

Calidad de suelos bajo dos esquemas de manejo en fincas cafeteras del sur de Colombia¹

Soil quality under two different management schemes in coffee plantations of southern Colombia

Oscar Eduardo Valbuena-Calderón², Wilson Rodríguez-Pérez³, Juan Carlos Suárez-Salazar⁴

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue establecer un índice de calidad de suelo aditivo (ICSA) en arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.). El estudio se llevó a cabo bajo dos esquemas de manejo intensivo y tradicional, en nueve fincas (32 lotes) en el sur de Colombia, durante el año 2013. Se realizó un análisis de separación de medias mediante la prueba de LSD Fisher ($P < 0,05$) a cada una de las variables físicas y químicas del suelo. Las variables que presentaron diferencias entre los esquemas fueron sometidas a análisis de componentes principales para seleccionar el conjunto mínimo de datos (CMD) de los componentes que explicaron la mayor variabilidad y se verificó redundancia entre los indicadores a partir de la correlación. El ICSA se obtuvo a partir de la sumatoria de los índices de calidad del suelo (ICS) de todos los indicadores, teniendo en cuenta que entre mayor sea el valor del ICSA mejor es la calidad del suelo del sistema en estudio. Las variables físicas seleccionadas fueron contenido de arena, arcilla; mientras que las variables químicas fueron: carbono orgánico (OC), P, Ca, Mg, bases totales (BT) y Ca/Mg. El mejor ICSA se obtuvo para el manejo tradicional, debido a que los valores de las variables seleccionadas coincidieron en mayor proporción con el objetivo de calidad identificado para la cuantificación del ICSA; en este caso el rendimiento del cultivo, basado en valores límites de producción del cultivo de café.

Palabras claves: índice calidad de suelo aditivo, conjunto mínimo de datos, análisis de componentes principales.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop an additive soil quality index (ASQI) in agroforestry managements of coffee (*Coffea arabica* L.). The study took place under two intense and traditional management schemes, in nine farms (32 lots) in the south of Colombia, during 2013. A separation of means analysis was held through the LSD Fisher test ($P < 0,05$) to each of the physical and chemical variables of the soil. The variables that showed differences between the schemes were submitted to a main components analysis to select the minimum data set (MDS) of the components that explained the most variability and the redundancy was verified within the indicators, based on the correlation. The ASQI was obtained from the total sum of soil quality index (SQI) of all the indicators, taking into account that the higher the score of the ASQI, the higher the quality of the soil within the study system. The selected physical variables were the content of sand and clay; while the chemical variables were: organic carbon (OC), P, CA, Mg, total bases (TB) and Ca/Mg. The best ASQI was obtained from traditional management, because the value of the selected variables matched in a bigger proportion with the quality objective identified for the ASQI quantification; in this case the crop yield, based on limit values for coffee plantations.

Keywords: additive soil quality index, minimum data set, principal component analysis.

¹ Recibido: 1 de octubre, 2015. Aceptado: 10 de febrero, 2016. Este estudio se realizó en el marco del proyecto de investigación "Importancia económica y ambiental de la actividad cafetera como estrategia de adaptación al cambio climático en un paisaje fragmentado del Macizo Colombiano" mediante convenio Universidad de la Amazonia-Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

² Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Centro de Gestión y Desarrollo Sostenible Surcolombiano. Tecnoparque Agroecológico Yamboro. Carrera 8 N° 7-53 - Centro. Pitalito - Huila. Colombia. oscarvalbuena@agroecologik.co (autor para correspondencia).

³ Universidad de la Amazonia, Facultad de Ciencias Básicas, Programa de Química. Sede principal CII 17 Diag 17 Cra 3F Barrio Porvenir. Florencia - Caquetá. Colombia. wisonrod@hotmail.com

⁴ Universidad de la Amazonia, Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería Agroecológica. Sede principal CII 17 Diag 17 Cra 3F Barrio Porvenir. Florencia - Caquetá. Colombia. juansuarez1@gmail.com



INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo se relaciona con la capacidad de proveer las condiciones para un buen desarrollo del ecosistema (Idowu et al., 2009; Bone et al., 2014; Balota et al., 2015), así como para las distintas coberturas productivas. Esta característica implica fusionar los diferentes atributos químicos, físicos y biológicos, de modo tal que tengan la capacidad de describir procesos del ecosistema en un indicador que explique su óptimo funcionamiento (Andrews et al., 2002; Gugino et al., 2009); para ello se han propuesto varios marcos conceptuales para monitoreo de la calidad del suelo (Andrews et al., 2004; Velásquez et al., 2007; Nosrati, 2013; Veum et al., 2014).

El manejo aplicado en los suelos de áreas cafeteras en Colombia, se ha enfocado principalmente en la política de investigación propuesta y desarrollada por la Federación Nacional de Cafeteros (CENICAFÉ, 2014). El manejo del cultivo depende entre otras cosas, del esquema de fertilización (Sadeghian, 2010a; Gonzáles, 2012) relacionado con la densidad de siembra, etapas de crecimiento (Sadeghian y González, 2012; 2014), nivel de sombreado bajo estructuras agroforestales (Farfán y Jaramillo, 2009; Farfán, 2014), manejo (Gonzáles et al., 2014); además de la estructura del sistema de producción (tradicional, tecnificado, con semisombra y con sombra (Arcila et al., 2007). Este enfoque depende también de las condiciones agroecológicas agrupadas en ecotopos (Gómez et al., 1991).

Para valorar la calidad del suelo mediante un indicador, generalmente se parte de un conjunto mínimo de datos (Chen et al., 2013) que integra las variables físicas, químicas y biológicas que muestran su adecuado estado y funcionamiento (Rezaei et al., 2006). Estos datos son seleccionados por su idoneidad hacia una función particular (Andrews et al., 2004), servicio ecosistémico (Velásquez et al., 2007) o por ser considerado como amenaza para el suelo (Morvan et al., 2008). De acuerdo con las variables seleccionadas, estas se integran mediante un proceso de normalización y calificación para integrarse en un valor de índice de la calidad del suelo (Andrews et al., 2002; 2004; Idowu et al., 2009; Paz-Kagan et al., 2014a, 2014b) que explica el estado actual de este de acuerdo con la práctica de manejo. El objetivo de este estudio fue establecer el índice de calidad de suelo

aditivo (ICSA) en arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y manejo

En el año 2013, en nueve fincas se seleccionaron un total 32 lotes de productores con arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.), bajo dos esquemas de manejo: intensivo y tradicional, dieciséis de cada uno, ubicados en el municipio de Pitalito (1°51'14"N 76°03'05"O departamento del Huila), al sur de Colombia. Los lotes con manejo intensivo (Intensivo), siendo este esquema el más implementado por la mayoría de los productores de café de la zona, caracterizado por plantaciones con siembras intensivas (densidad superior a 7000 árboles/ha) a libre exposición, con aplicaciones de fertilizantes inorgánicos con elementos mayores y menores; por lo menos tres aplicaciones al año de urea (600 kg/ha/año), fosfato diamónico (DAP; 110 kg/ha/año), cloruro de potasio (KCl; 315 kg/ha/año) propuesto por la Federación Nacional de Cafeteros (FNC). El manejo tradicional (Tradicional) es un esquema propuesto por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR, 2006), reglamentado mediante la normativa de producción orgánica el cual se caracteriza por utilizar enmiendas orgánicas, con densidades de siembra de 5500 árboles/ha o menores, sistema de sombra o semisombra regulada y con vinculación a un programa de certificación orgánica. Este tipo de manejo no es común encontrarlo en la zona de estudio y el objetivo es lograr un precio diferencial en el momento de la venta del café por ser catalogado orgánico.

Parámetros químicos y físicos del suelo

En cada lote se tomó una muestra de suelo compuesta de cinco submuestras, a una profundidad de 30 cm, donde se realizaron las siguientes determinaciones químicas y físicas siguiendo las metodologías descritas por Zamudio et al. (2006): pH (relación suelo: agua de 1:2), aluminio intercambiable por diferencia de titulación de la acidez e hidrógeno intercambiable, carbono orgánico (Walkley-Black), fósforo asimilable (Bray II modificado), potasio,

calcio y magnesio (acetato de amonio 1N y neutro), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio 1N y neutro), bases totales (Ca, Mg, Na y K) y saturación de bases intercambiables (extracción con acetato de amonio 1N y neutro), nitrógeno total (Kjeldahl), acidez intercambiable (volumetría), bases totales (espectrofotometría de absorción atómica). Para cada una de las variables físicas se tomaron cuatro repeticiones, donde se determinaron densidad aparente mediante el método de cilindro de volumen conocido, densidad real (picnómetro), textura (Bouyoucos), resistencia (penetrómetro de mano análogo), infiltración (anillos de infiltración) con lectura en cada minuto hasta llegar a los diez minutos y después en intervalos de diez minutos, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), agua disponible (AD), conductividad hidráulica (CH) y punto de saturación (estimación) (Saxton y Rawls, 2004).

Índice de calidad de suelo aditivo (ICSA) y análisis estadístico

A cada una de las variables físicas y químicas del suelo se les realizó pruebas de estadística descriptiva y análisis de separación de medias mediante la prueba de LSD Fisher ($P < 0,05$). A las variables que presentaron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre esquemas se realizó el análisis de componentes principales (ACP) (D'Hose et al., 2013), considerando las variables con un valor de respuesta de la variación ≥ 1 (Chen et al., 2013; Yao et al., 2013) y fueron retenidas de cada componente principal (CP) para el conjunto mínimo de datos (CMD). Las variables altamente ponderadas dentro del 10% mayor o menor del valor absoluto más alto (Andrews et al., 2002; Mastro et al., 2008).

De acuerdo con los resultados de comparación de métodos de indexación de calidad de suelos propuestos por Andrews et al. (2002) y Qi et al. (2009), se obtuvo el CMD y, se correlacionaron las variables para verificar posibles redundancias y así retener mayor número de indicadores (Yao et al., 2013).

A partir la identificación de estos indicadores se realizaron los cálculos matemáticos para establecer el índice de calidad de suelo aditivo por cada esquema de manejo (Cerdeira, 2008; Delgado et al., 2010; Chavarría et al., 2012), de acuerdo con un análisis factorial lineal (Cerdeira et al., 2012). Esta combinación de métodos ha sido muy usada para explorar relaciones entre grandes

números de variables y facilitar la interpretación de los resultados (Andrews et al., 2002). Para el cálculo del ICS se tomó como referencia la metodología de valoración lineal propuesta por Andrews et al. (2002), donde se explica que para unos indicadores un mayor valor indica una mejor calidad y que para otros un menor valor indica una mejor calidad; por ello los indicadores se clasificaron en:

- Mayor es mejor: indicadores cuyos valores altos son considerados como buenos.
- Menor es mejor: indicadores cuyos valores bajos son considerados como buenos.

Se calculó un índice de calidad de suelo (ICS) para cada indicador de cada una de las parcelas en estudio, mediante las siguientes fórmulas:

- Mayor es mejor: $ICS = \text{valor de cada indicador} / \text{valor más alto del indicador}$
- Menor es mejor: $ICS = \text{valor más bajo del indicador} / \text{valor de cada indicador}$

Mediante estas fórmulas se obtienen valores ponderados entre 0-1 para cada uno de los indicadores, soportado mediante los umbrales mínimos y máximos de cada una de las propiedades, tanto químicas como físicas del suelo, obteniendo los valores más altos y más bajos reportados por cada variable, teniendo en cuenta los límites que afectan la producción del cultivo (e.g. $CO_2 > 5$ se considera como el valor más alto reportado, que condiciona la aplicación de materia orgánica al suelo) (Sadeghian, 2010b); y así finalmente calcular el ICSA para cada una de las parcelas en estudio.

El ICSA se obtiene mediante la sumatoria de los ICS de todos los indicadores, teniendo en cuenta que entre mayor sea el valor del ICSA mejor es la calidad del suelo del sistema en estudio. La prueba de medias y ACP se realizó utilizando el software libre R versión 3.2.0. (R Development Core Team, 2015), mediante la plataforma independiente para análisis estadísticos R Commander (Fox, 2005), basado en el paquete FactoMineR (Husson et al., 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentaron diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre los esquemas de manejo del suelo (Cuadro 1), debido al efecto de las enmiendas orgánicas, las cuales modifican la fertilidad del suelo (Diacono y Montemurro, 2010) e incrementan los contenidos de

Cuadro 1. Promedios de los indicadores físicos y químicos de suelos en arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) bajo esquema de manejo intensivo (tipo FNC fertilización sintética, siembra intensiva, pleno sol) y tradicional (fertilización orgánica, bajo sombra) en pequeñas fincas en el sur de Colombia. 2013.

Table 1. Averages of physical and chemical indicators of soil in agroforestry arrangements coffee (*Coffea arabica* L.) under intensive management scheme (FNC type synthetic fertilizers, intensive planting in full sun) and traditional (organic fertilization, shade) in small farms in southern Colombia. 2013.

Indicador	Unidad	Manejo				p-value
		Intensivo		Tradicional		
		Media	E.E.	Media	E.E.	
Físicas						
Arena	%	37,16 ±	1,9 b	45,23 ±	2,7 a	0,0167
Arcilla		37,6 ±	1,6 a	26,18 ±	1,6 b	<0,0001
Limos		25,25 ±	1,2	28,59 ±	1,8	
PMP	cm ³ /cm ³	0,21 ±	0 a	0,15 ±	0 b	<0,0001
CC		0,33 ±	0 a	0,27 ±	0 b	0,0004
PS		0,5 ±	0 a	0,47 ±	0 b	0,0001
AD		0,12 ±	0	0,12 ±	0	
CH	cm/hr	0,75 ±	0,5	0,6 ±	0,1	
RP	Mpa	0,86 ±	0,1 b	1,14 ±	0,1 a	0,0082
V. Infilt.	mm/h	216,8 ±	25	348,9 ±	63	
DA	g/cm ³	1,08 ±	0	1,09 ±	0	
Químicas						
pH	Und	5,14 ±	0,1	5,34 ±	0,1	
AcInter	meq/100g	1,44 ±	0,3	1,24 ±	0,3	
Ca		5,48 ±	1,1 b	13,52 ±	1,5 a	<0,0001
Mg		1,24 ±	0,1 b	2,28 ±	0,2 a	<0,0001
K		0,46 ±	0 b	1,14 ±	0,3 a	0,022
Na		1,74 ±	0,7	1,06 ±	0,1	
BT		8,91 ±	1,3 b	18,01 ±	1,7 a	0,0001
CIC		14,23 ±	0,9	16,69 ±	1	
P	mg/kg M.S	11,96 ±	0,1 b	12,2 ±	0,1 a	0,0409
C.O.	%	2,28 ±	0,2 b	2,87 ±	0,2 a	0,0451
N		0,99 ±	0 b	1,09 ±	0 a	0,0056
Ca/Mg		4,22 ±	0,5 b	5,69 ±	0,5 a	0,0376
Mg/K		2,73 ±	0,2	3 ±	0,2	
Ca/K		12,44 ±	2,4	15,81 ±	1,5	
(Ca+Mg)/K		15,16 ±	2,5	18,81 ±	1,7	
Sat. Bases		63,81 ±	8,2 b	103,1 ±	7,1 a	0,0376
Sat Na Int		13,66 ±	5,7	8,23 ±	1,8	
Sat. Al Int		26,42 ±	6,5	13,7 ±	4,5	

E.E.: error estándar. PMP: punto marchitez permanente, CC: capacidad de campo, PS: punto de saturación, AD: agua disponible, CH: conductividad hidráulica, RP: resistencia a la penetración, V. Infilt: velocidad de infiltración, DA: densidad aparente, AcInter: acidez intercambiable, Ca: calcio, Mg: magnesio, K: potasio, Na: sodio, BT: bases totales, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, C.O.: carbono orgánico, N: nitrógeno, Sat. Bases: saturación de bases, Sat Na Int: saturación de sodio intercambiable, Sat. Al Int: saturación de aluminio intercambiable / S.E.: standard error. PMP: permanent wilting point, CC: field capacity, PS: saturation point, AD: water available, CH: hydraulic conductivity, RP: resistance to penetration, V. Infilt: infiltration rate, DA: bulk density, Acinter: exchangeable acidity, Ca: calcium, Mg: magnesium, K: potassium, Na: sodium, BT: total bases, CIC: cation exchange capacity, P: phosphorus, CO: organic carbon, N: nitrogen, Sat. Bases: bases saturation, Sat Na Int: sodium saturation exchange, Sat. Al Int: aluminum saturation exchange.

carbono (Nardi et al., 2004; Mandal et al., 2007), nitrógeno (Tittarelli et al., 2007), potasio (Hartl et al., 2003), fósforo (He et al., 2001) y bases totales (Ca, Mg y sus relaciones) (Rosatto-Moda et al., 2014). Desde el punto de vista físico se presentaron diferencias en resistencia a la penetración, debido a la presencia de árboles en los arreglos agroforestales que a su vez afectan la velocidad de infiltración (Muschler, 1999) y el crecimiento de las raíces del cultivo; considerando las anteriores variables, tanto químicas y físicas, importantes, debido a que se relacionan con el suministro de nutrientes, crecimiento de la planta, estabilidad de los agregados del suelo, fertilidad y productividad.

Con las dieciséis variables que presentaron diferencias estadísticas entre los esquemas de manejo, se explicó 82% de la variabilidad en los primeros 4 CP en donde se presentó un valor de respuesta ≥ 1 (Cuadro 2). Este valor de respuesta proporcionó la magnitud de la variable dentro de cada CP (Yemefack et al., 2006), lo cual permitió retener las variables más representativas para el CMD.

Se seleccionaron once variables para el CMD, las cuales representan un grupo predominante para la evaluación de la calidad dinámica del suelo (Obando et al., 2004), puesto que son sensibles a los efectos de corto y mediano plazo sobre el cual tienen injerencia los esquemas de manejo (Doran y Zeiss, 2000; Chen et al., 2013; Prieto-Méndez et al., 2013). Luego de realizar el análisis de correlación, solamente quedaron priorizadas ocho variables (Cuadro 3), siendo eliminados los parámetros hídricos (PMP, CC, PS), debido a la existencia de redundancia estadística, ya que su cálculo fue determinado por estimación (Saxton y Rawls, 2004), contrario a lo reportado por Askari y Holden (2014) en la generación de indicadores para la evaluación cuantitativa de la calidad del suelo bajo manejo de pasturas. Este resultado identificó las variables de respuesta más sensibles a las prácticas de manejo del suelo que incluye cada una de los esquemas de manejo, y por tanto, son consideradas como variables de calidad dinámica del suelo (Santana et al., 1998; Karlen et al., 2003; Obando et al., 2004).

De acuerdo con el método de valoración lineal propuesto por Andrews et al., (2002), se realizó una valoración de los parámetros retenidos en el CMD asumiendo que el comportamiento de los mismos fue lineal, independientemente del grado de afectación o

Cuadro 2. Resultados de Análisis de Componentes Principales de indicadores de calidad de suelos en arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) bajo esquema de manejo intensivo (tipo FNC fertilización sintética, siembra intensiva, pleno sol) y tradicional (fertilización orgánica, bajo sombra) en pequeñas fincas en el sur de Colombia. 2013.

Table 2. Results of principal component analysis of soil quality indicators in coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry arrangements under intensive management scheme (FNC type synthetic fertilizers, intensive planting in full sun) and traditional (organic fertilization, under shadow) on small farms in southern Colombia. 2013.

Componente principal	CP1	CP2	CP3	CP4
Respuesta de la variación	7,86	2,47	1,75	1,07
Proporción	0,49	0,15	0,11	0,07
Prop. acumulada	0,49	0,65	0,75	0,82
Variables	CP1	CP2	CP3	CP4
Físicas				
Arena	-0,28*	-0,28	-0,01	0,03
Arcilla	0,30	0,25	0,16	0,20
PMP	0,29	0,25	0,16	0,26
CC	0,30	0,29	0,12	0,20
PS	0,31	0,26	0,09	0,06
RP	-0,12	0,02	-0,28	0,30
Químicas				
C.O	-0,21	0,05	0,55	-0,14
P	-0,16	-0,22	-0,09	0,52
N	-0,23	0,002	0,23	-0,07
Ca	-0,27	0,39	-0,06	0,05
Mg	-0,28	0,17	0,12	0,35
K	-0,27	0,08	0,13	0,40
BT	-0,28	0,36	-0,11	0,07
Ca/Mg	-0,14	0,41	-0,21	-0,39
Sat. Bases	-0,23	0,31	-0,31	-0,10

* Autovectores. Indicadores en negrita presentaron los mayores valores ponderados y los subrayados fueron los que se incluyeron en el CMD. PMP: punto marchitez permanente, CC: capacidad de campo, PS: punto de saturación, RP: resistencia a la penetración, C.O.: carbono orgánico, P: fósforo, N: nitrógeno, Ca: calcio, Mg: magnesio, K: potasio, BT: bases totales, Sat. Bases: saturación de bases / Eigenvalues. Indicators in bold had the highest weighted values and underlined were those that include the CMD. PMP: permanent wilting point, CC: field capacity, PS: saturation point, RP: resistance to penetration, CO: organic carbon, P: phosphorus, N: nitrogen, Ca: calcium, Mg: magnesium, K: potassium, BT: total bases, Sat. Bases: bases saturation.

Cuadro 3. Matriz de correlación de indicadores de calidad de suelos en arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) bajo esquema de manejo intensivo (tipo FNC fertilización sintética, siembra intensiva, pleno sol) y tradicional (fertilización orgánica, bajo sombra) en pequeñas fincas en el sur de Colombia. 2013.

Table 3. Correlation matrix of indicators of soil quality in coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry arrangements under intensive management scheme (FNC type synthetic fertilizers, intensive planting in full sun) and traditional (organic fertilization, shade) in small farms in southern Colombia. 2013.

Propiedad	Arena	Arcilla	PMP	CC	PS	RP	C.O.	P	N	Ca	Mg	K	BT	Ca/Mg
Arcilla	-0,78 ***													
PMP	-0,74 ***	0,99 ***												
CC	-0,85 ***	0,95 ***	0,95											
PS	-0,91 ***	0,94 ***	0,91	0,93										
RP	0,24	-0,28 **	-0,25	-0,22	-0,32 **									
C.O.	0,41 ***	-0,35 **	-0,33 ***	-0,37 ***	-0,41 **	0,05								
M.O	0,41 ***	-0,35 **	-0,33 ***	-0,37 ***	-0,41 **	0,05								
P	0,5 ***	-0,4 **	-0,36 ***	-0,43 ***	-0,47 ***	0,19	0,13							
N	0,46 ***	-0,51 ***	-0,49	-0,46 ***	-0,51	0,03	0,49 ***	0,19						
Ca	0,34 ***	-0,42 ***	-0,38 ***	-0,35 ***	-0,42 ***	0,28*	0,41 ***	0,15	0,46 ***					
Mg	0,49 ***	-0,49 ***	-0,44 ***	-0,44 ***	-0,53	0,22	0,49 ***	0,33**	0,57 ***	0,79 ***				
K	0,57 ***	-0,49 ***	-0,43 ***	-0,47 ***	-0,59	0,2	0,48 ***	0,37**	0,48 ***	0,65 ***	0,81 ***			
BT	0,39 ***	-0,46 ***	-0,42 ***	-0,4 ***	-0,46 ***	0,29*	0,39 **	0,2	0,46 ***	0,95 ***	0,78 ***	0,66 ***		
Ca/Mg	0,06	-0,19	-0,19	-0,14	-0,14	0,14	0,18	-0,08	0,15	0,7 ***	0,22	0,16	0,63 ***	
Sat. Bases	0,28 **	-0,46 ***	-0,45 ***	-0,39 ***	-0,4 **	0,26 *	0,15	0,16	0,29 *	0,75 ***	0,51 ***	0,43 ***	0,86 ***	0,64 ***

*, **, *** Diferencia significativa a $P < 0,05$, $P < 0,01$ y $P < 0,001$, respectivamente / Significant difference $P < 0,05$, $P < 0,01$ and $P < 0,001$ respectively

PMP: punto marchitez permanente, CC: capacidad de campo, PS: punto de saturación, RP: resistencia a la penetración, C.O.: carbono orgánico, P: fósforo, N: nitrógeno, Ca: calcio, Mg: magnesio, K: potasio, BT: bases totales, Sat. Bases: saturación de bases / PMP: permanent wilting point, CC: field capacity PS: saturation point, RP: resistance to penetration, CO: organic carbon, P: phosphorus, N: nitrogen, Ca: calcium, Mg: magnesium K: potassium, BT: total bases, Sat. Bases: bases saturation.

intensidad con que se implementen los esquemas de manejo evaluados (Yemefack et al., 2006). Lo anterior tuvo como fundamento la revisión del valor óptimo para el desarrollo y producción en el cultivo del café (Cardona y Sadeghian, 2005; Sadeghian, 2008; Carvajal et al., 2009), originando de esta manera el punto de partida para la transformación de datos del

CMD a indicadores de calidad de suelo, haciendo referencia el objetivo de calidad identificado para valorar los indicadores.

Una vez transformados los datos en escala de 0-1, se calculó el índice de calidad de suelo aditivo (Andrews et al., 2002; Cerda, 2008). Se encontró que el esquema de manejo tradicional dado en pequeñas

fincas en el sur de Colombia contribuyó a un mayor valor de ICESA, comparado con el presentado en el esquema intensivo (Cuadro 4), debido posiblemente al mismo esquema de manejo, el cual se caracteriza por utilizar enmiendas orgánicas, densidades de siembra de 5500 árboles/ha o menores, sistema de sombra o semisombra regulada.

La interpretación de este resultado mediante la adaptación de los rangos propuesto por Cantú et al. (2007), fue de muy alta calidad y alta calidad, respectivamente (Cuadro 5), teniendo un impacto en el suelo en relación con una mayor disponibilidad de nutrientes, humedad, y macrofauna. Con relación al sistema de producción, al estar bajo arreglos agroforestales, la eficiencia fotosintética fue mejor, por tanto, una mayor vida útil del cultivo. La interpretación mediante rangos permitió entender de mejor manera los resultados, y aunque no se determinó el nivel de afectación (degradación) de los esquemas de manejo

sobre el suelo (Askari y Holden, 2014), se estableció una relación de afectación sobre las variables que respondieron de manera sensible a estos esquemas, en función de la producción como objetivo principal, por tanto se trazaron tendencias que determinaron la calidad dinámica del suelo (D'Hose et al., 2013).

Relación entre los esquemas de manejo y el ICESA

Se observó una diferencia significativa entre los indicadores físicos y químicos del suelo en función de los esquemas de manejo identificados para este estudio, puesto que una vez analizados los datos, tanto por técnica estadística univariada como multivariada, se encontraron valores medios distintos para cada indicador, con confiabilidad del 95%. Mediante análisis multivariado de ACP y la matriz de correlación, se definió un CMD con los ocho indicadores más representativos de la calidad del suelo, en función del

Cuadro 4. Transformación de datos del CMD (Valoración de indicadores) de indicadores de calidad de suelos en arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) bajo esquema de manejo intensivo (tipo FNC fertilización sintética, siembra intensiva, pleno sol) y tradicional (fertilización orgánica, bajo sombra) en pequeñas fincas en el sur de Colombia. 2013.

Table 4. Data Transformation CMD (evaluation indicators) of indicators of soil quality in coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry arrangements under intensive management scheme (FNC type synthetic fertilizers, intensive planting in full sun) and traditional (organic fertilization, shade) on small farms in southern Colombia. 2013.

Indicador	Valor ideal	Fuente	Manejo			
			Intensiva		Tradicional	
			Media	Valor	Media	Valor
Físicos						
Arena*	31,86	Salamanca y Sadeghian, 2005	37,16	1	45,23	1
Arcilla*	35,62	Salamanca y Sadeghian, 2005	37,6	1	26,18	1
Químicos						
C.O.	5	Carvajal et al., 2009	2,28	0,46	2,87	0,57
P	30	Sadeghian, 2008	11,96	0,4	12,2	0,41
Ca*	3		5,48	1	13,52	1
Mg*	0,9		1,24	1	2,28	1
BT	25	IICA, 1988	8,91	0,36	18,01	0,72
Ca/Mg*	3,9	Salamanca y Sadeghian, 2005	4,22	1	5,69	1
ICESA			6,21		6,7	

*Valores llevados a 1 directamente, porque los valores reportados eran menores a los resultados del análisis de muestras para este estudio / Values taken directly 1, because the reported values were lower than the results of the analysis of samples for this study.

**Entre pH 5 <pH≤5,5 / Between pH 5 <pH≤5.5.

C.O.: carbono orgánico, P: fósforo, Ca: calcio, Mg: magnesio, BT: bases totales / CO: organic carbon, P: phosphorus, Ca: calcium, Mg: magnesium, BT: total bases.

Cuadro 5. Interpretación del índice de calidad obtenido en arreglos agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) bajo esquema de manejo intensivo (tipo FNC fertilización sintética, siembra intensiva, pleno sol) y tradicional (fertilización orgánica, bajo sombra) en pequeñas fincas en el sur de Colombia. 2013.

Table 5. Interpretation quality index obtained in coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry arrangements under intensive management scheme (FNC type synthetic fertilizers, intensive planting in full sun) and traditional (organic fertilization, shade) on small farms southern Colombia. 2013.

Índice de calidad de suelo	Escala	Clase
Muy alta calidad	6,40 - 8,00	1
Alta calidad	4,80 - 6,39	2
Moderada calidad	3,20 - 4,79	3
Baja calidad	1,60 - 3,19	4
Muy baja calidad	0,00 - 1,59	5

Fuente: autor (modificado de Cantú et al., 2007) / Source: author (modified Cantu et al., 2007).

objetivo de producción identificado como parámetro de medición para este estudio.

Se estableció una tabla de valores con base en los umbrales mínimos y máximos de los ocho indicadores de calidad del suelo, de manera que reflejaran aquellas limitantes de la producción en el cultivo y sirvieran como referencia para transformar los datos de variables a indicadores en escala 0-1. Los indicadores más representativos fueron BT y CO, respectivamente, los cuales reflejaron condiciones del potencial de fertilidad de un suelo.

El ICESA calculado mostró que existió diferencia significativa entre el esquema intensivo y tradicional con confiabilidad del 95%, al igual se evidenció la diferencia mediante calificación por rangos de los valores obtenidos como alta calidad y muy alta calidad, respectivamente. En este estudio se propuso un cuadro de interpretación de resultados del ICESA, de manera que se pudiera ofrecer datos fácilmente transferibles acerca de la calidad del suelo analizado y se pudiera comparar igualmente dos o más conjuntos de prácticas realizadas en un agroecosistema de café.

LITERATURA CITADA

- Andrews, S.S., D.L. Karlen, and C.A. Cambardella. 2004. The soil management assessment framework. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1945-1962.
- Andrews, S.S., D.L. Karlen, and J.P. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agric. Ecosyst. Environ.* 90:25-45.
- Arcila, J., F. Farfán, A.M. Moreno, L.F. Salazar, y E. Hincapié. 2007. *Sistemas de producción de café en Colombia*. 1 ed. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - Cenicafé, Chinchiná, COL.
- Askari, M.S, and N.M. Holden. 2014. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma* 230:131-142.
- Balota, E.L., I. Yada, H. Amaral, A. Nakatani, M. Hungria, R. Dick, and M. Coyne. 2015. Soil quality in relation to forest conversion to perennial or annual cropping in southern Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 39:1003-1014.
- Bone, J., D. Barraclough., P. Eggleton., M. Head., D. Jones., and N. Voulvoulis. 2014. Prioritising soil quality assessment through the screening of sites: the use of publicly collected data. *Land Degradation Develop.* 25:251-266.
- Cantú, M., A. Becker, J. Bedano, y H. Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de los suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Cienc. Suelo* 25:173-178.
- Cardona, C., y S. Sadeghian. 2005. Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé* 56:348-364.
- Carvajal, A., A. Feijoo, H. Quintero, y M. Rondón. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 9:222-235.
- Cenicafé (Centro Nacional en Investigación en Café), 2014. Informe anual 2014 CENICAFÉ. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Fondo Nacional del Café, COL.
- Cerda, R. 2008. Calidad de los suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.), banano (*Musa* AAA) y plátano (*Musa* AAB) en el valle de Talamanca, Costa Rica. Tesis MSc., CATIE, Turrialba, CRC.
- Cerda, R., E. Somarriba, A. Tapia, W. Peña, and J. Crozier. 2012. Assessment of soil quality in agroforestry

- systems. In: VII Congresso Latinoamericano de Sistemas Agroflorestais para a Produção Pecuária Sustentável, 8-10 nov. Belem do Pará, BRA.
- Chavarría, N., A. Tapia, G. Soto, y E. Virginio. 2012. Efecto de diferentes sistemas de manejo sobre la calidad del suelo, en fincas cafetaleras de la zona de Turrialba y Orosí. *Intersedes* 13(26):85-105.
- Chen, Y.D., H.Y. Wang, J.M. Zhou, L. Xing, B.S. Zhu, Y.C. Zhao, and X.Q. Chen. 2013. Minimum data set for assessing soil quality in farmland of northeast China. *Pedosphere* 23:564-576.
- Delgado, E., J. Trejos, M. Villalobos, G. Martínez, D. Lobo, J.C. Rey, G. Rodríguez, F.E. Rosales, y L.E. Pocasangre. 2010. Determinación de un índice y salud de suelos para plantaciones bananeras en Venezuela. *Interciencia* 35:927-933.
- D'Hose, T., M. Cougnon, A. De Vlieghe, B. Vandecasteele, N. Viaene, W. Cornielis, E. Bockstaele, and D. Reheul. 2013. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Appl. Soil Ecol.* 75:189-198.
- Diacono, M., and F. Montemurro. 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30:401-422.
- Doran, J.W., and M.R. Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15:3-11.
- Farfán, F. 2014. Agroforestería y sistemas agroforestales con café. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-Cenicafé, Manizales, Caldas, COL.
- Farfán, F., y R.A. Jaramillo. 2009. Sombrío para el cultivo de café según nubosidad de la región. *Avances Técnicos Cenicafe* 379:1-9.
- Fox, J. 2005. The R commander: a basic statistics graphical user interface to R. *JSS* 14(9):1-42.
- Gómez, G.L., R.A. Caballero, y J.V. Baldión. 1991. *Ecotopos cafeteros de Colombia*. 1ª ed. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bogotá, COL.
- González, H. 2012. Opciones para el manejo eficiente de los fertilizantes: actualidad y perspectivas. 1ª ed. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Chinchiná, COL.
- González, H., S. Sadeghian, y A. Jaramillo. 2014. Épocas recomendables para la fertilización de cafetales. *Avances Técnicos Cenicafe* 442:1-12.
- Gugino, B.K., O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, H.M. van Es, D.W. Wolfe, B.N. Moebius-Clune, J.E. Thies, and G.S. Abawi, 2009. Cornell soil health assessment training manual. Cornell University College of Agriculture and Life Sciences, NY, USA.
- Hartl, W., B. Putz, and E. Erhart. 2003. Influence of rates and timing of biowaste compost application on rye yield and soil nitrate levels, *Eur. J. Soil Biol.* 39:129-139.
- He, Z., X. Yang, B.A. Kahn, P.J. Stoffella, and D.V. Calvert. 2001. Plant nutrition benefits of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and micronutrients from compost utilization, In: P.J. Stoffella, and B.A. Kahn, editors, *Compost utilization in horticultural cropping systems*. CRC Press LLC, USA p. 307-317.
- Husson, F., J. Josse, S. Le, and J. Mazet. 2012. FactoMineR: multivariate exploratory data analysis and data mining with R. R package version 1.18. <http://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR> (consultado 14 feb. 2015).
- Idowu, O.J., H.M. van Es, G.S. Abawi, D.W. Wolfe, R.R. Schindelbeck, B.N. Moebius-Clune, and B.K. Gugino. 2009. Use of an integrative soil health test for evaluation of soil management impacts. *Renew Agric. Food Syst.* 24:214-224.
- Karlen, D.L., C.A. Ditzler, and S.S. Andrews. 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114:145-156.
- MADR (Ministerios de Agricultura y Desarrollo Rural) 2006. Resolución N° 187: Reglamento para la producción de productos agropecuarios ecológicos. República de Colombia, Bogotá, COL.
- Mandal, B., B. Majumder, P.K. Bandyopadhyay, G.C. Hazra, A. Gangopadhyay, R.N. Samantaray, A.K. Mishra, J. Chaudhury, M.N. Saha, and S. Kundu. 2007. The potential of cropping systems and soil amendments for carbon sequestration in soils under long-term experiments in subtropical India. *Global Change Biol.* 13:357-369.
- Masto, R.E., P.K. Chhonkar, T.J. Purakayastha, A.K. Patra, and D. Singh. 2008. Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical India. *LDD* 19:516-529.
- Morvan, X., N. Saby, D. Arrouays, C. Le Bas, R.J.A. Jones, P. Bellamy, M. Stephens, and M.G. Kibblewhite. 2008. Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sci. Total Environ.* 391:1-12.
- Muschler, R. 1999. Árboles en cafetales. Módulo de enseñanza agroforestal N° 5. 1ª ed. CATIE, Turrialba, CRC.
- Nardi, S., F. Morari, A. Berti, M. Tosoni, and L. Giardini. 2004. Soil organic matter properties after 40 years of different use of organic and mineral fertilisers, *Eur. J. Agron.* 21:357-367.

- Nosrati, K. 2013. Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. *Environ. Monit. Assess.* 185:2895-2907.
- Obando, F.H., J. Montes, y M. Zuluaga. 2004. Desarrollo de indicadores de calidad inherente y dinámica de andisoles en el departamento de Caldas. En: I Taller Nacional sobre Indicadores de Calidad del Suelo. 20 – 22 oct. CIAT, COL.
- Paz-Kagan, T., M. Shachak, E. Zaady, and A. Karnieli. 2014a. A spectral soil quality index (SSQI) for characterizing soil function in areas of changed land use. *Geoderma* 230:171-184.
- Paz-Kagan, T., M. Shachak, E. Zaady, and A. Karnieli. 2014b. Evaluation of ecosystem responses to land-use change using soil quality and primary productivity in a semi-arid area, Israel. *Agric. Ecosyst. Environ* 193:9-24.
- Prieto-Mendez, J., F. Prieto-García, O. Acevedo-Sandoval, y M. Méndez. 2013. Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del Estado de Hidalgo, México. *Agron. Mesoam.* 24:83-91.
- Qi, Y., J.L. Darilek, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu province, China. *Geoderma* 149:325-334.
- R Development Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna, AUT. <http://www.R-project.org/> (consultado 14 feb. 2015).
- Rezaei, S.A., R.J. Gilkes, and S.S. Andrews. 2006. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma* 136:229-234.
- Rosatto-Moda, L., R.D. Mello-Prado, L. Castellanos-González, A. Reyes-Hernández, G. Caione, y C.N. Silva-Campos. 2014. Solubilización de fuentes de fósforo asociadas a un compuesto orgánico enriquecido con biofertilizantes. *Agrociencia* 48:489-500.
- Sadeghian, S. 2008. Fertilidad del Suelo y Nutrición del Café en Colombia. Cenicafé, Caldas, COL.
- Sadeghian, S. 2010a. Evaluación de la fertilidad del suelo para una adecuada nutrición de los cultivos. Caso café. *Suelos Ecuatoriales* 41:46-64.
- Sadeghian, S. 2010b. La materia orgánica: componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros. 1ª ed. Cenicafé, Caldas, COL.
- Sadeghian, S., y H. González. 2012. Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción. *Avances Técnicos Cenicafé* 424:1-8.
- Sadeghian, S., y H. González. 2014. Respuesta de almácigos de café a diferentes fuentes y dosis de nitrógeno. *Avances Técnicos Cenicafé* 447:1-4.
- Santanta, D.P., F. Bahia, and F.C. Antonio. 1998. Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado. In: World congress of soil science. 18 may. Montpellier, FRA.
- Saxton, K.E., and W. Rawls. 2004. Soil texture triangle: hydraulic properties calculator. <http://resources.hwb.wales.gov.uk/VTC/env-sci/module2/soils/soilwatr.htm> (consultado 15 oct. 2014).
- Tittarelli, F., G. Petruzzelli, B. Pezzarossa, M. Civilini, A. Benedetti, and P. Sequi. 2007. Quality and agronomic use of compost. In: L.F. Díaz et al., editors, *Compost science and technology, waste management, series 8*, Elsevier Ltd., HOL. p. 119-145.
- Velásquez, E., P. Lavelle, and M. Andrade. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 39:3066-3080.
- Veum, K.S., K.W. Goyne, R.J. Kremer, R.J. Miles, and K.A. Sudduth. 2014. Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. *Biogeochemistry* 117:81-99.
- Yao, R., J. Yang, P. Gao, J. Zhang, and W. Jing. 2013. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. *Soil Tillage Res.* 128:137-148.
- Yemefack, M., V.G. Jetten, and D.G. Rossiter. 2006. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. *Soil Tillage Res.* 86:84-98.
- Zamudio-Sánchez, A.M., M.L. Carrascal-Carrascal, C.E. Pulido-Roa, J.F. Gallardo, E.A. Ávila-Pedraza, M.A. Vargas-Alfonso, y D.F. Vera-Raigosa. 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. 6ª ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, COL.