

Effect of land use change and agricultural management on physical and hydrological properties of an Andosol in Uruapan, Michoacán

Efectos del cambio de uso del suelo y del manejo agrícola en las propiedades físicas e hidrológicas de un Andosol en Uruapan, Michoacán

Silvia J. Béjar-Pulido; Israel Cantú-Silva*; Humberto González-Rodríguez; José G. Marmolejo-Moncivais; María I. Yáñez-Díaz; Erik O. Luna-Robles

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional núm. 85, km 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

*Corresponding author: icantu59@gmail.com; tel.: +52 821 212 4895.

Abstract

Introduction: World agriculture is characterized by intensive land use, which causes variations in physical and hydrological properties, regarded as key for agricultural productivity.

Objective: To study the effect of land use change from forest to agriculture land with organic and conventional management on the physical and hydrological properties of an Andosol.

Materials and methods: Four land use scenarios were evaluated: a forest land use scenario, two with *Persea americana* Mill var. Hass with conventional and organic management, and one with *Macadamia integrifolia* Maiden & Betche. Physical properties (texture, bulk density [BD], mechanical resistance to penetration [MRP] and porosity) and hydrological properties (moisture, hydraulic conductivity, infiltration, permanent wilting point [PWP], field capacity and available water) were determined. These variables were analyzed by parametric (ANOVA) and non-parametric (Kruskal-Wallis) statistics to determine differences among land use scenarios and depths (0 to 20 cm and 20 to 40 cm).

Results and discussion: The ANOVA showed significant differences ($P \leq 0.05$) in physical and hydrological properties among land use scenarios; infiltrations decreased 40 to 70 % in agricultural systems with respect to forest use. For the depth factor, no differences were observed in the case of hydrological variables only in PWP and silt. Interaction was only significant for BD. Porosity, MRP, BD and clay defined the behavior of the hydrological variables.

Conclusions: The change from forest to agricultural land use causes significant variations in the physical and hydrological properties of an Andosol soil. The infiltration process was the most affected.

Keywords: organic management; conventional agriculture; infiltration; *Persea americana*; *Macadamia integrifolia*.

Resumen

Introducción: La agricultura mundial se caracteriza por el uso intensivo del suelo, el cual genera variaciones en las propiedades físicas e hidrológicas, consideradas clave para la productividad agrícola.

Objetivo: Estudiar los efectos del cambio de uso de suelo forestal al agrícola con enmiendas orgánicas y convencionales sobre las propiedades físicas e hidrológicas de un Andosol.

Materiales y métodos: Se evaluaron cuatro usos de suelo: uno forestal, dos con cultivo de *Persea americana* Mill var. Hass con manejo convencional y orgánico, y uno con *Macadamia integrifolia* Maiden & Betche. Se determinaron propiedades físicas (textura, densidad aparente [DA], resistencia mecánica a la penetración [RMP] y porosidad) e hidrológicas (humedad, conductividad hidráulica, infiltración, punto de marchitez permanente [PMP], capacidad de campo y agua disponible). Dichas variables se analizaron por estadística paramétrica (ANOVA) y no paramétrica (Kruskal-Wallis) para determinar diferencias entre usos de suelo y profundidades (0 a 20 cm y 20 a 40 cm).

Resultados y discusión: El ANOVA mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las propiedades físicas e hidrológicas entre usos de suelo; las infiltraciones disminuyeron 40 a 70 % en los sistemas agrícolas con respecto al uso forestal. Para el factor profundidad no se observaron diferencias en las variables hidrológicas solo en el PMP y limo. La interacción solo fue significativa para la DA. La porosidad, RMP, DA y arcilla definieron el comportamiento de las variables hidrológicas.

Conclusiones: El cambio de uso de suelo forestal al agrícola provoca variaciones significativas en las propiedades físicas e hidrológicas de un suelo Andosol. El proceso de infiltración fue el más afectado.

Palabras clave: enmiendas orgánicas; agricultura convencional; infiltración; *Persea americana*; *Macadamia integrifolia*.

Introduction

Global agriculture is characterized by intensive land use in conventional and organic management modalities, causing variations in physical and hydrological properties, regarded as key for agricultural productivity, thus deterioration involves soil chemical and biological activity (Babin et al., 2019; Di Prima et al., 2018; Sihi et al., 2017). About 37.4 % of the Earth's surface is used for agriculture (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentables y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA, 2019]).

Mexico has 26 of the 32 soil groups recognized by the World Soil Resource Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2006). This diversity can be explained by several factors such as geographic location, vegetation, topography and climate, which directly influence land use and management. Andosol soils derived from volcanic ash and are important for the development of agriculture, which has been one of the bases of economic growth, and a factor of social stability (IUSS Working Group WRB, 2016). Andosols have good aggregate stability and high permeability, which makes them resistant to erosion; however, under well hydrated conditions or subjected to drastic change they can be susceptible to damage (Meza-Pérez & Geissert-Kientz, 2006). Andosol cover about 0.7 % of the emerged land surface (IUSS Working Group WRB, 2016) worldwide; in Mexico, these soils cover less than 2 % of the continental surface (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016) and, at the regional level, Michoacán accounts for 15.4 % (Bedolla-Ochoa, Bautista, Ihl, & Dubrovina, 2019).

In Mexico, avocado is grown in 28 states, but Michoacán is the main producer with 84 % of the national production with about 112 000 ha. The economic benefits of this crop make Michoacán a significant contributor to the regional economy, but the production model has a high impact on nature, due to land use change in forest lands and soil deterioration due to inadequate management practices and excessive use of agrochemicals. These factors point to Mexico as one of the countries most exposed to desertification; in particular, Michoacán has a severe problem of degradation and potential desertification due to crop expansion (Chávez-León et al., 2012; Villanueva & Zepeda, 2018).

The objective of this study was to evaluate the effect of the change from forest to agricultural land use on physical and hydrological properties of an Andosol. The hypothesis proposes that the change from a forest ecosystem to agricultural use, and agricultural management in relation to the application of organic and conventional management, causes alterations in soil properties.

Introducción

La agricultura mundial se caracteriza por el uso intensivo del suelo en sus modalidades de manejo convencional y orgánico, generando variaciones en las propiedades físicas e hidrológicas, consideradas clave para la productividad agrícola, por lo que el deterioro involucra a la actividad química y biológica del suelo (Babin et al., 2019; Di Prima et al., 2018; Sihi et al., 2017). Cerca de 37.4 % de la superficie de la Tierra es usada para la agricultura (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentables y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA, 2019]).

En México se distribuyen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por la Base Referencial Mundial de Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2006). Esta diversidad puede explicarse por varios factores como la ubicación geográfica, vegetación, topografía y clima, que influyen directamente sobre el uso y manejo de los suelos. Los suelos Andosoles son derivados de cenizas volcánicas y son de importancia para el desarrollo de la agricultura, la cual ha sido una de las bases del crecimiento económico, así como un factor de estabilidad social (IUSS Working Group WRB, 2016). Generalmente, los Andosoles presentan buena estabilidad de agregados y alta permeabilidad, que los hace resistentes a la erosión; no obstante, en condiciones bien hidratadas o sometidos a un cambio drástico pueden ser susceptibles al daño (Meza-Pérez & Geissert-Kientz, 2006). A nivel mundial, el Andosol ocupa cerca de 0.7 % de la superficie de tierras emergidas (IUSS Working Group WRB, 2016); en México, estos suelos ocupan menos de 2 % de la superficie continental (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016) y, a nivel regional, Michoacán cuenta con 15.4 % (Bedolla-Ochoa, Bautista, Ihl, & Dubrovina, 2019).

En México, el aguacate se cultiva en 28 estados, pero Michoacán es el principal productor aportando 84 % de la producción nacional con cerca de 112 000 ha. La derrama económica de este cultivo lo hace un impulsor de la economía regional, pero el modelo de producción es de alto impacto para la naturaleza, debido al cambio de uso del suelo en terrenos forestales y al deterioro del suelo por prácticas inadecuadas de manejo y uso excesivo de agroquímicos. Estos factores señalan a México como uno de los países más expuestos a la desertificación; específicamente, el estado de Michoacán tiene un problema severo de degradación y desertificación potencial por la expansión del cultivo (Chávez-León et al., 2012; Villanueva & Zepeda, 2018).

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del cambio de uso de suelo forestal al agrícola sobre las propiedades físicas e hidrológicas de un Andosol. La hipótesis plantea que el cambio de un ecosistema forestal a uso agrícola, así como el manejo agrícola

Materials and Methods

Study area

The study area is located in the ejido of “Toreo El Alto” in Uruapan, Michoacán, located in the southern part of the Purépecha mountain range, between coordinates 19° 28' 22.2" N and 102° 00' 19.7" W. The area has an altitude of 1 890 m and belongs to the Balsas River region; the climate is temperate-humid with summer rains (Cw) (García, 2004), with an average annual temperature between 10 and 27 °C and average annual rainfall that exceeds 1 500 mm. The soil type is Andosol of volcanic origin (Alcalá, Ortiz, & Gutiérrez, 2001). Three main types of vegetation are identified: pine forest, pine-oak forest and mountain mesophyll forest (Bello & Madrigal, 1996).

In an Andosol soil, four experimental plots were selected: one for forest use and three for agricultural use. According to the classification of Rzedowski (2006), the forest plot has coniferous forest vegetation represented by a mixture of species of the genus *Pinus* and *Quercus*, which include: *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus pseudostrobus* Brongn., *P. lawsonii* Roehl ex Gordon, *P. leiophylla* Schl. & Cham, *Quercus rugosa* Neé, *Q. laurina* Bonpl., *Arbustus xalapensis* Kunth and *Fraxinus udheii* (Wenz) Lingelsh, corresponding to an unmanaged and uneven-aged forest, with an average age of 80 years.

The agricultural plots correspond to two avocado orchards (*Persea americana* Mill var. Hass) with organic and conventional management and an organic macadamia nut orchard (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche) that uses the same management as the organic avocado orchard; the trees have an average age of 60 years in the three orchards.

Organic management consists of cattle compost, derived from cattle feces with a dose of 50 Mg·ha⁻¹ (N-P₂O₅-K₂O [39-37-29] + S [18.4 %] + Mg [13.6] + Ca [74 %] and micronutrients), applied in partial shade for a period of three years. Conventional management includes chemical fertilizers such as copper sulfate pentahydrate (CuSO₄·5H₂O, 600 mL·ha⁻¹) used as a fungicide and bactericide for preventive use; CO (NH₂)₂ foliar fertilizer at a dose of 3 kg·ha⁻¹ (20-30-10) every two months; and an extended-release granules (15-00-00 + 26.6 [CaO] + 0.3 [B]).

Sampling and soil analysis

A random sampling was carried out in each of the four experimental plots. Four composite samples were collected in each plot at two depths (0 to 20 and 20 to 40 cm). Samples were taken to the soil laboratory of the Faculty of Forestry Sciences of the Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) and were dried

con respecto a la aplicación de enmiendas orgánicas y convencionales, provoca alteraciones en las propiedades del suelo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el ejido de “Toreo El Alto” en Uruapan, Michoacán, localizado en la parte sur de la sierra Purépecha, entre las coordenadas 19° 28' 22.2" LN y 102° 00' 19.7" LO. El área presenta una altitud de 1 890 m y pertenece a la región del río Balsas; el clima corresponde al tipo templado húmedo con lluvias en verano (Cw) (García, 2004), con una temperatura media anual entre 10 y 27 °C y promedio pluvial anual que supera los 1 500 mm. El tipo de suelo es Andosol de origen volcánico (Alcalá, Ortiz, & Gutiérrez, 2001). Se reconocen tres tipos principales de vegetación: bosque de pino, bosque de pino-encino y bosque mesófilo de montaña (Bello & Madrigal, 1996).

En un suelo Andosol se seleccionaron cuatro parcelas experimentales; una de uso forestal y tres de uso agrícola. De acuerdo con la clasificación de Rzedowski (2006), la parcela forestal tiene vegetación de bosque de coníferas representado por una mezcla de especies del género *Pinus* y *Quercus*, entre ellos destacan: *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus pseudostrobus* Brongn., *P. lawsonii* Roehl ex Gordon, *P. leiophylla* Schl. & Cham, *Quercus rugosa* Neé, *Q. laurina* Bonpl., *Arbustus xalapensis* Kunth y *Fraxinus udheii* (Wenz) Lingelsh, correspondiente a un bosque incoetáneo sin manejo, con una edad promedio de 80 años.

Las parcelas agrícolas corresponden a dos huertas de aguacate (*Persea americana* Mill var. Hass) con manejo orgánico y convencional y una huerta de nuez de macadamia orgánica (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche) que emplea el mismo manejo que la de aguacate orgánico; los árboles tienen una edad promedio de 60 años en las tres huertas.

El manejo orgánico consiste en composta de res, derivada de heces de ganado vacuno con una dosis de 50 Mg·ha⁻¹ (N-P₂O₅-K₂O [39-37-29] + S [18.4 %] + Mg [13.6] + Ca [74 %] y micronutrientes), aplicada a media sombra por un periodo de tres años. El manejo convencional incluye fertilizantes químicos como el sulfato de cobre pentahidratado (CuSO₄·5H₂O, 600 mL·ha⁻¹) utilizado como fungicida y bactericida de uso preventivo; el fertilizante foliar CO (NH₂)₂ en una dosis de 3 kg·ha⁻¹ (20-30-10) cada dos meses; y un granulado de liberación prolongada (15-00-00 + 26.6 [CaO] + 0.3 [B]).

Muestreo y análisis de suelo

Se realizó un muestreo al azar en cada una de las cuatro parcelas experimentales, donde se obtuvieron

outdoors and sieved on a 2 mm sieve to determine texture and moisture content. Methods used for the analysis of soil physical and hydrological properties are shown in Table 1.

Statistical analysis

The variables were analyzed in a completely randomized experimental design with factorial arrangement to evaluate the effect of land use system and depth changes, and interaction. All variables were tested for normality and homogeneity ($n = 32$) and the following analyses were applied: Kruskal-Wallis nonparametric test for hydraulic conductivity (Ks), porosity, moisture and sand; one-factor ANOVA for infiltrations and mechanical resistance to penetration (MRP); and factorial ANOVA for available water (Aw), bulk density (BD), clay, silt, permanent wilting point (PWP) and field capacity (FC). Subsequently, a Tukey

cuatro muestras compuestas en cada parcela a dos profundidades (0 a 20 y 20 a 40 cm). Las muestras se llevaron al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), se secaron al aire libre y se cribaron en un tamiz de 2 mm, para la determinación de textura y contenido de humedad. Los métodos empleados para el análisis de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo se indican en el Cuadro 1.

Análisis estadístico

Las variables se analizaron en un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial, para evaluar el efecto del sistema de uso del suelo y cambios por profundidad, así como su interacción. Todas las variables se sometieron a pruebas de normalidad y homogeneidad ($n = 32$) y se aplicaron los siguientes análisis: prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para

Table 1. Methods used for the evaluation of soil physical and hydrological properties.

Cuadro 1. Métodos utilizados para la evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo.

Properties / Propiedades	Method / Método	Unit / Unidad
Physical / Físicas		
Texture ^{1,2} / Textura ^{1,2}	Method AS-09 of NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002)./ Método AS-09 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002).	%
Bulk density ^{1,2} / Densidad aparente ^{1,2}	Gravimetric method (Woerner, 1989)./ Método gravimétrico (Woerner, 1989).	g·cm ⁻³
MRP ¹ / RMP ¹	Hardness meter/penetrometer (soil hardness tester Yamanaka) (Medina-Guillén et al., 2017)./ Medidor de dureza/penetrómetro (soil hardness tester Yamanaka) (Medina-Guillén et al., 2017).	Kg·cm ⁻²
Porosity ^{1,2} / Porosidad ^{1,2}	Estimation by means of bulk density and particle size./ Estimación por medio de la densidad aparente y tamaño de partícula.	%
Hydrological / Hidrológicas		
Moisture ¹ / Humedad ¹	Thermogravimetric technique, NOM-021-RECNAT-2000./ Técnica termogravimétrica, NOM-021-RECNAT-2000.	%
Ks ¹	Permeability analysis specified by Japanese Industrial Standards (Das, 2002)./ Análisis de permeabilidad especificada por Japanese Industrial Standards (Das, 2002).	cm·s ⁻¹
F _b ¹ , F ₀ ¹ and F _a ¹	Double ring method (Zhang et al., 2017)./ Método de doble anillo (Zhang et al., 2017).	mm·h ⁻¹
Available water ^{1,2} , PWP ^{1,2} (15 bar) and FC ^{1,2} (0.3 bar)/ Agua disponible ^{1,2} , PMP ^{1,2} (15 bar) y CC ^{1,2} (0.3 bar)	Pressure plate and membrane method (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA) (Klute & Dirksen, 1986)./ Método de la placa y la membrana de presión (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA) (Klute & Dirksen, 1986).	%

MRP = mechanical penetration resistance, Ks = hydraulic conductivity, F_b = infiltration capacity, F₀ = initial infiltration, F_a = cumulative infiltration, PWP = permanent wilting point and FC = field capacity. ¹Depth from 0 to 20 cm and ²depth from 20 to 40 cm.

RMP = resistencia mecánica a la penetración, Ks = conductividad hidráulica, F_b = capacidad de infiltración, F₀ = infiltración inicial, F_a = infiltración acumulada, PMP = punto de marchitez permanente y CC = capacidad de campo. ¹Profundidad de 0 a 20 cm y ²profundidad de 20 a 40 cm.

test was performed for the comparison of means. All variables were analyzed with Pearson's correlation coefficient at both depths (0 to 20 and 20 to 40 cm). Statistical analyses were performed using SPSS statistical package version 22.0 with a confidence level of $P \leq 0.05$ (International Business Machines [IBM, 2013]).

Results

Land use effect on physical and hydrological properties at a depth of 0-20 cm

According to Table 2, ANOVA for surface variables such as infiltration (F_0 , F_b and F_a) and MRP showed significant differences ($P \leq 0.05$) among land use scenarios.

Table 3 indicates that, according to Tukey's test, infiltration variables (F_0 , F_b and F_a) and MRP of agricultural land uses showed significant decreases ($P \leq 0.05$) with respect to the forestry system. MRP of the forestry system had the lowest hardness in contrast to agricultural systems with avocado, which showed mean values of $4.5 \text{ Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Referring to the initial, basic, and cumulative infiltration variables, values were lower compared to those of the forestry system; on average, the three variables decreased 70, 43 and 40 % in conventional avocado, organic avocado and macadamia, respectively. Organic systems (avocado and macadamia) were similar, differing significantly from conventional management, which indicates that the use of organic amendments can be an alternative to improve these hydrological variables.

On the other hand, the Kruskal-Wallis test (Table 3) indicated that Ks and moisture content were significantly different ($P \leq 0.05$) among land use scenarios. Ks showed average values from 0.002 to $0.060 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, the lowest value was for organic avocado

conductividad hidráulica (Ks), porosidad, humedad y arena; ANOVA de un factor para las infiltraciones y resistencia mecánica a la penetración (MRP); y ANOVA factorial para agua disponible (Ad), densidad aparente (DA), arcilla, limo, punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC). Posteriormente se hizo una prueba de Tukey para la comparación de medias. Todas las variables se analizaron con el coeficiente de correlación de Pearson en ambas profundidades (0 a 20 y 20 a 40 cm). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando la versión 22.0 del paquete estadístico SPSS con un nivel de confianza de $P \leq 0.05$ (International Business Machines [IBM, 2013]).

Resultados

Efectos de los cambios de usos de suelo sobre las propiedades físicas e hidrológicas a una profundidad de 0-20 cm

De acuerdo con el Cuadro 2, el ANOVA para las variables superficiales como infiltración (F_0 , F_b y F_a) y MRP mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre usos de suelo.

El Cuadro 3 indica que, de acuerdo con la prueba de Tukey, las variables de infiltración (F_0 , F_b y F_a) y MRP de los usos de suelo agrícolas mostraron disminuciones significativas ($P \leq 0.05$) respecto al sistema forestal. Particularmente, la RMP del sistema forestal presentó la menor dureza a diferencia de los sistemas agrícolas con aguacate, los cuales presentaron valores medios de $4.5 \text{ Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Con respecto a las variables de infiltración inicial, básica y acumulada, los valores fueron menores en comparación con los del sistema forestal; en promedio, las tres variables disminuyeron 70, 43 y 40 % en aguacate convencional, aguacate orgánico y macadamia, respectivamente. Asimismo, los sistemas orgánicos (aguacate y macadamia) fueron similares, diferenciándose significativamente del manejo

Table 2. One-factor analysis of variance for infiltration and mechanical resistance to penetration (MRP) among land use scenarios, at a depth of 0 to 20 cm.

Cuadro 2. Análisis de varianza de un factor para las variables de infiltración y resistencia mecánica a la infiltración (MRP) entre usos de suelo, a una profundidad de 0 a 20 cm.

Variables (0-20 cm)	SM	DF/gl	MS/CM	MSE/CME	F	P	R ²
F_0 (mm·h ⁻¹)	3 588 960	3	1 196 320	549 100	2.17**	0.005	0.52
F_b (mm·h ⁻¹)	491 703	3	163 901	12 451	13.16*	0.042	0.86
F_a (mm)	2 566 634	3	855 544	100 865	8.48*	0.014	0.80
MRP (Kg·cm ⁻²)/ RMP (Kg·cm ⁻²)	36.43	3	12.14	1.05	11.53**	0.007	0.85

SM = sum of squares, DF = degrees of freedom, MS = mean square, MSE = mean square error, and R² = adjusted r-squared. F_0 = initial infiltration, F_b = basic infiltration and F_a = cumulative infiltration. **Highly significant differences ($P \leq 0.01$); *significant differences ($P \leq 0.05$).

SM = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, CME = cuadrado medio del error, y R² = R cuadrada ajustada. F_0 = infiltración inicial, F_b = infiltración básica y F_a = infiltración acumulada. **Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); *diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Table 3. Mean comparison for physical and hydrological variables in an Andosol with four land use scenarios, at a depth of 0 to 20 cm.**Cuadro 3. Comparación de medias para las variables físicas e hidrológicas en un Andosol con cuatro usos de suelo, a una profundidad de 0 a 20 cm.**

Land use / Uso de suelo	F ₀ (mm·h ⁻¹)	F _b (mm·h ⁻¹)	F _a (mm)	Ks (cm·s ⁻¹)	M (%)	MRP (Kg·cm ⁻²) / RMP (Kg·cm ⁻²)
Forest / Forestal	2320 a	858.08 a	2013.56 a	0.020*	67.45*	2.05 c
Conventional avocado / Aguacate convencional	600 c	253.95 c	618.50 c	0.009*	57.54*	4.62 b
Organic avocado / Aguacate orgánico	1470 b	448.74 b	1103.50 b	0.002*	66.86*	4.37 ab
Macadamia	1560 b	488.14 b	1194.40 b	0.060*	52.47*	3.87 a

Values with different letter (Tukey) and with asterisk (Kruskal-Wallis) represent significant differences ($P \leq 0.05$) among land use. F₀, F_b and F_a = initial, basic, and cumulative infiltration, respectively; Ks = hydraulic conductivity; M = moisture; MRP = mechanical resistance to penetration.

Valores con letra distinta (Tukey) y con asterisco (Kruskal-Wallis) representan diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los usos de suelo. F₀, F_b y F_a = infiltración inicial, básica y acumulada, respectivamente; Ks = conductividad hidráulica; H = humedad; RMP = resistencia mecánica a la penetración.

and the highest value for macadamia. In general, moisture content ranged from 52.47 to 67.45 % in the macadamia crop and forest plot, respectively.

Effect of land use and depth changes on physical and hydrological properties

Table 4 shows the factorial ANOVA, where the soil use factor led to highly significant differences ($P \leq 0.01$) in the variables BD and silt and clay content, and significant ($P \leq 0.05$) for the variables FC and PWP, while Ad showed no differences. In the case of the factor depth only PWP and silt content had highly significant differences, while the rest of the variables showed no differences (BD, Aw, FC and clay). In the case of the factor interaction, only BD showed significant differences.

Table 5 indicates that sand and porosity had significant differences ($P \leq 0.05$) among land use, for both depths, based on the Kruskal-Wallis test. Porosity was relatively high in all land uses, the systems with the highest and lowest percentages at both depths were forest use with 78.9 % and organic avocado with 69.2 %. In general, sand contents for both depths were high in all land uses with averages of 55 %, except for conventional use which had 35 %.

The comparison of means of physical and hydrological properties by depth (Table 5) indicates that soil BD had low values, typical of Andosols, although forest use had the lowest values (0.55 and 0.65 g·cm⁻³), and the highest values were recorded in organic avocado (0.81 and 0.80 g·cm⁻³) at both depths.

FC ranged from 55 (macadamia) to 68 % (conventional avocado) for the first depth (0 to 20 cm) and ranged from 55 (organic avocado) to 62 % (forest use) for the second depth (20 to 40 cm). PWP ranged from

convencional, lo cual indica que el uso de enmiendas orgánicas puede ser una alternativa para mejorar estas variables hidrológicas.

Por otra parte, la prueba de Kruskal-Wallis (Cuadro 3) indicó que la Ks y el contenido de humedad fueron diferentes significativamente ($P \leq 0.05$) entre los usos de suelo. La Ks presentó valores promedio de 0.002 a 0.060 cm·s⁻¹, siendo el menor en aguacate orgánico y el mayor en macadamia. En general, el contenido de humedad osciló entre 52.47 y 67.45 % en el cultivo de macadamia y la parcela forestal, respectivamente.

Efectos de los cambios de usos de suelos y profundidad sobre las propiedades físicas e hidrológicas

El Cuadro 4 muestra el ANOVA factorial, donde el factor uso de suelo generó diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en las variables DA y contenido de limo y arcilla, y significativas ($P \leq 0.05$) en las variables CC y PMP, mientras que el Ad no presentó diferencias. En el factor profundidad solo PMP y el contenido de limo presentaron diferencias altamente significativas, mientras que el resto de las variables no presentaron diferencias (DA, Ad, CC y arcilla). En la interacción de factores, únicamente DA mostró diferencias significativas.

El Cuadro 5 indica que la arena y porosidad presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre usos de suelo, para ambas profundidades, con base en la prueba de Kruskal-Wallis. La porosidad fue relativamente alta en todos los usos del suelo, siendo el forestal (78.9 %) y aguacate orgánico (69.2 %) los sistemas con mayor y menor porcentaje en ambas profundidades. En general, los contenidos de arena para ambas profundidades fueron altos en todos los usos de suelo con promedios del 55 %, a excepción del uso convencional que tuvo 35 %.

Table 4. ANOVA of two factors for land use (forest, organic avocado, conventional avocado and macadamia) and depth (0 to 20 cm and 20 to 40 cm) and interaction on the physical and hydrological properties of an Andosol soil.

Cuadro 4. ANOVA de dos factores para uso de suelo (forestal, aguacate orgánico, aguacate convencional y macadamia) y profundidad (0 a 20 cm y 20 a 40 cm) y su interacción en las propiedades físicas e hidrológicas de un suelo Andosol.

Variables	Land use/Usos de suelo	Depth/Profundidad	Interaction/Interacción
	$F_{(3, 24)}$	$F_{(1, 24)}$	$F_{(3, 24)}$
BD ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)/DA ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	11.21** (0.000)	1.34 ^{ns} (0.289)	0.474** (0.000)
Aw (%) / Ad (%)	2.72 ^{ns} (0.072)	2.51 ^{ns} (0.107)	0.727 ^{ns} (0.565)
FC (%) / CC (%)	5.371* (0.008)	3.178 ^{ns} (0.126)	1.871 ^{ns} (0.199)
PWP (%) / PMP (%)	6.766* (0.002)	18.668** (0.000)	1.707 ^{ns} (0.262)
Silt (%) / Limo (%)	23.45** (0.000)	17.38** (0.001)	0.339 ^{ns} (0.590)
Clay (%) / Arcilla (%)	12.13** (0.000)	0.286 ^{ns} (0.601)	0.943 ^{ns} (0.453)

**Highly significant differences ($P \leq 0.01$); *significant differences ($P \leq 0.05$). $P < 0.05$ is indicated in parentheses. BD = bulk density, Aw = available water, FC = field capacity, PWP = permanent wilting point.

**Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); *diferencias significativas ($P \leq 0.05$). Entre paréntesis se indica el valor de $P < 0.05$. DA = densidad aparente, Ad = agua disponible, CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente.

Table 5. Comparison of means of physical and hydrological properties at depths of 0 to 20 cm and 20 to 40 cm in four soil uses in an Andosol.

Cuadro 5. Comparación de medias de las propiedades físicas e hidrológicas en las profundidades de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm en cuatro usos de suelo en un Andosol.

Variable	Land use/Usos de suelo			
	Forest/Forestal	Conventional avocado/Aguacate convencional	Organic avocado/Aguacate orgánico	Macadamia
Depth from 0 to 20 cm / Profundidad 0 a 20 cm				
Sand (%) / Arena (%)	48.60*	27.96*	51.10*	56.46*
Silt (%) / Limo (%)	45.36 a	60.81 b	42.13 a	37.36 c
Clay (%) / Arcilla (%)	6.06 a	11.23 b	6.77 a	6.18 a
BD ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) / DA ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.55 a	0.57 a	0.81 b	0.69 b
Porosity (%) / Porosidad (%)	78.93*	78.60*	69.19*	73.96*
FC (%) / CC (%)	58.14 a	68.73 b	56.94 a	55.95 a
PWP (%) / PMP (%)	42.78 a	45.66 a	34.49 b	39.35 b
Aw (%) / Ad (%)	15.35 a	23.06 a	22.44 a	16.59 a
Depth from 20 to 40 cm / Profundidad 20 a 40 cm				
Sand (%) / Arena (%)	56.28*	37.05*	59.14*	67.82*
Silt (%) / Limo (%)	37.66 a	53.22 b	32.91 a	27.00 a
Clay (%) / Arcilla (%)	6.06 a	9.73 b	7.95 a	5.18 a
BD ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) / DA ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.65 a	0.58 a	0.80 b	0.73 b
Porosity (%) / Porosidad (%)	75.34*	77.80*	69.48*	72.42*
FC (%) / CC (%)	62.02 a	61.60 b	55.38 a	40.12 a
PWP (%) / PMP (%)	37.80 a	36.89 a	28.43 b	23.27 c
Aw (%) / Ad (%)	24.22 a	24.71 a	26.95 a	16.84 a

Values with different letter (Tukey) and with asterisk (Kruskal-Wallis) represent significant differences ($P \leq 0.05$) among land uses by depth. BD = bulk density, FC = field capacity, PWP = permanent wilting point and Aw = Available water.

Valores con letra distinta (Tukey) y con asterisco (Kruskal-Wallis) representan diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los usos de suelo por profundidad. DA = densidad aparente, CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente y Ad = agua disponible.

34 % (organic avocado) to 45 % (conventional avocado) for the first 20 cm, and at a depth of 20 to 40 cm, it decreased from 23 (macadamia) to 37 % (forest use). Aw ranged between 15 % for forestry system and 23 % for conventional use for the first depth (0 to 20 cm), which can be associated with high sand contents of forestry system; at a depth of 20 to 40 cm it varied from 16 to 26 % for the macadamia and organic avocado systems, respectively.

Silt values ranged from 40 to 60 % for the first depth (0 to 20 cm) and from 30 to 50 % for the second depth (20 to 40 cm). In the case of clay, the four land uses showed low contents, ranging from 6 to 11 % for 0 to 20 cm depth and from 5 to 9 % for 20 to 40 cm depth. The textural class for forest and organic land uses (organic avocado and macadamia) was sandy loam, and for conventional avocado was silt loam.

Correlation of physical and hydrological properties

According to Pearson's correlation results, at depth 0 to 20 cm, BD correlated negatively with porosity (-1), sand (-0.60), K_s (-0.82), F_0 (-0.65), F_b (-0.83) and F_a (-0.76), and positively with clay (0.74), silt (0.53), FC (0.54) and MRP (0.83). There is a strong positive correlation among the variables K_s , porosity and BD. Infiltrations (F_0 , F_b , F_a) showed no correlation with any other variable except for the relationships between them (Table 6).

On the other hand, at depth 20 to 40 cm, BD correlated strongly with porosity, sand, clay and silt (-1, -0.90, 0.64 and 0.86, respectively). Similarly, porosity correlated strongly with sand, silt and clay with correlation coefficients of 0.90, -0.65 and -0.87, respectively.

Discussion

On a historical basis, deforestation in the state of Michoacán is associated with changes in land use due to agricultural activities under different organic and conventional management (Chávez-León et al., 2012), causing changes in the physical, hydrological, chemical and biological properties of the land. This was observed in the results of the present research, where the variables showed differences compared to the forestry system. This has a direct impact on soil ecosystem services and, consequently, accelerates degradation processes, where agricultural and livestock activities represent the main causes in Mexico (35 % of the land), followed by loss of vegetation cover, urban and industrial development (Etchevers, Saynes, Sánchez, & Roosevelt, 2016). Krasilnikov, Jiménez, Reyna, and García (2011) indicate Mexico needs to take soil conservation measures, given its dominant role in food production, because 44 % of the area is under agricultural activity and indicate that since 2010 there has been greater pressure on soil resources.

La comparación de medias de las propiedades físicas e hidrológicas por profundidad (Cuadro 5) señala que la DA del suelo presentó valores bajos, típicos de los Andosoles, aunque el uso forestal presentó los valores más bajos (0.55 y 0.65 g·cm⁻³) y los valores mayores se registraron en aguacate orgánico (0.81 y 0.80 g·cm⁻³) en ambas profundidades.

La CC varió de 55 (macadamia) a 68 % (aguacate convencional) en la primera profundidad (0 a 20 cm) y osciló de 55 (aguacate orgánico) a 62 % (uso forestal) en la segunda profundidad (20 a 40 cm). El PMP osciló de 34 % (aguacate orgánico) a 45 % (aguacate convencional) en los primeros 20 cm, y en la profundidad 20 a 40 cm disminuyó de 23 (macadamia) a 37 % (forestal). El Ad fluctuó entre 15 % para el sistema forestal y 23 % para el uso convencional en la primera profundidad (0 a 20 cm), lo que se puede asociar a los altos contenidos de arena del sistema forestal; en la profundidad de 20 a 40 cm varió de 16 a 26 % en los sistemas de macadamia y aguacate orgánico, respectivamente.

Los valores de limo oscilaron entre 40 a 60 % para la primera profundidad (0 a 20 cm) y de 30 a 50 % para la segunda profundidad (20 a 40 cm). Con respecto a la arcilla, los cuatro usos de suelo presentaron contenidos bajos, fluctuando entre 6 y 11 % en la profundidad de 0 a 20 cm y de 5 a 9 % en la profundidad de 20 a 40 cm. La clase textural para los usos de suelo forestal y orgánico (aguacate orgánico y macadamia) resultó franco arenosa, mientras que el uso con aguacate convencional fue del tipo franco limoso.

Correlación de las propiedades físicas e hidrológicas

De acuerdo con los resultados de correlación de Pearson, en la profundidad 0 a 20 cm, la DA se correlacionó negativamente con la porosidad (-1), arena (-0.60), K_s (-0.82), F_0 (-0.65), F_b (-0.83) y F_a (-0.76), y positivamente con arcilla (0.74), limo (0.53), CC (0.54) y RMP (0.83). De igual forma existe correlación positiva fuerte entre las variables K_s , porosidad y DA. Las infiltraciones (F_0 , F_b , F_a) no reflejaron correlación con alguna otra variable a excepción de las relaciones entre sí (Cuadro 6).

Por otra parte, en la profundidad 20 a 40 cm, la DA se correlacionó fuertemente con la porosidad, arena, arcilla y limo (-1, -0.90, 0.64 y 0.86, respectivamente). De igual manera, la porosidad se correlacionó fuertemente con arena, limo y arcilla con coeficientes de correlación de 0.90, -0.65 y -0.87, respectivamente.

Discusión

Históricamente, la deforestación en el estado de Michoacán está asociada a los cambios de uso de suelo por actividades agrícolas bajo distintos manejos

Table 6. Pearson's correlation coefficient for physical and hydrological properties in an Andosol with depth from 0 to 20 cm.**Cuadro 6. Coeficiente de correlación de Pearson para las propiedades físicas e hidrológicas en un Andosol con profundidad de 0 a 20 cm.**

	BD (%)/ DA (%)	Porosity/ Porosidad	Sand/ Arena	Clay/ Arcilla	Silt/ Limo	PWP/ PMP	FC/ CC	Aw (%)/ Ad (%)	Ks	MRP/ RMP	F ₀	F _b	F _a	M (%)/ H (%)
BD (%)/ DA (%)	1													
Porosity/ Porosidad	-1.000**	1												
Sand/ Arena	-0.609 [†]	0.608 [†]	1											
Clay/ Arcilla	0.749**	-0.747**	-0.794**	1										
Silt/ Limo	0.535 [†]	-0.535 [†]	-0.988**	0.692**	1									
PWP/ PMP	0.283	-0.284	-0.388	0.150	0.423	1								
FC/ CC	0.547 [†]	-0.547 [†]	-0.602 [†]	0.600 [†]	0.565 [†]	0.720**	1							
Aw (%)/ Ad (%)	0.437	-0.436	-0.388	0.670**	0.293	-0.177	0.556 [†]	1						
Ks	-0.824**	0.822**	0.272	-0.496	-0.199	0.150	-0.249	-0.533 [†]	1					
MRP/ RMP	0.838**	-0.835**	-0.607 [†]	0.649**	0.559 [†]	0.224	0.535 [†]	0.490	-0.809**	1				
F ₀	-0.659*	0.656*	0.429	-0.577*	-0.361	0.252	-0.259	-0.701*	0.780**	-0.721**	1			
F _b	-0.832**	0.830**	0.452	-0.662*	-0.366	0.247	-0.282	-0.732**	0.924**	-0.781**	0.921**	1		
F _a	-0.760**	0.758**	0.405	-0.614*	-0.321	0.325	-0.208	-0.704*	0.883**	-0.742**	0.967**	0.982**	1	
M (%)/ H (%)	-0.539	0.541	-0.042	-0.103	0.078	0.485	0.168	-0.294	0.825**	-0.453	0.533	0.670*	0.647*	1

**highly significant correlations ($P \leq 0.01$); *significant correlations ($P \leq 0.05$). Bulk density (BD), porosity, sand, clay, silt, permanent wilting point (PWP), field capacity (FC), available water (Aw), hydraulic conductivity (Ks) and mechanical resistance to penetration (MRP): n = 16. Infiltrations F₀, F_b, F_a and moisture (M): n = 12.

**correlaciones altamente significativas ($P \leq 0.01$); *correlaciones significativas ($P \leq 0.05$). Densidad aparente (DA), porosidad, arena, arcilla, limo, punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC), agua disponible (Ad), conductividad hidráulica (Ks) y resistencia mecánica a la penetración (RMP): n = 16. Infiltraciones F₀, F_b, F_a y humedad (H): n = 12.

Table 7. Pearson's correlation coefficient for physical and hydrological properties in an Andosol with depth from 20 to 40 cm (n = 16).**Cuadro 7. Coeficiente de correlación de Pearson para las propiedades físicas e hidrológicas en un Andosol con profundidad de 20 a 40 cm (n = 16).**

	BD/DA	Porosity/ Porosidad	Sand/ Arena	Clay/ Arcilla	Silt/ Limo	PWP/PMP	FC/CC	Aw (%)/ Ad (%)
BD/DA	1							
Porosity/Porosidad	-1.000**	1						
Sand/Arena	-0.904**	0.908**	1					
Clay/Arcilla	0.648**	-0.650**	-0.613 [†]	1				
Silt/Limo	0.869**	-0.873**	-0.984**	0.464	1			
PWP/PMP	0.419	-0.426	-0.640**	0.469	0.613 [†]	1		
FC/CC	0.373	-0.383	-0.560 [†]	0.520 [†]	0.512 [†]	0.835**	1	
Aw (%) / Ad (%)	0.190	-0.200	-0.275	0.387	0.222	0.362	0.815**	1

**Highly significant correlations ($P \leq 0.01$); *significant correlations ($P \leq 0.05$). Bulk density (BD), permanent wilting point (PWP), field capacity (FC), available water (Aw).

**Correlaciones altamente significativas ($P \leq 0.01$); *correlaciones significativas ($P \leq 0.05$). Densidad aparente (DA), punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC), agua disponible (Ad).

Acosta (2007) indicates that physical properties influence soil water dynamics, mainly texture, DA and porosity. Clay content allows a diagnosis of the physical-hydrological interaction of the soil, since increases in these particles lead to physical degradation, mainly modifying hydrological variables (Jiménez-Heredia, Martínez-Bravo, & Mancera-Rodríguez, 2010). This was the case of the conventional avocado plot, where infiltration variables were modified mainly by texture, because it had greater amount of clay and less infiltration.

According to Neris, Jiménez, Fuentes, Morillas, and Tejedor (2012), under natural or unmanaged conditions, Andosols are soils known for high infiltration rates, due to good structural development and aggregate stability; however, these properties are vulnerable to degradation by land use changes. The results of the present study are consistent with the above, where the highest infiltration rates were found under natural (forest) land use. On the other hand, infiltration differences between organic and conventional agricultural uses are marked by the contents of organic matter, which improves chemical, biological, physical and hydrological properties (Williams, Blanco-Canqui, Francis, & Galusha, 2017), being the application of organic amendments a common practice for organic avocado and macadamia.

Narro (1994) points out that Ks values between 0.003 and 0.005 cm·s⁻¹ indicate high permeability. According to the results of the present study, only the organic avocado plot is outside the range of this assessment (medium permeability), which may be associated with bulk density and porosity values influenced by the degree of mechanization during crop harvesting. On the other hand, Di Prima et al. (2018) mention that sandy loam-textured soils with agricultural management have positive and highly significant correlation between Ks and porosity, having a similar trend in this research. Larios-González, Salmerón-Miranda, and García-Centeno (2014) and Zúñiga, Buenaño, and Risco (2018) report that in Andosols soils it is common to find low BD values (<0.90 g·cm⁻³) and high porosity (>65 %) (Ibáñez & Manríquez, 2011), which also coincides with the values estimated in this study.

MRP results show correlation with BD, porosity and texture, which influence hydrological properties, coinciding with Shah et al. (2017), who indicate that high BD and low soil moisture content have a direct impact on the increase of MRP. Parker (2007) and Vásquez, Gómez, Velázquez, Aldrete, and Fierros-González (2011) mention that Andosols with high MRP values exceed the ideal conditions for root growth and development, making them more vulnerable to physical deterioration.

Two textural classes were found (sandy loam and silt loam) in the granulometric analysis of Andosol, which

orgánicos y convencionales (Chávez-León et al., 2012), provocando cambios en las propiedades físicas, hidrológicas, químicas y biológicas del suelo. Esto se observó en los resultados de la presente investigación, donde las variables analizadas presentaron diferencias respecto al sistema forestal. Lo anterior repercute directamente en los servicios ecosistémicos del suelo y, en consecuencia, se aceleran los procesos de degradación, donde las actividades agrícolas y pecuarias representan las causas principales en México (35 % de la superficie), seguido de la pérdida de cobertura vegetal, desarrollo urbano e industrial (Etchevers, Saynes, Sánchez, & Roosevelt, 2016). Así también, Krasilnikov, Jiménez, Reyna, y García (2011) señalan que en México es necesario tomar medidas de conservación del suelo, dada su función dominante en la producción de alimentos, ya que 44 % de la superficie presenta actividad agrícola e indican que desde 2010 existe mayor presión sobre el recurso suelo.

Acosta (2007) señala que las propiedades físicas influyen en la dinámica del agua en el suelo, principalmente la textura, DA y porosidad. Particularmente, los contenidos de arcilla permiten un diagnóstico sobre la interacción física-hidrológica del suelo, puesto que aumentos de estas partículas conlleva a degradaciones físicas modificando las variables hidrológicas principalmente (Jiménez-Heredia, Martínez-Bravo, & Mancera-Rodríguez, 2010). Este fue el caso de la parcela de aguacate convencional, donde las variables de infiltración se modificaron principalmente por la textura, ya que presentó mayor cantidad de arcilla y menor infiltración.

De acuerdo con Neris, Jiménez, Fuentes, Morillas, y Tejedor (2012), en condiciones naturales o sin manejo, los Andosoles son suelos reconocidos por sus tasas altas de infiltración, debido al buen desarrollo estructural y estabilidad de agregados; sin embargo, dichas propiedades son vulnerables a la degradación por los cambios de uso de suelo. Los resultados del presente estudio concuerdan con lo anterior, donde las tasas de infiltración más altas se encontraron bajo el uso de suelo en condiciones naturales (forestal). Por otra parte, las diferencias de infiltración entre usos agrícolas orgánico y convencional se ven marcadas por los contenidos de materia orgánica, la cual mejora las propiedades químicas, biológicas, físicas e hidrológicas (Williams, Blanco-Canqui, Francis, & Galusha, 2017), siendo la aplicación de enmiendas orgánicas una práctica habitual en aguacate orgánico y macadamia.

Narro (1994) señala que los valores de Ks entre 0.003 y 0.005 cm·s⁻¹ indican una alta permeabilidad. De acuerdo con los resultados del presente estudio, solo la parcela de aguacate orgánico se encuentra fuera del rango de esta valoración (permeabilidad media), lo cual puede estar asociado a los valores de densidad

seems to have influenced the infiltration variables; in the case of conventional avocado these variables could have been negatively affected by the texture, because a greater amount of clay was observed (negatively correlated with the infiltration variables) and lower sand content. Even so, Jiménez-Heredia et al. (2010) state that, in general, this type of soil has good conditions for the development of vegetation, because it has optimal drainage characteristics, water storage capacity and aeration, characteristics of volcanic soils (Paz & Sánchez, 2007).

Moisture, FC, PWP and A_w are in the range reported for Andosols with low DA ($0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (Paz & Sánchez, 2007). Soil moisture is mainly affected by altered texture, BD and porosity (Anaya, Mendoza, Rivera, Páez, & Olivares-Martínez, 2016). Ibáñez and Manríquez (2011) indicate that Andosols show high values of Ad and PWP. In this study, the results showed PWP values between 34 and 45 % and for A_w from 15 to 23 %, showing positive correlation of PWP with silt (0.613) and negative with sand (-0.640) at a depth of 20 to 40 cm. Texture is an important variable in water retention at high tensions, due to the influence of soil particle size on fluid absorption and retention (Chicas, Vanegas, & García, 2014; Saxton & Rawls, 2006).

Conclusions

Land use change to agricultural use caused significant variations in the physical and hydrological properties of Andosol. The infiltration process was the most affected; infiltrations decreased 40 to 70 % in agricultural systems compared to forest use. Bulk density, porosity, mechanical resistance to penetration and clay defined the behavior of hydrological variables. Organic agriculture showed minor negative effects compared to conventional agriculture however, both are important for the economy of Michoacán. Therefore, the results of this research can be used to establish criteria and make sustainable decisions on soil resources. This study evidences the consequences of land use change on the behavior of physical and hydrological variables, showing that the conversion from forest use to agricultural use (organic or conventional) generates a significant negative effect on the behavior of soil properties.

Acknowledgments

The authors would like to thank CONACYT for the support of the doctoral grant (737236) for carrying out this research. The authors also thank the ejido of "Toreo El Alto" for allowing access and collection of the information used in this research.

End of English version

aparente y porosidad influenciados por el grado de mecanización durante la cosecha del cultivo. Por otra parte, Di Prima et al. (2018) mencionan que los suelos de textura franco-arenosa con manejo agrícola presentan correlación positiva y altamente significativa entre las variables K_s y porosidad, observándose una tendencia similar en esta investigación. Asimismo, Larios-González, Salmerón-Miranda, y García-Centeno (2014) y Zúñiga, Buenaño, y Risco (2018) señalan que en suelos Andosoles es común encontrar valores bajos de DA ($<0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y de alta porosidad ($>65 \%$) (Ibáñez & Manríquez, 2011), lo cual coincide también con los valores estimados en el presente estudio.

Los resultados de RMP muestran principalmente correlación con las variables DA, porosidad y textura, las cuales influyen sobre las propiedades hidrológicas, coincidiendo con Shah et al. (2017), quienes indican que una DA alta y un contenido bajo de humedad en el suelo repercuten directamente en el aumento de la RMP. Parker (2007) y Vásquez, Gómez, Velázquez, Aldrete, y Fierros-González (2011) mencionan que los Andosoles con valores altos de RMP rebasan las condiciones ideales para el crecimiento y desarrollo de las raíces, haciéndolos más vulnerables al deterioro físico.

En el análisis granulométrico del Andosol se encontraron dos clases texturales (franco arenosa y franco limosa), lo cual al parecer influyó en las variables de infiltración; en el aguacate convencional dichas variables pudieron ser afectadas negativamente por la textura, ya que presentó mayor cantidad de arcilla (correlacionada negativamente con las variables de infiltración) y menor contenido de arena. Aun así, Jiménez-Heredia et al. (2010) señalan que, en general, este tipo de suelo presenta buenas condiciones para el desarrollo de la vegetación, ya que tiene características óptimas de drenaje, capacidad de almacenamiento de agua y aireación, particularidades de los suelos de origen volcánico (Paz & Sánchez, 2007).

La humedad, CC, PMP y Ad se encuentran en el intervalo reportado para Andosoles con baja DA ($0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (Paz & Sánchez, 2007). La humedad del suelo es afectada principalmente por la alteración de la textura, DA y porosidad (Anaya, Mendoza, Rivera, Páez, & Olivares-Martínez, 2016). Ibáñez y Manríquez (2011) señalan que los Andosoles presentan valores altos de Ad y PMP. En este estudio, los resultados mostraron valores de PMP entre 34 y 45 % y para Ad de 15 a 23 %, presentando correlación positiva de PMP con limo (0.613) y negativa con arena (-0.640) en la profundidad de 20 a 40 cm. La textura es una variable importante en la retención de agua a tensiones altas, debido a la influencia del tamaño de partículas del suelo sobre la absorción y retención del líquido (Chicas, Vanegas, & García, 2014; Saxton & Rawls, 2006).

Referencias / Referencias

- Acosta, C. (2007). El suelo agrícola, un ser vivo. *Inventio*, la génesis de la cultura universitaria en Morelos, 3(5), 55–60. Retrieved from <http://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/219>
- Alcalá, D. J. M., Ortiz, S. A. C., & Gutiérrez, C. M. C. (2001). Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra Latinoamericana*, 19(3), 227–239. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319304.pdf>
- Anaya, C. A., Mendoza, M., Rivera, M., Páez, R., & Olivares-Martínez, L. D. (2016). Contenido de carbono orgánico y retención de agua en suelos de un bosque de niebla en Michoacán, México. *Agrociencia*, 50(2), 251–269. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000200251&script=sci_arttext
- Babin, D., Deubel, A., Jacquiod, S., Sørensen, S. J., Geistlinger, J., Grosch, R., & Smalla, K. (2019). Impact of long-term agricultural management practices on soil prokaryotic communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 129, 17–28. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.11.002
- Bedolla-Ochoa, C., Bautista, F., Ihl, T., & Dubrovina, I. (2019). Diversidad de suelos y su distribución espacial. In A. Cruz, C. Nájera, & E. Melgarejo (Eds.), *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado*. (pp. 51–59). México: CONABIO.
- Bello, G. M. A., & Madrigal, S. X. (1996). *Estudio florístico del Campo Experimental "Barranca del Cupatitzio", Uruapan, Michoacán*. Retrieved from <https://www.worldcat.org/title/estudio-floristico-del-campo-experimental-barranca-del-cupatitzio-uruapan-michoacan/oclc/651484543>
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentables y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA). (2019). El suelo, un recurso invaluable para la producción de alimentos. Retrieved from http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/49Suelo_recurso_invaluable.pdf
- Chávez-León, G., Tapia-Vargas, L. M., Bravo-Espinoza, M., Sáenz-Reyes, J., Muñoz-Flores, H. J., Vidales-Fernández, I., & Mendoza-Cantú, M. (2012). *Impacto de cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. México: INIFAP. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/265125083_Impacto_del_cambio_de_uso_del_suelo_forestal_a_huertos_de_aguacate_IMPACT_OF_FOREST_LAND_USE_CHANGE_TO_AVOCADO_ORCHARDS
- Chicas, S. R. A., Vanegas, C. E. A., & García, A. N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del Río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 41–46. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542014000100007&script=sci_arttext&tlng=en
- Das, B. (2002). *Soil mechanics laboratory manual*. USA: Oxford University Press.
- Di Prima, S., Rodrigo-Comino, J., Novara, A., Iovino, M., Pirastru, M., Keesstra, S., & Cerdà, A. (2018). Soil physical quality of citrus orchards under tillage, herbicide, and organic managements. *Pedosphere*, 28(3), 463–477. doi: 10.1016/S1002-0160(18)60025-6

Conclusiones

El cambio de uso forestal al agrícola provocó variaciones significativas en las propiedades físicas e hidrológicas del Andosol. El proceso de infiltración fue el más afectado; las infiltraciones disminuyeron 40 a 70 % en los sistemas agrícolas en comparación con el uso forestal. La densidad aparente, porosidad, resistencia mecánica a la penetración y arcilla definieron el comportamiento de las variables hidrológicas. La agricultura orgánica mostró efectos negativos menores en comparación con la convencional; sin embargo, ambas son importantes para la economía de Michoacán. Por tanto, los resultados de la presente investigación pueden ser empleados para establecer criterios y toma de decisiones sustentables del recurso suelo. Este estudio evidencia las consecuencias del cambio de uso de suelo en el comportamiento de las variables físicas e hidrológicas, mostrando que la conversión de uso forestal al agrícola (orgánico o convencional) genera efecto negativo significativo en el comportamiento de las propiedades del suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo de la beca doctoral (737236) para la realización de esta investigación. También al ejido de "Toreo El Alto" por permitir el acceso y la obtención de información utilizada en la presente investigación.

Fin de la versión en español

- Etchevers, J., Saynes, V., Sánchez, M., & Roosevelt, F. (2016). Manejo sustentable del suelo para la producción agrícola. In D. Carrera-Martínez, & J. Ramírez (Eds), *Ciencia, tecnología e innovación en el sistema agroalimentario de México* (pp. 63–79). México: Colegio de Postgraduados. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/J_Etchevers/publication/304581117_Capitulo_4_Manejo_sustentable_del_suelo_para_la_produccion_agricola_A_nation_that_destroys_its_soil_destroys_itself/links/57741f7608ae4645d60a0d90.pdf
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: UNAM. Retrieved from <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- International Business Machines (IBM). (2013). *IBM SPSS Statistics for Windows, version 22.0*. Armonk, NY, USA: Author.
- IUSS Working Group WRB. (2006). *World reference base for soil resources 2006: A framework for international classification, correlation and communication*. Roma: FAO. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/wrb2007_red.pdf

- IUSS Working Group WRB (2016). *Base referencial mundial del recurso suelo. 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106*. Roma: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i3794es/i3794ES.pdf>
- Jiménez-Heredia, Y., Martínez-Bravo, C. M., & Mancera-Rodríguez, N. J. (2010). Características físicas y químicas del suelo en diferentes sistemas de uso y manejo en el centro agropecuario Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 40(2), 176–188. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/296662433_Caracteristicas_Fisicas_y_Quimicas_del_Suelo_en_Diferentes_Sistemas_de_Uso_y_Manejo_en_el_Centro_Agropecuario_Cotove_Santa_Fe_de_Antioquia_Colombia
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Conductividad y difusividad hidráulica: métodos de laboratorio. In A. Klute (Ed.), *Métodos de análisis de suelos: Parte 1 Métodos físicos y mineralógicos*. USA: American Society of Agronomy, Inc.-Soil Science Society of America, Inc. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28
- Krasilnikov, P., Jiménez, F. J., Reyna, T., & García, N. E. (2011). *Geografía de suelos de México*. México: UNAM. Retrieved from https://rde.inegi.org.mx/RDE_08/Doctos/RDE_08_opt.pdf
- Larios-González, R. C., Salmerón-Miranda, F., & García-Centeno, L. (2014). Fertilidad del suelo con prácticas agroecológicas y manejo convencional en el cultivo de café. *La Calera*, 14(23), 67–75. doi: 10.5377/calera.v14i23.2660
- Medina-Guillén, R., Cantú-Silva, I., Gonzales-Rodríguez, H., Pando-Moreno, M., Kubota, T., & Gómez-Meza, M. V. (2017). Efectos del rodillo aireador y el fuego en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo en Matorrales de Coahuila, México. *Agrociencia*, 51(5), 471–485. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000500471&script=sci_arttext
- Meza-Pérez, E., & Geissert-Kientz, D. (2006). Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 163–170. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108002.pdf>
- Narro, F. E. (1994). *Física de suelos: con enfoque agrícola*. México: Trillas.
- Neris, J., Jiménez, C., Fuentes, J., Morillas, G., & Tejedor, M. (2012). Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andosols in Tenerife (Canary Islands, Spain). *CATENA*, 98, 55–62. doi: 10.1016/j.catena.2012.06.006
- Parker, R. T. (2007). Monitoring soil strength conditions resulting from mechanical harvesting in volcanic ash soils of central Oregon. *Western Journal of Applied Forestry*, 22(4), 261–268. doi: 10.1093/wjaf/22.4.261
- Paz, I. E., & Sánchez, M. (2007). Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades físicas del suelo en la meseta de Popayán. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 5(2), 39–43. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117963>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México: Limusa, Noriega Editores.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. doi: 10.2136/sssaj2005.0117
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma oficial mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2015. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y crecimiento verde*. México: Author. Retrieved from https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Muhammad, A. B., ... Souliyanonh, B. (2017). Efectos de la compactación del suelo sobre la salud y la productividad del suelo: una descripción general. *Environmental Science Pollution Restoration*, 24, 10056–10067. doi: 10.1007/s11356-017-8421-y
- Sihí, D., Dari, B., Sharma, D. K., Pathak, H., Nain, L., & Sharma, O. P. (2017). Evaluation of soil health in organic vs. conventional farming of basmati rice in North India. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180(3), 389–406. doi: 10.1002/jpln.201700128
- Vásquez, G. I., Gómez, G. A., Velázquez, M. A., Aldrete, A., & Fierros-González, A. M. (2011). Un penetrómetro dinámico para evaluar la resistencia mecánica en suelos forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 292–302. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.04.017
- Villanueva, T. L., & Zepeda, A. J. (2018). La producción de aguacate en el estado de Michoacán y sus efectos en los índices de pobreza, el cambio del uso de suelo y la migración. *Revista Mexicana Sobre Desarrollo Local*, 2(1), 1–12. Retrieved from <http://rmdl.uan.edu.mx/index.php/RMDL/article/view/41/17>
- Williams, D. M., Blanco-Canqui, H., Francis, C. A., & Galusha, T. D. (2017). Organic farming and soil physical properties: An assessment after 40 years. *Agronomy Journal*, 109(2), 600–609. doi: 10.2134/agronj2016.06.0372
- Woerner, M. (1989). *Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León,
- Zhang, J., Lei, T., Qu, L., Chen, P., Gao, X., Chen, C., & Su, G. (2017). Method to measure soil matrix infiltration in forest soil. *Journal of Hydrology*, 552, 241–248. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.032
- Zúñiga, F., Buenaño, M., & Risco, D. (2018). Caracterización física y química de suelos de origen volcánico con actividad agrícola, próximos al volcán Tungurahua. *Revista Ecuatoriana de Investigaciones Agropecuaria*, 1(1), 5–10. doi: 10.31164/reiagro.v1n1.2

