

ESTABILIDAD DE AGREGADOS DE SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

Luz Adriana Lince Salazar *, Andrés Felipe Castro Quintero **, Wadi Andrey Castaño Castaño ***

Lince-Salazar, L.A., Castro, A. F., & Castaño, W. A. (2020). Estabilidad de agregados de suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2), 73-91. <https://doi.org/10.38141/10778/71206>



La estabilidad de los agregados (EA) es la capacidad del suelo para conservar el arreglo de su espacio sólido y poroso cuando se expone a procesos de deterioro, y se considera como un buen indicador de sostenibilidad del suelo. En Colombia, en el estudio de la sostenibilidad del suelo se estima que un 37,2% presenta conflicto de uso y está en riesgo su sostenibilidad. Dado que, mediante el estudio de la estabilidad de agregados se logra una aproximación de la sostenibilidad del suelo de uso agrícola, se realizó una investigación en lotes cafeteros, ubicados en 24 unidades edáficas. Por cada unidad se tomaron tres muestras de suelo, a una profundidad entre 0 y 20 cm, a las cuales se les realizó análisis de EA por el método de Yoder, carbono orgánico y textura; además se calculó el índice de estabilidad estructural (S_t) de Pieri. Los valores de EA indicaron que 12 de 24 unidades no limitan la producción de los cultivos ni la sostenibilidad del suelo, desde la parte estructural, entre ellas Tablazo, Guadalupe, San Agustín; seis limitan de modo leve, entre ellas Doscientos, Catarina, Malabar y en seis se limita de manera moderada, entre ellas, San Simón, Campoalegre, Timaná. El S_t indicó que las unidades Doscientos y Timaná son ligeramente inestables y las restantes estables. Existe relación entre la EA y la materia orgánica y no hay equivalencia entre el EA y S_t , no se recomienda el uso del último para evaluar la sostenibilidad del suelo en la región cafetera colombiana, pero sí incluir indicadores de biología.

Palabras clave: Arcillas, diámetro ponderado, índice de estabilidad, materia orgánica, sostenibilidad.

STABILITY OF SOIL AGGREGATES IN THE COLOMBIAN COFFEE ZONE

Aggregate stability refers to soil capability to preserve its solid and porous space arrangement when exposed to deterioration process and, it is considered a good indicator of soil sustainability. In Colombia, studies about soil sustainability consider that around 37.2% present conflict of use and its sustainability is at risk. Since through the study of aggregate stability an approximation of the soil sustainability for agricultural use is achieved, a work of research was carried out in coffee lots located in 24 edaphic units. For each unit, three soil samples were taken at a depth between 0 and 20 cm, and their aggregate stability was analyzed by the Yoder method, organic carbon, and texture. In addition, the Stability Structural Index by Pieri (S_t) was calculated. The aggregate stability values showed that 12 out of 24 soil units such as Tablazo, Guadalupe, and San Agustín do not limit crop production or soil sustainability from the structural part. In 6 soil units such as Doscientos, Catarina, Malabar there is a slight limitation. In six soil units such as San Simón, Campoalegre and Timaná there is a moderate limitation. According to the S_t , the soils in Doscientos and Timaná are slightly unstable and the other soils are stable. There is a relationship between aggregate stability and organic matter, but not between aggregate stability and S_t . The use of S_t is not recommendable to evaluate soil sustainability in the Colombian coffee zone and soil biology indicators must be included.

Keywords: clays, mean diameter, stability index, organic matter, sustainability.

* Investigador Científico I. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-4263-5357>

** Ingeniero agrónomo, MSc. <https://orcid.org/0000-0002-7336-7829>

*** Ingeniero agrónomo. <https://orcid.org/0000-0002-1958-5200>



La estabilidad de los agregados (EA) es la capacidad del suelo para conservar el arreglo de su espacio sólido y poroso cuando se expone a diferentes procesos de deterioro que afectan los procesos de floculación y cementación, tales como la labranza, el tráfico, la humectación y el secado (Kay y Angers, 2000).

La EA se evalúa a través de diversas metodologías y varias maneras, entre ellas, las más comunes son el tamiz húmedo de Yoder (1936), ya que permite evaluar el rango completo del estado de agregación del suelo por medio del cálculo del diámetro medio del peso, el diámetro medio geométrico y la proporción de agregados estables al agua (Long et al., 2015) y el del impacto de la gota (McCalla, 1944). Otras son el método de partículas menores de 250 μm propuesto por El-Swaify y Dangler (1982), que, al igual que el de Yoder, se realiza en tamiz húmedo, pero en este caso solo se tienen en cuenta partículas y microagregados menores a 250 μm y los índices de estabilidad estructural propuestos por Henin et al. (1958), De Leenheer y De Boodt (1959) y el de Topp et al. (1997), todos similares al propuesto por Yoder (1936) con modificaciones en el número y tamaño de los tamices y en el tratamiento para destruir los agregados.

Entre las herramientas más utilizadas para predecir la EA en términos de diámetro medio ponderado, están los modelos lineales generalizados, de regresión múltiple, redes neuronales artificiales y sistemas adaptativos neurodifusos, los cuales emplean entradas que van desde el uso individual de parámetros del suelo (contenidos de materia orgánica, carbonatos de calcio y de arcillas) y atributos del paisaje (pendiente e índice de vegetación), hasta la combinación de los mismos; sin embargo, los resultados de predicción de las redes neuronales artificiales y los sistemas adaptativos son mejores ya que emplean la

combinación de los parámetros del suelo y los atributos del paisaje (Besalatpour et al., 2013). Entre las técnicas de alta aplicabilidad desarrolladas a partir de modelos de regresión está el índice estructural desarrollado por Pieri (1995), el cual tiene como finalidad dar a conocer una aproximación de la estabilidad de agregados del suelo mediante el contenido de arcillas, limos y materia orgánica; el índice de separación de partículas y sellado-encostrado, propuesto por Florentino (1998) y el índice de encostramiento de la FAO (1980), entre otros.

La EA se considera un buen indicador de la sostenibilidad del suelo, por ser sensible a modificaciones a corto plazo (Kay, 1998) y proporcionar información relacionada con factores que afectan la productividad de los cultivos y la sostenibilidad del suelo (Lal, 1994), y entre ellos, los contenidos de materia orgánica, la actividad biológica, la resistencia al rompimiento, al movimiento de los gases y los nutrientes (Gelaw et al., 2015), el impacto de la gota de lluvia, la escorrentía superficial (Canasveras et al., 2010) y otras propiedades físicas (Ayuke et al., 2011). Pese a que la estabilidad de los agregados se considera como el resultado de interacciones entre la flora, la fauna, la litología, el clima (Imeson, 1984), las propiedades físico-químicas y el uso del suelo (Romero et al., 2009), hasta el momento no se evidencia una tendencia definida entre estos, especialmente para carbono orgánico y arcillas (Abiven et al., 2009), que junto con el carbonato de calcio son las que más se mencionan en la literatura (Canasveras et al., 2010).

En Colombia, el estudio de la sostenibilidad del suelo es un tema de amplio interés, ya que se estima que un 37,2% del país, aproximadamente el 80% de la zona andina, presenta conflicto de uso de este recurso, lo que pone en riesgo su sostenibilidad como resultado de la actividad agrícola con tecnologías inadecuadas sin

considerar la aptitud de uso (Arteaga et al., 2016). Dado que el cultivo de café es uno de los más predominantes en el país, se presume que, especialmente el de libre exposición, puede estar afectando dicha sostenibilidad (Palacio, 2007).

Entre los estudios de sostenibilidad del suelo cultivado en café en Colombia, evaluados por medio de la EA se tiene el de Buenaver y Rodríguez (2016) realizado en el departamento de Norte de Santander, en el cual los autores indican que dichos suelos presentan una baja estabilidad estructural, y la explican a través de la compactación, en términos de porosidad total, derivada de la relación entre la densidad aparente y la densidad real, con valores alrededor de 0,5 y 0,4 g cm⁻³, respectivamente. Otros estudios que, si bien no se enfocaron en la sostenibilidad del suelo, evaluaron este parámetro en lotes cafeteros, como los realizados por Rivera (1999) quien relacionó la EA con la erodabilidad del suelo y a su vez con la MO. Después, Hincapié y Rivera (2003) validaron el factor de erodabilidad de la unidad Chinchiná, con la EA como propiedad física determinante. Adicionalmente, Salamanca y Sadeghian (2005) en ocho unidades cartográficas de suelos en diferentes departamentos cafeteros relacionaron de forma inversa la densidad aparente y la estabilidad de agregados. Además, Rivera et al (2010) empleó la EA como indicador de erodabilidad, y Lince y Sadeghian (2012) que determinaron su variabilidad en lotes cafeteros y determinaron el número de muestras simples requeridas para tener muestreos confiables.

Dada la importancia que tiene el conocer la estabilidad de los agregados del suelo, en lotes tradicionalmente plantados en café, se realizó una investigación tendiente a evaluar dicho parámetro en suelos de la zona cafetera colombiana y su relación con otras propiedades edáficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para conocer la estabilidad de los agregados del suelo de la región cafetera colombiana y su sostenibilidad, se realizó un estudio con 24 unidades cartográficas de suelos, previamente definidas y caracterizadas por la FNC (Tabla 1), provenientes de los departamentos de Antioquia, Caldas, Huila, Risaralda, Quindío y Tolima, ubicados entre las latitudes 1° 48' 33,6" N y 5° 56' 16,2" N, y las longitudes 76° 19' 32,3" W y 75° 33' 54,3" W, entre los 1.200 y 1.800 m de altitud, en el Centro Occidente de Colombia. En esta zona, el clima es tropical ecuatorial de montaña, con precipitación anual entre 1.000 y 3.000 mm año⁻¹, con distribución bimodal, en la que los períodos de mayor precipitación están entre los meses de marzo a junio y septiembre a diciembre.

Geomorfológicamente las zonas son variables y están representadas, de forma general, por colinas onduladas de longitud menor a 100 m y pendientes homogéneas menores a 50% (Unidades Chinchiná, Génova, Laboyos, Líbano, Malabar, Mendarco, Montenegro, Quindío, Saladoblanco, San Agustín y Timaná), vertientes erosionales con pendientes superiores a 50% con longitudes que no superan los 100 m (Unidad Suroeste) y mayores a 300 m (Unidades Buenavista, Campoalegre, Catarina, Doscientos, Guadalupe, Gualí, Mendarco, Parnaso, Tablazo, Salgar y San Simón).

Se trabajó por unidades coropleticas, definidas por el material parental y el uso del suelo, que según Brady y Weil (2008), hacen parte de las principales fuentes de variación de la EA, la cual pese a que a nivel general es baja (Warrick y Nielsen, 1980), puede ser disminuida con una selección precisa de los sitios de muestreo. El primer factor (material parental) fue determinado por las unidades cartográficas de suelo de la FNC, y

dado que dicho levantamiento está en escala 1:100.000, se realizaron cateos previos a la selección, para confirmar que los materiales parentales fueran los de interés. Una vez cumplido el paso anterior, por cada unidad edáfica se seleccionaron tres lotes, cuyo uso en café superara los 5 años y en cada lote se tomaron cuatro muestras de suelo a una profundidad entre 0 y 20 cm, con las cuales se generó una muestra compuesta de 1,0 kg. El muestreo se considera confiable, ya que la EA presenta una variabilidad baja, y en lotes de uso cafetero, con una muestra se logran resultados con una confianza entre el 90% y 95% (Lince y Sadeghian, 2012).

En el laboratorio, a las muestras se les extrajeron los residuos de raíces, fragmentos de roca y macrofauna, y se secaron al aire a una temperatura ambiente ($\pm 23^{\circ}\text{C}$), durante cinco días. Posteriormente, se realizó el análisis de estabilidad de agregados al agua y como variables complementarias se analizó el carbono orgánico (Walkley-Black), expresado en porcentaje de materia orgánica (MO) y la textura en términos de porcentaje de arenas (A), limos (L) y arcillas (Ar) (pipeta).

El análisis de estabilidad de agregados al agua se realizó por el método en húmedo de Yoder (1936), con el analizador de agregados DIK-2001. Además, se realizaron tres modificaciones a la metodología mencionada, relacionadas con el tamaño inicial de los agregados (agregados entre 4,75 y 2,00 mm), la malla de los tamices (2,00; 1,00; 0,50; 0,25 y 0,106 mm) y el tratamiento de las fracciones de agregación total (a los agregados se les adicionaron 10 cm^3 de peróxido de hidrógeno al 30% y se dejaron en un agitador recíproco de mesa Bioblock scientific 64736 por 24 horas, a 150 movimientos por minuto), con el fin de dispersar los agregados del suelo y tener un valor real de las partículas primarias.

Los datos se presentaron en porcentaje de agregados por cada uno de los tamices y en diámetro medio ponderado, calculado por la Ecuación <1> (IGAC, 1990).

$$DMP = \sum_{i=1}^n \frac{(M_{ssi} \%)(x_i)}{100} \quad <1>$$

Donde, DMP es el diámetro medio ponderado; $M_{ssi}\%$ es el porcentaje de los agregados del suelo retenidos por cada tamiz, x_i es el promedio del diámetro de abertura del tamiz, mm.

Además, se calculó el índice de estabilidad estructural (S_t), como método de evaluación indirecta para dicho parámetro, según la Ecuación <2> propuesta por Pieri (1995) para suelos tropicales, y categorizado de la siguiente manera: $S_t < 5$ suelos de estructura degradada; $S_t < 7 \geq 5$ suelos estructuralmente inestables; $S_t < 9 \geq 7$ suelos estructuralmente ligeramente inestables, y suelos con $S_t \geq 9$ suelos estructuralmente estables.

$$S_t = \frac{MO \%}{(Ar \% + L \%)} \times 100 \quad <2>$$

Donde, S_t es el índice estructural; MO porcentaje de materia orgánica; Ar y L porcentajes de arcillas y limos, respectivamente.

Los resultados de las pruebas de estabilidad de agregados al agua, porcentajes de agregados por tamiz, materia orgánica y fracciones de arena, limo y arcilla, de las muestras compuestas, se promediaron por unidad cartográfica de suelo (tres muestras compuestas por unidad). Mientras que la estabilidad de agregados y la materia orgánica se clasificaron según Lal (1994) para el grado de limitación de la productividad de los cultivos y sostenibilidad del uso del suelo; el cual para EA indica que un diámetro medio ponderado mayor a 2,5 mm no ofrece ninguna

limitación, entre 2,0 y 2,5 mm la limitación es ligera, entre 1,0 y 2,0 moderada, entre 0,5 y 1,0 mm fuerte y menor a 0,5 mm muy fuerte, y para carbono orgánico entre 5,0% y 10,0% no ofrece ninguna limitación, entre 3,0% y 5,0% la limitación es ligera, entre 1,0% y 3,0% moderada, entre 0,5% y 1,0% fuerte y menor a 0,5% muy fuerte. Dado que la clasificación se presenta en términos de carbono orgánico el valor propuesto en dicha categorización se multiplicó por el factor 1,724 para transformar la variable carbono orgánico en porcentaje de materia orgánica.

Para la EA y porcentajes de agregados por tamiz se realizó un análisis de varianza. Una vez determinada la diferencia estadística se continuó con la prueba de comparación de

Tukey al 5%, para esto se utilizaron Excel y Stathgraphics (V. 5.2).

Los valores promedio de EA y los porcentajes de agregados por tamiz, se correlacionaron con las variables complementarias (materia orgánica, fracciones de arena, limo y arcilla), por el método de Pearson con una confianza del 95%. Con las variables que mostraron correlación se estableció la expresión matemática que explica la estabilidad de los agregados al agua. Además, por medio de correlaciones de Pearson con confianza del 95% y regresiones matemáticas se compararon los resultados obtenidos con el método indirecto de evaluación propuesta por Pieri y los de la metodología de Yoder. Lo anterior se realizó con software Excel, Stathgraphics (V. 5.2) y Sigmaplot (V. 10).

Tabla 1. Descripción de las unidades cartográficas de suelo muestreadas, según FNC (1973, 1985, 1986, 1988 y 1992).

Unidad cartográfica de suelo	Contenido pedológico	Área, ha*	Material parental	Sitio de muestreo	
				Municipio	Departamento
Asociación Campoalegre	Typic Dystrudepts 40%, Typic Udorthents 30% y otros (Entic Dystrudepts, Paralithic Udorthents y Paralithic Dystrudepts) 30%	49.867	Granito moscovítico	Campoalegre	Huila
Asociación Catarina	Paralithic Udorthents 40%; Typic Eutrudepts 35%; Andic Eutrudepts 10%; otros 15%	3.289	Esquisto talcoso	Santuario	Risaralda
Asociación Doscientos	Typic Dystropept 57%; Typic Dystrandept 27%; Otros (Lythic Troporthent y Typic Troporthent) 16%	44.527	Basalto	Betulia, Concordia y Santa Bárbara	Antioquia

Continúa...

...continuación.

Unidad cartográfica de suelo	Contenido pedológico	Área, ha*	Material parental	Sitio de muestreo	
				Municipio	Departamento
Asociación Génova	Typic Eutrudepts 35%; Paralithic Udorthents 30%; Lithic Udorthents 20%; Paralithic Eutrudepts 10%; otros 5%	8.485	Esquisto	Génova	Quindío
Asociación Guadalupe	Typic Udorthents 45%, Typic Dystrudepts 30% y otros (Lithic Dystrudepts, Lithic Udorthents, Paralithic Dysrtrudepts y Paralithic Udorthents) 25%	11.310	Arenisca	Pitalito y Suaza	Huila
Asociación Laboyos	Typic Argiaquolls 50%, Tropic Fluvaquents 30% y otros 20%	13.577	Coluvio- aluviales	Pitalito	Huila
Asociación Saladoblanco	Lithic Udorthents 50%, Typic Dystrudepts 30% y otros (Typic TropudalFs, Lithic Dystrudepts y Typic Hapludands) 20%	18.214	Toba	La Plata	Huila
Asociación Salgar	Typic Dystropept 44%; Typic Troporthent 20%; Typic Dystrandep 16%; otros (Lithic Troporthent, Paralithic Dystropept y Paralithic Troporthent) 20%	81.733	Esquistos	Betulia, Salgar y Ciudad Bolívar	Antioquia
Asociación Tablazo	Typic Eutropepts 50%; Typic Dystrandep 35%; Otros 15% (Paralithic Eutropepts y Typic Troporthents)	946	Esquisto	Salamina	Caldas

Continúa...

...continuación.

Unidad cartográfica de suelo	Contenido pedológico	Área, ha*	Material parental	Sitio de muestreo	
				Municipio	Departamento
Asociación San Simón	Typic Udorthents 40%, Typic Dystrudepts 30% y otros (Paralithic Udorthents, Paralithic Dystrudepts, Andic Dystrudepts y Lithic Udorthents) 30%	44.698	Granito	La Plata	Huila
Asociación Timaná	Typic Eutrudepts 45% y Typic Udorthents 55%	8.917	Arcillolitas	Timaná	Huila
Consociación Buenavista	Typic Eutrudepts 70%; otros (Andic Eutrudepts, Lithic Eutrudepts, Lithic Udorthents y Typic Hpludands) 30%	1.356	Anfibolita	Pijao y Buenavista	Quindío
Consociación Chinchiná	Antioquia: Typic Dystrandep 80%; otros (Andic Dystropept, Typic Dystropept y Entic Dystrandep) 20%	59.328		Andes y Jardín	Antioquia,
	Quindío: Typic Melanudands 75%; otros 25%	20.270	Ceniza volcánica	Circasia y Quimbaya,	Quindío y
	Risaralda: Typic Hapludands 80%; Andic Dystudepts 10%; otros 10%	54.293		Apía y Belén de Umbría	Risaralda
Consociación Malabar	Quindío: Vertic Tropudalfs 70%; otros (Typic Hapludands y Entic Dystrandep) 30% Risaralda: Typic Hapludalfs 70%; Typic Hapludands 10%; Typic Argiudoll 15%; otros 5%	11.587	Ceniza volcánica	Quimbaya y Pereira	Quindío y Risaralda

Continúa...

...continuación.

Unidad cartográfica de suelo	Contenido pedológico	Área, ha*	Material parental	Sitio de muestreo	
				Municipio	Departamento
Consociación Montenegro	Typic Melanudands 75%; Entic Hapludands 25%	26.420	Ceniza volcánica	Montenegro, Armenia y La Tebaida	Quindío
Consociación Parnaso	Typic Eutrudepts 75%; Paralithic Eutrudepts 15%; otros 10%	19.954	Basalto	Santa Rosa de Cabal, Guática y Quinchía	Risaralda
Consociación Quindío	Typic Melanudands 80%; Entic Hapludands 20%	8.892	Ceniza volcánica	Circasia, Calarcá y Armenia	Quindío
Consociación San Agustín	Typic Melanudands 70%, Typic Dystrudepts 20% y Entic hapludandst 10%	12.244	Ceniza volcánica	San Agustín	Huila
Consociación Suroeste	Typic Dystropept 75%; Otros (Paralithic Dystropept, Andic Dystropept, Lithic Troporthent y Typic Troporthent) 25%	71.154	Aglomerados	Concordia, Andes y Fredonia	Antioquia
Gualí	Sin definir	33.438	Esquistos	Libano	Tolima
Libano	Sin definir	33.725	Ceniza volcánica	Libano	Tolima
Mendarco	Sin definir	102.202	Arenisca	Ataco, Planadas y Chaparral	Tolima

Área en hectáreas de cada unidad cartográfica de suelo en la región cafetera colombiana.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de EA oscilaron entre 1,06 y 3,56 mm (Tabla 2), lo que indica que, según la categorización de limitación de la productividad de los cultivos y sostenibilidad del uso del suelo (Lal, 1994) las unidades de suelos evaluadas se ubican en tres rangos, de las cuales, Asociación Tablazo, Asociación Guadalupe, Mendarco, Consociación San Agustín, Líbano, Asociación Laboyos, Consociaciones Quindío y Chinchiná (esta última en los departamento de Caldas y Risaralda) y Asociación Génova, son las que no limitan ($DMP > 2,5$ mm); Consociaciones Parnaso y Montenegro, las que limitan de modo leve ($DMP > 2,0 \leq 2,5$ mm). Por otro lado, las Asociaciones Doscientos y Catarina, unidad Gualí, Consociaciones Suroeste, Malabar y Chinchiná (esta última en el departamento de Antioquia); y las que limitan de manera moderada ($DMP > 1,0 \leq 2,0$ mm) Asociaciones San Simón, Campoalegre, Timaná, Salgar y Saladoblanco y Consociación Buenavista. Los resultados reportados para las unidades Chinchiná, Montenegro, San Simón, Doscientos, Salgar y Guadalupe, son similares a los de otros estudios realizados en la zona cafetera colombiana (Salamanca y Sadeghian, 2005).

El índice de estabilidad estructural (S_t) estuvo entre 8,07% y 47,38% (Tabla 2), y según la clasificación los suelos de las Unidades Doscientos y Timaná son ligeramente inestables, mientras que los de las 22 unidades restantes son estructuralmente estables.

En cuanto a las variables complementarias, los valores promedio de MO oscilaron entre 4,8% y 19,3% (Tabla 2), que según la categorización de Lal (1994) en las Unidades Mendarco, Líbano, Laboyos, Quindío, San Agustín y Chinchiná en los departamentos de Antioquia, Quindío y Risaralda, no se ve limitada la producción y la sostenibilidad del suelo ($MO > 8,62\%$); en las Unidades

Timaná, Doscientos, Malabar, Saladoblanco, Tablazo, Gualí, Montenegro, Buenavista, Suroeste, Génova, Salgar, Catarina, Guadalupe y Parnaso, se presenta una limitación leve ($5,17\% < MO \leq 8,62\%$); y en Campoalegre y San Simón la limitación es moderada ($1,75\% < MO \leq 5,17\%$).

De las clases texturales, la más común es la franco arcillo arenosa, en ocho de las 24 unidades cartográficas de suelos, seguida por la textura arcillosa en seis unidades (Tabla 2). Según Lal (1994), las unidades que no presentaron limitación por la clase textural fueron Líbano y Chinchiná en el departamento de Risaralda; las de limitación moderada Chinchiná en los departamentos de Quindío y Antioquia, Malabar, Catarina, Saladoblanco, Buenavista, Campoalegre, San Simón, Parnaso, Génova, Mendarco y Gualí; y las que se ven limitadas de forma severa y extrema son las unidades Guadalupe, Suroeste, Doscientos, Salgar y Timaná.

Según el análisis de correlación para las unidades evaluadas, la EA tiene relación estadística con la MO, pero no con las A, los L y las Ar (Tabla 3), lo cual se asemeja a lo reportado en la literatura, pues se indica que si bien las Ar juegan un papel importante en la EA, la presencia de estas no la asegura (Marshall et al., 1996), y puede afectar la proporción de cationes y alterar dicha EA (Lal et al., 1999). Sin embargo, y considerando lo ya mencionado, la relación entre las Ar y la EA encontrada en esta investigación no es concluyente, debido a que el secado del suelo al aire aumenta la cohesión de las arcillas por una disminución en la doble capa eléctrica, lo que permite que la fuerza atractiva de corto alcance aumente y con ello la resistencia de los agregados a la acción del agua (Dexter et al., 1988; Kemper y Rosenau, 1984; Soenne et al., 2014) y, por ende, a la erodabilidad.

Para las unidades de suelo objeto de estudio, no se encontró explicación lineal de la EA por MO como lo expresa Lopes et al. (2016), pero sí exponencial, con una explicación del 33% (Tabla 4, Figura 1 a), como lo exponen Mainuri y Owino (2013). Lo cual, puede deberse a que no toda la MO es responsable de la EA y a que esta es afectada por otros factores pedológicos y antrópicos (Lal y Shukla, 2004), lo cual se atribuye a los factores antrópicos, ya que no se encontró diferencia de medias entre unidades de materiales parentales contrastantes (Tabla 5), a excepción de la unidad San Simón, proveniente de un granito biotítico, que presentó diferencia con dos unidades provenientes de cenizas volcánicas (Chinchiná en Risaralda y Montenegro) y una de basalto (Parnaso); sumado a que las unidades Parnaso y Génova, provenientes de materiales parentales que aportan bases de cambio al suelo, presentaron EA > 3,00 mm, mientras que las unidades Buenavista y Salgar, provenientes de materiales parentales de composición similar a las anteriores, presentaron valores de EA < 2,0 mm, sin diferencias en MO en las cuatro unidades mencionadas. Por lo anterior, para las unidades cartográficas analizadas, no se atribuye la totalidad de la EA al material parental o al contenido de MO, pero se resalta la importancia de estos dos parámetros en dicha propiedad del suelo.

Sin embargo, para las unidades de suelo objeto de estudio, un contenido de 9,2% de MO, puede ser considerado como el límite crítico o valor umbral para la EA, debido a que es el valor de inflexión hasta el cual la MO explica de forma lineal el 41% de la EA ($f(x) = -0,433MO + 0,4376$; $p < 0,0001$) (Figura 2 a), y contenidos por encima de este representan pocos incrementos en la estabilidad (Figura 2 b), tal como lo indican Lal y Shukla (2004). Además, para las unidades edáficas analizadas, se sugiere que los suelos con MO > 6%, desde la parte estructural, no limitan

la producción agrícola o su sostenibilidad, dado que el 89% de los datos con MO ≥ 6 % presentó una EA > 2,0 mm.

Es de anotar, que de ninguna manera los rangos de MO relacionados con la EA, son comparables o discutibles con los mencionados por Sadeghian (2008), como aporte de nitrógeno a la planta, ya que los primeros corresponden a una actividad agregante del suelo, la cual, según la literatura se atribuye principalmente a la glomalina (Brady y Weil, 2008) y los segundos corresponden a una calibración de carácter nutricional, de aportes de un elemento para la planta. Tampoco puede atribuirse la EA a algún estado de la MO, pues, la principal función de la MO en la fijación de los agregados, es contribuir a la supervivencia de los microorganismos y los insectos del suelo, que son los responsables la formación de complejos biopolímeros que, junto con los lixiviados de las raíces de las plantas, son los que realmente definen la EA (Brady y Weil, 2008).

En cuanto a la distribución de los agregados por tamaño, 63 de las 72 muestras analizadas, presentaron el mayor porcentaje de relación de peso en las partículas entre 4,75 y 2,00 mm (Tabla 4), y de estas, las unidades Quindío, Génova, Montenegro, Parnaso y Chinchiná en los departamentos de Risaralda y Quindío, presentaron más del 70%. Dicha distribución de tamaño de agregados por tamiz está acorde con lo reportado por otros estudios realizados en suelos de montaña y en altitudes similares a las de esta investigación (Volteras y Amézquita, 2009; An et al., 2013).

Se determinó que no hay relación estadística entre la EA por el método de Yoder y el cálculo indirecto de estabilidad estructural propuesto por Pieri, lo cual se debe posiblemente a las razones ya expuestas con relación a la influencia de los parámetros utilizados en el cálculo del

índice y a que los valores de MO y la suma de L y Ar, del presente estudio están por fuera de los rangos con los cuales se realizó el modelo del índice de estabilidad, que si bien, está propuesto para suelos tropicales, este fue realizado en suelos semiáridos de África, con un valor máximo de MO de 1,3% y de suma de L y Ar de 17% (Pieri, 1995), los cuales son menores que los reportados en el presente trabajo.

Los resultados logrados son similares a los reportados en diferentes estudios de la zona cafetera, acá mencionados, los cuales a excepción de los Salamanca y Sadeghian (2005) y Lince y Sadeghian (2012), se han centrado en correlacionar la EA con la erodabilidad (Rivera, 1999; Hincapié y Rivera, 2003; Rivera et al., 2010) relación que ha sido ampliamente estudiada, y en todos los casos se ha encontrado una correlación positiva, ya que ambas evalúan la respuesta del suelo a la acción del agua.

Para los suelos cafeteros de Colombia, aún no se ha caracterizado el lixiviado de las raíces de la planta de café y su relación con la EA, tampoco se han establecido cuales son los microorganismos e insectos presentes en los suelos cafeteros que más influyen en la formación de biopolímeros agregantes, tampoco se conocen los tipos de compuestos agregantes en estos suelos, ni la cantidad y calidad de la glomalina. Por lo tanto, dada la importancia de los organismos vivos del suelo, se considera necesario que sean incluidos como indicadores en los estudios de sostenibilidad del suelo

y en la búsqueda de explicaciones para la dinámica de la EA.

Puede concluirse que, para las unidades cartográficas analizadas, la EA no afecta de forma negativa la producción agrícola y el uso que se está dando a los suelos no pone en riesgo su sostenibilidad desde el punto de vista estructural del suelo.

Para dichas unidades, la EA se relaciona directamente con los contenidos de MO, y no es dependiente del tamaño de partículas, por lo cual puede inferirse que el manejo del suelo tiene una relación más fuerte con dicho parámetro, que los factores de génesis. Además, dichos suelos presentaron un valor umbral de respuesta y un valor que es considerado como indicador de estabilidad.

Se considera que para los suelos de la zona cafetera colombiana es confiable emplear el método de cuantificación de la estabilidad de los agregados propuesto por Yoder (1936) y este no presenta equivalencia con el índice de estabilidad propuesto por Pieri (1995).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los Comités Departamentales de Cafeteros de Antioquia, Huila, Quindío, Risaralda y Tolima, a la Disciplina de Suelos de Cenicafé y a la ONG Solidaridad Andes y a la FNC por el apoyo financiero en la investigación.

Tabla 2. Valores promedio y de error estándar de las características analizadas en las unidades cartográficas de suelo muestreadas.

Unidad edáfica	Promedio ± error estándar (n=3)							CT	S _t , %
	EA, mm	MO, %	A, %	L, %	Ar, %	FArA	FAr		
Buenavista	1,79 ±0,9	6,8 cd*	±0,9	50,7 ±3,4	21,7 ±2,6	27,3 ±1,5	FArA	13,8	
Campoalegre	1,39 ±0,7	4,8 d	±0,7	54,7 ±2,7	17,8 ±4,0	27,5 ±1,5	FArA	10,6	
Catarina	2,27 ±2,1	7,8 cd	±2,1	54,7 ±2,9	23,3 ±2,9	22,0 ±5,0	FArA	17,1	
Chinchiná - Antioquia	2,39 ±4,2	17,2 ab	±4,2	63,8 ±5,8	15,3 ±0,6	20,9 ±6,3	FArA	47,4	
Chinchiná - Quindío	3,23 ±2,3	10,9 abcd	±2,7	57,3 ±2,6	19,7 ±2,4	23,0 ±0,6	FArA	25,6	
Chinchiná - Risaralda	3,56 ±0,5	15,8 abc	±0,5	50,0 ±0,0	29,7 ±0,7	20,7 ±0,3	F	31,4	
Doscientos	2,24 ±0,3	5,6 d	±0,2	31,0 ±1,3	21,0 ±1,2	48,0 ±1,1	Ar	8,1	
Génova	3,22 ±0,9	7,4 cd	±0,3	38,3 ±3,5	29,0 ±0,0	32,7 ±3,5	FAr	12,1	
Guadalupe	2,57 ±1,0	8,1 bcd	±1,0	50,6 ±1,2	7,1 ±1,4	42,3 ±1,3	ArA	16,4	
Gualí	2,34 ±1,1	6,2 d	±1,1	40,2 ±5,7	30,3 ±5,8	29,5 ±4,7	FAr	10,4	
Laboyos	2,81 ±3,7	10,1 bcd	±3,7	44,4 ±0,0	4,8 ±0,0	50,8 ±0,0	Ar	18,2	
Libano	2,81 ±2,6	9,6 bcd	±2,6	49,4 ±7,3	33,4 ±1,8	17,2 ±5,6	F	18,9	

Continúa...

...continuación.

Unidad edáfica	Promedio \pm error estándar (n=3)												
	EA, mm	MO, %	A, %	L, %	Ar, %	CT	S _t , %	EA, mm	MO, %	A, %	L, %	Ar, %	CT
Malabar	2,38	$\pm 0,4$	51,3	$\pm 3,3$	26,0	$\pm 1,0$	22,3	$\pm 3,8$	FArA	12,3			
Mendarco	2,59	$\pm 1,3$	42,4	$\pm 3,7$	24,4	$\pm 4,1$	33,3	$\pm 1,8$	FAR	15,2			
Montenegro	3,48	$\pm 0,7$	63,0	$\pm 1,2$	18,0	$\pm 2,1$	19,0	$\pm 1,0$	A	17,4			
Pamaso	3,48	$\pm 0,6$	27,3	$\pm 6,4$	33,7	$\pm 3,3$	39,0	$\pm 9,2$	FAR	11,3			
Quindío	3,12	$\pm 1,4$	57,0	$\pm 2,5$	23,7	$\pm 2,3$	19,3	$\pm 0,7$	A	28,0			
Saladoblanco	1,88	$\pm 0,8$	49,9	$\pm 3,8$	17,8	$\pm 1,1$	32,4	$\pm 2,7$	FArA	11,9			
Salgar	1,87	$\pm 0,9$	36,8	$\pm 4,6$	21,8	$\pm 1,2$	41,4	$\pm 4,8$	Ar	11,9			
San Agustín	2,80	$\pm 2,4$	43,8	$\pm 6,9$	14,4	$\pm 1,8$	41,8	$\pm 6,6$	Ar	34,3			
San Simón	1,06	$\pm 0,6$	59,8	$\pm 1,2$	13,1	$\pm 1,7$	27,5	$\pm 11,3$	FArA	12,2			
Suroeste	2,41	$\pm 0,3$	36,5	$\pm 3,4$	19,6	$\pm 2,1$	43,8	$\pm 5,1$	Ar	11,1			
Tablazo	2,51	$\pm 1,0$	52,7	$\pm 4,1$	30,7	$\pm 2,4$	16,7	$\pm 1,8$	A	13,1			
Timaná	1,74	$\pm 0,2$	37,9	$\pm 4,1$	17,8	$\pm 1,1$	44,3	$\pm 3,2$	Ar	8,5			

EA: estabilidad de agregados, en diámetro medio ponderado; MO: materia orgánica; A: arenas, L: limos; Ar: arcillas; CT: clase textural; FArA: Franco arcillo arenoso; F: franco; Ar: arcilloso; A: arenoso. * grupo homogéneo (Tukey, al 5%). S_t: Índice de estabilidad estructural (Pieri, 1995).

Tabla 3. Correlación entre el porcentaje del tamaño de los agregados del suelo y la estabilidad de los agregados, con el contenido de materia orgánica y el porcentaje de tamaño de las partículas.

Parámetro, %	Tamaño de las partículas del suelo, mm						EA, mm
	4,75 – 2,00	2,00 – 1,00	1,00 – 0,50	0,50 – 0,25	0,25 – 0,11	> 2,00	
MO	0,50*	-0,48*	-0,52**	-0,48*	-0,43*	-0,13	0,48*
Ar	-0,18	0,13	0,22	0,10	-0,01	0,09	-0,17
L	0,31	-0,15	-0,26	-0,16	-0,05	-0,27	0,33
A	-0,05	-0,04	-0,04	0,01	0,04	0,11	-0,07

EA: estabilidad de los agregados, en diámetro medio ponderado; * = valor $p < 0,05 \geq 0,01$; ** = valor $p < 0,01 \geq 0,001$.

Tabla 4. Modelos de explicación de EA por medio de MO, para los suelos analizados (n=72).

Modelo	Parámetro	Coficiente	Error estándar	Valor t	Valor P	VIF	R ²
f = y0 + a*x	y0	1,7722	0,2065	8,5829	<0,0001	4,7360<	0,1826
	a	0,0838	0,0212	3,9548	0,0002	4,7360<	
f = a*(1 - exp(-b*x))	a	3,3923	0,2816	12,0453	<0,0001	6,0644<	0,3301
	b	0,1814	0,0351	5,1754	<0,0001	6,0644<	

Donde f = EA; x = MO. Nótese la no significancia del parámetro a, en el modelo lineal.

Tabla 5. Promedio y grupos homogéneos del porcentaje del peso de los agregados retenidos en cada tamiz y de la estabilidad de los agregados por unidad cartográfica de suelo.

Unidad de suelo	Abertura del tamiz, mm										E.A, DMP, mm			
	Porcentaje de peso (n=3) y grupo homogéneo*													
	<4,75≥2,00	<2,00≥1,00	<1,00≥0,50	<0,50≥0,25	<0,25≥0,11	<0,11								
Buenvista	29,49	ab	23,62	ab	18,41	a	16,31	a	7,57	a	4,61	bcd	1,79	ab
Campoalegre	23,11	ab	20,22	ab	12,98	ab	7,04	ab	3,36	bc	33,28	abc	1,39	ab
Catarina	51,53	ab	6,65	ab	3,59	ab	1,73	b	0,95	c	35,56	ab	2,27	ab
Chinchiná - Antioquia	48,07	ab	20,28	ab	9,67	ab	3,83	b	1,90	bc	16,25	abcd	2,39	ab
Chinchiná - Quindío	72,35	ab	10,47	ab	6,09	ab	3,81	b	4,09	bc	3,20	cd	3,23	ab
Chinchiná - Risaralda	84,19	a	3,81	b	0,55	b	0,48	b	0,43	c	10,55	bcd	3,56	a
Doscientos	45,16	ab	17,38	ab	11,34	ab	5,37	b	1,20	bc	18,72	abcd	2,24	ab
Génova	71,54	ab	11,55	ab	6,95	ab	5,35	b	3,62	bc	0,99	d	3,22	ab
Guadalupe	56,11	ab	11,02	ab	7,13	ab	4,49	b	2,98	bc	18,26	abcd	2,57	ab
Gualí	49,73	ab	13,60	ab	6,69	ab	4,19	b	3,55	bc	22,25	abcd	2,34	ab
Laboyos	62,79	ab	10,11	ab	5,44	ab	3,53	b	1,83	bc	16,31	abcd	2,81	ab
Libano	60,66	ab	15,29	ab	5,91	ab	3,38	b	2,35	bc	12,40	bcd	2,81	ab

Continúa...

...continuación.

Unidad de suelo	Abertura del tamiz, mm										E.A, DMP, mm			
	Porcentaje de peso (n=3) y grupo homogéneo*													
	<4,75≥2,00	<2,00≥1,00	<1,00≥0,50	<0,50≥0,25	<0,25≥0,11	<0,11	<0,25≥0,11	<0,11	<0,11	<0,11				
Malabar	45,68	ab	22,68	ab	13,25	ab	8,23	ab	5,45	ab	4,73	abcd	2,38	ab
Mendarco	56,10	ab	14,06	ab	4,42	ab	2,90	b	1,66	bc	20,86	abcd	2,59	ab
Montenegro	80,11	ab	7,44	ab	3,74	ab	4,065	b	1,95	bc	2,69	cd	3,48	a
Parnaso	80,85	ab	6,19	b	2,94	ab	1,90	b	1,32	c	6,79	bcd	3,48	a
Quindío	70,54	ab	10,55	ab	3,02	ab	1,65	b	1,27	c	12,98	bcd	3,12	ab
Saladoblanco	33,87	ab	21,93	ab	14,86	ab	6,91	ab	3,17	bc	19,26	abcd	1,88	ab
Salgar	35,62	ab	19,49	ab	10,56	ab	4,40	b	1,76	bc	28,17	abcd	1,87	ab
San Agustín	65,52	ab	4,49	b	1,56	b	1,16	b	0,10	c	26,27	abcd	2,80	ab
San Simón	16,23	b	18,22	ab	11,77	ab	5,63	b	2,45	bc	45,71	a	1,06	b
Suroeste	49,44	ab	16,64	ab	10,42	ab	5,63	b	3,02	bc	14,86	abcd	2,41	ab
Tablazo	55,60	ab	11,93	ab	2,66	ab	1,37	b	1,40	c	27,03	abcd	2,51	ab
Timaná	27,42	ab	30,25	a	15,44	ab	6,99	ab	3,84	bc	16,06	abcd	1,74	ab

*: Tukey al 5%; DMP: diámetro medio ponderado.

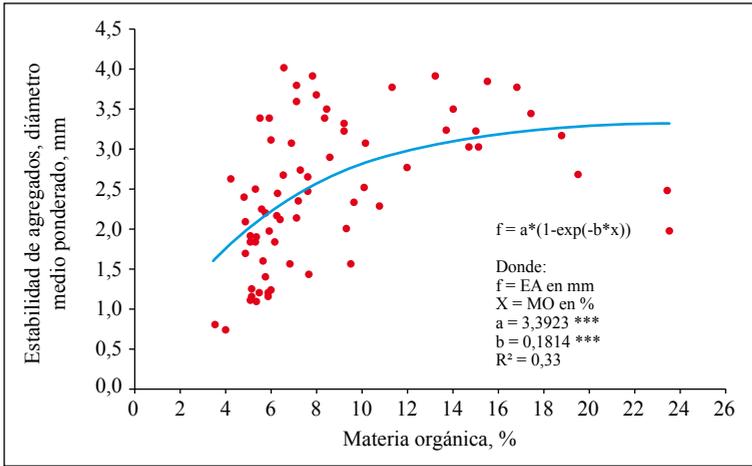


Figura 1. Estabilidad de los agregados del suelo en función de la materia orgánica para 24 unidades de suelo de la zona cafetera colombiana (n=72). EA: Estabilidad de los agregados del suelo; MO: materia orgánica; *** = valor $p < 0,0001$.

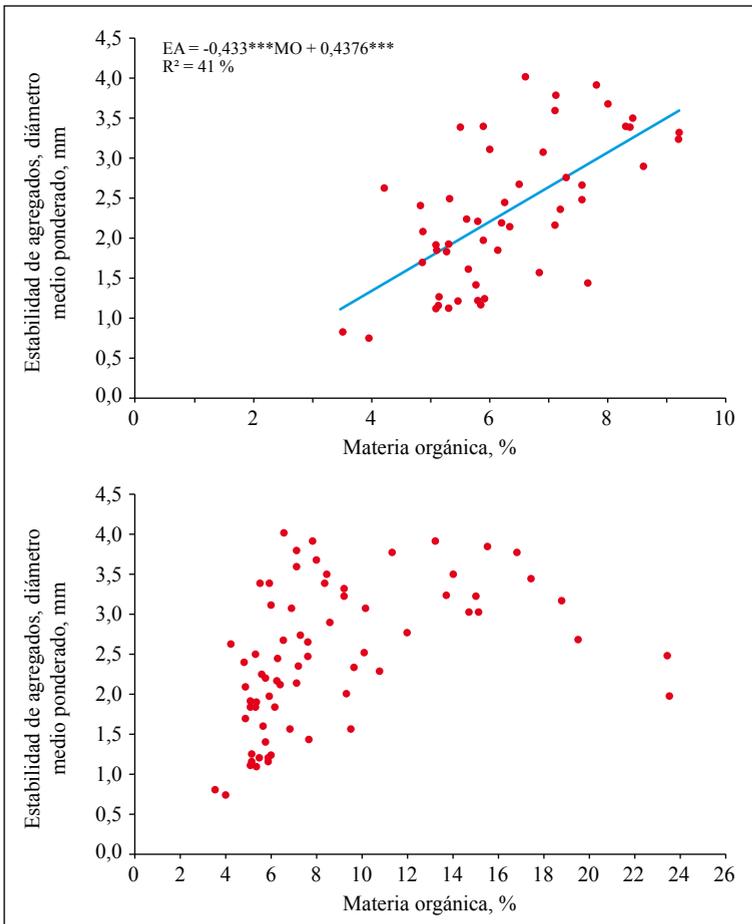


Figura 2. a) EA en función de MO para 52 de los 72 predios cafeteros analizados. EA: Estabilidad de los agregados del suelo; MO: materia orgánica; ** = valor $p < 0,01 \geq 0,001$; *** = valor $p < 0,0001$. b) Nube de los 72 datos de EA vs MO correspondientes a las 24 unidades cartográficas.

LITERATURA CITADA

- Abiven, S., Menasseri, S. & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- An, S. S., Darboux, F. & Cheng, M. (2013). Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). *Geoderma*, 209–210, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.020>
- Arteaga, J. C., Navia, J. F., Castillo, J. A. (2016). Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 62–75. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v33n2/v33n2a06.pdf>
- Ayuke, F. O., Brussaard, L., Vanlauwe, B., Six, J., Lelei, D. K., Kibunja, C. N. y Pulleman, M. M. (2011). Soil fertility management: impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation. *Applied Soil Ecology*, 48(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.02.001>
- Besalatpour, A. A., Ayoubi, S., Hajabbasi, M. A., Mosaddeghi, M. y Schulin, R. (2013). Estimating wet soil aggregate stability from easily available properties in a highly mountainous watershed. *Catena*, 111, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.07.001>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils*. Prentice Hall.
- Dexter, A. R., Horn, R. & Kemper, W. D. (1988). Two mechanisms for age-hardening of soil. *Journal of Soil Science*, 39(2), 163–175. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1988.tb01203.x>
- El-Swaifi, S. A., & Dangler, E. W. (1982). Rainfall erosion in the tropics: a state of the art. En W. K. Chairman, S. A. El-Swaifi & J. Mannering (Eds.), *Soil erosion and conservation in the tropics, ASA special publication* (Vol. 43, pp. 1-25). Madison: American Society Association.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. FAO.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1973). *Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos en la zona cafetera del departamento del Tolima*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1985). *Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos en la zona cafetera del departamento del Huila*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1986). *Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos en la zona cafetera del departamento del Quindío*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1988). *Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos en la zona cafetera del departamento de Risaralda*. Cenicafé.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1992). *Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos en la zona cafetera del suroeste de Antioquia*. Cenicafé.
- Florentino, A. (1998). Guía para la evaluación de la degradación del suelo y de la sostenibilidad del uso de la tierra: selección de indicadores físicos. Valores críticos. En *Manejo sostenible de los suelos, manual de prácticas* (pp. 68-77). Universidad Central de Venezuela.
- Gelaw, A. M., Singh, B. R., & Lal, R. (2015). Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 26(7), 690–700. <https://doi.org/10.1002/ldr.2261>
- Henin, S., Monnier, G., & Combeau, A. (1958). Methode pour l'étude de la stabilite structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 1, 73–92.
- Hincapié, E., & Rivera, H. (2003). Validación del factor erodabilidad en suelos de la unidad Chinchiná, *Melanudands*, mediante el uso de simulador de lluvias. *Revista Cenicafé*, 54(1), 77–89. <http://hdl.handle.net/10778/242>
- Imeson, A. C. (1984). An eco-geomorphological approach to the soil degradation and erosion problem. En R. Fantechi & N. S. Margaris (Eds.), *Desertification in Europe* (pp. 110–125). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1990). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos* (5ta ed.). IGAC.
- Kay, B. D. (1998). Soil structure and organic carbon: a review. En R. Lal, J. Kimble, R. Follett & B. Stewart (Eds.), *Soil processes and the carbon cycle* (pp. 169–197). Boca Raton, CRC Press.

- Kay, B. D., & Angers, D. A. (2000). Soil structure. En M. Sumner (Ed.). *Handbook of soil science* (pp. 229–276). Boca Raton, CRC Press.
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1984). Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5), 1001–1006. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800050009x>
- Lal, R. (1994). *Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. SMSS technical monograph, 21. Soil Management Support Services*. U.S. Department of Agriculture.
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Lal, R., Mokma, D., & Lowery, B. (1999). Relation between soil quality and erosion. En R. Ratta & R. Lal (Eds.), *Soil quality and soil erosion* (pp. 237–258). CRC Press.
- Long, P., Sui, P., Gao, W., Wang, B., Huang, J., Yan, P., Zou, J., Yan L., & Chen, Y. (2015). Aggregate stability and associated C and N in a silty loam soil as affected by organic material inputs. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(4), 774–787. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60796-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60796-6)
- Lopes, E., Cairo, P., Colás, A., & Rodríguez, A. (2016). Relaciones entre las propiedades indicadoras de calidad, en dos subtipos de suelo pardos, en la provincia de Villa Clara. *Centro Agrícola*, 43(1), 21–28. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v43n1/cag03116.pdf>
- McCalla, T. M. (1944). Water-drop method of determining stability of soil structure. *Soil Science*, 58(2), 117–122.
- Mainuri, Z. G., & Owino, J. O. (2013). Effects of land use and management on aggregate stability and hydraulic conductivity of soils within River Njoro Watershed in Kenya. *International Soil and Water Conservation Research*, 1(2), 80–87. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30042-3](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30042-3)
- Marshall, T. J., Holmes, J. W., & Rose, C. W. (1996). *Soil physics* (3ra ed.). Cambridge University Press.
- Palacio, J. (2007). *Estudio de tres diferentes usos del suelo y su efecto en la estructura y funcionalidad del ensamblaje de escarabajos coprófagos (Coleóptera: Scarabaeidae) en el departamento de Antioquia Colombia*. [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana.
- Pieri, C. (1995). Long term soil management experiments in semiarid francophone Africa. En R. Lal & B. Stewart (Eds.). *Soil management: experimental basis for sustainability and environmental quality* (pp. 225–266). CRC Press.
- Rivera, J. H. (1999). *Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera central colombiana* [Tesis de Doctorado], Universidad Nacional de Colombia.
- Rivera, J. H., Lal, R., Amézquita, E., Mesa, O., & Chaves, B. (2010). Predicción de la erodabilidad en algunos suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 61(4), 344–357. <http://hdl.handle.net/10778/508>
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé*, 32, 1–44. <http://hdl.handle.net/10778/587>
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 56(4), 381–397. <http://hdl.handle.net/10778/163>
- Soinne, H., Hovi, J., Tammeorg, P., & Turtola, E. (2014). Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. *Geoderma*, 219, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.022>
- Volteras, B., & Amézquita, E. (2012). Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agronómica*, 58(1), 35–39. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/9741
- Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agronomy Journal*, 28(5), 337–351. <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>
- Warrick, A., & Nielsen, D. (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In Hillel, D. (Ed.). *Applications of soil physics* (pp. 319–344). Academic Press.