O: longitud oeste (UTM); Z: altitud (msnm). [§]LA: ladera alta; LM: ladera media; LB: ladera baja; PL: pie de ladera ♦ N: longitude north (UTM); O: longitude west (UTM); Z: altitude (masl). [§]LA: high slope; LM: middle slope; LB: low slope; PL: foot slope.

Análisis de laboratorio

Los núcleos de suelo se secaron en un horno a 105 °C, hasta obtener un peso constante. La densidad aparente (DA) se calculó dividiendo el peso del suelo entre el volumen del núcleo; los valores se corrigieron por el peso y volumen de las gravas (Elliott *et al.*, 1999). Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente en laboratorio, se tamizaron por una malla de 2 mm de apertura para obtener la fracción fina del suelo, y se almacenaron a temperatura ambiente para su análisis físico y químico. La textura del suelo se determinó por el método de Bouyoucos, con la eliminación previa de la materia orgánica (Gee y Bauder, 1986). La conductividad eléctrica se determinó en extractos de suelo con agua destilada a una relación 1:5 (ISO 11265, 1994), usando un conductímetro (Oakton 8CU28). La retención de fósforo (RP) se determinó por el método de Blakemore (ISRIC-FAO, 2002), usando un espectrofotómetro (Jenway 6505 UV/Vis) para determinar las concentraciones de fósforo. La retención de humedad se determinó por el método de olla y membrana de presión (Klute, 1986). Los porcentajes gravimétricos de retención de agua se determinaron a tensiones de 30 kPa (capacidad de campo; CC) y 1,500 kPa (punto de marchitez; PM). El agua disponible (AD) se calculó como la diferencia entre la CC y el PM (Osman, 2013). El contenido de agua en cada capa de suelo a CC y PM se determinó mediante la multiplicación del porcentaje de agua del suelo a CC ó PM por el cociente de la densidad aparente del suelo entre densidad del agua pura (1 g cm⁻³) por el espesor de la capa de suelo (Osman, 2013). Los valores se ajustaron por la pedregosidad. El contenido de agua del perfil (en L m⁻²) se

1999). The soil samples were dried at room temperature in the laboratory, sieved using a 2 mm sieve to obtain the fine fraction of the soil, and stored at room temperature for its physical and chemicals analysis. The soil texture was determined using the Bouyoucos Method, after eliminating organic matter (Gee and Bauder, 1986). Electric conductivity was determined in soil extracts using distilled water at a ratio of 1:5 (ISO 11265, 1994), using a conductivity meter (Oakton 8CU28). Phosphorous retention (PR) was determined using the Blakemore method (ISRIC-FAO, 2002), using a spectrophotometer (Jenway 6505 UV/Vis) to determine phosphorous concentrations. Humidity retention was determined using the pressure plate method (Klute, 1986). The water retention gravimetric percentages were determined at tensions of 30 kPa (field capacity; FC) and 1500 kPa (wilting point; WP). The available water (AW) was calculated as the difference between FC and WP (Osman, 2013). The water content in each soil layer at FC and WP was determined by multiplying the percentage of water in the soil at FC or WP with the quotient of the apparent soil density by the density of pure water (1 g cm⁻³) by the thickness of the soil layer (Osman, 2013). The values were adjusted due to the stoniness. The amount of water of the profile (in L m⁻²) was determined with the sum of the amounts of water in each layer. The cation-exchange capacity (CEC) was determined by the sodium saturation method (EPA 9081). This method tends to underestimate the CEC in comparison to the more accurate ammonium acetate method (Chapman, 1965). To determine the concentration of sodium, a flame photometer (Jenway PFP-7) was used. The concentrations of interchangeable bases (Ca²⁺,

determinó mediante la suma de los contenidos de agua de cada capa. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó por el método de saturación de sodio (EPA 9081). Este método tiende a subestimar la CIC en comparación con el método más preciso de acetato de amonio (Chapman, 1965). Para determinar la concentración de sodio se usó un Fotómetro de flama (Jenway PFP-7). Las concentraciones de las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) se determinaron por cromatografía iónica en un cromatógrafo (Metrohm Basic 883 IC-plus). El Al y Fe se extrajeron con oxalato de amonio por 4 h en la oscuridad a pH 3. Las concentraciones de Al_o y Fe_o (i.e. Al y Fe en oxalato) se cuantificaron en un espectrómetro de absorción atómica (SpectrAA 220 Varian). La concentración del carbono orgánico del suelo (COS) se determinó por coulometría (Huffman, 1977) en un analizador de carbono total UIC modelo CM5012. El contenido de COS (Mg ha^{-1}) en cada horizonte se determinó mediante la multiplicación de la concentración de C, por la densidad aparente, por el grosor del horizonte, por un factor de corrección de la concentración de pedregosidad (1- fracción de rocas) y por una unidad de conversión espacial (Amundson, 2001). El contenido de COS total en el perfil del suelo se determinó con la suma de los contenidos de C de sus capas.

Las muestras de mantillo se secaron en horno a 70 °C por 72 h y se pesaron. La masa de mantillo por unidad de área se determinó dividiendo la masa entre el área muestreada. Todos los análisis se realizaron en el Laboratorio de Suelo y Agua del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, excepto las determinaciones de C total efectuadas en el Laboratorio de Biogeoquímica del Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, y las determinaciones de Al_o y Fe_o realizados en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Posgraduados.

Clasificación de suelos

Los suelos se clasificaron de acuerdo con la Base Mundial Referencial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2014). La clasificación se realizó a un segundo nivel, incluyendo los calificadores principales y suplementarios que aplican según el grupo de suelo, y para los cuales se tuvo certeza a partir de la descripción de rutina y de los análisis físicos y químicos realizados, omitiéndose los calificadores para los cuales no hubo datos. Para la clasificación de los Andosol se utilizaron los valores de Al_o y Fe_o de horizontes que, en su conjunto, sumaran más de 30 cm.

Análisis estadísticos

Para describir los cambios de las concentraciones y contenidos de COS en función de la profundidad del suelo se usaron los

Mg^{2+} , K^+ , and Na^+) were determined by ionic chromatography in a chromatograph (Metrohm Basic 883 IC-plus). Al and Fe were extracted with ammonium oxalate for 4 h in the dark at a pH of 3. The concentrations of Al_o and Fe_o (i.e. Al and Fe in oxalate) were measured in an atomic absorption spectrometer (SpectrAA 220 Varian). The concentration of soil organic carbon (SOC) was determined by coulometry (Huffman, 1977) in a UIC CM 5012 total carbon analyzer. The content of SOC (Mg ha^{-1}) in each horizon was determined by multiplying the concentration of C, by the bulk density, by the thickness of the horizon, by a factor of correction of the concentration of stoniness (1- fraction of stones), and by a spatial conversion unit (Amundson, 2001). The total amount of SOC in the soil profile was determined with the sum of the amounts of C of its layers.

The litter samples were oven dried at 70 °C for 72 h and weighed. The mass of litter per unit area was determined by dividing the mass by the area sampled. All analyses were performed in the Laboratorio de Suelo y Agua del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, except for the determinations of total C, which were carried out in the Laboratorio de Biogeoquímica of the Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, and the determinations of Al_o and Fe_o , which were carried out in the Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental of the Colegio de Posgraduados.

Soil classification

Soils were classified according to the World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB, 2014). The classification was carried out at a second level, including the principal and supplementary qualifiers that apply according to the soil group, and for which there was certainty from the routine description and the physical and chemical analyses performed, omitting the qualifiers for which there was no data. For the classification of the Andosols, we used the values of Al_o and Fe_o for horizons that, together, added up to over 30 cm.

Statistical analyses

To describe the changes in concentrations and contents of SOC based on the soil depth, the four regression models proposed by Jobbágy and Jackson (2000) were used: 1) base logarithm 10 (log) of the average depth of the horizon against the concentration of its SOC; 2) log of the average depth of the horizon against the log of its SOC concentration; 3) log of the horizon depth against the accumulated content of SOC; and 4) log of the depth of the horizon against the log of the accumulated content of SOC. These models assume that the relation between the depth with the concentrations and contents of SOC is not

cuatro modelos de regresión propuestos por Jobbágy y Jackson (2000): 1) logaritmo base 10 (\log) de la profundidad promedio del horizonte contra la concentración de COS del mismo; 2) \log de la profundidad promedio del horizonte contra el \log de la concentración de COS del mismo; 3) \log de la profundidad del horizonte contra el contenido acumulado de COS; y 4) \log de la profundidad del horizonte contra el \log del contenido acumulado de COS. Estos modelos asumen que la relación de la profundidad con las concentraciones y contenidos de COS no es lineal, y por ello los datos son transformados logarítmicamente (Jobbágy y Jackson, 2000; Zar, 1999). La relación entre la profundidad y el contenido acumulado de COS tiene la ventaja de que el almacén de COS se integra desde la capa superficial del suelo hacia capas profundas. Sin embargo, tiene la desventaja estadística de la falta de independencia entre horizontes para un ajuste no lineal (Jobbágy y Jackson, 2000).

Para describir el efecto de la densidad aparente, los porcentajes de arcillas, limos, arenas, y de COS sobre la CC, el PM y el AD, se hicieron análisis de regresión múltiple por pasos (Gupta y Larson, 1979). Previo al análisis de regresión se hicieron análisis de correlación de Pearson y sólo las variables del suelo que tuvieron una correlación significativa con las condiciones de humedad se incluyeron en el análisis (Zar, 1999). En el modelo final sólo se incluyeron las variables independientes con un efecto significativo sobre la magnitud de la humedad de suelo (Beta significativo; $\beta \neq 0$) (Zar, 1999). Para estos análisis se usó el conjunto de datos de los ocho perfiles ($n=37$). Los análisis estadísticos se realizaron con el STATISTICA 7.1 (Hill y Lewicki, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación de suelos

La caracterización de los perfiles de suelo mostró la presencia de tres grupos en la zona de estudio: Andosol, Alisol y Umbrisol (Cuadro 2). Los perfiles 3, 5, 7 y 8 se clasificaron en el grupo Andosol, y tuvieron en común el calificador de Dystric (Cuadro 2). No se hicieron análisis de aluminio extraído con pirofosfato para diferenciar los calificadores Silandic y Aluandic, no obstante, la presencia de colores claros y la ausencia de valores de pH extremadamente ácidos en todos los horizontes con propiedades ácidas sugieren la posibilidad del calificador Silandic (IUSS Working Group WRB, 2014). Los calificadores Silandic y Aluandic denotan diferencias en los cocientes Al/Si, y en la estabilización de la materia orgánica por la formación de complejos organominerales (Shoji *et al.*, 1993; Campos-Cascaredo, 2000).

linear, and therefore the data are transformed logarithmically (Jobbágy and Jackson, 2000; Zar, 1999). The relation between the depth and the accumulated content of SOC has the advantage of the SOC storage being integrated from the superficial layer of the soil towards deeper layers. However, it has the statistical disadvantage of lacking independence between horizons for a non-linear adjustment (Jobbágy and Jackson, 2000).

In order to describe the effects of the bulk density, the percentages of clays, limes, sands, and SOC's the on the FC, WP, and the AW, stepwise multiple regression analyses were performed (Gupta and Larson, 1979). Before the regression analysis, Pearson correlation analyses were carried out, and only the soil variables that had a significant correlation with the moisture conditions were included in the analysis (Zar, 1999). In the final model, the only independent variables included were those which had a significant effect on the humidity levels of the soils (Beta significant; $\beta \neq 0$) (Zar, 1999). These analyses required the use of the set of data from all eight profiles ($n = 37$). The statistical analyses were carried out using the STATISTICA 7.1 (Hill and Lewicki, 2007).

RESULTS AND DISCUSSION

Soil classification

The soil profile characterization indicates the presence of three groups in the area under study: Andosol, Alisol, and Umbrisol (Table 2). The profiles 3, 5, 7, and 8 were classified in the group of Andosols, and had in common the Dystric qualifier (Table 2). There were no analyses on aluminum extracted with pyrophosphate to differentiate the Silandic and Aluandic qualifiers, although the presence of clear colors and the lack of extremely acidic pH values in all horizons with andic properties suggest the possibility of the Silandic qualifier (IUSS Working Group WRB, 2014). The Silandic and Aluandic qualifiers indicate differences in the quotients Al/Si, as well as in the stabilization of organic matter due to the formation of organomineral complexes (Shoji *et al.*, 1993; Campos-Cascaredo, 2000). The concentrations of Al_0 and Fe_0 fluctuated from 2.1 % to 6.1 % and from 0.2 % to 1.2 %, respectively. These concentrations are considered high, which supports the inference of the Silandic qualifier, since they are indicative of high amounts of allophane (Parfitt and Clayden, 1991, Shoji *et al.*, 1985). For example, Parfitt and Clayden (1991) show that an Al_0 concentration of 2 % is equal to nearly 8 %

Cuadro 2. Características físicas y químicas de los perfiles de suelo de un bosque de niebla en Michoacán, México.
Table 2. Physical and chemical characteristics of the soil profiles for a cloud forest in Michoacan, Mexico.

Ho	Variable [†]															
	Pr	pH	Col	Pd	R	L	A	DA	CIC	SB	Al _o	Fe _o	RP	CO	CC	PM
Perfil 1. Haplic Alisol (Clayic, Cutanic)																
Ah	0-9	5.2	10YR 5/3	3	43	27	30	0.92	41	18	nd	nd	47	5.4	40	19
Bw	-19	4.5	10YR 5/3	1	40	45	15	0.74	33	11	nd	nd	49	1.6	44	27
2Bt	-43	4.6	10YR 6/6	1	44	52	4	1.06	33	8	nd	nd	51	1.6	45	24
3Bt1	-64	4.8	10YR 6/6	5	62	38	0	1.12	31	3	nd	nd	41	0.4	46	25
3Bt2	-100	5.1	10YR 6/6	8	60	40	0	1.05	52	2	nd	nd	46	0.2	44	26
Perfil 2. Alic Umbrisol (Clayic, Loxic, Tonguic)																
Ah	0-11	7.2	10YR 4/3	3	49	35	16	0.84	51	4	nd	nd	69	5.1	57	23
BA	-27	7.4	10YR 5/5	5	44	35	21	1.05	20	33	nd	nd	53	1.7	45	17
E	-50	7.4	10YR 6/3	15	23	23	54	0.89	41	9	nd	nd	35	0.7	36	14
2Bt	-100	7.6	10YR 5/4	30	42	31	27	1.01	34	18	nd	nd	60	1.4	40	20
Perfil 3. Dystric Leptic Andosol (Loamic)																
Ah	0-8	5.6	10YR 4/4	2	25	57	18	0.53	68	8	2.2	0.7	94	10.4	75	33
Bw	-30	6.1	7.5YR 5/6	3	27	50	23	0.7	58	11	2.5	0.7	96	3.7	68	23
2Bw1	-44	5.2	7.5YR 6/4	3	40	38	22	0.85	33	15	nd	nd	71	1.1	58	20
2Bw2	-88	5.0	7.5YR 6/4	20	45	44	11	1.19	33	10	nd	nd	44	0.4	44	19
Perfil 4. Leptic Alisol (Clayic, Colluvic, Cutanic, Magnesic, Endoakroskeletalic)																
Ah	0-8	5.1	10YR 4/2	8	36	43	20	0.71	53	8	nd	nd	90	11.6	68	30
Bt1	-18	5.0	10YR 6/2	3	37	36	27	0.81	51	10	nd	nd	42	2.2	51	17
Bt2	-33	5.2	10YR 7/2	8	41	42	17	0.93	36	19	nd	nd	35	0.8	39	16
BtC	-49	5.3	10YR 7/3	15	41	34	25	1.11	37	18	nd	nd	46	0.4	47	18
C	-72	5.1	10YR 7/2	50	39	33	28	1.02	48	15	nd	nd	40	0.3	45	18
Perfil 5. Dystric Andosol (Loamic)																
Ah	0-9	5.4	10YR 4/4	1	19	59	22	0.56	90	5	nd	nd	100	10.5	76	35
Bw1	-28	5.4	7.5YR 4/3	5	27	48	25	0.59	92	8	3.1	0.5	100	2.4	68	23
Bw2	-43	5.7	7.5YR 6/3	1	38	39	23	0.8	29	20	nd	nd	72	0.4	52	46
Bw3	-57	6.1	7.5YR 6/3	1	41	40	19	0.84	30	22	2.4	0.2	93	0.5	54	33
Bw4	-70	4.9	5YR 6/3	1	44	34	22	1.01	16	37	nd	nd	55	0.3	47	26
2Bw1	-89	5.8	7.5YR 5/6	5	44	20	36	0.78	38	14	nd	nd	85	0.5	60	25
2Bw2	-100	5.8	5YR 6/3	30	28	20	52	0.98	43	13	nd	nd	43	0.3	43	18
Perfil 6. Leptic Alisol (Clayic, Cutanic, Loaminovic, Profondic, Ruptic)																
ABw	0-22	5.2	7.5YR 4/3	1	46	45	9	0.88	26	22	nd	nd	82	2.3	48	19
Bw	-43	5.6	7.5YR 4/3	1	45	39	16	0.92	19	10	nd	nd	88	1.4	44	21
2Bt	-56	5.2	7.5YR 6/4	8	54	38	8	1.21	32	15	nd	nd	48	0.4	38	19
3Bt	-103	5.5	7.5YR 6/3	20	52	38	10	1.2	13	40	nd	nd	49	0.5	60	39
Perfil 7. Dystric Umbric Andosol (Loamic)																
Ah1	0-3	5.3	10YR 2/2	1	41	42	18	0.4	95	3	nd	nd	91	9.6	94	51
Ah2	-17	6.0	10YR 4/3	1	31	48	21	0.43	77	7	nd	nd	98	5.4	66	37
2BC1	-44	6.5	10YR 6/4	2	13	56	31	0.67	85	8	nd	nd	100	2.0	52	22
2BC2	-100	7.1	10YR 5/6	5	12	48	40	0.64	84	8	3.0	0.9	100	1.1	54	22
Perfil 8. Dystric Andosol (Loamic)																
Ah	0-15	5.7	10YR 2/2	1	38	52	10	0.4	118	3	nd	nd	88	8.7	83	52
BC	-46	6.0	10YR 4/4	3	25	42	34	0.7	64	10	2.9	0.7	93	1.9	59	21
2Bwb	-86	6.6	10YR 6/4	10	29	38	34	0.81	45	14	nd	nd	76	0.8	40	16
3Bw	-100	6.6	10YR 4/4	10	15	68	17	0.67	44	13	4.4	1.0	100	2.2	65	30

[†]Ho: Horizonte; Pr: profundidad (cm); Col: color en seco; Pd: pedregosidad (%); R: arcillas (%); L: limos (%); A: arenas (%); DA: densidad aparente (g cm⁻³); CIC: capacidad de intercambio catiónico (Cmol kg⁻¹); SB: saturación de bases (%); Al_o: aluminio en oxalato (%); Fe_o: hierro en oxalato (%); RP: retención de fósforo (%); CO: carbono orgánico (%); CC: retención de humedad a 30 kPa (%); PM: retención de humedad a 1500 kPa (%); nd: no determinado ♦ [†]Ho: Horizon; Pr: depth (cm); Col: color when dry; Pd: stoniness (%); R: clays (%); L: limes (%); A: sands(%); DA: bulk density (g cm⁻³); CIC: cationic exchange capacity (Cmol kg⁻¹); SB: base saturation (%); Al_o: aluminum in oxalate (%); Fe_o: iron in oxalate (%); PR: phosphorous (%); CO: organic carbon (%); FC: moisture retention at 30 kPa (%); WP: moisture retention at 1500 kPa (%); nd: not determined.

Las concentraciones de Al_0 y Fe_0 oscilaron de 2.1 % a 6.1 % y de 0.2 % a 1.2 %, respectivamente. Estas concentraciones se consideran elevadas, lo cual apoya la inferencia del calificador Silandic, ya que son indicativas de contenidos altos de alófono (Parfitt y Clayden, 1991, Shoji *et al.*, 1985). Por ejemplo, Parfitt y Clayden (1991) muestran que una concentración de Al_0 del 2 % equivale a cerca de 8 % de alófono. La concentración de Al activo (e.i. alófonos, imogolita) está implicada en la adsorción de fósforo, de forma que a mayor concentración de Al activo mayor retención de fósforo (Shoji *et al.*, 1985). En nuestro estudio, los Andosoles mostraron una retención de fósforo superior al 88 % en sus horizontes con propiedades ándicas (Cuadro 2).

Por sus características físicas y químicas y la argiluvación como proceso pedogenético, los perfiles 1, 4 y 6 se clasificaron dentro del grupo Alisol (Cuadro 2). Estos suelos tuvieron una elevada RP, un pH ácido y una saturación baja de bases, lo que sugiere la presencia de minerales ricos en aluminio (Shoji *et al.*, 1996). De ser así, estos suelos podrían calificarse como Alomic, pero este calificador debe validarse con los análisis correspondientes.

El perfil 2 se clasificó dentro del grupo Umbrisol (Cuadro 2). A pesar de tener todos los procesos y características de los perfiles clasificados dentro del grupo Alisol, este suelo cuenta con un horizonte úmbrico suficientemente desarrollado para considerarse en dicho grupo (IUSS Working Group WRB, 2014). Si bien el pH no es un criterio de diferenciación entre grupos, es interesante notar que este suelo tuvo valores de pH neutros, a diferencia de los del grupo Alisol, que fueron más ácidos.

Los suelos encontrados son típicos de regiones montañosas con una moderada a alta humedad y tasas de intemperismo relativamente altas (IUSS Working Group WRB, 2014). Estos suelos mostraron ciertas similitudes químicas entre sí, como una acidez de alta a neutra, saturación de bases baja y contenidos altos de materia orgánica, las cuales son características identificadas en suelos de BN de otras regiones (Bruijnzeel y Proctor, 1995; Kitayarna, 1995). No obstante, la presencia de tres grupos diferentes de suelo denota también una heterogeneidad edáfica importante en el área de estudio. Esta heterogeneidad puede asociarse a la actuación de diferentes condiciones ambientales como la posición topográfica, el régimen de humedad del suelo y tiempos de desarrollo

of allophane. The concentration of active Al (e.g. allophanes, imogolite) is implied in the adsorption of phosphorous, so the higher the concentration of active Al, the higher the phosphorous retention will be (Shoji *et al.*, 1985). In our study, the Andosols displayed a phosphorous retention of over 88 % in its horizons with andic properties (Table 2).

Due to its physical and chemical properties and the clay illuviation as a pedogenetic process, profiles 1, 4, and 6 were classified in the Alisol group (Table 2). These soils had a high PR, an acidic pH, and a low saturation of bases, which suggests the presence of minerals rich in aluminum (Shoji *et al.*, 1996). In this case, these soils could be classified as Alomic, although this qualifier must be validated with the corresponding analyses.

Profile 2 was classified within the Umbrisol group (Table 2). Despite having all the processes and characteristics of the profiles classified within the Alisol group, this soil has an umbric horizon developed enough to be included in this group (IUSS Working Group WRB, 2014). Although the pH is not a criterion to differentiate between groups, it is interesting to notice that this soil had neutral pH values, unlike those in the Alisol group, which were more acidic.

The soils found are typical of mountainous regions with moderate to high moisture levels, and relatively high levels of weathering (IUSS Working Group WRB, 2014). These soils displayed certain chemical similarities amongst them, such a high to neutral acidity, low base saturation, and high contents of organic matter, which are characteristics that have been identified in CFs of other regions (Bruijnzeel and Proctor, 1995; Kitayarna, 1995). However, the presence of three different soil groups also denotes important soil heterogeneity in the studied area. This heterogeneity could be related to the action of different environmental conditions, such as topographic position, the soil's humidity regime, and different development times, which determine the soil-formation processes, such as erosion, soil accumulation, clay illuviation and the rate of weathering of the parent material (Binkley and Fisher, 2013).

The INEGI (2007) indicates only the Acrisol group in the study area, in contrast to our results. This may be due, in part, to INEGI taking samples in a much lower resolution than in our study. In this

diferenciales, que determinan los procesos de formación de los suelos, como la erosión, la acumulación del suelo, la argiluvación y la tasa de intemperismo del material parental (Binkley y Fisher, 2013).

El INEGI (2007) señala sólo al grupo Acrisol en el sitio de este estudio, lo cual contrasta con nuestros resultados. Esto puede deberse, en parte, a que los muestreos del INEGI se realizan a una escala de mucho menor resolución que la de nuestro estudio. Así, nuestros resultados complementan la información edafológica estatal y pueden ayudar a mejorar la representación cartográfica de la misma.

Contenido de carbono orgánico

No se detectó presencia de carbonatos mediante la reacción con HCl en ninguno de los suelos (datos no mostrados). El contenido de COS varió entre perfiles de 92 a 152 Mg C ha⁻¹, con un promedio de 118 ± 7 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 3). Estos valores están en la porción inferior de los intervalos reportados para bosques de niebla en Chiapas (102 a 461 Mg C ha⁻¹) y Oaxaca (158 a 222 Mg C ha⁻¹) por De Jong *et al.* (1999) y Álvarez-Arteaga *et al.* (2013), respectivamente. Sin embargo, esos estudios no reportan que los contenidos de COS hayan sido ajustados por el porcentaje de pedregosidad en las capas del suelo, por lo que sus valores pueden estar sobreestimados. Nuestro valores se encuentran dentro del intervalo

way, our results complement the information of the state on soil, and may help improve its cartographic representation.

Organic carbon content

No carbonates were found using the reaction with HCl in any of the soils (data not shown). The content of SOC varied among profiles between 92 and 152 Mg C ha⁻¹, with an average of 118 ± 7 Mg C ha⁻¹ (Table 3). These values are in the lower section of the intervals reported for cloud forests in Chiapas (102 to 461 Mg C ha⁻¹) and Oaxaca (158 to 222 Mg C ha⁻¹) by De Jong *et al.* (1999) and Álvarez-Arteaga *et al.* (2013), respectively. However, those studies do not report that the contents of SOC were adjusted by the percentage of stoniness in the layers of soil; therefore their values may be overestimated. Our values lie within the interval reported for Andosols in undisturbed forests of fir (115 to 207 Mg C ha⁻¹) and pine-oak (70 to 136 Mg C ha⁻¹), of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (Pérez-Ramírez *et al.*, 2013).

In all the profiles, the concentration of C was higher in the superficial layer of the soil, and decreased with depth (Table 2). On the other hand, the accumulated SOC (Mg C ha⁻¹) naturally increased with depth (data not shown). Both behaviors were confirmed using the regression models, with a negative relation

Cuadro 3. Contenido de carbono orgánico del suelo (COS), contenido de agua a 30 kPa (CC), contenido de agua a 1500 kPa (PM) y agua disponible (AD) por perfil de suelo.

Table 3. Soil organic carbon content (SOC), water content at 30 kPa (FC), water content at 1500 kPa (WP), and available water (AD) by soil profile.

Perfil	COS [†] (Mg ha ⁻¹)	COS [‡] (Mg ha ⁻¹)	CC [†] (L m ⁻²)	PM [†] (L m ⁻²)	AD [†] (L m ⁻²)	AD [§] (L m ⁻²)
1	115	63	510	284	226	120
2	135	56	326	142	184	127
3	128	77	385	151	234	167
4	98	88	249	98	151	135
5	100	78	412	217	195	127
6	98	59	503	283	194	134
7	125	48	363	157	206	107
8	152	47	396	171	224	122
Promedio	118 ± 7	65 ± 5	384 ± 27	182 ± 21	202 ± 10	130 ± 6

[†]Contenido a la profundidad total del perfil (ver Cuadro 2). [‡]Contenido hasta una profundidad de 30 cm.

[§]Contenido hasta una profundidad de 60 cm. [♦] [†]Content at total depth of profile (see Table 2). [‡]Content up to depth of 30 cm. [§]Content up to depth of 60 cm.

reportado para Andosoles de bosque de oyamel (115 a 207 Mg C ha⁻¹) y bosque de pino-encino (70 a 136 Mg C ha⁻¹) sin perturbar, de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (Pérez-Ramírez *et al.*, 2013).

En todos los perfiles, la concentración de C fue mayor en la capa superficial del suelo y descendió con la profundidad (Cuadro 2). Por su parte, el contenido acumulado de COS (Mg C ha⁻¹) incrementó conforme aumentó la profundidad (datos no mostrados). Ambos comportamientos fueron confirmados por los modelos de regresión, con una relación negativa entre la profundidad y la concentración de COS, y una positiva entre la profundidad y el contenido acumulado de COS (Cuadro 4). Los modelos con mejor ajuste fueron los log-log, los cuales explicaron 78 % (R²=0.78) de la variación de las concentraciones y contenidos de COS con la profundidad (Cuadro 4). El ajuste significativo de estos modelos indica que la relación entre dichas variables es no lineal, es decir, la magnitud de los cambios en la concentración y contenido de COS entre capas de suelo disminuye con la profundidad. La concentración mayor de COS en la parte superficial del suelo se relaciona con una mayor incorporación de materia orgánica proveniente de la descomposición del mantillo superficial y del recambio de raíces finas en esta capa, en comparación con capas más profundas (Jobbagy y Jackson, 2000). No obstante, los mecanismos que controlan la distribución vertical de la materia orgánica en el perfil del suelo todavía no están bien entendidos, más aún, estos mecanismos pueden diferir entre suelos (Jobbagy y Jackson, 2000; Rasse *et al.*, 2005; Rumpel y Kögel-Knabner, 2011).

En promedio, el 55 % del contenido total de COS en los perfiles se concentró en los primeros 30 cm del suelo (Cuadro 3). Similarmente, en

between depth and the content of SOC, and a positive relation between the depth and the accumulated SOC (Table 4). The best adjusted models were the log-log, which accounted for 78 % (R²=0.78) of the variation in the concentrations and contents of SOC with depth (Table 4). The significant adjustment of these models indicates that the relation between these variables is not linear, i.e. the magnitude of the changes in concentration and contents of SOC between layers decreases with depth. The highest concentration of SOC in the superficial layer of the soil is related to a higher incorporation of organic matter coming from the decomposition of surface litter and the turnover of fine roots in this layer, in comparison to deeper roots (Jobbagy and Jackson, 2000). However, the mechanisms that control the vertical distribution of organic matter in the soil profile are not yet fully understood; furthermore, these mechanisms may differ among soils (Jobbagy and Jackson, 2000; Rasse *et al.*, 2005; Rumpel and Kögel-Knabner, 2011).

On average, 55 % of the total SOC content in the profiles was concentrated in the top 30 cm of soil (Table 3). Similarly, in an analysis of 1017 soil profiles in forests of the United States, Jobbagy and Jackson (2000) found that 50 % of the SOC was concentrated in the top 20 cm in profiles one meter deep. The superficial layer of the soil (< 30 cm) is very sensitive to direct or indirect human disturbances, such as deforestation and changes in land uses to agricultural systems (García-Oliva *et al.*, 1999; Guo and Gifford, 2002; Don *et al.*, 2011). Therefore, an implication of the high accumulation of SOC on the soil surface is that the disturbance of forests by anthropogenic activities may result in significant losses of SOC.

Cuadro 4. Modelos de regresión que describen la variación de la concentración de carbono orgánico del suelo (COS) o del contenido de carbono orgánico ([COS]) en función de la profundidad (Pr) en ocho perfiles de suelo de un bosque de niebla.

Table 4. Regression models that describe the variation in the concentration of Soil Organic Carbon (SOC) or the content of organic carbon ([SOC]) in function of the depth (Pr) in eight soil profiles in a cloud forest.

Modelo	Ecuación	R ²	p
Log COS - log Pr	Log COS = -0.9422 (log Pr) + 1.451	R ² = 0.74	<0.0001
COS - log Pr	COS = -0.014 (log Pr) + 0.6689	R ² = 0.58	<0.0001
Log [COS] - log Pr	Log [COS] = 0.4529 (log Pr) + 1.1861	R ² = 0.78	<0.0001
[COS] - log Pr	[COS] = 0.0048 (log Pr) + 1.6537	R ² = 0.58	<0.0001

un análisis de 1017 perfiles de suelo en bosques de EE.UU., Jobbagy y Jackson (2000) encontraron que 50 % del contenido de COS se concentra en los primeros 20 cm en perfiles de 1 m de profundidad. La capa superficial del suelo (<30 cm) es muy sensible a las perturbaciones humanas directas o indirectas, como deforestación y cambio de uso de suelo a sistemas agrícolas (García-Oliva *et al.*, 1999; Guo y Gifford, 2002; Don *et al.*, 2011). Por lo tanto, una implicación de la alta acumulación de COS en el suelo superficial es que la perturbación de los bosques por actividades antropogénicas puede resultar en pérdidas significativas de COS.

Los contenidos de COS no difirieron entre tipos de suelo ya que, por ejemplo, los valores máximo y mínimo correspondieron a Andosoles a la profundidad de 30 cm (Cuadro 3), así como a la profundidad del perfil menos profundo (72 cm; datos no mostrados). Otros factores que pueden influir en la variación del COS a nivel del paisaje pueden ser la ubicación topográfica, la pendiente y la composición florística (Birkeland, 1984; Amundson, 2001; Johnson *et al.*, 2011).

Retención de agua

Los porcentajes de retención de agua a CC, PM y AD tuvieron una variación amplia entre las capas de suelo de los perfiles, con los siguientes intervalos: 36 a 94 %, 14 a 52 % y 6 a 45 %, respectivamente (Cuadro 2). El porcentaje de humedad a CC correlacionó positivamente con el porcentaje de limos ($R=0.5$; $p=0.001$) y la concentración de COS ($R=0.74$; $p\leq 0.0001$), y negativamente con la densidad aparente ($R=-0.77$; $p\leq 0.0001$). El modelo de regresión múltiple mostró que dos variables, la densidad aparente y la concentración de COS, explicaron 69 % de la variación en la magnitud de la CC del suelo ($R^2=0.69$; Cuadro 5). El porcentaje de humedad en el PM tuvo correlación positiva con el porcentaje de limos ($R=0.38$; $p=0.02$) y la concentración de COS ($R=0.53$; $p=0.001$) y negativa con la densidad aparente ($R=-0.54$; $p\leq 0.001$) y el porcentaje de arenas ($R=-0.33$; $p=0.045$). De acuerdo con el modelo de regresión múltiple, la densidad aparente y el porcentaje de arenas explicaron 49 % de la variación del PM (Cuadro 5). La proporción de AD tuvo correlación positiva con la concentración de COS ($R=0.57$; $p\leq 0.0001$) y el porcentaje de limos

Contents of SOC did not differ between soil types, since, for example, the maximum and minimum values were from Andosols at a depth of 30 cm (Table 3), and at the depth from the profile with the least depth (72 cm; data not shown). Other factors that may have an influence on the variation of SOC at a landscape level are the topographic location, slope steepness, and floristic composition (Birkeland, 1984; Amundson, 2001; Johnson *et al.*, 2011).

Water retention

The percentages of water retention at FC, WP, and AD had a broad variation among soil layers of the profiles, with the following intervals: 36 to 94 %, 14 to 52 %, and 6 to 45 %, respectively (Table 2). The percentage of humidity at FC correlated positively with the percentage of limes ($R=0.5$; $p=0.001$) and the concentration of SOC ($R=0.74$; $p\leq 0.0001$), and negatively with bulk density ($R=-0.77$; $p\leq 0.0001$). The multiple regression model showed that two variables, bulk density and the concentration of SOC accounted for 69 % of the variation in the magnitude of FC in the soil ($R^2=0.69$; Table 5). The percentage of humidity in the WP had a positive correlation with the percentage of limes ($R=0.38$; $p=0.02$) and the concentration of SOC ($R=0.53$; $p=0.001$), and a negative correlation with the bulk density ($R=-0.54$; $p\leq 0.001$) and the percentage of sands ($R=-0.33$; $p=0.045$). According to the multiple regression model, the bulk density and the percentage of sands explained 49 % variation of the WP (Table 5). The proportion of AD had a positive correlation with the concentration of SOC ($R=0.57$; $p\leq 0.0001$) and the percentage of limes ($R=0.36$; $p=0.027$), and a negative one with bulk density ($R=-0.60$; $p\leq 0.001$) and percentage of clay ($R=-0.47$; $p=0.003$). The regression model showed that the concentration of SOC and the percentage of clay explained 44 % of variation in the magnitude of the AD (Table 5).

Humidity retention in the soil is affected by texture, bulk density, and the concentration of organic matter (Gupta and Larson 1979; Rawls *et al.*, 1982; Rawls *et al.*, 2003). However, it is difficult to interpret the independent effect of such soil properties since these interact with each other. Thus, our results show a positive correlation between density and percentage of clay ($R=0.62$; $p\leq 0.0001$) and a negative correlation between bulk density and

Cuadro 5. Análisis de regresión múltiple por pasos para evaluar el efecto de la densidad aparente (DA) y las concentraciones de carbono orgánico (COS), arenas (A), limos (L) y arcillas (R) sobre la retención de humedad a 1500 kPa (PM), la retención de humedad a 30 kPa (CC) y el agua disponible (AD) en suelos de un bosque de niebla. El conjunto de datos proviene de ocho perfiles de suelo con sus horizontes (n=37). En los modelos sólo se incluyen las variables que tuvieron un efecto significativo sobre la magnitud de la variable dependiente.

Table 5. Stepwise multiple regression analysis to evaluate the effect of the bulk density (BD) and the concentrations of organic carbon (SOC), sands (S), limes (L), and clay (R) on the retention of humidity at 1500 kPa (WP), the retention of humidity at 30 kPa (FC) and available water (WA) in soils of a cloud forest. The data set comes from eight profiles with their horizons (n=37). The models only include the variables that had a significant effect on the magnitude of the dependent variable.

Variable dependiente	Ecuación	R ²	P
PM	= 56.21 - 27.213 (DA) - 0.361 (A)	R ² = 0.49	<0.0001
CC	= 75.39 + 1.666 (COS) - 31.04 (DA)	R ² = 0.69	<0.0001
AD	= 34.63 + 1.31 (COS) - 0.264 (R)	R ² = 0.44	<0.0001

(R=0.36; p=0.027), y negativa con la densidad aparente (R=-0.60; p≤0.001) y el porcentaje de arcillas (R=-0.47; p=0.003). El modelo de regresión mostró que la concentración de COS y el porcentaje de arcillas explicaron 44 % de la variación en la magnitud del AD (Cuadro 5).

La retención de humedad en el suelo es afectada por la textura, la densidad aparente y la concentración de materia orgánica (Gupta y Larson 1979; Rawls *et al.*, 1982; Rawls *et al.*, 2003). No obstante, es difícil interpretar el efecto independiente de dichas propiedades del suelo porque éstas interactúan entre sí. Así, nuestros resultados muestran una correlación positiva entre la densidad y el porcentaje de arcillas (R=0.62; p≤0.0001) y una negativa entre la densidad aparente y la concentración de COS (R=0.67; p≤0.0001). Saxton y Rawls (2006) sugieren que la textura tiene una función preponderante sobre la retención de agua a tensiones altas (p. ej. 1500 kPa), debido a la influencia importante del tamaño de las partículas del suelo sobre la adsorción de agua. Los mismos autores señalan que la función de la materia orgánica sobre la retención de agua es más relevante a tensiones bajas (e.i. 33 kPa), porque su influencia sobre la humedad ocurre principalmente (pero no exclusivamente) a través de su efecto en la agregación del suelo y la conductividad hidráulica. Nuestros resultados coinciden con estas apreciaciones. Así, la proporción de arenas y la densidad aparente destacaron por su influencia negativa en la humedad en el PM (1500 kPa), mientras que el COS destacó por su

concentración de SOC (R=0.67; p≤0.0001). Saxton and Rawls (2006) suggest that texture has a prevailing role on water retention at high tensions (e.g. 1500 kPa), due to the important influence the size of soil particles has on water adsorption. These authors point out that the role of organic matter on water retention is more relevant at lower tensions (e.g. 33 kPa), since its influence on humidity takes place mainly (though not exclusively) through its effect on soil aggregation and water conductivity. Our results coincide with these appreciations. For example, the proportion of sands and bulk density stood out for their negative influence on humidity at WP (1500 kPa), whereas SOC stood out for its positive influence on the magnitude at AW (Table 5). The FC (30 kPa), which includes the humidity retained at high (WP) and low tensions (WA), was negatively influenced by the bulk density, and positively by the SOC (Table 5).

Water contents at FC and WP estimated at the total depth of the profiles varied from 249 to 510 L m⁻² and from 98 to 284 L m⁻², respectively (Table 3). These values are in the low part of the interval reported for Andosols. Thus, in forests of Cofre de Perote, Mexico, a water content at FC was estimated between 322 and 980 L m⁻² in soil profiles with depths of 70 and 226 cm, respectively (Gamboa and Galicia, 2012); meanwhile, soils in forests of the Chichinautzin mountains showed water contents at FC among 612 and 1357 L m⁻² at depths between 93 and 293 cm, respectively (Peña-Ramírez *et al.*, 2009). These differences may be due to a higher bulk

influencia positiva en la magnitud del AD (Cuadro 5). La CC (30 kPa), que incluye la humedad retenida a tensiones alta (PM) y baja (AD), fue influenciada negativamente por la densidad aparente y positivamente por el COS (Cuadro 5).

Los contenidos de agua a CC y PM estimados a la profundidad total de los perfiles variaron de 249 a 510 L m⁻² y de 98 a 284 L m⁻², respectivamente (Cuadro 3). Estos valores se encuentran en la parte baja del intervalo reportado en Andosoles. Así, en bosques del Cofre de Perote, México, se estimó un intervalo de contenido de agua a CC de 322 a 980 L m⁻² en perfiles de suelo con profundidad de 70 y 226 cm, respectivamente (Gamboa y Galicia, 2012); mientras que en suelos de bosques de la sierra del Chichinautzin se determinaron contenidos de agua a CC de 612 a 1357 L m⁻² a profundidades de 93 a 293 cm, respectivamente (Peña-Ramírez *et al.*, 2009). Estas diferencias pueden deberse a una mayor densidad aparente en nuestros suelos que en los de otros estudios, los cuales reportan densidades menores a 0.9 g cm⁻³ en todos los perfiles estudiados, así como a diferencias en las profundidades de los perfiles analizados, ya que en dichos estudios se analizaron perfiles de mayor profundidad que en nuestro experimento.

La zona de absorción de agua por las plantas, de acuerdo con la distribución promedio de las raíces en los perfiles, estuvo entre 0 a 60 cm de profundidad. En esta zona se estima un contenido de agua disponible de 107 a 167 L m⁻² (Cuadro 3). Cabe mencionar que no se observaron diferencias en la disponibilidad de agua entre tipos de suelos, ya que, al igual que en la variación del COS, los valores máximo y mínimo de AD ocurrieron en Andosoles. Esta falta de relación entre el AD y el tipo del suelo puede estar relacionada con el hecho de que los principales factores que influyeron en el AD fueron la concentración de carbono y la densidad aparente, las cuales pueden ser mayormente influenciadas por características de la flora (e.g. densidad de raíces), más que por el tipo de suelo (Jobbágy y Jackson, 2000; Schoenholtz *et al.*, 2000).

Mantillo

La masa de mantillo tuvo un intervalo de variación amplio entre sitios, de 10.0±2.4 a 19.7±3.2 Mg ha⁻¹, con un promedio de 15±1.3 Mg ha⁻¹. Al asumir una concentración de carbono en la materia

density in our soils than in those of other studies, which report densities below 0.9 g cm⁻³ in all the profiles studied, as well as to differences in the depths of the profiles analyzed, since those studies analyzed deeper soil profiles than in our study.

The water absorption area, according to the average distribution of roots in the profiles, ranged between 0 and 60 cm in depth. In this area, available water was estimated in 107 to 167 L m⁻² (Table 3). It is worth mentioning that there were no differences in the availability of water between soils, since, as in the variation of the SOC, the highest and lowest AW values were found in Andosols. This lack of relation between AW and soil type may be related to the fact that the main factors that influenced the AW were the concentration of carbon and bulk density, which may be influenced more by the characteristics of the flora (e.g. root density) than by the type of soil (Jobbágy and Jackson, 2000; Schoenholtz *et al.*, 2000).

Litter

The litter mass had a wide variation interval between sites, between 10.0±2.4 and 19.7±3.2 Mg ha⁻¹, with an average of 15±1.3 Mg ha⁻¹. Assuming a concentration of carbon in organic matter of 50 % (IPCC, 2003), these values equal a stock of organic carbon of 5.0 ± 1.2 to 9.8 ± 1.6 Mg C ha⁻¹, with an average of 7.5 ± 0.6 Mg C ha⁻¹. The average of mass is greater than the values reported by Tanner (1980) (8.1 and 11.7 Mg ha⁻¹) and McDonald *et al.* (2000) (4.3 Mg ha⁻¹) for different CFs in Jamaica, and by Negrete-Yankelevich *et al.* (2007) (2.0–4.2 Mg ha⁻¹) for a CF in Mexico. The highest accumulation of litter in our study's CF suggests that here the rate of decomposition of organic matter is slow. In CFs, the low decomposition rate of the litter has been related to low concentrations of nutrients in the organic matter, low ambient temperatures, and with the generation of anaerobic conditions as a consequence of the high soil moisture (Benner *et al.*, 2010; Giambelluca and Gerold, 2011). Considering the litter and the mineral soil, the stock of carbon in the soil fluctuated between 99 and 157 Mg ha⁻¹, with an average of 126 ± 7 Mg ha⁻¹.

CONCLUSIONS

This study produced information on soil from a scarcely studied cloud forest in Michoacán. The

orgánica de 50 % (IPCC, 2003), estos valores equivalen a un almacén de carbono orgánico de 5.0 ± 1.2 a 9.8 ± 1.6 Mg C ha⁻¹, con un promedio de 7.5 ± 0.6 Mg C ha⁻¹. El promedio de masa es mayor a los valores reportados por Tanner (1980) (8.1 y 11.7 Mg ha⁻¹) y McDonald *et al.* (2000) (4.3 Mg ha⁻¹) para diferentes BN en Jamaica, y por Negrete-Yankelevich *et al.* (2007) (2.0–4.2 Mg ha⁻¹) para un BN en México. La mayor acumulación de mantillo en el BN de nuestro estudio sugiere que la tasa de descomposición de la materia orgánica es lenta. En los BN, la lenta tasa de descomposición del mantillo se asocia con concentraciones bajas de nutrientes en la materia orgánica, temperaturas bajas en los sitios y con la generación de condiciones anaeróbicas como consecuencia de la humedad alta del suelo (Benner *et al.*, 2010; Giambelluca y Gerold, 2011). Al considerar el mantillo y el suelo mineral, el almacén de carbono en el suelo osciló de 99 a 157 Mg ha⁻¹, con un promedio de 126 ± 7 Mg ha⁻¹.

CONCLUSIONES

El presente estudio generó información edafológica de un bosque de niebla de Michoacán poco estudiado. Los principales grupos de suelo se identificaron a un segundo nivel con poco detalle, y se reportan datos de contenidos de carbono orgánico y retención de agua en suelos. Los resultados pueden usarse en inventarios de carbono estatal y nacional para evaluar la función de los ecosistemas terrestres en el ciclo de carbono, así como para analizar la función de dichos ecosistemas en el ciclo hidrológico.

La concentración de carbono decreció con la profundidad del suelo, y 55 % del carbono total se concentró en los 30 cm superficiales del suelo. El contenido promedio de carbono del suelo estuvo entre los valores más bajos reportados para el bosque de niebla en México y en la parte media del intervalo reportado para Andosoles en el Sistema Neovolcánico Transversal.

La retención de agua a capacidad de campo fue afectada negativamente con la densidad aparente y positivamente por la concentración de carbono. El punto de marchitez permanente fue afectado negativamente por la densidad aparente y la proporción de arenas. El agua disponible fue afectada positivamente por la concentración de carbono, resaltando la influencia de la materia orgánica en la disponibilidad de agua para las plantas. La retención de agua tuvo

valores bajos en comparación con los reportados para Andosoles en el Sistema Neovolcánico Transversal, presumiblemente debido a la mayor densidad aparente de los suelos de este estudio.

Dado que la mayor proporción del carbono orgánico se concentra en los primeros 30 cm del suelo, este almacén y la retención de agua pueden ser muy sensibles a las perturbaciones naturales y antropogénicas en el bosque estudiado.

main soil groups were identified at a second level in little detail, and data is reported on organic carbon contents and retention of water in soils. The results may be used in carbon inventories for the state and countrywide to evaluate the role played by the terrestrial ecosystems in the carbon cycle, as well as to analyze the function of such ecosystems in the water cycle.

Carbon concentration decreased with soil depth, and 55 % of the total of carbon was concentrated in the 30 cm below the soil surface. The average content of carbon in the soil was among the lowest values reported for cloud forests in Mexico, and in the mid-section of the interval reported for Andosols in the Trans-Mexican Volcanic System.

Water retention at field capacity was negatively affected by bulk density and positively, by the concentration of carbon. The permanent wilting point was negatively affected by the bulk density and by the proportion of sands. The available water was positively affected by the concentration of carbon, highlighting the influence of organic matter in the availability of water for plants. Water retention showed low values in comparison to those reported for Andosols in the Trans-Mexican Volcanic System, presumably due to the higher bulk density of the soils in this study.

—End of the English version—

---*---

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Hilda Rivas, Zaira Pérez y Lorenza Sebastián por su apoyo técnico en campo y laboratorio, a Maribel Nava Mendoza por realizar los análisis de carbono, a Juliana Padilla Cuevas por realizar los análisis de Al y Fe, a Gabriela Cuevas García por la elaboración de mapas y a Raquel González García por su apoyo técnico en cómputo. Este trabajo fue financiado por CONACYT; proyecto: "Evaluación de la importancia relativa de bosque húmedo de niebla bajo un enfoque de paisaje". C.A.A., agradece a CONACYT por una beca posdoctoral (Becario, 18966). Agradecemos los valiosos comentarios de un editor y un revisor anónimos a una versión previa del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Álvarez-Arteaga, G., N. E. García, P. Krasilnikov, y F. García-Oliva. 2013. Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 47: 171-180.
- Amundson, R. 2001. The carbon budget in soils. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 29: 535-562.
- Batjes, N. H. 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma* 71:31-52.
- Benner, J., P. M. Vitousek, and R. Ostertag. 2010. Nutrient cycling and nutrient limitation in tropical montane cloud forests. *In: Bruijnzeel L. A., F. N. Scatena, and L. S. Hamilton (eds). Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management.* Cambridge University Press, London. pp: 90-100.
- Binkley, D. and Fisher, R. 2013. Ecology and management of forest soils. John Wiley & Sons. Fourth Edition. 347 p.
- Birkeland, W. P. 1984. Soils and Geomorphology. Oxford University Press. 372 p.
- Bravo-Espinosa, M., M. Mendoza, T. Carlón-Allende, L. Medina, J. T. Sáenz, and R. Páez. 2012. Effects of converting forest to avocado orchards on loss ground cover and topsoil properties in the Trans-Mexican Volcanic System. *Land Degrad. Dev.* 25:452-457
- Bruijnzeel, L. A. and J. Proctor. 1995. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? *In: Hamilton, L. S., J. O. Juvik, and F. N. Scatena (eds). Tropical Montane Cloud Forests. Ecological Studies* 110, Springer, New York. pp: 38-78.
- Campos-Cascaredo, A., K. Oleschko, L. Cruz-Huerta, J. D. Etchevers, and C. Hidalgo. 2001. Estimation of allophane and its relationship with other chemical parameters in mountain andisols of the Volcano Cofre de Perote. *Terra* 19: 105-116.
- Chapman, H. D. 1965. Cation-exchange Capacity. *In: Black, C. A. (ed.). Method of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Inc. Madison, USA. pp: 891-900.
- CONABIO (Comisión Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2010. El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. CONABIO, México, D.F. 196 p.
- Cotler, H. 2003. Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña. *In: Sánchez, Ó., E. Vega, E. Peters, y O. Monroy-Vilchis (eds). Conservación de los Ecosistemas Templados de Montaña en México.* INE, México, D.F. pp: 153-162.
- De Jong, B. H., M. A. Cairns, P. K. Haggerty, N. Ramirez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, and I. March-Mifsut. 1999. Land-use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environ. Manage.* 23: 373-385.
- Don, A., J. Schumacher, and A. Freibauer. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.* 17: 1658-1670.
- Elliott, E. T., J. W. Heil, E. F. Kelly, and H. C. Monger. 1999. Soil structural and other physical properties. *In: Robertson, G., D. Coleman, C. Bledsoe, and P. Sollins (eds). Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research.* Oxford University Press Inc., NY. Pp: 74-85.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2006. Guidelines for soil description. FAO, Rome. Pp 5-6.
- Gamboa, A. M. and L. Galicia. 2012. Land-use/cover change effects and carbon controls on volcanic soil profiles in highland temperate forests. *Geoderma* 170: 390-402.
- García-Oliva, F., R. L. Sanford Jr, and E. Kelly. 1999. Effects of slash-and-burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest. *Geoderma* 88: 1-12.
- Guardiño-Monroy, V. H., P. Corona-Chávez, I. Israde-Alcántara, L. Mennella, E. Arregue, B. Bigioggero, y S. Chiesa. 1999. Carta Geológica de Michoacán 1:250,000. 111 p.
- Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. *In: Klute, A. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Inc. Madison, USA. Pp 383-411.
- Giambelluca, T. and G. Gerold. 2011. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests. *In: Forest Hydrology and Biogeochemistry.* Springer, Netherlands. Pp: 221-259.
- Gómez-Tuena A., T. Orozco-Ezquivel, y L. Ferrari. 2005. Petrogénesis ígnea de la faja volcánica trans-mexicana. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 3: 227-283.
- González-Espinosa, M., J. A. Meave, F. G. Lorea-Hernández, G. Ibarra-Manríquez, and A. C. Newton. 2011. The red list of mexican cloud forest trees, fauna and flora international. Cambridge, UK. 120 p.
- Guo, L. B. and R. M. Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob. Change. Biol.* 8: 345-360.
- Gupta, S. and W. Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resour. Res.* 15: 1633-1635.
- Hamilton, L. S., J. O. Juvik, and F. N. Scatena. 1995. The Puerto Rico tropical cloud forest symposium: introduction and workshop synthesis. *In: Hamilton, L. S., J. O. Juvik, and F. N. Scatena (eds). Tropical Montane Cloud Forests. Ecological Studies* 110. Springer Verlag, New York. pp: 1-18.
- Hill, T., and P. Lewicki. 2007. STATISTICS: Methods and Applications. StatSoft, Tulsa, OK.
- Huffman E. W. D. 1977. Performance of a new carbon dioxide coulometer. *Microchem. J.* 22: 567-573.

- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2013. Extractor Rápido de Información Climatológica III, v. 3.2. Información climatológica disponible en formato electrónico. Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2007. Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1:250 000 Serie II. INEGI, Aguascalientes, México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-use change, and forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan. 300 p.
- ISO 11265. 1994. Soil quality - Determination of the specific electrical conductivity. International Organization for Standardization. 3 p.
- ISRIC (International Soil Reference and Information Centre) 2002. Procedures for soil analysis. Technical paper 9. FAO, Italia. pp: 14-17.
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 181 p.
- Jobbágy, E. G., and R. B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10: 423-436.
- Johnson, K. D., F. N. Scatena, and Silver W. L. 2011. A typical soil carbon distribution across a tropical stepland forest catena. *Catena* 87: 391-397.
- Kitayarna, K. 1995. Biophysical conditions of the montane cloud forests of Mount Kinabalu, Sabah, Malaysia. *In*: Hamilton L. S., J. O. Juvic, and F. N. Scatena (eds). Tropical Montane Cloud Forests. Springer-Verlag, NY, USA. pp: 183-197.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. *In*: Klute, A. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Inc. Madison, USA. pp: 635-662.
- Lützw, M. V., I. Kögel-Knabner, K. Ekschmitt, E. Matzner, G. Guggenberger, B. Marschner, and H. Flessa. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 426-445.
- Malone, B.P., A. B. McBratney, V. Minasny, and G. M. Laslett. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma* 154: 138-152.
- Martínez, M. L., O. Pérez-Maqueo, G. Vázquez, G. Castillo-Campos, J. García-Franco, K. Mehltreter, M. Equihua, and R. Landgrave. 2009. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *For. Ecol. Manag.* 258: 1856-1863.
- McDonald, M. A. and J. R. Healey. 2000. Nutrient cycling in secondary forests in the Blue Mountains of Jamaica. *For. Ecol. Manag.* 139: 257-278.
- Mendoza, M. E., E. López-Granados, D. Geneletti, D. R. Pérez-Salicrup, and V. Salinas. 2011. Analysing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975-2003). *Appl. Geog.* 31: 237-250.
- Negrete-Yankelevich, S., C. Fragoso, A. C. Newton, and O. W. Heal. 2007. Successional changes in soil, litter and macroinvertebrate parameters following selective logging in a Mexican Cloud Forest. *Appl. Soil Ecol.* 35: 340-355.
- Osman, K. T. 2013. Soils: Principles, Properties and Management. Springer, London UK. 306 p.
- Palm, C., P. Sanchez, S. Ahamed, and A. Awiti. 2007. Soils: A contemporary perspective. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32: 99-129.
- Parfitt, R. L. and B. Clayden. 1991. Andisols: The development of a new order in Soil Taxonomy. *Geoderma* 49: 181-198.
- Peña-Ramírez, V. M., L. Vázquez-Selem, and C. Siebe. 2009. Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835–30,500 years BP) in Mexico. *Geoderma* 149: 224-234.
- Pérez-Ramírez, S., M. I. Ramírez, P. F. Jaramillo-López, y F. Bautista. 2013. Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca. *RCHSCFA* 19: 158-173.
- Prentice, I. C., G. D. Farquhar, M. J. Fasham, M. L. Goulden, M. Heimann, V. J. Jaramillo, H. S. Khashgi, C. L. Quéré, R. J. Scholes, and D. W. Wallace. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *In*: Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson (eds). Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp 183-37.
- Rasse, D. P., C. Rumpel, and M. F. Dignac. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant Soil* 269: 341-356.
- Rawls, W. J., Y. A. Pachepsky, J. C. Ritchie, T. M. Sobecki, and H. Bloodworth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116(1), 61-76.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *T. Asae* 25: 1316-1320.
- Rumpel, C. and I. Kögel-Knabner. 2011. Deep soil organic matter - a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant Soil* 338: 143-158.
- Rzedowski, J. 1996. Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Bot. Mex.* 35: 25-44.
- Santana, H. G., M. E. Mendoza, M. V. Salinas, D. R. Perez-Salicrup, R. Y. Martínez, and M. I. Aburto. 2014. Análisis preliminar de la diversidad y estructura arbórea-arbustiva del bosque mesófilo en el sistema volcánico transversal de Michoacán, México. *Rev. Mex. Biod.* 85: 1104-1116.
- Saxton, K. E. and W. J. Rawls. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569-1578.
- Schoenholtz, S. H., H. Van Miegroet, and J. A. Burger. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *For. Ecol. Manag.* 138: 335-356.
- Siebe, C., R. Jahn, and K. Stahr. 2006. Manual para la Descripción y Evaluación Ecológica de Suelos en el Campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México, Universidad Autónoma Chapingo, México. 2a edición. 57 p.
- Shoji, S., M. Nanzio, and R. A. Dahlgren. 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties, and Utilization. *Dev. Soil Sci.* 21. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 287 p.
- Shoji, S., M. Nanzio, R. A. Dahlgren, and P. Quantin. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soil Resources. *Soil Sci.* 161:605-615.

- Shoji, S., T. Ito, M. Saigusa, and I. Yamada. 1985. Properties of nonallophanic Andisols from Japan. *Soil Sci.* 148: 264-277.
- Tanner, E. V. J. 1980. Studies on the biomass and productivity in a series of montane rain forests in Jamaica. *J. Ecol.* 68:573-588.
- Toledo-Aceves, T., J. A. Meave, M. González-Espinosa, and N. Ramírez-Marcial. 2011. Tropical montane cloud forests: current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *J. Environ. Manage.* 92:974-981.
- Villaseñor, J. L. 2010. El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF. 42 p.
- Zar, J. H. 1999. *Biostatistical Analysis*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall. 620 p.