

Calidad inherente y dinámica del suelo en una zona cafetalera, en el estado de Guerrero, México

Yael D. Martínez-Herrera¹, M. Socorro Fuentes-Andrade², Miguel A. Valera-Pérez³,
Víctor M. Rosas-Guerrero¹, Alejandro H. Ramírez-Guzmán¹ y Blanca L. Alemán-Figueroa¹
Universidad Autónoma de Guerrero¹

Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense²

Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla³

Autor de correspondencia: Miguel Ángel Valera Pérez valeraperezmiguelangel@gmail.com

Abstract— The production of coffee modifies the quality of the soil, which is determined by the inherent quality, resulting from its genesis, and the dynamic quality, resulting from its agricultural management. The dynamic quality of soils with coffee plantations was compared with the inherent quality of soils with forest vegetation in the region of Atoyac de Álvarez, Guerrero, Mexico. Four coffee production systems and two forest vegetation systems were identified. It was found that the main modification between the two types of systems was the loss of soil superficial horizons. It was possible to establish differences between Inherent and Dynamics Soil Quality.

Keyword— *Soil Quality Indicators, Agroforestry systems, Coffee, Land use change*

Resumen— La producción de café modifica la Calidad de Suelo, la cual está determinada por la Calidad Inherente, resultante de su génesis, y la Calidad Dinámica, resultante del manejo agrícola. Se comparó la Calidad Dinámica de Suelo con plantaciones de café con la Calidad Inherente de Suelo con vegetación forestal en la región de Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. Se identificaron 4 sistemas de producción de café y dos sistemas de vegetación forestal. Se encontró que la principal modificación entre los dos tipos de sistemas fue la pérdida de horizontes superficiales de suelo. Fue posible establecer diferencias entre la Calidad Inherente y Dinámica de Suelo.

Palabras clave— *Indicadores de Calidad de Suelo, Sistemas agroforestales, Café, Cambio de uso de suelo.*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la Ciencia del Suelo es considerada una ciencia ambiental [1], que comprende aspectos ecológicos, sociales y económicos, con un enfoque sistémico, abordando aspectos tan complejos como lo de Calidad y Salud del Suelo [2], Seguridad del Suelo [3], entre otros y con fundamento en el uso sustentable del recurso natural. Sin embargo, a lo largo de los años el suelo se ha visto afectado por las malas prácticas de manejo, ya que estas ocasionan que surja el acelerado e irreversible proceso de degradación en sus propiedades físicas, químicas y biológicas [4, 5]. En contraposición la Calidad de Suelo (CS), es el resultado de una conservación continua del recurso y del control de los procesos de degradación que lo afectan, por lo que representa la capacidad del suelo para funcionar como un ecosistema vivo saludable [6]. La CS está determinada por su Calidad Inherente (CI), la cual es innata del suelo y se origina como resultado de los factores formadores (material parental, clima, organismos, relieve y tiempo) y los procesos de su génesis (entradas, salidas, transformación y transferencia), mientras que la Calidad Dinámica (CD), resulta de las actividades antropogénicas. Por ello, el conocer la CD se convierte en una herramienta para proponer y evaluar prácticas de conservación y uso del recurso [7]. De ahí la importancia de evaluar las CS tanto Inherente como Dinámica, pues han demostrado ser indicadoras de la sustentabilidad en el manejo del recurso [8, 9, 10 y 11], con base en conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Ballesta y González [8] identificaron la importancia de la CS como una medida para la conservación de este recurso natural,

demonstrando mediante comparaciones cualitativas y cuantitativas y con apoyo en algunas teorías sobre el tema, que los indicadores de CS son una herramienta para realizar medidas adecuadas sobre la sustentabilidad en su uso, diagnosticando si éste contribuye o no a su conservación. Tenorio [12, 13] evaluó la CI y CD de suelos, analizando los problemas relacionados con los contenidos de materia orgánica y residuos, pH y fertilidad de suelo, los resultados que obtuvo indican que en las propiedades indicadoras requeridas para la evaluación de la CS propuestas por el *Natural Resources Conservation Service* [7], no está considerado el contenido de nitrógeno total, resultando esta propiedad la que tiene mayor influencia para diferenciar suelos con CD o CI cuando se analizan los problemas de contenidos en materia orgánica y residuos y el de fertilidad natural del suelo.

Los principales problemas ambientales en los sistemas de producción de café son la pérdida de hábitat y sus efectos sobre la biodiversidad, la degradación del suelo, los efectos sobre la calidad del agua y el uso excesivo de plaguicidas [14]. En México existen cinco sistemas de producción de café de acuerdo con Fuentes [15] y Nolasco [16], estos son: a) Sistema Rusticano o de Montaña (R), b) Policultivo Tradicional o “Jardín de Café” (PT), c) Policultivo Comercial (PC), d) Monocultivo Bajo Sombra o Sistema Especializado (SE), y e) Monocultivo de Sol o a Cielo Abierto (MCA). En el estado de Guerrero la superficie reportada con café es de 39 209.9 ha correspondientes a 12 245 unidades de producción [17]. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue comparar la Calidad Dinámica de los suelos que soportan los diferentes sistemas de producción de café con la Calidad Inherente en el ecosistema que no ha sido modificado, empleando como indicadores las propiedades físicas y químicas de los suelos en la zona cafetalera de Atoyac de Álvarez, Guerrero.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización Geográfica. El municipio de Atoyac de Álvarez pertenece a la región de la Costa Grande del estado de Guerrero, situado en México. Está ubicado entre los paralelos 17° 04' y 17° 34' de latitud norte y los meridianos 100° 06' y 100° 32' de longitud oeste con altitudes que van desde 0 a 3,400 msnm (Figura 1), los lugares de procedencia de las muestras de suelo se identifican como puntos rojos en la figura 1. En esta región existe una gran variedad de climas, predominando el cálido subhúmedo con lluvias en verano, tipo $Aw_2(x')$ de acuerdo con Koopen modificado por E. García [18], con temperaturas que oscilan de los 12 a 30°C, con un régimen de lluvias que abarca los meses de junio a septiembre y una precipitación promedio anual de 1100 - 2500 mm, siendo la vegetación predominante el Bosque Tropical Caducifolio (BTC) y el Bosque de Pino y Encino (BPE) [19].

Muestreo de suelos. La obtención de las muestras de suelo se efectuó en los meses de marzo y julio de 2017, se seleccionaron cuatro zonas y sitios con vegetación natural de BTC y BPE, las comparaciones se realizaron entre los siguientes sistemas: MCA vs BTC (perfil 1), R vs BTC (perfil 2), PT vs BTC (perfil 3) y Rusticano con Café Orgánico (RCO) vs BPE (perfil 4). De cada sistema de producción de café se seleccionaron dos parcelas, de las cuales se tomaron las muestras simples para formar la muestra compuesta con ayuda de una barrena de acero inoxidable a una profundidad de 0 – 20 cm. Los perfiles se geoposicionaron (GPS Garmin eTrex 10) y con una pala de campo se tomó una muestra de cada horizonte del perfil de suelo. La caracterización ambiental y morfológica de los perfiles de suelo se efectuó en campo con base en lo establecido por la *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) [20].

Caracterización de las muestras de suelo. Las propiedades físicas y químicas de los suelos fueron evaluadas en el laboratorio mediante los procedimientos establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000 [21], la Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo [22] y la Guía para la Evaluación

Integral de Salud del Suelo [23]. Estas fueron: Densidad Aparente (DA), Color en seco y húmedo, porcentaje de arena (%A), porcentaje de arcilla (%R), porcentaje de limo (%L), Textura (T), porcentaje de Materia Orgánica (%MO), porcentaje de Carbono Orgánico (%CO), pH en agua en relación agua/suelo 2:1 (pH H₂O), pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1 (pH KCl), Delta pH (Δ pH) [24], porcentaje de Nitrógeno Total (%NT), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Bases Intercambiables (Ca⁺², Mg⁺², K⁺ y Na⁺) y porcentaje de Saturación en Bases (%V).

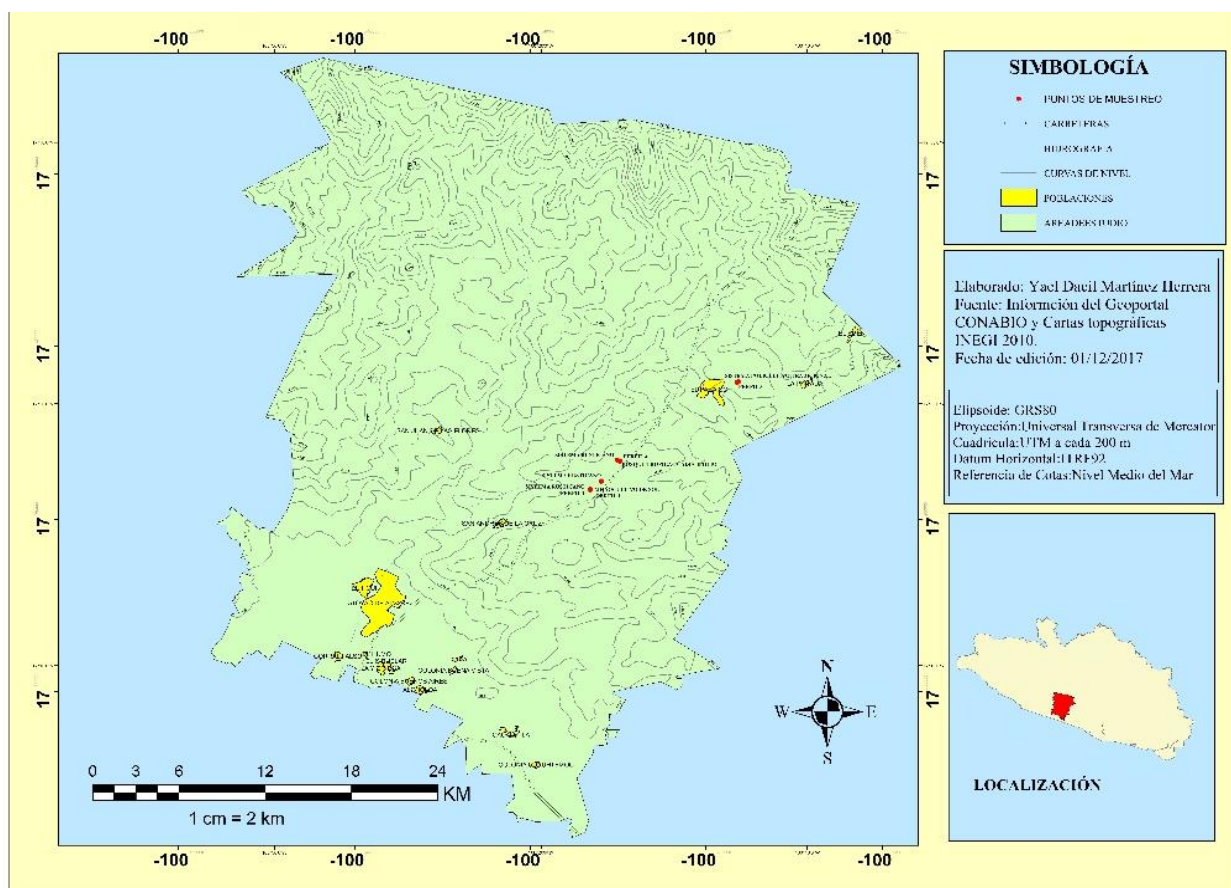


Fig. 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 1 y 2, se presenta los resultados de la caracterización de los perfiles de suelo asociados a cada uno de los sistemas de producción de café estudiados. Las propiedades de los suelos que corresponden al BTC y BPE son indicadoras de la CI. En la tabla 3 se presentan los resultados de la caracterización de los suelos superficiales que soportan las plantaciones con diferentes sistemas de producción de café, que son indicadoras de la CD.

Los suelos que soportan BTC en la región estudiada (Tabla 1, Figura 2, 3 y 4), presentan una sucesión de horizontes conformada por un horizonte A organomineral identificado como Úmbrico y un horizonte Bt Árgico además de subhorizontes de transición E (perfil 1), BA (perfil 2) y BC (todos los perfiles). Solo en el caso del perfil 1, aparece un horizonte de suelo sepultado B2t. El suelo que soporta

vegetación de BPE (Tabla 2, Figura 5) presenta la siguiente sucesión de horizontes: O (Litter), A (Úmbrico), Bt (Árgico) y varios subhorizontes de transición BC. Se trata de un suelo muy profundo con una potente capa de Litter en la superficie.

La existencia del horizonte Bt Árgico aunado a los valores de pH en H₂O como en KCl, sobretudo el valor del Δ pH, indica la presencia de importantes concentraciones de aluminio intercambiable. Si a esto se le suman los bajos Porcentajes de Saturación en Bases (%V), hace concluir que los suelos son Acrisoles [25], donde dominan minerales arcillosos de tipo 1:1, posiblemente Haloisitas y/o Caolinitas, la Capacidad de Intercambio Catiónico en la mayoría de los casos es muy baja y el Δ pH identifica la presencia de minerales arcillosos de carga variable [24].

Tomando en cuenta el modelo CS, estas propiedades descritas conforman la CI de los suelos que se han desarrollado en condiciones naturales. Cuando es cambiado el uso del suelo sustituyendo total o parcialmente la vegetación original, la CS se transforma en una CD, esto ocurre al establecerse las plantaciones de café.

A pesar de que los Acrisoles no son los suelos más aptos para las plantaciones de café, se reporta su uso para estos fines a nivel internacional, como en Puerto Rico [26] y Costa Rica [27, 28]. En México se reporta el cultivo de café sobre Acrisoles en el estado de Veracruz [29, 30] y recientemente en la zona de estudio de este trabajo [31].

Los indicadores de CI relacionados con la acidez del suelo son una limitante para la producción de café [32], por lo que algunas prácticas agrícolas como el encalado, son empleadas para neutralizar los efectos nocivos del aluminio intercambiable, dando origen a una modificación importante de la CI del suelo generando una CD. Al establecerse las plantaciones de café sobre Acrisoles, el productor aplica un paquete tecnológico que consiste principalmente en el empleo de fertilizantes químicos y enmiendas mediante la aplicación de materia orgánica en forma de abonos o compostas y el encalado empleando diferentes materiales minerales. Todo esto modifica la CI del suelo y da origen a diferentes CD. La intención del productor es neutralizar la actividad del aluminio intercambiable, que es el principal responsable de la alta acidez del suelo, pues ante condiciones de acidez ($\text{pH} < 5.5$), pero sobre todo al exceso de aluminio intercambiable, se afecta el crecimiento de las raíces de los cafetos, reduciendo la absorción de nutrientes y el desarrollo de la parte aérea de la planta [32].

A continuación, se describen los resultados con base en las propiedades químicas (pH H₂O y pH KCl, Δ pH, CIC y %V), para comparar la CI y CD en las parcelas estudiadas de los sistemas de producción de café. Los valores de pH H₂O, pH KCl y Δ pH, fueron utilizados como medidas indirectas de la concentración del aluminio intercambiable en los suelos.

Monocultivo a Cielo Abierto (MCA) parcelas 1 y 2, vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 1. En la parcela 1 se detecta que en la plantación de café se erosionó el horizonte A y el cultivo se está efectuando sobre el horizonte E (Tabla 4) [25]. La erosión del suelo persiste, sobre todo se está perdiendo la fracción arcilla del suelo. Los valores de %MO se ven incrementados por la adición de hojarasca mezclada con dolomita, tal y como lo informaron los productores.

Este manejo ocasiona un incremento en el valor del pH, la CIC y del %V por la adición de calcio y magnesio contenidos en la dolomita. El incremento del potasio también generado por la aplicación de la dosis de 19 t/ha de fertilizante potásico. Sin embargo, al analizar el Δ pH como indicador de la presencia de aluminio intercambiable, se observa que éste prácticamente no ha sido modificado, lo que pone en duda el efecto benéfico del encalado. Desde el análisis de CS, es detectado que el principal problema del cambio de CI a CD es la pérdida del horizonte A. También es significativo que, aunque se modifican varias propiedades del suelo por la aplicación de fertilizantes y enmiendas (hojarasca mezclada con

dolomita), el problema del aluminio intercambiable desde una perspectiva agronómica, no se está solucionando. En la parcela 2 el efecto del cambio de CI a CD es semejante al de la parcela 1. También se erosionó el horizonte A y el cultivo se está efectuando sobre el horizonte E2 (Tabla 5). La erosión del suelo persiste perdiéndose la fracción arcilla del suelo, por lo que disminuye el valor de la CIC. El efecto de neutralización de la acidez es positivo, esto se corrobora por el importante incremento en el %V, benéfico para el desarrollo del café.

Rusticano (R) parcelas 3 y 4, vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 2. En la parcela 3 de este sistema el café se está cultivando sobre el horizonte A, favorecido por el relieve en donde se ubica. La práctica de encalado está neutralizando la acidez que presentan los suelos y esto se refleja en los valores del ΔpH , que es más alto en el horizonte A del perfil de suelo con respecto al suelo de la parcela (Tabla 6). En la parcela 4 los horizontes A y AB se han erosionado, puesto que las plantaciones de café se encuentran en el horizonte Bt. No se aprecia el efecto del encalado sobre la acidez, lo cual indica que no se está neutralizando el aluminio intercambiable en el suelo y es posible que el material de enmienda que se aplica tenga un movimiento horizontal arrastrado por el agua. El valor de la CIC es debido al evidente incremento de la arcilla del horizonte Bt (Tabla 7).

Policultivo Tradicional (PT) parcela 5, vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 3. En la parcela 5 el café se está cultivando sobre el horizonte Bt, lo que indica la erosión del horizonte A. Los resultados sobre los indicadores de CS del horizonte Bt del perfil 3 muestran que la CI y la correspondiente CD de la parcela 5 son semejantes. Solamente el mayor contenido de %MO, por la práctica de emplear estiércol y composta como abono, establecen la diferencia (Tabla 8).

Policultivo Tradicional (PT) parcela 6, vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 2. En la parcela 6 los horizontes A y AB se erosionaron, la plantación de café se encuentra en el horizonte Bt, no se aprecia el efecto del encalado sobre la acidez (Tabla 9). Esto con base en que no hay diferencia significativa entre los valores de pH H_2O , pH KCl, CIC y %V, siendo más claro en la no modificación del ΔpH .

Rusticano con Café Orgánico (RCO) parcela 7, vs Bosque de Pino y Encino (BPE) perfil 4. En la parcela 7, el horizonte A fue erosionado, la plantación se encuentra sobre el horizonte Bt, la neutralización del pH no ha provocado una disminución importante de la concentración del aluminio intercambiable, tal y como lo indica el pequeño cambio en el ΔpH . Si se aprecia un efecto positivo en el aumento del pH y %V (Tabla 10).

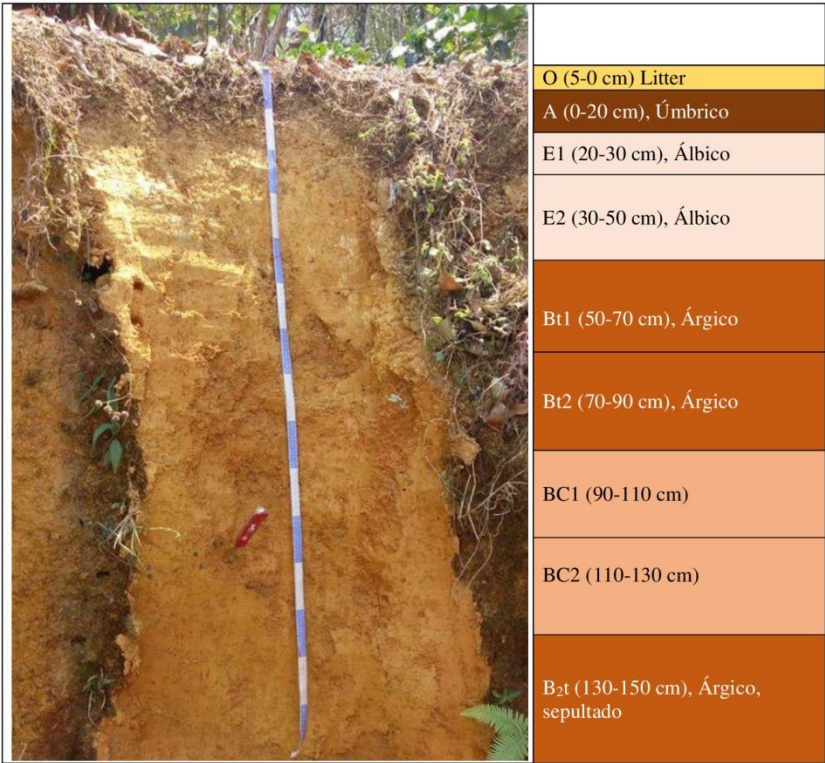


Fig. 2. Perfil 1, Acrisol que soporta vegetación de Bosque Tropical Caducifolio (BTC)



Fig. 3. Perfil 2, Acrisol que soporta vegetación de Bosque Tropical Caducifolio (BTC)

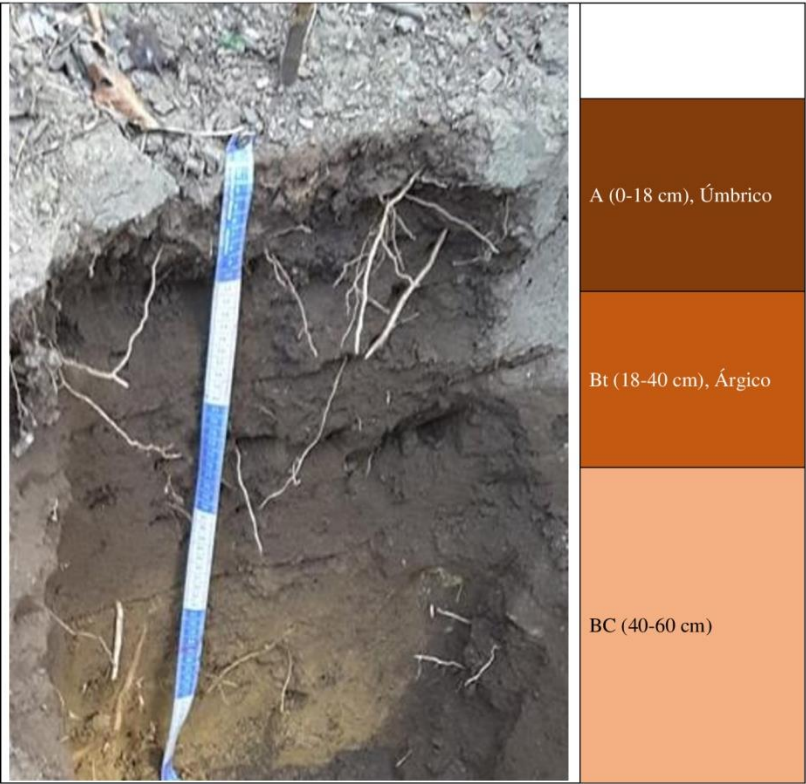


Fig. 4. Perfil 3, Acrisol que soporta vegetación de Bosque Tropical Caducifolio (BTC)

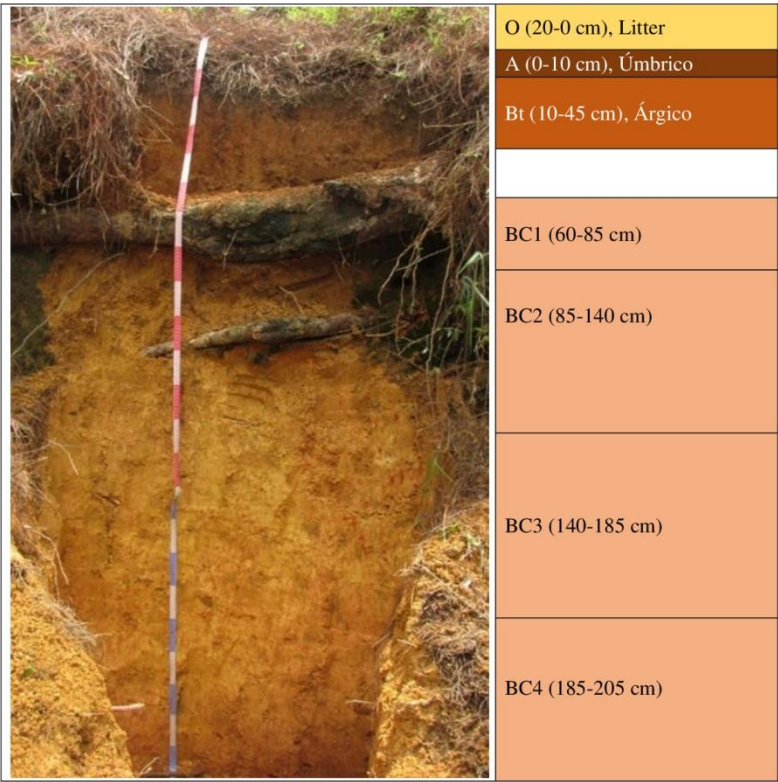


Fig. 5. Perfil 4, Acrisol que soporta vegetación de Bosque de Pino y Encino (BPE)

Tabla I. Resultados de las propiedades físicas y químicas de las muestras de los perfiles de suelo que soportan vegetación de Bosque Tropical Caducifolio.

	H	Prof. cm	DA g/cm³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H₂O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	
P 1	A	0-20	1.18	10YR 6/4	10YR 4/4	40	38	22	Franco arcillosa	1.83	3.2	4.9	4.1	-0.8	0.34	5.2	1.33	0.31	0.19	0.12	21.72
	E1	20-30	1.06	7.5 YR 6/8	7.5YR 4/6	51	34	15	Arcillosa	0.46	0.8	5.2	4.0	-1.2	0.13	5.2	1.22	0.21	0.16	0.07	17.97
	E2	30-50	1.13	10YR 7/8	10YR 5/8	37	35	28	Franco arcillosa	0.27	0.5	5.0	4.1	-0.9	0.13	17.2	0.76	0.26	0.17	0.08	4.36
	Bt	50-70	1.11	7.5YR 7/6	7.5 YR 5/8	48	47	5	Arcillo arenosa	0.15	0.3	4.6	4.0	-0.6	0.10	23.6	1.08	0.22	0.15	0.05	3.56
	Bt	70-90	1.05	7.5YR 7/8	7.5 YR 5/8	13	47	40	Arcillo limosa	0.35	0.6	5.0	4.0	-0.9	0.13	64.0	0.85	0.15	0.12	0.09	1.12
	BC1	90-110	1.02	7.5YR 7/8	7.5 YR 5/8	13	39	48	Franco arcillo limosa	0.23	0.4	5.5	4.0	-1.5	0.20	23.6	0.76	0.13	0.13	0.08	2.78
	BC2	110-130	1.06	7.5YR 7/8	7.5 YR 5/8	15	35	50	Franco arcillo limosa	0.06	0.1	4.9	4.1	-0.8	0.09	23.2	1.02	0.16	0.16	0.10	3.63
	B₂t	130-150	1.06	7.5YR 7/8	7.5 YR 5/8	13	40	47	Franco arcillo limosa	0.19	0.3	5.5	4.0	-1.5	0.06	30.0	0.79	0.06	0.12	0.08	2.09
P 2	A	0-33	0.91	5YR 4/3	5YR 2.5/2	33	17	50	Franca	3.85	6.6	5.9	4.8	-1.2	0.60	132.8	6.39	1.70	0.23	0.25	3.41
	BA	33-62	0.87	7.5YR 4/4	7.5YR 3/4	28	34	38	Franco arcillosa	2.53	4.4	6.3	4.7	-1.6	0.38	92.4	4.46	0.91	0.18	0.13	3.25
	Bt	62-77	1.05	7.5YR 5/6	7.5YR 3/3	36	37	27	Franco arcillosa	0.27	0.5	5.3	4.5	-0.8	0.28	8.4	2.58	0.57	0.13	0.11	21.57
	BC	77+	1.18	10YR 7/4	10YR 3/6	53	30	17	Franco arcillo arenosa	0.35	0.6	5.1	4.2	-0.9	0.16	23.2	1.80	0.48	0.17	0.08	5.96
P 3	A	0-18	1.02	10YR 5/2	10YR 2/1	53	37	10	Franco arcillo arenosa	1.67	2.9	5.3	4.6	-0.7	0.46	10.4	4.22	1.10	0.18	0.30	30.18
	Bt	18 -40	1.07	10YR 5/2	10YR 2/2	37	43	20	Arcillosa	0.30	0.5	5.4	4.3	-1.1	0.23	10.6	1.92	0.68	0.17	0.18	27.83
	BC	40-60	1.18	10YR 8/4	10YR 4/6	53	27	20	Franco arcillo arenosa	0.43	0.7	5.2	4.1	-1.1	0.11	4.8	1.46	0.38	0.18	0.08	24.74
Claves tabla: P= Perfil de Suelo; H= Horizonte de suelo; Prof.= Profundidad; DA=Densidad Aparente; %A= Porcentaje de Arena; %R= Porcentaje de Arcilla; %L= Porcentaje de Limo; T= Textura de suelo; %MO= Porcentaje de Materia Orgánica; %CO = Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H₂O = pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl = pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT = Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca²⁺= Calcio; Mg²⁺= Magnesio; Na⁺= Sodio; K⁺= Potasio; %V= Porcentaje de Saturación en bases																					

Tabla II. Resultados de las propiedades físicas y químicas de las muestras de los perfiles de suelo que soportan vegetación de Bosque de Pino y Encino

	H	Prof. cm	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
P 4	A	0-10	0.95	10YR 6/3	10YR 3/6	20	45	35	Arcillosa	2.6	1.51	3.8	3.5	-0.3	0.15	10.0	1.00	0.34	0.42	0.09	11.81
	Bt	10-45	1.03	7.5YR 7/6	7.5YR 5/6	12	53	35	Arcillosa	2.5	1.43	4.0	3.6	-0.3	0.14	13.4	0.93	0.19	0.27	0.07	10.98
	BC1	60-85	1.04	10YR 8/4	10YR 5/8	9	46	45	Arcillo limosa	0.2	0.14	4.0	3.9	-0.1	0.06	10.4	1.17	0.21	0.22	0.08	9.47
	BC2	85-140	1.07	10YR 8/4	10YR 5/8	6	39	55	Arcillo limosa	0.1	0.06	4.0	3.7	-0.4	0.13	4.8	0.90	0.16	0.36	0.06	19.67
	BC3	140-185	1.09	10YR 8/6	10YR 6/8	6	39	55	Franco arcillo limosa	0.1	0.06	4.0	3.9	-0.1	0.03	6.0	0.55	0.15	0.31	0.06	11.97
	BC4	185-205	0.91	5YR 6/4	5YR4/6	24	33	43	Arcillo limosa	0.2	0.14	4.5	3.8	-0.7	0.04	10.4	0.99	0.17	0.13	0.03	7.13

Claves tabla: P= Perfil de Suelo; H= Horizonte de suelo; Prof.= Profundidad; DA=Densidad Aparente; %A= Porcentaje de Arena; %R= Porcentaje de Arcilla; %L= Porcentaje de Limo; T= Textura de suelo; %MO= Porcentaje de Materia Orgánica; %CO= Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H₂O= pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl= pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT=Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca²⁺= Calcio; Mg²⁺= Magnesio; Na⁺= Sodio; K⁺= Potasio; %V= Porcentaje de Saturación en bases

Tabla III. Resultados de las propiedades físicas y químicas de los suelos superficiales que soportan las plantaciones con diferentes sistemas de producción de café

Sistema	N° de Parcela	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
			Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
MCA	1	1.05	10YR5/4	10YR3/4	58	24	18	Franco arcillo arenoso	1.59	2.7	5.7	4.6	-1.1	0.29	10.0	3.30	0.55	0.16	0.30	23.77
	2	1.08	10YR6/4	10YR3/3	36	29	35	Franco	2.72	4.7	5.3	4.6	-0.7	0.30	8.8	4.08	1.01	0.23	0.28	34.59
R	3	1.01	10YR4/3	10YR3/3	36	17	48	Franco	2.88	5.0	5.3	4.5	-0.8	0.56	92.8	3.84	0.97	0.17	0.18	2.96
	4	0.97	7.5YR5/6	7.5YR3/4	20	57	23	Arcillosa	2.24	3.9	5.1	4.1	-1.0	0.41	84.4	2.58	0.56	1.18	0.12	3.40
PT	5	1.07	10YR5/3	10YR2/2	45	42	13	Arcillosa	2.49	4.3	5.4	4.2	-1.2	0.35	8.4	4.02	0.85	0.20	0.07	32.21
	6	1.00	10YR4/3	10YR2/2	28	49	23	Arcillosa	0.51	0.9	5.0	4.2	-0.8	0.56	9.6	2.34	0.73	0.22	0.18	20.15
RCO	7	1.20	7.5YR5/6	7.5YR4/4	20	50	30	Arcillosa	1.59	2.7	4.4	4.0	-0.4	0.27	7.6	3.31	0.88	0.18	0.15	25.33

Claves tabla: MCA= Monocultivo a Cielo Abierto; R=Rusticano; PT= Policultivo Tradicional; RCO= Rusticano con Café Orgánico; DA=Densidad Aparente; %A= Porcentaje de Arena; %R= Porcentaje de Arcilla; %L= Porcentaje de Limo; T= Textura de suelo; %MO= Porcentaje de Materia Orgánica; %CO= Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H₂O= pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl= pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT=Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca²⁺= Calcio; Mg²⁺= Magnesio; Na⁺= Sodio; K⁺= Potasio; %V= Porcentaje de Saturación en bases

Tabla IV. Comparación de la parcela 1 del sistema Monocultivo a Cielo Abierto (MCA) vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 1

	H	Prof. cm	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
P1	E1	20-30	1.06	7.5 YR 6/8	7.5YR 4/6	51	34	15	Arcillosa	0.8	0.46	5.2	4.0	-1.2	0.13	5.2	1.22	0.21	0.16	0.07	17.97
MCA		Parcela 1	1.05	10YR5/4	10YR3/4	58	24	18	Franco arcillo arenoso	2.7	1.59	5.7	4.6	-1.1	0.29	10.0	3.30	0.55	0.16	0.30	23.77
Claves tabla: P= Perfil de Suelo; H= Horizonte de suelo; MCA= Monocultivo a Cielo Abierto; Prof.= Profundidad; DA=Densidad Aparente; %A= Porcentaje de Arena; %R= Porcentaje de Arcilla; %L= Porcentaje de Limo; T= Textura de suelo; %MO= Porcentaje de Materia Orgánica; %CO= Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H ₂ O= pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl= pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT=Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca ²⁺ = Calcio; Mg ²⁺ = Magnesio; Na ⁺ = Sodio; K ⁺ = Potasio; %V= Porcentaje de Saturación en bases																					

Tabla V. Comparación de la parcela 2 del sistema Monocultivo a Cielo Abierto (MCA) vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 1

	H	Prof. cm	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
P1	E2	30-50	1.13	10YR 7/8	10YR 5/8	37	35	28	Franco arcillosa	0.5	0.27	5.0	4.1	-0.9	0.13	17.2	0.76	0.26	0.17	0.08	4.36
MCA		Parcela 2	1.08	10YR6/4	10YR3/3	36	29	35	Franco	4.7	2.72	5.3	4.6	-0.7	0.30	8.8	4.08	1.01	0.23	0.28	34.59

Claves tabla: **P**= Perfil de Suelo; **H**= Horizonte de suelo; **MCA**= Monocultivo a Cielo Abierto; **Prof.**= Profundidad; **DA**=Densidad Aparente; **%A**= Porcentaje de Arena; **%R**= Porcentaje de Arcilla; **%L**= Porcentaje de Limo; **T**= Textura de suelo; **%MO**= Porcentaje de Materia Orgánica; **%CO**= Porcentaje de Carbono Orgánico; **pH H₂O**= pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; **pH KCl**= pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; **ΔpH** = Delta pH; **%NT**=Porcentaje de Nitrógeno Total; **CIC**= Capacidad de Intercambio Catiónico; **Ca²⁺**= Calcio; **Mg²⁺**= Magnesio; **Na⁺**= Sodio; **K⁺**= Potasio; **%V**= Porcentaje de Saturación en bases

Tabla VI. Comparación de la parcela 3 del sistema Rusticano (R) vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 2

	H	Prof. cm	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
P2	A	0-33	0.91	5YR 4/3	5YR 2.5/2	33	17	50	Franca	6.6	3.85	5.9	4.8	-1.2	0.60	132.8	6.39	1.70	0.23	0.25	3.41
R		Parcela 3	1.01	10YR4/3	10YR3/3	36	17	48	Franco	5.0	2.88	5.3	4.5	-0.8	0.56	92.8	3.84	0.97	0.17	0.18	2.96
Claves tabla: P= Perfil de Suelo; H= Horizonte de suelo; R=Rusticano; Prof.= Profundidad; DA=Densidad Aparente; %A= Porcentaje de Arena; %R= Porcentaje de Arcilla; %L= Porcentaje de Limo; T= Textura de suelo; %MO= Porcentaje de Materia Orgánica; %CO= Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H ₂ O= pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl= pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT=Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca ²⁺ = Calcio; Mg ²⁺ = Magnesio; Na ⁺ = Sodio; K ⁺ = Potasio; %V= Porcentaje de Saturación en bases																					

Tabla VII. Comparación de la parcela 4 del sistema Rusticano (R) vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfil 2

	H	Prof. cm	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
P2	Bt	62-77	1.05	7.5YR 5/6	7.5YR 3/3	36	37	27	Franco arcillosa	0.5	0.27	5.3	4.5	-0.8	0.28	8.4	2.58	0.57	0.13	0.11	21.57
R		Parcela 4	0.97	7.5YR5/6	7.5YR3/4	20	57	23	Arcillosa	3.9	2.24	5.1	4.1	-1.0	0.41	84.4	2.58	0.56	1.18	0.12	3.40
Claves tabla: P = Perfil de Suelo; H = Horizonte de suelo; R =Rusticano; Prof. = Profundidad; DA =Densidad Aparente; %A = Porcentaje de Arena; %R = Porcentaje de Arcilla; %L = Porcentaje de Limo; T = Textura de suelo; %MO = Porcentaje de Materia Orgánica; %CO = Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H₂O = pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl = pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT =Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca²⁺ = Calcio; Mg²⁺ = Magnesio; Na⁺ = Sodio; K⁺ = Potasio; %V = Porcentaje de Saturación en bases																					

Tabla VIII. Comparación de la parcela 5 del sistema de Policultivo Tradicional (PT) vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfiles 3

	H	Prof. cm	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
P3	Bt	18 -40	1.07	10YR 5/2	10YR 2/2	37	43	20	Arcillosa	0.5	0.30	5.4	4.3	-1.1	0.23	10.6	1.92	0.68	0.17	0.18	27.83
PT		Parcela 5	1.07	10YR5/3	10YR2/2	45	42	13	Arcillosa	4.3	2.49	5.4	4.2	-1.2	0.35	8.4	4.02	0.85	0.20	0.07	32.21
Claves tabla: P = Perfil de Suelo; H = Horizonte de suelo; PT = Policultivo Tradicional; Prof. = Profundidad; DA =Densidad Aparente; %A = Porcentaje de Arena; %R = Porcentaje de Arcilla; %L = Porcentaje de Limo; T = Textura de suelo; %MO = Porcentaje de Materia Orgánica; %CO = Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H₂O = pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl = pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT =Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca²⁺ = Calcio; Mg²⁺ = Magnesio; Na⁺ = Sodio; K⁺ = Potasio; %V = Porcentaje de Saturación en bases																					

Tabla IX. Comparación de la parcela 6 del sistema de Policultivo Tradicional (PT) vs Bosque Tropical Caducifolio (BTC) perfiles 2

	H	Prof. cm	DA g/cm ³	Color		%A	%R	%L	T	%MO	%CO	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	%NT	CIC Cmol (+) Kg ⁻¹	Cationes Intercambiables Cmol (+) Kg ⁻¹				%V
				Seco	Húmedo												Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
P2	Bt	62-77	1.05	7.5YR 5/6	7.5YR 3/3	36	37	27	Franco arcillosa	0.5	0.27	5.3	4.5	-0.8	0.28	8.4	2.58	0.57	0.13	0.11	21.57
PT		Parcela 6	1.00	10YR4/3	10YR2/2	28	49	23	Arcillosa	0.9	0.51	5.0	4.2	-0.8	0.56	9.6	2.34	0.73	0.22	0.18	20.15
Claves tabla: P = Perfil de Suelo; H = Horizonte de suelo; PT = Policultivo Tradicional; Prof. = Profundidad; DA =Densidad Aparente; %A = Porcentaje de Arena; %R = Porcentaje de Arcilla; %L = Porcentaje de Limo; T = Textura de suelo; %MO = Porcentaje de Materia Orgánica; %CO = Porcentaje de Carbono Orgánico; pH H₂O = pH en agua en relación agua/ suelo 2:1; pH KCl = pH en solución de KCl 1N pH 7 en relación solución/ suelo 2:1; ΔpH = Delta pH; %NT =Porcentaje de Nitrógeno Total; CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico; Ca²⁺ = Calcio; Mg²⁺ = Magnesio; Na⁺ = Sodio; K⁺ = Potasio; %V = Porcentaje de Saturación en bases																					

IV. CONCLUSIONES

De todos los sistemas analizados se determinó que la principal modificación entre la CI y la CD es la pérdida de los horizontes superficiales.

El manejo de los suelos correspondiente a la CD en las parcelas 1, 2, 3 y 5, ha generado un incremento en los contenidos de Materia Orgánica.

La práctica del encalado solo ha incrementado el valor del pH en las parcelas 1, 2 y la 7, lo cual implica su escaso efecto en la neutralización de la acidez de los suelos. No hay evidencia de un efecto de neutralización de la actividad del aluminio intercambiable, pues los resultados del ΔpH de la CI y su cambio a CD son contradictorios.

En lo referente al cambio de la CI a CD, el manejo que ha minimizado las diferencias en CS es el efectuado en la parcela 3 del sistema Rusticano. Lo cual implica que la relación entre el sistema natural de Bosque Tropical Caducifolio y la plantación de café es soportable desde una perspectiva de sustentabilidad. Sin embargo, es necesario efectuar estudios sobre su viabilidad (ecología-economía) y equidad (economía-sociedad) para que el sistema tienda a ser completamente sustentable.

V. RECOMENDACIONES

La determinación del ΔpH nos permite estimar la actividad del aluminio intercambiable y su relación con la acidez del suelo. Sin embargo, será necesario cuantificar el aluminio intercambiable y evaluar sus efectos sobre la retención de fosfatos, reacciones que generan problemas sobre la fertilidad del suelo que soporta plantaciones de café.

La práctica del encalado requiere ser valorada mediante la determinación de las dosis efectuando los experimentos correspondientes y no solo por la recomendación del proveedor de fertilizantes y enmiendas químicas.

RECONOCIMIENTOS

Este proyecto fue realizado con el apoyo del CONACYT, mediante el Programa de Becas de Mujeres indígenas y los apoyos complementarios para mujeres indígenas becarias de CONACYT.

Agradecemos a los productores del municipio de Atoyac de Álvarez, Guerrero, miembros de la Red de Agricultores Sustentables Autogestivos (RASA) A.C., por las facilidades otorgadas para el estudio de los suelos en las plantaciones de café y bosques de la región. En especial al C. Ing. Arturo García Jiménez por todas sus atenciones.

Agradecemos al Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por el apoyo brindado para la caracterización física y química de las muestras de los suelos estudiados. En especial al Quím. Cesar Calderón Fabián y al M.C. Abel Cruz Montalvo.

Agradecemos a la Mapoteca “Jorge A. Vivó”, del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por el apoyo brindado en su laboratorio de estudios Geomáticos. En particular al Dr. Edgardo Torres Trejo.

REFERENCIAS

- [1] Arnold, R. W. (2006). Soil survey and soil classification. En S. Grunwald (Ed.), *Environmental Soil-Landscape Modeling*, (pp. 37-59). Boca Raton, FL: P.CRC/Taylor and Francis.
- [2] Carter, M. R., Gregorich, E. G., Anderson, D. W., Doran, J. W., Janzen, H. H. y Pierce, F. J. (1997). Concepts of soil quality and their significance. En E. G. Gregorich y M. Carter (Eds.), *Soil quality for crop production and ecosystem health*, (pp. 1-19). Amsterdam, Netherlands. Elsevier Science Publishers.
- [3] Blum W. E. H. (2006). The future of soil science. En A. E. Hartemink (Ed.), *The future of soils science*, (pp. 16-18). The Netherlands. IUSS International Union of Soil Sciences.
- [4] Ibáñez J. J. (2010). Concepto de suelo, su clasificación y representaciones canónicas. *Suelos Ecuatoriales* 41(1), 19-22.
- [5] Fuentes-Andrade, M. S., Acevedo-Sandoval, O. A., Cruz-Chávez, E., Otazo-Sánchez, E. M., y Román-Gutiérrez, A. D. (2014). Cambios en las propiedades edafológicas en el tiempo en un bosque templado del estado de Hidalgo, México. *European Scientific Journal* 10(6), 399-410.
- [6] Muscolo, A., Panuccio, M.R., Mallamaci, C., y Sidari, M. (2014). Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. *Ecological Indicators* 45, 416-423.
- [7] Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2001). *Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning*. Washington, DC. United States Department of Agriculture, Soil Quality Institute.
- [8] Ballesta, R. J., y González, Q. V. (2006). La Calidad de Suelos como medida para su conservación. *Edafología* 13(3), 125-138.
- [9] Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., y Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo* 25(2), 173-178.
- [10] Rosas, A. J., Escamilla, P. E., y Ruiz, R. O. (2008). Relación de los nutrientes del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoamericana* 26(4), 375-384.
- [11] Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas* 33(2), 117-24. doi:10.22267/rcia.163302.58.
- [12] Tenorio, M. G. (2008). Relación de las Propiedades Fisicoquímicas y Calidad de los Suelos de Tetelilla, Teziutlán, Puebla (Tesis doctoral). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad de Puebla, México.
- [13] Tenorio, M. G., Valera, M. A., Linares, G., Acevedo, O. A, y Dixon, J. B. (2008). Análisis discriminante lineal en el estudio de la calidad de los suelos de la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista de Ciencias Matemáticas de Cuba* 24(único), 42-51.
- [14] Clay, J. A. (2004). *World Agriculture and the Environment: a commodity-by-commodity guide to impacts and practices*, (pp. 570). Washington. Island Press.
- [15] Fuentes, F. R. (1979). Coffee production systems in México. En De las Salas, F. (Ed.), *Workshop on Agroforestry Systems in Latin America*. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- [16] Nolasco, M. (1985). *Café y sociedad en México*, (pp. 454). México, DF. Centro de Ecodesarrollo.
- [17] Comité Técnico Estatal de Evaluación (2011). Informe de evaluación de avances logrados entre 2006 y 2010: Campaña contra la Broca del Café. SAGARPA y Gobierno del estado de Guerrero. Recuperado de: www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/guerrero/Documents/Comite%20Estatal%20de%20Evaluación%202011/INFORME%20BROCA%20DEL%20CAFE.pdf

- [18] García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. México. Instituto de Geografía UNAM.
- [19] CONABIO. (2006). Capital natural y bienestar social. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- [20] FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos, Cuarta edición. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- [21] Diario Oficial de la Federación. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021.RECNAT-2000. Ciudad de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [22] Natural Resources Conservation Service (NRCS) (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Washington, DC. United States Department of Agriculture. Soil Quality Institute.
- [23] Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D.W. y Abawi, G. S. (2016). Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2. Geneva, NY. Cornell University.
- [24] Uehara, G., y Guilman, G. (1981). The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Coulter, Colorado. Westview Press.
- [25] IUSS Working Group WRB. (2015). 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.
- [26] Arango, M. A. (2007). Zonificación agroecológica del café en Puerto Rico y análisis estructural y de composición de especies arbóreas presentes en el agroecosistema cafetero (Tesis posgrado). Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayaguez.
- [27] Harmand, M. J., Ávila, H., Oliver, R., Sain, A. L., y Dambrine, E. (2010). The impact of kaolinite and oxyhydroxides on nitrate adsorption in deep layers of a Costarican Acrisol under coffee cultivation. *Geoderma* 158, 216-224. doi:10.1016/j.geoderma.2010.04.032.
- [28] Carvajal, F. A., Feijoo, A., Quintero, H., y Rondón, A. M. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *J. Soil. Sci. Plant Nutr.* 9(3), 222-235.
- [29] Molgora, T. A. (2013). Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra del centro de Veracruz (Tesis posgrado). Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.
- [30] Geissert, D., Mólgora, T. A., Negrete, Y. S., y Hunter, M. R. (2017). Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra. *Agrociencia*. 51(2), 119-133.
- [31] González, H. A. y Hernández, J. R. (2016). Zonificación agroecológica del *Coffea arábica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*. 90, 105-118. doi:10.14350/rig.49329.
- [32] Siavosh, S. K. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. Avances técnicos Cenicafe. Manizales, Caldas, Colombia. Gerencia Técnica/Programa de Investigación Científica, Fondo Nacional del Café.