

## DETERMINACIÓN DE DOS ÍNDICES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN LA CALIDAD DE LA TAZA DE CAFÉ<sup>a</sup>

### DETERMINATION OF TWO INDICES OF SOIL QUALITY INDICATORS IN COFFEE CUP QUALITY

MARIA LUISA ANAYA GÓMEZ<sup>b</sup>, DANIEL JARAMILLO JARAMILLO<sup>c</sup>

Recibido 14-06-2017, aceptado 10-08-2017, versión final 03-10-2017.

Artículo Investigación

**RESUMEN:** Se evaluaron algunas propiedades edáficas y foliares en 50 fincas cafeteras de seis municipios de Antioquia. Se determinaron dos índices de la calidad del suelo relacionados con la calidad de la taza de café mediante dos conjuntos de indicadores seleccionados por análisis de componentes principales (MDS1) y análisis de factores (MDS2). El contenido de azufre (S), la actividad enzimática (AE), el índice de Shanon (ISh), la respirometría (CO<sub>2</sub>) y los contenidos foliares de N (Nf), Mg (Mgf) y S (Sf) fueron indicadores comunes a los dos índices. Los mejores índices se presentaron en Ciudad Bolívar, finca La Carolina: ICS1 (1.32) e ICS2 (4.32). Los índices más bajos estuvieron en Urrao: ICS1 (finca El Cadillal: 0.82) e ICS2 (fincas El Rosal y El Cadillal: 2.50). El mayor índice general promedio lo presentó el ICS2 (3.19) y el menor el ICS1 (1.05). Se presentaron diferencias significativas en los índices entre ellos y entre núcleos. Se recomienda el uso del ICS2 por ser mayor y requerir menos variables: más económico y fácil de determinar.

**PALABRAS CLAVE:** Calidad de taza de café; indicadores de la calidad del suelo; suelos cafeteros; componentes principales; análisis de factores.

**ABSTRACT:** Some edaphic and foliar properties were assessed in 50 coffee farms in six municipalities of Antioquia. Two soil quality indexes related to coffee quality were determined using two sets of indicators selected by principal component analysis (MDS1) and factor analysis (MDS2). Sulfur content (S), enzyme activity (AE), Shanon index (ISh), respirometry (CO<sub>2</sub>) and foliar contents of N (Nf), Mg (Mgf) and S (Sf) were common indicators for both indices. The best indexes were presented in Ciudad Bolívar, La Carolina farm: ICS1 (1.32) and ICS2 (4.32). The lowest rates were in Urrao: ICS1 (El Cadillal farm: 0.82) and ICS2 (El Rosal and El Cadillal farms: 2.50). The highest overall index was presented by ICS2 (3.19) and the lowest by ICS1 (1.05). There were significant differences in the indices between them and between nucleuses. The use of ICS2 is recommended because it is higher and requires fewer variables: more economical and easier to determine.

<sup>a</sup>Anaya, M. & Jaramillo, D. (2017). Determinación de los índices de la calidad del suelo en la calidad de la taza de café. *Rev. Fac. Cienc.*, 6(2), 102–123. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n2.65667>

<sup>b</sup>Ingeniera Agrícola, Magíster en Ciencias – Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. [mlanaya@unal.edu.co](mailto:mlanaya@unal.edu.co)

<sup>c</sup>Ingeniero Agrónomo, MSc, Profesor Titular y Maestro Universitario. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. [djaramal@unal.edu.co](mailto:djaramal@unal.edu.co)

**KEYWORDS:** Coffee cup quality; soil quality indicators; coffee soils; main components; factorial analysis.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Soil Science Society of America (SSSA, 1997), Schoenholtz *et al.* (2000), Karlen *et al.* (2003) y Andrews *et al.* (2004) definen la calidad del suelo como “la capacidad de éste para funcionar dentro de los límites de un ecosistema para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de plantas y animales”. Además, afirman que la calidad en un suelo depende de sus propiedades, de su uso y/o las prácticas de manejo de la tierra.

La evaluación de la calidad del suelo puede utilizarse, como una herramienta que ayuda a optimizar la producción de alimentos, manteniendo la calidad ambiental del suelo y, como una medida de la sostenibilidad del suelo para generaciones futuras sometido a diferentes sistemas de manejo (Doran & Parkin, 1994).

Las propiedades del suelo que se utilizan para evaluar su calidad se denominan “indicadores de la calidad del suelo”: una propiedad medible que influye en la capacidad de un suelo para realizar una función. Ellos deben dar información útil para conocer el funcionamiento del suelo, ser accesibles para los usuarios y aplicables a las condiciones de manejo y clima en campo y ser económico de medir. Los indicadores son seleccionados de un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y forman el “conjunto mínimo de datos” (MDS) (Doran & Parkin, 1994; Schoenholtz *et al.*, 2000; Karlen *et al.*, 2003; Andrews *et al.*, 2004; Bastida *et al.*, 2008; Wienhold, 2009).

Según Glover *et al.* (2000), Andrews *et al.* (2002), Rezai *et al.* (2004), Qi *et al.* (2009) y Yu-Dong *et al.* (2013), el MDS para evaluar la calidad del suelo puede ser seleccionado utilizando la opinión de los expertos, las funciones de pedotransferencia o con procedimientos estadísticos multivariados. Luego de la selección del MDS, los indicadores son transformados, con funciones lineales o no lineales, a un sistema adimensional para ser incluidos en el índice de la calidad del suelo (ICS). Una vez transformados, los indicadores son ponderados de acuerdo con la importancia que tienen en la función del suelo que se estudia.

Los indicadores transformados y ponderados se integran en un índice que define la calidad del suelo para la función que se estudia y el método más utilizado para calcular dicho índice es el de la ecuación 1 (Andrews & Carroll, 2001; Andrews *et al.*, 2002).

$$ICS = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (1)$$

Donde: n= Número de indicadores;  $S_i$ = Calificación del indicador;  $W_i$ = Ponderación del indicador.

La calidad del café en taza está influenciada por las características físicas del grano, su contenido de humedad, sus defectos y la época de cosecha, aspectos que a su vez están afectados por la especie, la variedad, las prácticas de manejo del cultivo y del beneficio, con muy poca influencia de factores como altitud, material parental de los suelos, unidades de suelos y origen geográfico del café (Puerta *et al.*, 2016; Puerta, 2000; Marín *et al.*, 2003). La calidad del café también es afectada, según Puerta (2013), por deficiencia de agua, uso indiscriminado de plaguicidas, suelos con exceso de Ca o deficiencia de Fe, falta de higiene en los equipos y tiempos prolongados de secado.

En trabajos realizados en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (UN) se encontraron efectos significativos de la interacción variedad x núcleo (sitio geográfico) sobre la calidad de la taza. Así mismo se presentaron correlaciones significativas e inversas entre el tiempo de almacenamiento del café pergamino seco y los contenidos de Al y de Fe con la calidad de la taza. Además, hubo correlación inversa y significativa entre la altitud y la calidad de la taza en fincas sembradas con la variedad Caturra, explicada por la alta susceptibilidad de esta variedad a la roya en alturas bajas (UN & Gobernación de Antioquia, 2015).

El objetivo de este estudio fue determinar dos índices de calidad del suelo (ICS), con base en dos diferentes grupos de indicadores seleccionados mediante análisis de componentes principales (ACP) y análisis factorial (AF).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción de las áreas de estudio

El estudio se efectuó en 50 fincas cafeteras de los núcleos de Amalfi, Ciudad Bolívar, Giraldo, La Ceja del Tambo-El Retiro y Urrao, departamento de Antioquia. En cada núcleo se seleccionaron 10 fincas que representaron la mayor parte de la variabilidad en los factores de calidad de taza del café. Estas unidades de muestreo se localizaron en altitudes comprendidas entre los 1206 a los 2280 msnm, con precipitaciones promedias anuales variando entre 1800 y 3100 mm y temperaturas medias anuales entre 16 y 22°C.

### 2.2. Muestreo de suelos y foliar

En cada una de las fincas seleccionadas se estableció una parcela experimental de 2000 m<sup>2</sup> y se ubicaron cinco sitios en los vértices y el centro. Se midió el espesor del horizonte A y se colectaron muestras entre 20 y 25 cm del suelo que se mezclaron y homogeneizaron, y se tomaron 2 kg para realizar análisis químicos y biológicos y 500 g para determinar la retención de humedad a 33 y 1500 kPa y densidad real. Además, se tomó una muestra de 250 g de suelo para determinar su estabilidad estructural y otra con un cilindro biselado para densidad aparente. Además, se colectaron en la parcela entre 30 y 40 hojas del tercio medio

de 10 plantas de café escogidas al azar, para hacer análisis foliares.

### 3. Propiedades evaluadas

Se evaluaron las siguientes propiedades edáficas y foliares siguiendo las metodologías estándar presentadas a continuación (Jaramillo, 2014; IGAC, 2006):

- **Propiedades Físicas:** Espesor del horizonte A (EA, Cinta métrica, cm), resistencia a la penetración (RP, penetrómetro de bolsillo,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), estabilidad estructural en agua y en seco (DPMH y DPMS, Yoder, mm), densidad aparente (Da, Cilindro biselado,  $\text{Mg}/\text{m}^3$ ), densidad real (Dr, Picnómetro,  $\text{Mg}/\text{m}^3$ ), textura (Contenidos de arena (A) limo (L) y arcilla (Ar), Hidrómetro, %), coeficiente higroscópico (CH, Humedad gravimétrica, %), punto de marchitez permanente (PMP, Platos de presión, %), humedad a capacidad de campo (CC, Ollas de presión, %), agua aprovechable (AA, Diferencia entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo, %), porosidad total (Pt, Relación de densidades aparente y real, %), macroporosidad (Mpr, Diferencia entre porosidad total y microporosidad, %) y microporosidad (mp, Humedad volumétrica a capacidad de campo, %).
- **Propiedades Químicas:** pH (Potenciómetro en agua 1:1), conductividad eléctrica (CE, Extracto de saturación,  $\text{dS}/\text{m}$ ), contenido de materia orgánica (MO, Walckley-Black, %), contenidos de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) intercambiables (Extracción con  $\text{AcNH}_4$ , 1N, pH7 y Complejometría,  $\text{cmolc}/\text{kg}$  suelo), contenidos de Potasio (K) y Sodio (Na) intercambiables (Absorción atómica en extractos de  $\text{AcNH}_4$ , 1N, pH 7,  $\text{cmolc}/\text{kg}$  suelo), capacidad de intercambio catiónico (CIC7, Extracción con  $\text{AcNH}_4$ , 1N, pH 7,  $\text{cmolc}/\text{kg}$  suelo), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE, Suma de bases más acidez intercambiable,  $\text{cmolc}/\text{kg}$  suelo), saturación de bases con base en la capacidad de intercambio catiónico efectiva (SBE, Relación entre la suma de bases más acidez intercambiable y la capacidad de intercambio catiónica efectiva, %), contenido de Aluminio intercambiable (Al, Extracción con KCl 1M,  $\text{cmolc}/\text{kg}$  suelo), contenido de Fósforo disponible (P, Bray II,  $\text{mg}/\text{kg}$  suelo), contenido de Azufre (S, Fosfato monocálcico 0.008 M,  $\text{mg}/\text{kg}$  suelo), contenidos de Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Cobre (Cu) y Zinc (Zn) (Olsen-EDTA,  $\text{mg}/\text{kg}$  suelo) y contenido de Boro (B, Agua caliente,  $\text{mg}/\text{kg}$  suelo).
- **Propiedades Biológicas:** Actividad global de microorganismos ( $\text{CO}_2$ , Respirometría,  $\text{mg}$  de  $\text{CO}_2$  /g suelo seco/día), actividad enzimática (AE, FDA  $\text{mg}$  Fluoresceína/kg suelo/3 h), contenido de lombrices (NL, Conteo en un volumen de suelo de  $0.015 \text{ m}^3$ ), índice de Shanon (ISh, Adimensional) y biodiversidad microbiana (BM, incubación a  $100^\circ\text{C}$ , 24 horas y Conteo de UFC/g suelo).

- **Propiedades Foliares:** Contenido de Nitrógeno total (N, Kjeldhal, %), contenidos de Fósforo y Boro (P, B, Colorimetría, %), contenidos de Hierro, Manganeseo, Cobre y Zinc (Fe, Mn, Cu, Zn, Absorción atómica,  $\mu\text{g/g}$ ), contenidos de Calcio, Magnesio y Potasio (Ca, Mg, K, Absorción atómica, %), contenido de Azufre (S, Turbidimetría, %).

### 3.1. Calidad de la taza

Se recolectó el café cereza producido en los 2000 m<sup>2</sup> de la parcela experimental en cada finca, se secó en horno de gas a 75 °C por 18 horas y se almacenó entre 8 y 15 °C entre 30 y 60 días. La taza de café fue evaluada por cinco catadores del Proyecto Cafés Especiales de la Gobernación de Antioquia, mediante 10 atributos sensoriales según la Norma Técnica Colombiana 3566 (NTC 3566, 2011) y el protocolo de análisis sensorial de la Specialty Coffee Association of America (SCAA, 2014).

Tabla 1: Escala de calificación y clasificación de la calidad de la taza de café.

Puntaje final	Clasificación
95 – 100	Café de especialidad súper premium
90 – 94	Café de especialidad premium
85 – 89	Especialidad
80 – 84	Premium
75 – 79	Buena calidad
70 – 74	Calidad promedio
60 – 69	Café que no es taza limpia, no exportable
50 – 59	Rango comercial
40 – 49	Por debajo de estándares
<40	Fuera de norma

En una muestra de 400 g cada catador evaluó la calidad de la bebida de café según los atributos: fragancia y aroma (FA), sabor (Sb), sabor residual (SbR), acidez (Az), cuerpo (Cp), balance (Bn), uniformidad de taza (Ut), taza limpia (TL), dulzor (Dz) y puntaje del catador (PC). A cada atributo se le asignó un puntaje entre 0 y 10 y la suma de los puntajes de los 10 atributos (TT) define la calificación de la calidad de la taza, siendo 100 la calificación máxima obtenida por una taza de café. Con base en el protocolo citado, el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, elaboró la siguiente escala de calificación para la calidad de la taza de café (Tabla 1, sin publicar).

### 3.2. Selección de las propiedades potencialmente indicadoras

De las propiedades edáficas y foliares evaluadas se seleccionaron las que se presentan en la Tabla 2 para establecer los MDS. Se eligieron propiedades que representen varias propiedades y/o que la mayoría de

ellas han sido utilizadas como indicadores de la calidad del suelo por diferentes autores.

Tabla 2: Propiedades edáficas y de contenidos foliares de nutrientes para seleccionar los MDS.

Propiedades	Nombre y símbolo
Físicas	Espesor del horizonte A (EA, cm), densidad aparente (Da, Mg/m <sup>3</sup> ), diámetro ponderado medio húmedo (DPMH, mm), agua aprovechable (AA, %) y porosidad total (Pt, %).
Químicas	Materia orgánica (MO, %), contenido de aluminio intercambiable (Al, cmolc/kg de suelo), saturación de bases con base en la capacidad de intercambio catiónico efectiva (SBE, %), contenidos de fósforo (P, de suelo) y azufre (S, mg/kg de suelo).
Biológicas	Índice de Shannon (ISh), respirometría (CO <sub>2</sub> , mg CO <sub>2</sub> /g suelo seco /día) y actividad enzimática (AE, mg fluoresceína/kg suelo/3h).
Contenidos foliares de nutrientes	Nitrógeno (N, %), magnesio (Mg, %) y azufre (S, %).

Se establecieron dos MDS utilizando métodos estadísticos multivariados y las propiedades síntesis de la Tabla 2, uno por medio de un análisis de componentes principales (ACP), y otro, mediante un análisis de factores (AF). En el primero se seleccionaron los componentes principales (CP) que tuvieron valores propios (VP) mayores a uno y en cada componente se extrajeron las propiedades que presentaron un peso mayor o igual al 10% del VP del respectivo componente (Andrews & Carroll, 2001; Rezai *et al.*, 2004). En el segundo se seleccionaron los factores que presentaron un VP mayor a uno y de cada factor se retuvieron las propiedades que presentaron una carga factorial mayor a 0.75, debido a que se trabajó con 50 muestras (Hair *et al.*, 2004).

En cada uno de los dos conjuntos de propiedades preseleccionadas se llevó a cabo un análisis de redundancia para definir el MDS final (Andrews & Carroll, 2001; Rezai *et al.*, 2004). Se hicieron un análisis de correlación lineal (ACL) entre las variables seleccionadas inicialmente y se consideraron redundantes aquellas que presentaron un coeficiente de correlación mayor a 0.7 entre ellas. Luego, se realizó un nuevo ACL entre las propiedades redundantes para seleccionar las que tuvieran mejor correlación y se hizo la sumatoria de los valores absolutos de los coeficientes de correlación de cada propiedad, eliminando la propiedad de cada pareja que presentó la menor sumatoria. Todas las variables que no fueron redundantes ( $r < 0.7$ ) se incluyeron en el respectivo MDS.

### 3.3. Calificación de los indicadores

A cada indicador se le asignó una calificación de acuerdo con el efecto esperado de él sobre la calidad de la taza de café. Esta calificación se realizó según los métodos “más es mejor” y “menos es mejor” utilizados por Glover *et al.* (2000), Andrews *et al.* (2002) y Rezai *et al.* (2004), como se indica: indicadores donde

“más es mejor”: se utiliza para indicadores en los cuales el efecto en la función que se estudia aumenta a medida que aumenta el valor del indicador. Se construye dividiendo cada valor del indicador por el mayor valor observado de él, y el mayor valor observado obtiene una calificación de uno. Indicadores donde “menos es mejor”: se utiliza con los indicadores en que el efecto en la función aumenta cuando disminuye el valor del indicador. Para la calificación se divide el menor valor observado por cada observación, y el menor valor obtiene una calificación de uno.

### 3.4. Ponderación de los indicadores de la calidad del suelo

Se ponderaron los indicadores según el método de selección de los MDS al que pertenecieron. En el MDS1 se tomó como ponderador el resultado de dividir el porcentaje de la varianza explicado por el CP seleccionado, por el porcentaje de varianza acumulada por todos los CP que tuvieron  $VP > 1$ . El resultado obtenido en cada CP se le asignó como ponderador a los indicadores seleccionados en el respectivo CP (Andrews *et al.*, 2002). En el MDS2 a los indicadores se les asignó como ponderador el valor de la comunalidad del AF (Qi *et al.*, 2009; Yu-Dong *et al.*, 2013). Los ponderadores de cada MDS se incluyeron en valor absoluto en los índices de calidad.

### 3.5. Cálculo del índice de calidad del suelo (ICS)

Transformados los indicadores y definidos los ponderadores respectivos para cada MDS se calcularon los correspondientes ICS en cada finca con ambos MDS, con la ecuación 1.

### 3.6. Evaluación de los índices de calidad del suelo (ICS)

Se realizó mediante análisis de correlación lineal y no lineal entre las propiedades respuesta (calidad de la taza) y los ICS obtenidos. Se realizó, además, un análisis de comparación de promedios entre diferentes índices para los diferentes núcleos mediante la prueba de múltiples rangos que permitió determinar si los índices representaban una o varias poblaciones. Finalmente, se tomó como mejor índice el que presentó el mayor valor.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Definición del MDS1 con base en análisis de componentes principales

De este análisis resultaron 16 CP de los cuales los cinco primeros presentaron  $VP > 1$  y explicaron el 72.65 % de la varianza acumulada (Tabla 3). En la Tabla 4 se presentan los pesos de las variables en los cinco prime-

ros CP y se resaltan en negrilla las propiedades que dentro de cada CP presentaron un peso en él equivalente o mayor al 10 % del valor propio del componente.

Tabla 3: Componentes principales con valor propio >1 y varianza explicada por ellos.

Componente	Valor propio	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulado
1	4.86	30.37	30,37
2	2.58	16.1	46.47
3	1.7	10.63	57.11
4	1.42	8.86	65.97
5	1.07	6.69	72.65

Tabla 4: Peso de las variables en los cinco primeros componentes principales. En negrilla las propiedades con peso significativo en el respectivo componente.

Propiedad	Componente				
	1	2	3	4	5
EA	0.13	<b>0.27</b>	-0.03	0.04	<b>0.16</b>
Da	-0.42	-0.02	0.06	0.12	-0.10
DPMH	-0.26	-0.23	<b>-0.27</b>	-0.11	-0.02
AA	0.34	-0.08	-0.15	-0.03	<b>0.21</b>
Pt	0.42	0.00	-0.06	-0.13	0.07
MO	0.42	0.03	-0.09	<b>0.15</b>	0.04
Al	0.23	<b>-0.46</b>	0.05	<b>0.22</b>	-0.02
SBE	-0.27	<b>0.40</b>	-0.06	-0.05	<b>0.28</b>
P	-0.04	0.07	<b>0.34</b>	<b>0.33</b>	<b>0.25</b>
S	-0.01	<b>-0.40</b>	-0.07	<b>0.14</b>	<b>0.52</b>
ISh	-0.04	0.23	<b>0.39</b>	0.11	<b>0.48</b>
CO <sub>2</sub>	0.32	<b>0.27</b>	<b>0.19</b>	-0.01	-0.04
AE	-0.04	<b>-0.34</b>	<b>0.48</b>	<b>-0.25</b>	0.03
Nf	-0.17	-0.20	-0.14	<b>0.48</b>	<b>0.19</b>
Mgf	0.05	0.00	<b>0.42</b>	<b>0.45</b>	<b>-0.47</b>
Sf	-0.04	-0.20	<b>0.38</b>	<b>-0.50</b>	0.10

EA: Espesor del horizonte A (cm). Da: Densidad aparente ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ). DPMH: Diámetro ponderado medio en húmedo (mm). AA: Agua aprovechable (%).Pt: Porosidad total (%). MO: Contenido de materia orgánica (%). Al: Contenido de aluminio intercambiable ( $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$  de suelo). SBE: Saturación de bases con base en la capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo (%) P y S: Contenidos de fósforo y azufre disponibles, respectivamente ( $\text{mg}/\text{kg}$  de suelo). ISh: Índice de Shanon. CO<sub>2</sub>: Respirimetría ( $\text{mg CO}_2 / \text{g}$  suelo seco / día). AE: Actividad enzimática ( $\text{mg Fluoresceína}/\text{kg}$  suelo / 3h). Nf, Mg, Sf: Contenidos foliares de nitrógeno, magnesio y azufre, respectivamente (%).

De los resultados de la Tabla 4, los posibles indicadores de calidad del suelo extraídos por los CP son EA,



DPMH, AA, MO, Al, SBE, P, S, ISh, CO<sub>2</sub>, AE, Nf, Mgf y Sf. En la Tabla 5 se presenta los coeficientes de correlación lineal entre las propiedades extraídas con el ACP, observándose redundancia ( $r > 0.7$ ) entre MO y AA y entre Al y SBE, debido a la alta capacidad de retención de agua que tiene la MO y a que el Al se presentó como el catión de intercambiable dominante en los suelos (Jaramillo, 2014). Después de comparar los respectivos coeficientes de correlación totales de las variables redundantes se eliminaron AA y SBE (Tabla 6) y el MDS1 se conformó con los indicadores EA, DPMH, MO, Al, P, S, CO<sub>2</sub>, AE, ISh, Nf, Mgf y Sf, algunos de ellos utilizados como indicadores por Doran & Parkin (1994), Karlen *et al.* (2003), Schoenholtz *et al.* (2000), Andrews *et al.* (2002), Arshad & Martin (2002), Sharma *et al.* (2005), Evanylo & Mcguinn (2009), Wienhold (2009) y Alves *et al.* (2013). Los indicadores Al, ISh, Nf, Mgf y Sf no han sido reportados en la literatura revisada.

Tabla 5: Coeficientes de correlación lineal entre propiedades seleccionadas inicialmente para el MDS1. En negrilla coeficientes de correlación entre variables redundantes ( $r > 0.7$ ).

Propiedad	EA	DPMH	AA	MO	Al	SBE	P	S	ISh	CO <sub>2</sub>	AE	Nf	Mgf
DPMH	-0.24												
AA	0.09	-0.31											
MO	0.21	-0.46	<b>0.72</b>										
Al	-0.16	-0.10	0.40	0.46									
SBE	0.03	0.15	-0.32	-0.47	<b>-0.86</b>								
P	0.07	-0.10	-0.20	-0.01	-0.05	0.11							
S	-0.12	0.27	0.14	0.00	0.44	-0.25	0.00						
ISh	0.05	-0.26	-0.11	-0.08	-0.18	0.36	0.17	-0.02					
CO <sub>2</sub>	0.38	-0.54	0.43	0.63	0.07	-0.14	0.02	-0.26	0.19				
AE	-0.19	0.05	-0.03	-0.28	-0.28	-0.28	0.09	0.27	0.02	-0.16			
Nf	-0.13	0.24	-0.08	-0.20	0.12	0.09	0.13	0.26	-0.08	-0.44	-0.01		
Mgf	-0.02	-0.20	-0.06	0.13	0.17	-0.20	0.18	-0.12	0.14	0.25	0.17	0.05	
Sf	-0.16	0.06	-0.07	-0.20	0.06	-0.12	0.03	0.04	0.04	-0.06	0.52	-0.08	-0.11

EA: Espesor del horizonte A (cm). DPMH: Diámetro ponderado medio en húmedo (mm). AA: Agua aprovechable (%). MO: Contenido de materia orgánica (%). Al: Contenido de aluminio intercambiable (cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo). SBE: Saturación de bases con base en la capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo (%). P y S: Contenidos de fósforo y azufre disponibles, respectivamente (mg/kg de suelo). ISh: Índice de Shanon. CO<sub>2</sub>: Respirimetría (mg CO<sub>2</sub> / g suelo seco / día). AE: Actividad enzimática (mg Fluoresceína / kg suelo / 3h). Nf, Mgf, Sf: Contenidos foliares de nitrógeno, magnesio y azufre, respectivamente (%).

#### 4.2. Definición del MDS2 con base en análisis de factores (AF)

Siguiendo la metodología de Qi *et al.* (2009) y Yu-Dong *et al.* (2013) se realizó el AF para seleccionar el MDS2 (Tablas 7 y 8). En este análisis los primeros cinco factores presentaron VP>1 y un porcentaje de varianza acumulada de 72.26 %. Fueron seleccionados como posibles indicadores Da, AA, Pt, MO, S, AE, Sf, ISh y Mgf.

Tabla 6: Suma de coeficientes de correlación de propiedades redundantes para el MDS1.

Propiedad	AA	MO	Al	SBE
AA	-1.00	0.72	0.40	0.32
MO	0.72	1.00	0.46	0.47
Al	0.40	0.46	1.00	0.86
SBE	0.32	0.47	0.86	1.00
$\Sigma$	2.44	2.65	2.72	2.65

AA: Agua aprovechable (%). MO: Contenido de materia orgánica (%). Al: Contenido de aluminio intercambiable (cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo). SBE: Saturación de bases a capacidad de intercambio catiónico efectiva (%).

Los resultados de la Tabla 9 muestran redundancia entre MO con Da, AA y Pt y entre Da y Pt debido a la capacidad de almacenar agua y a la alta porosidad que tiene la MO (Jaramillo, 2014). Después de analizar los coeficientes de correlación totales entre estas variables (Tabla 10) se eliminaron MO, AA y Pt, quedando el MDS2 conformado por los siguientes indicadores Da, S, ISh, AE, Mgf y Sf, algunos utilizados en trabajos previos como se indicó en MDS1.

Tabla 7: Factores con valor propio (VP) &gt;1 y varianza explicada por ellos.

Factor	Valor propio	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulado
1	4.81	30.08	30.08
2	2.59	16.16	46.24
3	1.69	10.57	56.81
4	1.50	8.78	65.58
5	1.07	6.68	72.26

En la Tabla 11 se aprecian los dos MDS establecidos. Es notable la diferencia composicional que se presentó entre los dos grupos, sobre todo en los indicadores físicos y químicos seleccionados en cada uno. El AF fue más eficiente en la reducción de variables, posiblemente porque analiza la varianza común o compartida entre las variables, a diferencia del ACP que considera la varianza total de las propiedades (Hair *et al.*, 2004). La presencia de las propiedades biológicas confirma que el componente biótico del suelo puede tener un efecto importante sobre la calidad de la producción agrícola, como lo sugieren Bastida *et al.* (2008) y Alves *et al.* (2013) al afirmar que la inclusión de los indicadores biológicos que evalúan la actividad y la respiración microbiales en los MDS tiene un efecto relevante para la agricultura y el ambiente. Estos indicadores muestran la capacidad oxidativa de los microorganismos del suelo, la cual es influenciada por la fuente de energía del suelo y el número de individuos en él, y cuyo efecto varía según los factores climáticos, prácticas

Tabla 8: Carga y comunalidad de las variables en los cinco primeros factores después de rotación varimax. En negrilla las propiedades con carga en el factor >0.75.

Propiedad	Carga en el factor					Comunalidad
	1	2	3	4	5	
EA	0.31	-0.21	-0.27	0.30	-0.13	0.32
Da	<b>-0.95</b>	0.10	0.01	0.06	0.05	0.91
DPMH	-0.51	0.31	0.02	-0.39	-0.27	0.58
AA	<b>0.79</b>	0.17	-0.04	-0.08	-0.10	0.67
Pt	<b>0.93</b>	-0.11	0.02	-0.10	-0.03	0.89
MO	<b>0.91</b>	0.02	-0.22	-0.02	0.16	0.90
Al	0.50	0.55	0.27	-0.27	0.41	0.86
SBE	-0.53	-0.28	-0.32	0.43	-0.45	0.86
P	-0.07	0.17	0.01	0.60	0.24	0.46
S	0.09	<b>0.81</b>	0.21	0.02	-0.16	0.74
ISh	-0.05	-0.09	0.08	<b>0.79</b>	-0.04	0.64
CO <sub>2</sub>	0.67	-0.45	-0.08	0.28	0.18	0.77
AE	-0.09	0.17	<b>0.84</b>	0.05	0.19	0.77
Nf	-0.33	0.67	-0.25	0.07	0.11	0.64
Mgf	-0.03	-0.09	-0.01	0.17	<b>0.89</b>	0.83
Sf	-0.06	-0.09	<b>0.84</b>	0.03	-0.15	0.74

EA: Espesor del horizonte A (cm). Da: Densidad aparente (Mg/m<sup>3</sup>). DPMH: Diámetro ponderado medio en húmedo (mm). AA: Agua aprovechable (%). Pt: Porosidad total (%). MO: Contenido de materia orgánica (%). Al: Contenido de aluminio intercambiable (cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo). SBE: Saturación de bases con base en la capacidad de intercambio catiónico efectiva del suelo (%). P y S: Contenidos de fósforo y azufre disponibles, respectivamente (mg/kg de suelo). ISh: Índice de Shanon. CO<sub>2</sub>: Respirimetría (mg CO<sub>2</sub>/g suelo seco/día). AE: Actividad enzimática (mg Fluoresceína/kg suelo/3h). Nf, Mg, Sf: Contenidos foliares de nitrógeno, magnesio y azufre, respectivamente (%).

de manejo, enmiendas y la contaminación. Además, la diversidad microbial está íntimamente relacionada con la estructura de las comunidades biológicas y su función en la interacción ciclo de nutrientes - relación hídrica - soporte para las plantas es crítica en la calidad del suelo (Andrews *et al.*, 2002).

De los indicadores seleccionados sólo el Al ha sido reportado en la literatura como un factor influyente en la calidad del café en taza; ninguno de los otros indicadores se ha relacionado con dicha calidad de taza (UN & Gobernación de Antioquia, 2015).

## 5. CALIFICACIÓN DE INDICADORES DE LOS CONJUNTOS MÍNIMOS DE DATOS

Después de determinar las propiedades de cada MDS se realizó la calificación de los indicadores seleccionados utilizando una técnica de calificación lineal con criterios de “más es mejor” o “menos es mejor”, teniendo en cuenta si un alto valor es bueno o malo en términos de la función del suelo. Se utilizaron

Tabla 9: Coeficientes de correlación lineal entre propiedades seleccionadas inicialmente para el MDS2. En negrilla coeficientes de correlación entre variables redundantes ( $r > 0.7$ ).

Propiedad	Da	AA	Pt	MO	S	ISh	CO <sub>2</sub>	AE	Nf	Mgf
AA	-0.67									
Pt	<b>-0.99</b>	0.65								
MO	<b>-0.84</b>	<b>0.72</b>	<b>0.83</b>							
S	0.02	0.14	-0.03	0.00						
ISh	0.10	-0.11	-0.13	-0.08	-0.02					
CO <sub>2</sub>	-0.62	0.43	0.58	0.63	-0.26	0.19				
AE	0.09	-0.03	-0.07	-0.28	0.27	0.02	-0.16			
Nf	0.37	-0.08	-0.37	-0.20	0.26	-0.08	-0.44	-0.01		
Mgf	0.05	-0.06	-0.05	0.13	-0.12	0.14	0.25	0.17	0.05	
Sf	0.06	-0.07	-0.05	-0.20	0.04	0.04	-0.06	0.52	-0.08	-0.11

Da: Densidad aparente (Mg/m<sup>3</sup>). AA: Agua aprovechable (%). Pt: Porosidad total (%). MO: Contenido de materia orgánica. S: Contenido de azufre disponible (mg/kg de suelo). ISh: Índice de Shanon. CO<sub>2</sub>: Respirometría (mg CO<sub>2</sub>/g suelo seco/día). AE: Actividad enzimática (mg Fluoresceína/kg suelo/3h). Nf, Mg, Sf: Contenidos foliares de nitrógeno, magnesio y azufre, respectivamente (%).

Tabla 10: Suma de coeficientes de correlación para análisis de redundancia del MDS2.

Propiedad	Da	AA	Pt	MO
Da	1	0.67	0.99	0.84
AA	0.67	1	0.65	0.72
Pt	0.99	0.65	1	0.83
MO	0.84	0.72	0.83	1
$\Sigma$	<b>3.51</b>	<b>3.04</b>	<b>3.47</b>	<b>3.40</b>

Da: Densidad aparente (Mg/m<sup>3</sup>). AA: Agua aprovechable (%). Pt: Porosidad total (%). MO: Contenido de materia orgánica (%).

como criterios de calificación y análisis los niveles críticos que para la nutrición del café y los contenidos foliares de nutrientes normales en café que propone Sadeghian (2013), así como valores críticos establecidos en la literatura para propiedades del suelo agrícola Jaramillo (2014). La mayoría de valores (más del 80 %) estuvieron dentro de los rangos adecuados para la producción de café por lo que los indicadores EA, DPMH, MO, P, S, AE, ISh, CO<sub>2</sub>, Nf, Mg y Sf se calificaron con el criterio de “más es mejor”, mientras que Da y Al fueron calificados con la opción “menos es mejor”.

### 5.1. Ponderación de indicadores de los conjuntos mínimos de datos

En la Tabla 12 se presentan los ponderadores utilizados en cada MDS determinados como se indicó en la metodología. Nótese que los ponderadores del MDS2 son mayores que en el MDS1 debido a los altos valo-

Tabla 11: Indicadores de calidad en cada conjunto mínimo de datos (MDS)

Indicadores	Conjunto mínimo de datos	
	MDS1	MDS2
Físicos	EA y DPMH	Da
Químicos	MO, Al, P y S	S
Biológicos	CO <sub>2</sub> , AE e ISh	ISh y AE
Foliare	Nf, Mgf y Sf	Mgf y Sf

EA: Espesor del horizonte A (cm). DPMH: Diámetro ponderado medio en húmedo (mm). Da: Densidad aparente ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ). MO: Contenido de materia orgánica. Al: Contenido de aluminio intercambiable ( $\text{cmol (+)} \text{kg}^{-1}$  de suelo). P y S: Contenidos de fósforo y azufre disponibles, respectivamente ( $\text{mg}/\text{kg}$  de suelo). ISh: Índice de Shanon. CO<sub>2</sub>: Respirimetría ( $\text{mg CO}_2/\text{g}$  suelo seco/día). AE: Actividad enzimática ( $\text{mg Fluoresceína}/\text{kg}$  suelo/3h). Mgf, Nf y Sf: Contenidos foliares de magnesio, nitrógeno, y azufre, respectivamente (%).

Conjuntos mínimos de datos con base en análisis de componentes principales (1) y de factor (2).

res obtenidos para la comunalidad de las variables incluidas en él.

Tabla 12: Ponderadores asignados a los indicadores de calidad del suelo.

Indicador	MDS1	MDS2
EA	0.22	-
DPMH	0.15	-
Da	-	0.91
MO	0.12	-
Al	0.22	-
P	0.15	-
S	0.22	0.74
ISh	0.15	0.64
CO <sub>2</sub>	0.22	0.77
AE	0.22	0.77
Nf	0.12	0.64
Mgf	0.15	0.83
Sf	0.22	0.73

EA: Espesor del horizonte A (cm). DPMH: Diámetro ponderado medio en húmedo (mm). Da: Densidad aparente ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ). MO: Contenido de materia orgánica (%). Al: Contenido de aluminio intercambiable ( $\text{cmol (+)} \text{kg}^{-1}$  de suelo). P y S: Contenidos de fósforo y azufre disponibles, respectivamente ( $\text{mg}/\text{kg}$  de suelo). ISh: Índice de Shanon. CO<sub>2</sub>: Respirimetría ( $\text{mg CO}_2/\text{g}$  suelo seco/día). AE: Actividad enzimática ( $\text{mg Fluoresceína}/\text{kg}$  suelo/3h). Nf, Mgf y Sf: Contenidos foliares de magnesio, nitrógeno, y azufre, respectivamente (%).

Conjuntos mínimos de datos con base en análisis componentes principales (1) y de factor (2).

## 5.2. Cálculo de los índices de la calidad del suelo (ICS)

Obtenidas  $S_i$  y  $W_i$  de los indicadores en cada MDS, se calculó el respectivo ICS para cada una de las fincas estudiadas utilizando la ecuación 1. A nivel de finca, Urrao presentó los menores índices de calidad: ICS1 (finca El Cadillal, 0.82) e ICS2 (finca El Rosal, 0.84), y los mayores índices se tuvieron en la finca La Carolina (ICS1: 1.32 y ICS2: 4.32) de Ciudad Bolívar. El ICS1 promedio fue de 1.04 y varió entre 0.82 y 1.45, mientras que el ICS2 mostró un promedio de 3.19 y varió entre 2.5 y 4.32. Al analizar los ICS por núcleo, Giraldo presentó el mayor ICS1 promedio (1.11) y el de Ciudad Bolívar el mayor ICS2 (3.49). Los menores índices promedios estuvieron en los núcleos de Urrao (ICS1: 0.97) y La Ceja del Tambo-El Retiro (ICS2: 3.06). Además, el análisis de comparación de medias mostró diferencias significativas en promedios, tanto entre núcleos como entre índices (Tabla 15). El núcleo con las mejores condiciones de calidad del suelo fue Ciudad Bolívar por tener el mejor índice promedio en las 10 fincas estudiadas en él, a diferencia de La Ceja-El Retiro que presentó el índice más bajo. Al comparar los valores de los índices obtenidos es evidente el gran impacto que tuvo la ponderación de los indicadores con la comunalidad de ellos en el ICS2 (Qi *et al.*, 2009). Las diferencias entre los ICS fueron significativas estadísticamente al 95 %. En la Tabla 13 se muestra que el ICS2 presentó los mayores valores para todas las fincas lo que indica que el manejo agronómico del cultivo de café debe focalizarse en mejorar la calidad biológica y la nutrición foliar de las plantas para obtener una bebida de café de alta calidad.

En la Tabla 15 se muestra el promedio por núcleo de los dos índices calculados, y sus respectivos coeficientes de variación (CV). El ICS2 presentó los mayores valores promedios en todos los núcleos y la menor variabilidad general. El núcleo de Giraldo presentó el mayor promedio para ICS1 y el núcleo de Ciudad Bolívar mostró el mayor promedio para ICS2. El menor ICS1 promedio estuvo en el núcleo de Urrao (ICS1) y en La Ceja del Tambo-El Retiro, el menor ICS2. Se presentaron diferencias significativas en promedios, tanto entre núcleos como entre índices. Al comparar los valores de los índices obtenidos es evidente el gran impacto que tuvo la ponderación de los indicadores con la comunalidad de ellos en el ICS2.

## 5.3. Evaluación de la calidad de la taza de café

A los atributos  $U_t$ ,  $T_L$  y  $D_z$  todos los catadores le dieron una calificación de 10, y en una de las fincas de Urrao, tres catadores no reportaron calificaciones para los atributos de calidad. En términos generales, se observó una baja variabilidad en los atributos, y distribuciones simétricas en todos, excepto en  $T_T$  y  $S_b$ , aunque ninguno presentó distribución normal. Todos los atributos presentaron calificaciones superiores a 7 en el 75 % de los registros y en el  $T_T$  el 75 % de las fincas obtuvo puntajes superiores a 81 (Tabla 16).

La Tabla 17 muestra diferencias significativas entre núcleos en casi todos los atributos de la calidad de la taza de café, excepto en  $F_A$ , posiblemente por diferencias en las variedades cultivadas, los métodos de beneficio y / o factores ambientales como clima (Puerta, 2013; Puerta *et al.*, 2016) y altitud (Buenaventura

Tabla 13: Índices de la calidad del suelo (ICS) calculados con diferentes MDS en las 50 fincas cafeteras evaluadas en el departamento de Antioquia.

Finca	Variedad	ICS1	ICS2
<b>Amalfi</b>			
La Frijolera	Colombia	1.04	3.21
Los Alpes	Colombia	1.1	3.39
La Rosa	Castillo	0.94	2.74
Los Pinos	Castillo	0.92	2.92
Guayacanes	Colombia	0.98	3.28
La Gurría	Castillo	0.93	2.85
Los Planes	Catimor	1.05	3.52
La Bamba	Colombia	0.94	2.86
La Pastorona	Caturra	1.09	3.72
La Brisalda	Colombia	1.06	3.45
<b>Ciudad Bolívar</b>			
La Palomera	Catimor	1.11	3.45
El Porvenir	Colombia	1.10	3.44
La María	Castillo	1.21	3.60
Los Naranjos	Castillo	1.05	3.23
La Carolina	Castillo	1.32	4.32
Santa Ana	Maragogipe	1.01	3.27
Aguas Frías	Castillo	1.14	3.32
Montenegro-Vuelta Bonita	Caturra	0.94	3.00
Aguas Claras	Castillo	1.11	3.86
El Privilegio	Castillo	1.04	3.38

Índices de la calidad del suelo calculados con base en MDS1, MDS2, respectivamente.

& Castaño, 2002; UN & Gobernación de Antioquia, 2015). El núcleo de Giraldo tuvo los mayores promedios en todos los atributos de calidad de la taza, lo que puede estar relacionado directamente con el mayor promedio en altitud observado en él y porque presentó los suelos con mejores condiciones nutricionales para el café (Buenaventura & Castaño, 2002; UN & Gobernación de Antioquia, 2015).

Ciudad Bolívar y Urrao fueron los núcleos con calificaciones más deficientes, siendo el último el que presentó el menor promedio en TT. En Ciudad Bolívar y Urrao se presentó la mayor variabilidad en los atributos evaluados, siendo la subregión del suroeste antioqueño la de mayor variabilidad en la calidad de la taza de café, posiblemente debido a que en ella se presenta también la mayor variabilidad ambiental.

Al realizar la clasificación general de la calidad de la taza (Tabla 1), en el 6% de las fincas la clasificación de la taza correspondió a café de Especialidad, en el 88% a café de calidad Premium, en el 4% a café de Buena Calidad, en otro 4% a café de calidad promedio y fuera de norma en el 2% de las fincas. Las mejores

Tabla 14: Continuación. Índices de la calidad del suelo (ICS) calculados con diferentes MDS en las 50 fincas cafeteras evaluadas en el departamento de Antioquia.

Finca	Variedad	ICS3	ICS4
Giraldo			
La Zunga 2	Castillo	1.16	3.02
La Ciénaga	Catimor	1.02	3.04
La Zunga	Colombia	1.10	2.87
El Arrayanal	Maragogipe	0.9	2.90
La Modesta	Castillo	1.05	3.03
La Falda del Centro	Castillo	1.05	2.96
Durazno	Caturra	1.15	3.06
Montero	Castillo	1.45	3.99
El Guayabo	Castillo	1.22	3.32
El Chuscal	Caturra	1.02	2.98
La Ceja del Tambo-El Retiro			
La Argentina	Caturra	1.29	3.11
La Naviera	Colombia	0.83	2.77
San José	Colombia	0.99	3.09
El Diamante	Colombia	1.19	3.27
Buenos Aires	Colombia	1.01	3.12
La Mansión	Colombia	1.00	3.13
El Mirador	Castillo	1.03	3.11
El Danubio	Castillo	1.00	3.23
La Marsella	Catimor	0.97	2.89
Mi Cafetal	Castillo	1.04	2.85
Urrao			
El Cadillal	Colombia	0.82	2.50
La Esperanza Gulunga	Caturra	1.05	3.36
El Rosal	Castillo	0.84	2.50
Bellavista	Colombia	1.01	3.60
El Placer	Catimor	1.07	3.37
El Tigre	Castillo	0.85	2.91
La Mata de Guadua	Castillo	1.02	3.44
Las Flores	Castillo	1.07	3.20
La Falda	Caturra	0.96	3.04

Índices de la calidad del suelo calculados con base en MDS1, MDS2, respectivamente.

calificaciones de café de Especialidad se presentaron en las fincas: Montenegro y Vuelta Bonita de Ciudad Bolívar (variedad Caturra), El Arrayanal de Giraldo (variedad Maragogipe) y Bellavista de Urrao (variedad Colombia), mientras que la finca La Falda de Urrao tuvo la calificación más baja.



Tabla 15: Índices de la calidad del suelo promedios en los 5 núcleos cafeteros evaluados en el departamento de Antioquia. Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa, al 95 %, entre núcleos

Núcleo	ICS1	CV (%)	ICS2	CV (%)
Amalfi	1.00bc	6.99	3.19ab	10.47
Ciudad Bolívar	1.10ab	9.65	3.49a	10.64
Giraldo	1.11a	13.38	3.12b	10.59
La Ceja-El Retiro	1.03abc	12.07	3.06b	5.39
Urrao	0.97c	10.63	3.10b	12.87

Índices de la calidad del suelo calculados con base en MDS1, MDS2, respectivamente.

Tabla 16: Estadísticos básicos de los atributos organolépticos de café de las 50 fincas cafeteras estudiadas en el departamento de Antioquia (n=247).

Variable	Promedio	Mediana	DE	CV (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Sesgo	S-W
TT	82.50	82.5	2.83	3.43	70	91.5	81	84	-4.63	3.14E-07
FA	7.87	8	0.39	4.91	6	9	7.5	8	-1.89	3.48E-13
Sb	7.59	7.5	0.46	6.02	6	9	7.5	7.75	-3.27	0
SbR	7.36	7.5	0.43	5.90	6	9	7	7.5	-0.70	1.55E-15
Az	7.54	7.5	0.42	5.61	6	8.5	7.25	7.75	-1.46	5.51E-11
Cp	7.40	7.25	0.43	5.78	6	8.5	7	7.75	0.12	0
Bn	7.43	7.5	0.39	5.27	6	8.75	7	7.75	0.31	1.33E-15
PC	7.44	7.5	0.46	6.20	6	8.75	7	7.75	-1.80	0

Estadísticos básicos: DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. S-W: Valor P de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (si S-W>0.05 la distribución es normal).

Atributos organolépticos: TT: Puntaje total de la taza. FA: Fragancia aroma. Sb: Sabor. SbR: Sabor residual. Az: Acidez. Cp: Cuerpo. Bn: Balance. PC: Puntaje catador.

#### 5.4. Evaluación de los índices de calidad del suelo (ICS)

La Tabla 18 muestra una fuerte correlación lineal entre ICS1 e ICS2, hasta el punto de ser redundantes, debido posiblemente a que siete propiedades (S, CO<sub>2</sub>, AE, ISh, Nf, Mgf y Sf) fueron indicadores comunes en los MDS que los definieron. Dado este resultado, cualquiera de los dos índices describe el mismo efecto en la calidad de la taza de café. No se presentaron correlaciones significativas estadísticamente entre los índices de calidad del suelo y la calidad de la taza, probablemente debido a la ausencia de correlación entre casi todos los indicadores de calidad del suelo y las propiedades de calidad de la taza (Tabla 18).

Según la Tabla 19, sólo el ISh tuvo correlación significativa con todas las variables de la calidad de la taza,

Tabla 17: Análisis de promedios de los atributos organolépticos de café por núcleo. Valores con letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadísticamente significativa, al 95 %, entre núcleos.

Núcleo	Amalfi		Ciudad Bolívar		Giraldo		La Ceja del Tambo-El Retiro		Urrao	
Atributo	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
TT	82.23ab	1.55	81.94ab	3.29	83.84a	2.36	82.76ab	1.85	76.75b	4.25
FA	7.82a	2.21	7.78a	5.68	7.96a	3.54	7.96a	1.14	7.37a	2.74
Sb	7.52ab	3.17	7.52ab	5.88	7.81a	3.37	7.60ab	3.20	7.03b	5.34
SbR	7.31ab	2.32	7.24ab	4.88	7.56a	3.76	7.40ab	3.78	6.86b	4.67
Az	7.52ab	3.21	7.49ab	5.17	7.74a	3.21	7.49ab	3.59	7.03b	4.79
Cp	7.34ab	2.53	7.24ab	5.07	7.64a	4.08	7.41ab	3.57	6.89b	5.15
Bn	7.36ab	2.78	7.36ab	5.30	7.63a	3.19	7.44ab	3.09	6.93b	5.46
PC	7.37ab	3.77	7.33ab	6.05	7.68a	3.21	7.49ab	3.56	6.89b	6.05

Análisis de promedios: Comparación de promedios por prueba de t en las propiedades que tuvieron distribución normal o por lo menos simétrica y de medias por rango de Kruskal-Wallis en las demás, según Tabla 17. CV: Coeficiente de variación.

Atributos organolépticos: TT: Total taza. FA: Fragancia aroma. Sb: Sabor. SbR: Sabor residual. Az: Acidez. Cp: Cuerpo. Bn: Balance. PC: Puntaje catador.

Tabla 18: Matriz de coeficientes de correlación lineal de Pearson y no lineal de Sperman entre de los índices y las variables respuesta. En negrilla los coeficientes de correlación significativos al 95 %.

	Lineal		No lineal	
	ICS1	ICS2	ICS1	ICS2
ICS2	<b>0.72</b>		<b>0.65</b>	
TT	0.19	0.24	-0.19	-0.20
Bn	0.14	0.20	-0.19	-0.22
PC	0.13	0.18	-0.20	-0.24

ICS, ICS2: Índices de la calidad del suelo calculados con base en MDS1, MDS2, respectivamente.

Índices y variables respuesta: TT: Total taza. Bn: balance. PC: puntaje del catador.

confirmando la importancia de los microorganismos del suelo en la calidad de las cosechas, como lo establecieron Qi *et al.* (2009) y Yu-Dong *et al.* (2013). Aunque se presentaron sólo dos correlaciones significativas entre el Mgf y la calidad de la taza, las correlaciones obtenidas entre Mgf y Sf con dicha calidad parecen indicar que el contenido de estos dos elementos en la hoja pueden llegar a ser unos buenos indicadores de la calidad de la taza que se va a tener.

Tabla 19: Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre los atributos de calidad de la taza de café y los indicadores de la calidad del suelo. En negrilla los coeficientes de correlación significativos al 95 %.

Propiedad	TTm	FAm	Sbm	SbRm	Azm	Cpm	Bnm	PCm
EA	-0.18	-0.18	-0.22	-0.21	-0.23	-0.23	-0.22	-0.22
DPMH	0.00	0.04	0.01	0.03	0.01	0.01	-0.02	0.01
Da	0.25	0.23	0.27	0.25	0.25	0.25	0.24	0.26
MO	-0.26	-0.26	-0.26	-0.24	-0.28	-0.26	-0.25	-0.27
Al	-0.15	-0.10	-0.14	-0.13	-0.19	-0.19	-0.19	-0.22
P	0.00	0.04	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04	0.00	-0.05
S	-0.01	0.00	0.01	0.00	-0.03	-0.04	-0.06	-0.06
ISh	<b>0.45</b>	<b>0.41</b>	<b>0.46</b>	<b>0.46</b>	<b>0.49</b>	<b>0.44</b>	<b>0.47</b>	<b>0.45</b>
CO2	0.14	0.07	0.10	0.09	0.11	0.07	0.09	0.08
AE	-0.14	-0.18	-0.18	-0.15	-0.15	-0.13	-0.12	-0.16
Nf	0.09	0.16	0.09	0.08	0.07	0.03	0.05	0.06
Mgf	0.25	0.23	0.28	0.26	0.27	<b>0.29</b>	0.28	<b>0.31</b>
Sf	0.23	0.26	0.18	0.21	0.21	0.16	0.17	0.16

## 6. CONCLUSIONES

Las variables más persistentes en los cálculos de los índices fueron S, ISh, CO<sup>2</sup>, AE, Nf, Mgf y Sf, comunes en los dos MDS, y las seleccionadas como indicadores de la calidad del suelo que no se han reportado en la literatura fueron ISh, Al, Nf, Mgf y Sf. Los mejores índices de la calidad del suelo (ICS) para la calidad de la taza de café se presentaron en la finca La Carolina (Ciudad Bolívar): ICS1 (1.32) e ICS2 (4.32), y los más bajos estuvieron en Urrao: ICS1 (finca El Cadillal: 0.82) e ICS2 (fincas El Rosal y El Cadillal, 2.50 en ambas).

El ICS1 promedio fue de 1.05, con un coeficiente de variación de 11.7 %, y el ICS2 promedio fue de 3.19, con un coeficiente de variación del 11 %. El mayor valor del ICS2 se debe al uso de la comunalidad como factor ponderador de los indicadores, por lo que se recomienda su uso para evaluar los indicadores edáficos y foliares que se relacionan con la calidad de la taza de café. Se presentaron diferencias significativas entre índices y entre núcleos debidas, probablemente, a la variabilidad de las propiedades estudiadas, y a diferencias entre factores ambientales y de manejo del productor en las fincas.

Los resultados hallados sugieren que el segundo índice (ICS2) es el más adecuado para evaluar indicadores edáficos que se relacionan con la calidad de la taza de café, ya que presenta el mayor valor y para calcularlo se requieren menos variables (Tabla 11), lo que lo hace más económico y fácil de determinar. Este resultado indica, además, que el uso de la comunalidad como ponderador está asignando a las variables un peso más acorde con su papel en el fenómeno que se estudia al no diluir su varianza en el conjunto de elementos que forman el factor, como sucede en otros métodos que analizan la varianza total aportada por todas las

variables en conjunto.

## Referencias

- Alves De Castro, A.; Gomes De Sousa, D.; Montandon, G.; Bueno Dos Reis, F.; Goedert, W. & Carvalho, L. (2013). Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 461-472.
- Andrews, S. & Carroll, C. (2001). Designing a soil quality assesment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications*, 11(6), 1573-1585.
- Andrews, S.; Karlen, D. & Cambardella, C. (2004). The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
- Andrews, S.; Karlen, D. & Mitchell, J. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90(1), 25-45.
- Arshad, M. & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88(2), 153-160.
- Bastida, F.; Zsolnay, A.; Hernández, T. & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 147(3), 159-171.
- Buenaventura, C. & Castaño, J. (2002). Influencia de la altitud en la calidad de la bebida de muestras de café procedente del ecotopo 206B en Colombia. *Cenicafé*, 53(2), 119-131.
- Doran, J. & Parkin, T. (1994). Defining and assessing soil quality. *Soil Science Society of America*, 677(35), 3-21.
- Evanylo, G. & McGuinn, R. (2009). Agricultural management practices and soil quality: measuring, assessing, and comparing laboratory and field test kit indicators of soil quality attributes. College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University, 11 p.
- Glover, J.; Reganold, J. & Andrews, P. (2000). Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated Apple orchards in Washington State. *Agriculture Ecosystem Environment*, 80(1), 29-45.
- Hair, J.; Anderson, R.; Tatham, R. & Black, W. (2004). *Análisis Multivariante* (5ª ed.). Madrid: Prentice Hall.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá: IGAC.

- Jaramillo, D. (2014). *El suelo: origen, propiedades, espacialidad* (2ª ed.). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Karlen, D.; Ditzler, C. & Andrews, S. (2003). Soil quality: why and how?. *Geoderma*, 114(3), 145-156.
- Marín, S; Arcila, J., Montoya, E. & Oliveros, C. (2003). Cambios físico y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). *Cenicafé*, 54 (3), 208-225.
- Norma Técnica Colombiana (NTC 3566). (2011). Café verde. Preparación de muestras para uso en análisis sensorial. Ed. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Puerta, G.; González, F.; Correa, A.; Álvarez, I.; Ardila, J.; Girón, O.; Ramírez, C.; Baute, J.; Sánchez, P.; Santamaría, M. & Montoya, F. (2016). Diagnóstico de la calidad del café según altitud, suelos y beneficio en varias regiones de Colombia. *Cenicafé*, 67(2), 15-51.
- Puerta, G. (2000), Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café. *Cenicafé*, 51(2), 136-150.
- Puerta, G. (2013). Manual del cafetero colombiano. Calidad del café. *Cenicafé*, 82-110.
- Qi, Y.; Darilek, J.; Huang, B.; Zhao, Y.; Sun, W. & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3), 325-334.
- Rezai, S.; Gilkes, R. & Andrews, S. (2004). *A minimum data set for assessing soil quality in rangelands*. 13th International Soil Conservation Organisation Conference, Brisbane.
- Sadeghian, S. (2013). Manual del cafetero colombiano. Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. *Cenicafé*, 85-116.
- Sharma, K.; Mandal, U.; Snirvas, K.; Vittal, K.; Mandal, B.; Grace, J. & Ramesh, V. (2005). Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil Tillage Research*, 83(2), 246-259.
- Schoenholtz, S.; Van Miegroet, H. & Burger, J. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138(1), 335-356.
- Soil Science Society of America (SSSA). (1997). Glossary of Soil Science Terms 1996. *Soil Science Society of America*.
- Specialty Coffee Association of America (SCAA Protocols). (2014). *Cupping Specialty Coffee*, 23, 1-7.
- Universidad Nacional de Colombia. & Gobernación de Antioquia. (2015). Investigación sobre cafés especiales. “Antioquia: origen de cafés especiales”. Informe Final Técnico, 37-47.

- Wienhold, J.; Karlen, D.; Andrews, S.; Stott, D. (2009). Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(4), 260-266.
- Yu-Dong, C.; Huo-Yan, W.; Jian-Min, Z.; Lu, X.; Bai-Shu, Z.; Yong-Cun, Z. & Xiao-Qin, C. (2013). Minimum data set for assessing soil quality in farmland of Northeast China. *Pedosphere*, 23(5), 564-576.