


PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DE SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA Y SU RELACIÓN CON EL MATERIAL PARENTAL



HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF SOILS OF THE COLOMBIAN COFFEE REGION AND THEIR RELATIONSHIP WITH PARENTAL MATERIAL

Lince Salazar, Luz Adriana; Sadeghian Khalajabadi, Siavosh

 Luz Adriana Lince Salazar
luz.lince@cafedecolombia.com
Cenicafé, Manizales – Colombia, Colombia

 Siavosh Sadeghian Khalajabadi
siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com
Cenicafé, Manizales – Colombia, Colombia

Revista de Investigación Agraria y Ambiental
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia
ISSN: 2145-6097
ISSN-e: 2145-6453
Periodicidad: Semestral
vol. 14, núm. 1, 2023
riaa@unad.edu.co

Recepción: 21 Junio 2022
Aprobación: 13 Septiembre 2022
Publicación: 17 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/130/1303815003/>

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.5891>

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

CÓMO CITAR: Lince, L. A. y Sadeghian, S. (2023). Propiedades hidrofísicas de suelos de la zona cafetera colombiana y su relación con el material parental. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 51 - 84. <https://doi.org/10.22490/21456453.5891>

Resumen: Contextualización del tema: Las propiedades hidrofísicas del suelo desempeñan un papel relevante en la producción agrícola y en los servicios ecosistémicos. Estas se relacionan tanto con el material parental como con las condiciones bioclimáticas y el uso del suelo.

Vacío de conocimiento: Los resultados de la presente investigación contribuyen a dilucidar las propiedades hidrofísicas de los suelos, a partir del conocimiento de los materiales geológicos de las regiones de Colombia.

Objetivos: Dada la importancia del tema, se llevó a cabo una investigación cuyo objetivo fue conocer la relación entre las propiedades hidrofísicas del suelo y su material parental.

Metodología: se seleccionaron 72 fincas cafeteras en Colombia, con suelos pertenecientes a cinco materiales parentales [ceniza volcánica, rocas ígneas intrusivas y extrusivas, esquistos y sedimentarias] y 22 unidades cartográficas. En las fincas se tomaron muestras de suelo, de entre 10 a 30 cm de profundidad, del perfil y se determinaron: distribución de tamaño de partículas, densidad aparente y real [Da y Dr] y contenido de materia orgánica [MO]. Además, se evaluaron las siguientes propiedades hidrofísicas: i) retenciones gravimétricas de humedad a capacidad de campo [CC] y punto de marchitez permanente [PMP], ii) porosidad total [Pt], iii) capacidad de almacenamiento de agua [CAA] y iv) conductividad hidráulica saturada [k_s].

Resultados y conclusiones: Los suelos provenientes de ceniza volcánica presentaron la menor Dr [2.16 g/cm³], Da [0.85 g/cm³] y arcilla [20.76 %], y mayor MO [11.72 %]; mientras que los derivados de ígneas intrusivas exhibieron mayor Dr [2.55 g/cm³], Da [1.34 g/cm³] y arena [56.96 %], y menor MO [6.17 %], limo [15.52 %], CC [47.39 %], PMP [27.14 %] y K_s [0.16 cm.h⁻¹]. La MO tuvo influencia sobre la Dr y Da, con valores de coeficiente de correlación [r] de -0.71 y -0.87 respectivamente, además de las correlaciones positivas con Pt, CC y PMP [r de 0.84, 0.86 y 0.67, respectivamente]. Se encontraron diferencias significativas entre la mayoría de las propiedades hidrofísicas, los materiales parentales y las funciones discriminantes canónicas al analizar todos los materiales parentales, que se consiguió

reconocer en el 65 % de los casos. Cuando se excluyeron del análisis los suelos provenientes de esquistos y rocas sedimentarias, se logró un 91 % de acierto en la identificación de los materiales parentales. En todos los casos, las variables con mayor importancia fueron MO, Da, CC, PMP, arenas y arcillas.

Palabras clave: arcilla, capacidad de campo, densidad aparente, densidad real, depósitos sedimentarios, materia orgánica del suelo, punto de marchitamiento permanente, rocas ígneas, rocas metamórficas.

Abstract: Contextualization: Soil hydrophysical properties influence agricultural production and ecosystem services. These properties are related to both, parental material and bioclimatic conditions and soil use.

Knowledge gap: The results of the present investigation contribute to elucidate the hydrophysical properties of the soils, based on the knowledge about the geological materials of the regions.

Purpose: Given the importance of the topic, an investigation was carried out which objective was to know the relationship between the hydrophysical properties of soil and its parental material.

Methodology: 72 coffee farms were selected in Colombia, with soils belonging to five parental materials [volcanic ash, intrusive and extrusive igneous rocks, schists and sedimentary] and 22 cartographic units. Soil samples, between 10 and 30 cm depth of the soil profile, were taken. Particle size distribution, bulk, and particle densities [BD and PD], and organic matter content [OM] were defined. Also, these hydrophysical properties were determined: i) gravimetric moisture retention at field capacity [FC] and wilting point [WP], ii) total porosity [TP], iii) water storage capacity [WSC], and iv) saturated hydraulic conductivity [K_s].

Results and conclusions: Soils from volcanic ash presented lower PD [2.16 g/cm^3], BD [0.85 g/cm^3] and clay [20.76%], and higher OM [11.72%]; while derivatives of intrusive igneous exhibited higher PD [2.55 g/cm^3], BD [1.34 g/cm^3] and sand [56.96 %], and lower OM [6.17 %], silt [15.52 %], FC [47.39 %], WP [27.14 %] and K_s [0.16 cm/h]. The OM influenced PD and BD, with correlation values [r] of -0.71 and -0.87 respectively, in addition to the positive correlations with TP, FC, and WP [r of 0.84, 0.86 and 0.67, respectively]. For most hydrophysical properties, significant differences were found between the parental materials and the canonical discriminating functions when all parental materials were analyzed, identifying them in 65% of cases. When soils from schists and sedimentary rocks were excluded from the analysis, 91% of the parental materials were recognized. In all the cases, the most important variables were OM, BD, FC, PMP, sand and clay.

Keywords: Clay, field capacity, bulk density, particle density, sedimentary deposits, soil organic matter, wilting point, igneous rocks, metamorphic rocks.

RESUMEN GRÁFICO



Autores

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades hidrofísicas del suelo desempeñan un papel relevante en la producción agrícola (Lal & Shukla, 2004). Dicha relevancia se atribuye a que influye en diferentes dinámicas que se dan en el suelo, entre ellas: i) regulación del movimiento y retención de agua y solutos (Weninger et al., 2019); ii) afectación de la aireación y crecimiento de las raíces (Pandey et al., 2021); iii) vida de los organismos del suelo (Pandey et al., 2021). Además, las propiedades hidrofísicas tienen implicaciones directas en las funciones del suelo como la filtración de contaminantes, regulación del agua, el clima y los ciclos de carbono (Borrelli et al., 2020), las cuales son considerados como servicios valiosos para los ecosistemas y bienestar humano (Panagos et al., 2020).

En la producción agrícola y regulación hídrica, a nivel de cuenca, las propiedades hidrofísicas del suelo más relevantes son textura, porosidad [Pt], densidades aparente [D_a] y real [D_r], conductividad hidráulica [Ks], infiltración, distribución de tamaño de poros y capacidad de almacenamiento de agua [CAA], las cuales, en la mayoría de los estudios, se acompañan de la información del contenido de materia orgánica [MO] (Lal & Shukla, 2004; Patiño et al., 2021). La textura es considerada como la propiedad inherente más influyente en las funciones del suelo, por estar correlacionada con la mayoría de las propiedades biológicas y físicas del este (Nunes et al., 2021) y afectar los contenidos de MO (Haddix et al., 2020; Li et al., 2020).

La dinámica de las propiedades hidrofísicas tiene una fuerte dependencia tanto del material parental (Jenny, 1941; Evans et al., 2021) como del manejo del suelo (Ajayi et al., 2021; De Lima et al., 2022), lo cual en ocasiones dificulta determinar si la dinámica se debe a las propiedades inherentes o al manejo del suelo (Amsili et al., 2021). Esto también ocurre para la MO, en cuyo caso se ha reportado dependencia del material parental (Barré et al., 2017; Zhang et al., 2019) y del manejo del suelo (Angst et al., 2021; Nunes et al., 2021).

Por otra parte, el material parental ha sido un parámetro para definir los grupos de fertilidad del suelo [en análisis multivariados] (Bezerra et al., 2017; Figueroa et al., 2018) y la diversidad bacteriana (Ma et al., 2021). En la nutrición vegetal, el material parental también tiene influencia, dado que los nutrientes que se encuentran en la solución del suelo están relacionados con la composición y el grado de meteorización de las rocas (Kim & Kim, 2015; Anda et al., 2015). De acuerdo con lo anterior, los suelos provenientes de materiales de composición ultramáfica y máfica presentan mayores contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , en comparación con los provenientes de materiales de composición intermedia (Lince et al., 2016), y los derivados de cenizas

volcánicas tienen mayor fijación de fósforo que los otros materiales (Espinoza, 2004), lo que es atribuido a la mineralogía de arcillas (Ribeiro et al., 2009; Díaz y Sadeghian, 2018).

Adicional a lo anterior, el material parental se toma frecuentemente como un criterio para realizar estudios de clasificación por pedogénesis y geoformas (Yu & Hunt, 2018), debido a su afinidad con las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas del suelo (Jenny, 1941; Yu & Hunt, 2018) y por su estabilidad a mediano y largo plazo (Kubišna, 1958); además, porque las clases de suelo están destinadas a ser naturales y se reportan homogéneas con respecto a sus propiedades y funciones (Cline, 1949). De forma tal que una unidad de suelo, formada a partir de un material parental particular, puede presentar variaciones en el espacio que no son fácilmente separables, debido a varios factores, entre ellos: i) variaciones físicas y geoquímicas que se dan dentro de los tipos de rocas (Evans et al., 2021); ii) interacción del bioclima y la topografía (Lybrand & Rasmussen, 2018; Waroszewski et al., 2019); iii) ocurrencia de procesos de translocación y bioturbación (Phillips, 2007); iv) ruptura de los ciclos naturales de formación generados por la agricultura (Amundson, 2021), en ese caso, las variaciones se consideran genoformas. Sin embargo, cuando las variaciones en las genoformas son claramente diferenciables en el espacio y afectan sustancialmente las funciones del suelo son tratadas como fenofomas (Rossiter, 2021), de las cuales las más comunes son las relacionadas con MO (Stevenson et al., 2015), la humedad del suelo y Ks (Bouma & Droogers, 1999).

En Colombia, los suelos son diversos, especialmente en la zona central que geológicamente está conformada por diversas rocas: sedimentarias, polimetamórficas, plutónicas, batolitos y volcánicas de varias edades (Malagón, 2003). Con relación a esto, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC] cuenta con estudios de clasificación de unidades cartográficas de suelos, a nivel de suborden, desarrollados con la metodología para la identificación de genoformas. Dichos estudios cuentan con descripción del material parental (Gómez et al., 1991) y son nombrados en diversas publicaciones. Algunos de estos análisis, que incluyen hallazgos sobre las propiedades hidrofísicas de los suelos y que se han tenido en cuenta para realizar la unidad cartográfica de los suelos de Colombia, son los realizados por Suárez et al. (1986), Cardona y Sadeghian (2005), y Farfán e Hincapié (2011). Sin embargo, la mayoría de los estudios mencionados, realizados por la FNC, se han enfocado en los suelos aptos para el cultivo de café y por eso se han realizado a una profundidad máxima [del perfil del suelo] de 0.30 m, debido a que es la profundidad en la que la planta de café presenta el mayor número de raíces absorbentes y por ende desarrolla su mayor actividad biológica (Rendón y Giraldo-Herrera, 2019).

Siguiendo la línea mencionada, en la revisión de literatura sobre composición de suelos, de la zona cafetera de Colombia, se encontraron resultados de investigaciones en las que se relaciona la parte química del suelo con los materiales parentales y sus implicaciones en la fertilidad del suelo (Henaó, 1995; Lince et al., 2016; Díaz y Sadeghian, 2018), pero no se hallaron resultados que identifiquen la relación de las propiedades hidrofísicas con los diferentes materiales parentales. No obstante, el estado del arte indica que los materiales parentales dejan herencia rastreable en las propiedades hidrofísicas de los suelos, y que conocer dicha relación aporta al diagnóstico de la fertilidad del suelo y sirve de insumo para generar estrategias de manejo locales que repercuten en la producción del cultivo. Teniendo en cuenta estas antecedentes, se realizó esta investigación cuyo objetivo principal fue determinar la relación entre las propiedades hidrofísicas y los materiales parentales del suelo en las unidades de suelos de cinco departamentos, altamente influyentes en la caficultura Colombiana y geológicamente complejos [Huila, Antioquía, Tolima, Quindío y Risaralda], a una profundidad máxima [del perfil del suelo] de 0.30 m.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y condiciones climáticas

Entre los años 2016 y 2020 se tomaron muestras de suelos en 72 fincas cafeteras localizadas en los departamentos de Huila, Antioquia, Tolima, Quindío y Risaralda en Colombia. El criterio para la selección

de los departamentos fue la representatividad para el área cafetera y la diversidad de los materiales parentales. Estos departamentos representan el 51 % del área cultivada en café de Colombia, aproximadamente 490000 hectáreas, y se encuentran en la región Centro Occidental de Colombia, 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. En esta zona, el clima es tropical ecuatorial, de montaña, con una precipitación anual entre 1000 a 3000 mm año⁻¹ y con distribución bimodal, en la que los períodos de mayor precipitación están entre los meses de marzo a junio y en los de septiembre a diciembre (Gómez et al., 1991).

Unidades cartográficas de suelos y materiales parentales

Los suelos de la región cafetera, de los departamentos seleccionados, en su mayoría están compuestos por cinco materiales parentales [depósitos de ceniza volcánica, rocas ígneas intrusivas y extrusivas, esquistos y sedimentarias] [Figura 1] y 22 unidades cartográficas establecidas por la FNC, a nivel de subgrupo [Tabla 1]. Según las descripciones geomorfológicas de la FNC, las regiones donde se tomaron las muestras son variables y se pueden agrupar en tres: i) zonas con colinas onduladas, de longitud menor a 100 m y pendientes homogéneas menores al 50 %, representadas por las unidades cartográficas de Chinchiná, Génova, Laboyos, Líbano, Malabar, Mendarco, Montenegro, Quindío, San Agustín y Timaná. ii) zonas con vertientes erosionales, con pendientes superiores al 50 % y longitudes que no superan los 100 m, conformadas por la unidad Suroeste. iii) zonas con vertientes erosionales y pendientes superiores a 50 %, con longitudes mayores a 300 m, conformadas por las unidades cartográficas de Buenavista, Campoalegre, Catarina, Doscientos, Guadalupe, Gualí, Mendarco, Parnaso, Tablazo, Salgar y San Simón. La cartografía edáfica y de materiales parentales utilizada se revisó desde los archivos GIS [ArcGIS], propiedad de la FNC. La escala de levantamiento de la cartografía que se usó, para los departamentos de Antioquia, Huila, Quindío y Risaralda, fue de 1:50000 y para Tolima en 1:125000.

TABLA 1.
Descripción de las unidades cartográficas de suelo muestreadas, según la Federación Nacional de Cafeteros (1972; 1973; 1985; 1986; 1988; 1992).

Material parental		Unidad de suelo	Contenido pedológico	Departamento	Área cartografiada, ha*	Número de fincas muestreadas	
Tipo de roca o depósito	clase						
Ceniza volcánica	Ceniza volcánica	Anaime	Sin definir	Tolima	16872	3	
	Ceniza volcánica	Consociación Chinchiná	Typic Dystrandept [80 %]; otros [20 %]	Antioquia	59328	3	
			Typic Hapludands [80 %]; Andic Dystrudepts 10 %; otros [10%]	Risaralda	54293	3	
	Ceniza volcánica	Ceniza volcánica	Libano	Typic Melanudands [75%]; otros [25 %]	Quindío	20270	3
				Sin definir	Tolima	33725	3
		Ceniza volcánica	Consociación Montenegro	Typic Melanudands [75 %]; Entic Hapludands [25 %]	Quindío	26420	3
		Ceniza volcánica	Consociación Quindío	Typic Melanudands [80 %]; Entic Hapludands [20 %]	Quindío	8892	3
Ceniza volcánica	Consociación San Agustín	Typic Melanudands [70 %], Typic Dystrudepts [20 %] y Entic hapludandst [10 %]	Huila	12244	3		
Esquistoso	Esquistoso talcoso	Asociación Catarina	Paralithic Udorthents [40 %]; Typic Eutrudepts [35 %]; Andic Eutrudepts [10 %]; otros [15 %]	Risaralda	3289	3	
	Esquistoso	Asociación Génova	Typic Eutrudepts [35 %]; Paralithic Udorthents [30 %]; Lithic Udorthents [20 %]; Paralithic Eutrudepts [10 %]; otros [5 %]	Quindío	8485	3	
	Esquistos	Gualí	Sin definir	Tolima	33438	3	
	Esquistos	Asociación Salgar	Typic Dystrypept [44 %]; Typic Tropphenth [20 %]; Typic Dystrandept [16 %]; otros [80 %]	Antioquia	81733	3	
Ígnea extrusiva	Anfibolita	Consociación Buenavista	Typic Eutrudepts [70 %]; otros [30 %]	Quindío	1356	3	
	Basalto	Asociación Doscientos	Typic Dystrypept [57 %]; Typic Dystrandept [27 %]; Otros [16 %]	Antioquia	44527	3	
	Basalto	Consociación Parnaso	Typic Eutrudepts [75 %]; Paralithic Eutrudepts [15 %]; otros [10 %]	Risaralda	19954	3	
	Aglomerados	Consociación Suroeste	Typic Dystrypept [75 %]; Otros [25 %]	Antioquia	70879	3	
Ígnea intrusiva	Granito moscovítico	Asociación Campoalegre	Typic Dystrudepts [40 %]; Typic Udorthents [30%]; otros [30 %]	Huila	49867	3	
	Granito hornbléndico biotítico	Asociación San Simón	Sin definir	Tolima	106284	2	
			Sin definir	Huila	44698	3	
	Gneis margoso	Asociación El Recreo	Typic Eutrudepts [45 %]; Paralithic Eutrudepts [40 %]; otros [25 %].	Huila	57071	2	
	Sedimentario	Arenisca	Asociación Guadalupe	Typic Udorthents [45 %]; Typic Dystrudepts [30 %]; otros [25 %]	Huila	11310	3
Coluvio-aluviales		Asociación Laboyos	Typic Argiaquolls [50 %]; Tropic Fluvaquents [30 %]; otros [20 %]	Huila	13577	3	
Arenisca		Mendarco	Sin definir	Tolima	102202	3	
Arcillolitas		Asociación Timaná	Typic Eutrudepts [45 %]; Typic Udorthents [55 %]	Huila	8917	3	
Areniscas, arcillas, conglomerados y mantos de carbón		Asociación Venecia	Oxic Dystrypept [40 %]; Typic Dystrypept [30 %]; Paralithic Dystrypept [10 %]; Otros [20 %]	Antioquia	40750	2	

autores

Selección de fincas

Una vez identificadas las unidades de interés, con el software ArcGIS se seleccionaron tres puntos aleatorios en cada una de ellas; con las coordenadas de los puntos seleccionados, y con la ayuda del Servicio de Extensión de la FNC, se buscaron las 72 fincas [Figura 1] cuyo uso fuera, principalmente, el establecimiento

de cultivos de café, por lo menos en los últimos diez años, y que el café sembrado, preferiblemente, correspondiera a la variedad Castillo®. Además, se procuró que el café sembrado tuviera libre exposición y fertilización química, de acuerdo con el manejo recomendado por Cenicafé.

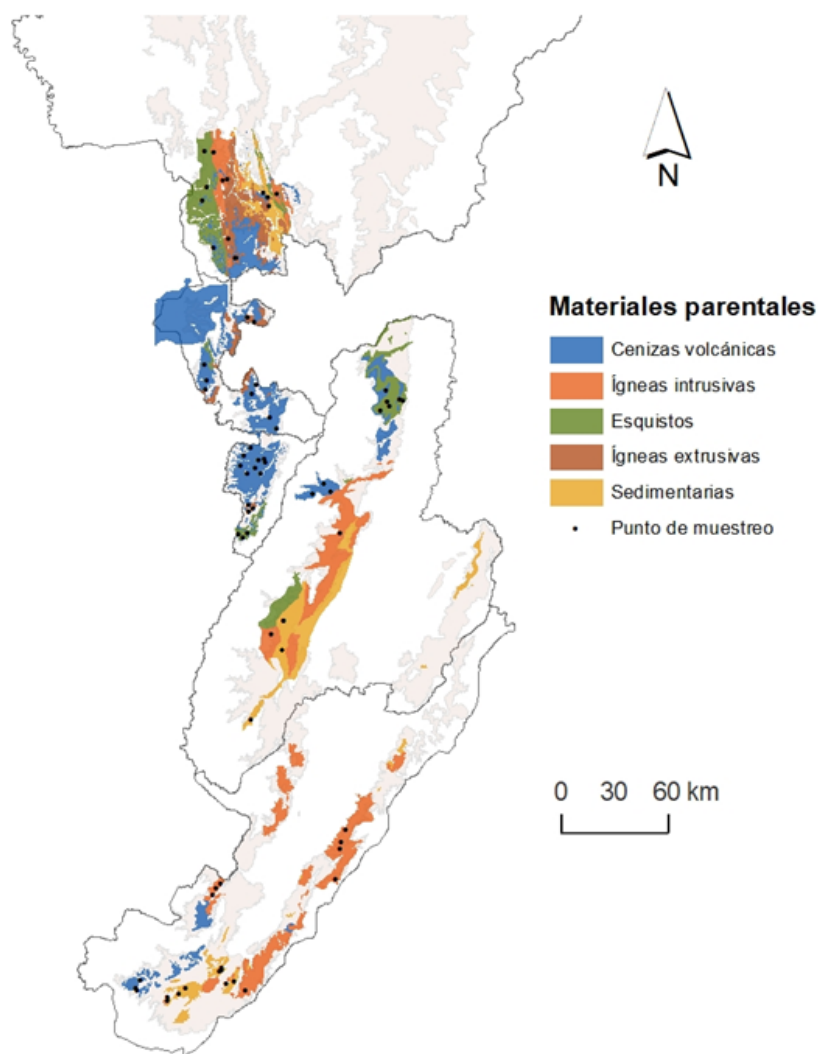


FIGURA 1.
Mapa de distribución de materiales parentales en la zona de estudio, basado en los levantamientos de suelos de FNC.
Autores.

Muestreo de suelos

En cada una de las 72 fincas, se seleccionó un lote plantado con café, preferiblemente en etapa de levante, y se realizó un cateo para confirmar que tanto el material parental como la unidad de suelo fuera la que se sugería en la cartografía edáfica de la FNC. Una vez verificadas las unidades de suelos y los materiales parentales, se marcaron cuatro puntos en diferentes posiciones geomorfológicas de cada lote [parte alta, baja y media], con el fin de minimizar la variabilidad, y se extrajeron las muestras.

Cuando el lote no presentaba cambios en la geomorfología, los puntos se marcaron de forma equidistante, partiendo del centro del lote; en cada uno de los puntos se tomaron muestras disturbadas [1.0 kg] y sin disturbar, con la ayuda de cilindros de acero de aproximadamente 5 cm de diámetro por 0.05 m de altura, a una profundidad del perfil entre 10 y 30 cm. El muestreo se realizó a partir de los 10 cm del perfil, debido a

que en los primeros centímetros del perfil las propiedades presentan valores diferentes a los que se obtienen a mayor profundidad (Meena et al., 2020; Lince-Salazar, 2021). Esto ocurre por varios factores, como la actividad biológica (Zech et al., 1997) representada en los ácidos orgánicos, la enzima fosfatasa o los quelantes (Smethurst, 2000).

Medición de propiedades hidrofísicas en laboratorio

Con las muestras disturbadas se determinaron: MO, a partir del contenido de carbono orgánico, [por el método de Walkley–Black]; colorimetría; contenido de arenas [A], arcillas [Ar] y limos [L] [por el método de la pipeta]; y Dr [por el método del picnómetro]. Con las muestras sin disturbar se determinaron: Da [por el método del cilindro de Coile]; Ks, [por medio de un permeámetro de cabeza constante] (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 1990); y las retenciones de humedad [RH], a 0.33 y 15.00 bar, [empleando ollas y una membrana de presión], conocidas como capacidad de campo [CC] y punto de marchitez permanente [PMP], respectivamente. La capacidad de almacenamiento de agua [CAA] y la porosidad total se calcularon a partir de las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$CAA = (CC - PMP) * Da$$

[Ecuación 1]

Donde

CAA: capacidad de almacenamiento de agua

CC: capacidad de campo (retención gravimétrica de humedad a 0.33 bar)

PMP: punto de marchitez permanente (retención gravimétrica de humedad a 15.00 bar)

Da: Densidad aparente

$$Pt = 100 (1 - Da/Dr)$$

[Ecuación 2]

Donde

Pt: porosidad total

Da: densidad aparente

Dr: densidad real

Análisis estadísticos

Para todas las propiedades analizadas, los valores obtenidos en laboratorio [cuatro muestras por lote] se promediaron y dicho valor fue el representante de cada punto muestreado [72 puntos en total]. Una vez estimados los valores de cada punto, se calculó el valor promedio y el error estándar para cada una de las 22 unidades cartográficas de suelo y los cinco materiales parentales. Con los valores promedio se realizó un análisis de varianza no balanceado, con una significancia del 5 %, entre los materiales parentales y cada una de las propiedades hidrofísicas. La razón por la cual se optó por el análisis no balanceado se debió a que las unidades San Simón, El Recreo y Venecia contaron con menor número de muestras (repeticiones) de suelo que las otras unidades.

Para cada uno de los 11 análisis, el grado de libertad entre grupos fue de 4 y el valor intragrupos, de 67. Posteriormente, se realizó la prueba [de Duncan] de múltiples rangos con una confianza del 95 %. Previo al análisis de varianza, se corroboró que los datos cumplieran con los supuestos de normalidad [asimetría y curtosis entre ± 2 y prueba z para asimetría y curtosis al 95 %] y homogeneidad de la varianza [prueba de

Levene con confianza del 95 %]. La significancia del valor P se incluyó en los resultados como: * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$ y *** = $p < 0.001$.

Se realizó el análisis de correlación de Pearson y regresión múltiple, con confianza del 95 %, para las 11 propiedades hidrofísicas analizadas en los 72 puntos y cada uno de los materiales parentales. En el análisis se tuvo en cuenta la exclusión de las propiedades que se autocorrelacionan [Pt con Da y Dr; CAA con CC, PMP y Da] y se marcaron en los resultados como AC [autocorrelación]. Previamente a los análisis mencionados, se comprobó que los datos provinieran de una distribución normal [prueba z para asimetría y curtosis con confianza del 95 %] y para las variables que no presentaron esa condición [MO, CC, PMP y Ks] se optó por la transformación matemática con Log10.

Una vez determinada la varianza entre los materiales parentales, se realizó el análisis de funciones discriminantes canónicas, que es comúnmente aplicado en edafología para identificar diferencias entre grupos de suelos, a partir de medidas de propiedades de los individuos pertenecientes a esos grupos (Webster & Oliver, 1990; Pires et al., 2001). A partir de los coeficientes estandarizados de las funciones discriminantes canónicas, se identificaron las variables responsables de generar diferencias entre los materiales parentales. Para cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas, se trabajó con las variables MO, CC, PMP y Ks transformadas con Log10 y no se incluyeron las variables Pt y CAA por derivarse de otras propiedades.

En el análisis de funciones discriminantes canónicas, el poder discriminante de las variables Lambda de Wilks, con valores cercanos a cero, se interpretaron como los de mayor poder discriminante [Pozo y Carrasco, 2005], y el poder discriminante de las funciones con valores cercanos a uno, se consideraron como los de mayor potencia discriminante (Salvador, 2000). Los softwares utilizados fueron Excel, Statgraphics [V. 5.2], SigmaPlot [V. 10.0] y ArcGIS [V.10.3.1].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadística descriptiva

Los suelos derivados de rocas ígneas extrusivas presentaron menor contenido de arenas [A] y los derivados de rocas ígneas intrusivas y cenizas volcánicas, los mayores contenidos de esta. El porcentaje de limos [L] fue menor en los suelos de rocas ígneas intrusivas y sedimentarias, y fue mayor en cenizas volcánicas y esquistos. Los suelos de cenizas volcánicas tuvieron el menor contenido de arcillas [Ar] y el mayor, los de rocas sedimentarias [Tabla 2, Figura 2].

La relación entre los porcentajes de A, L y Ar tuvo una distribución normal [Tabla 4] y los promedios se ajustaron a los reportados en la literatura (Nunes et al., 2021; Wilson, 2019) en la cual, los suelos que presentaron alto contenido de A y bajo de Ar fueron los procedentes de cenizas volcánicas (Nanko et al., 2014) y rocas intrusivas, de composiciones ácidas a intermedias, tipo granito (Corrêa et al., 2020; Zhang et al., 2019). Estas condiciones se atribuyen a la alta presencia de minerales resistentes a la meteorización como el cuarzo, mientras que en los esquistos y basaltos presentan un mayor contenido de Ar por ser menos resistentes a la meteorización (Banakeng et al., 2016; Liu, Guo, et al., 2021^a).

TABLA 2.

Valores promedio, error estándar y diferencias de medias por unidad cartográfica de suelo para porcentajes de distribución de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar), contenido de materia orgánica (MO) y conductividad hidráulica saturada (Ks). Cada letra (a, b, c, d, e) significa un grupo homogéneo, según Duncan al 95 %, la comparación estadística se hace por columnas.

Unidad de Suelo	A	L	Ar	MO	Ks
	%				cm.h ⁻¹
Suelos derivados de ceniza volcánica					
Anaime (n=3)	65.93±1.03 ^a	28.39±1.03 ^b	5.69±0.09 ^d	4.27±0.60 ^e	0.05±0.02 ^b
Chinchiná (n=9)	53.65±3.07 ^b	25.99±2.86 ^b	20.47±2.02 ^b	14.33±2.26 ^b	0.22±0.06 ^a
Líbano (n=3)	49.39±7.33 ^{bc}	33.43±1.77 ^a	17.17±5.61 ^{bc}	9.56±2.57 ^{cd}	0.46±0.24 ^a
Montenegro (n=3)	40.53±4.93 ^c	36.67±7.14 ^a	22.80±2.31 ^b	6.25±1.24 ^d	0.41±0.04 ^a
Quindío (n=3)	45.27±6.87 ^{bc}	37.53±7.27 ^a	17.20±0.40 ^c	11.42±0.60 ^c	0.28±0.08 ^a
San Agustín (n=3)	43.78±6.89 ^{bc}	14.42±1.84 ^c	41.80±6.56 ^a	19.28±2.43 ^a	0.30±0.10 ^a
Suelos derivados de esquistos					
Catarina (n=3)	44.33±0.67 ^a	33.67±2.19 ^a	22.00±2.52 ^c	14.53±1.33 ^a	0.39±0.06 ^{ab}
Génova (n=3)	42.27±7.36 ^{ab}	24.80±4.20 ^{bc}	32.93±3.28 ^{ab}	6.16±0.08 ^c	0.47±0.10 ^a
Gualí (n=3)	40.19±5.67 ^{ab}	30.27±5.76 ^{ab}	29.54±4.72 ^b	6.21±1.09 ^{bc}	0.27±0.14 ^{ab}
Salgar (n=3)	36.78±4.61 ^b	21.81±1.25 ^c	41.4±4.79 ^a	7.52±0.99 ^b	0.25±0.11 ^b
Suelos derivados de rocas ígneas extrusivas					
Buenavista (n=3)	46.13±0.67 ^a	29.07±1.76 ^a	24.80±1.15 ^b	5.54±1.37 ^{ab}	0.20±0.05 ^b
Doscientos (n=3)	30.97±1.33 ^{cd}	21.03±1.24 ^b	48.00±1.14 ^a	5.57±0.25 ^b	0.12±0.07 ^b
Parnaso (n=3)	29.33±8.25 ^c	30.00±1.00 ^a	40.67±7.54 ^a	7.53±0.86 ^a	0.61±0.20 ^a
Suroeste (n=3)	36.55±3.44 ^{bc}	19.61±2.07 ^b	43.85±5.13 ^a	7.02±0.34 ^a	0.38±0.33 ^{ab}
Suelos derivados de rocas ígneas intrusivas					
Campoalegre (n=3)	54.70±2.73 ^b	17.78±4.01 ^a	27.52±1.45 ^a	4.81±0.68 ^b	0.09±0.04 ^b
El Recreo (n=2)	65.90±2.46 ^a	5.61±1.06 ^a	18.69±13.33 ^a	8.04±0.02 ^a	0.10±0.00 ^b
San Simón (n=5)	54.73±3.20 ^b	18.13±3.22 ^a	27.40±6.20 ^a	6.24±1.08 ^b	0.22±0.07 ^a
Suelos derivados de rocas y cuerpos sedimentarios					
Guadalupe (n=3)	50.63±1.20 ^a	7.10±1.43 ^c	42.27±1.34 ^b	8.07±1.03 ^a	0.21±0.11 ^b
Laboyos (n=3)	44.45±0.00 ^b	4.75±0.00 ^d	50.80±0.00 ^a	10.09±3.72 ^a	0.21±0.12 ^b
Mendarco (n=3)	42.37±3.73 ^{bc}	24.36±4.05 ^a	33.26±1.80 ^c	8.77±1.30 ^a	0.66±0.47 ^a
Tímaná (n=3)	37.93±4.07 ^c	17.78±1.11 ^b	44.29±3.22 ^b	5.26±0.22 ^b	0.01±0.00 ^c
Venecia (n=2)	37.78±4.41 ^c	30.28±2.95 ^a	31.94±1.46 ^c	10.46±1.83 ^a	0.03±0.01 ^c
Resumen por materiales parentales					
Suelos de cenizas volcánicas (n=24)	50.73±2.35 ^a	28.55±2.10 ^a	20.76±2.28 ^d	11.72±1.29 ^a	0.27±0.04 ^a
Suelos de esquistos (n=12)	40.89±2.37 ^b	27.64±2.13 ^a	31.47±2.69 ^{ab}	8.56±1.11 ^{ab}	0.34±0.05 ^a
Suelos de ígneas extrusivas (n=12)	35.75±2.77 ^b	24.93±1.55 ^a	39.33±3.30 ^{ab}	6.37±0.44 ^b	0.33±0.10 ^a
Suelos de ígneas intrusivas (n=10)	56.96±2.27 ^a	15.52±2.48 ^b	25.7±3.74 ^{dc}	6.17±0.65 ^b	0.16±0.04 ^{ab}
Suelos de sedimentaria (n=14)	42.98±1.73 ^b	15.89±2.75 ^b	41.13±2.05 ^a	8.40±0.92 ^{ab}	0.24±0.11 ^b

autores

Los suelos provenientes de rocas ígneas intrusivas y extrusivas presentaron menores contenidos de materia orgánica [MO] [Tabla 2, Figura 2] y los derivados de cenizas volcánicas mayor contenido de esta; adicionalmente, los mayores contenidos de MO se encontraron en los suelos con alto contenido de A

[derivados de cenizas volcánicas] y no en suelos con alto contenido de Ar, como lo indican otros autores (Angst et al., 2021; Haddix et al., 2020; Erktan et al. 2020). Esto se puede atribuir a que los suelos arenosos, con altos contenidos de MO en la zona de estudio, exhiben características ándicas, es decir, el aluminio y el hierro forman complejos estables con el humus, lo que permite el desarrollo de horizontes superficiales con altos contenidos de MO (González et al., 2008).

En relación con lo mencionado anteriormente, una vez excluidos los suelos volcánicos del análisis se encontró una relación entre textura [T] y MO similar a los reportes de otras investigaciones (Angst et al., 2021); al respecto, los suelos provenientes de rocas intrusivas, con alto contenido de A, fueron los que presentaron menor valor de MO, y los de rocas sedimentarias, con alto contenido de Ar, los de mayor MO. Además, no se encontró correlación significativa entre la distribución de los diferentes tamaños de partículas [A, L y Ar] con MO.

MO no presentó una relación directa con el material parental, sin embargo, dada la relación entre la textura y el material parental, y a su vez de la textura con MO, se presume que pueda existir cierta influencia entre MO y el material parental, tal como lo exponen Zhang et al. (2019) y Barré et al. (2017). Es necesario tener en cuenta también el efecto de otros factores que condicionan los contenidos de MO en el suelo, tales como la topografía (Saifuzzaman et al., 2021; Nasta et al., 2020), la temperatura ambiental y la humedad del suelo (Li et al., 2020).

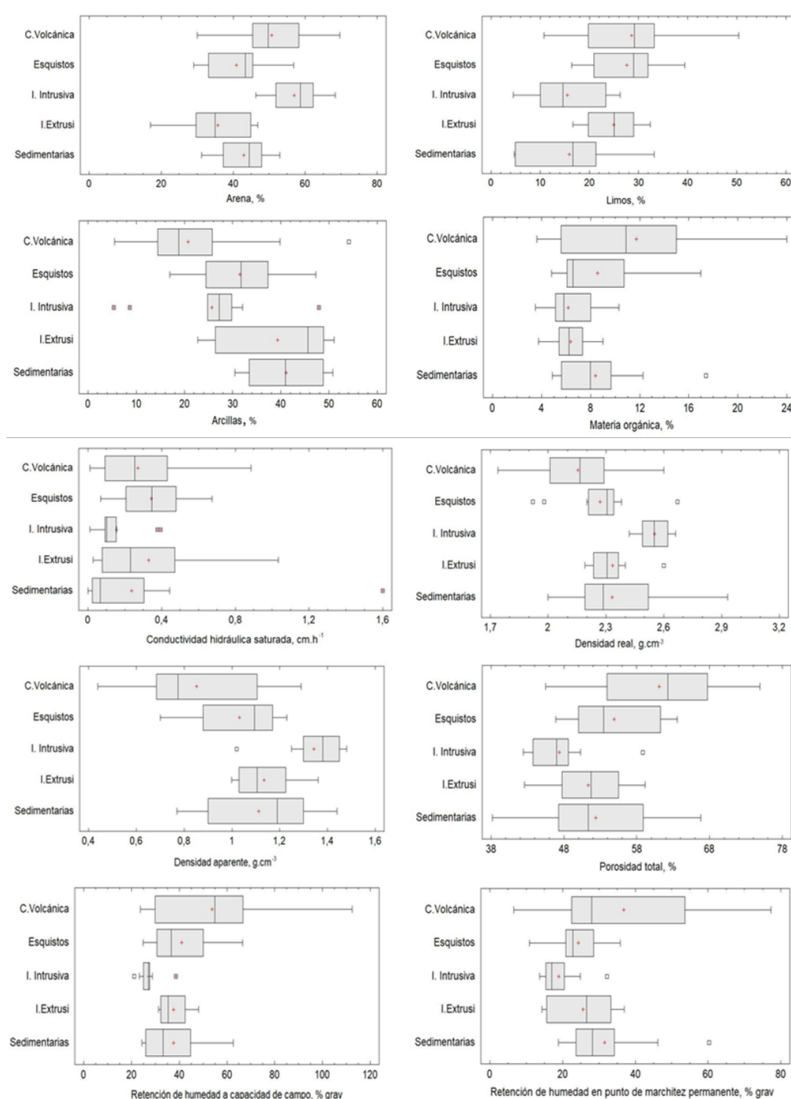


FIGURA 2.

Diagramas de caja y bigotes para las propiedades analizadas, según los materiales parentales. Suelos derivados de cenizas volcánicas n=24; de esquistos n=12; de rocas ígneas intrusivas n=10; de ígneas extrusivas n=12; y de sedimentarias n=14. autores

La conductividad hidráulica saturada [Ks] fue la propiedad con mayor variabilidad [alto error estándar] [Tabla 2] y más asimetría en la distribución de los datos [Tabla 4], este aspecto puede deberse a factores como la presencia de fragmentos de roca (Ilek et al., 2019), la topografía (Liu et al., 2021) y el tipo de uso agrícola (Villarreal et al., 2020; Ajayi et al., 2021), además de otros factores intrínsecos del suelo (Abdelbaki, 2021; Kashani et al., 2020), lo que dificulta encontrar una relación con los materiales parentales (Tabla 2, Figura 2). En general, se puede comentar que los suelos derivados de rocas ígneas intrusivas se caracterizaron por su menor Ks y los de rocas ígneas extrusivas y esquistos por presentar los promedios más altos de ella [Tabla 2, Figura 2].

Los promedios más bajos de densidad real [Dr] se reportaron para los suelos derivados de cenizas volcánicas, mientras que los más altos fueron para los de rocas ígneas intrusivas [Tabla 3, Figura 2] con una distribución normal [Tabla 4]. Con relación a la Dr se evaluaron dos grupos homogéneos: uno conformado

por los suelos provenientes de cenizas volcánicas, esquistos, rocas sedimentarias e ígneas extrusivas, y el otro grupo conformado por los suelos derivados de rocas ígneas intrusivas.

En general, los resultados de D_r se ajustan al rango establecido para partículas minerales formadoras del esqueleto del suelo (Lal & Shukla, 2004); no así para los provenientes de esquistos y basaltos, los cuales presentaron valores más bajos a los reportados en la literatura sobre el particular, que se encuentran entre 2.50–2.87, y 2.60 -2.66, respectivamente (Lal & Shukla, 2004). Estos resultados posiblemente se deban a la influencia de MO, dado que las partículas sólidas del suelo están conformadas por una mezcla entre sustancia mineral y MO, en la que los altos contenidos de MO se relacionan con bajos valores de D_r (Ruehlmann, 2020), con correlaciones negativas de valor $r = -0.996$ (Zanor et al., 2018). Dicha relación inversamente proporcional también se presentó en este estudio, lo cual se puede verificar con el análisis con la totalidad de los datos y para los suelos derivados de cenizas volcánicas, ígneas intrusivas y esquistos, obteniendo en todos ellos correlaciones significativas (Tabla 3).

TABLA 3.

Valores promedio, error estándar y diferencias de medias por unidad cartográfica de suelo para las siguientes propiedades: densidad real (Dr), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), retención de humedad gravimétrica a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de almacenamiento de agua (CAA). Cada letra (a, b, c, d) significa un grupo homogéneo, según Duncan, al 95 % (la comparación estadística se hace por columnas).

Unidad de Suelo	Dr	Da	Pt	CC	PMP	CAA
	----- g.cm ⁻³ -----		----- % -----			
Suelos derivados de ceniza volcánica						
Anaime (n=3)	2.54±0.02 ^b	1.22±0.04 ^a	52.07±1.90 ^b	28.06±0.85 ^d	25.95±1.36 ^c	2.59±0.77 ^d
Chinchiná (n=9)	2.03±0.07 ^c	0.72±0.08 ^{bc}	64.91±2.84 ^a	67.12±8.42 ^{ab}	38.90±7.38 ^b	19.49±2.00 ^a
Libano (n=3)	2.32±0.15 ^b	0.91±0.16 ^b	60.91±5.15 ^a	48.69±10.91 ^{bc}	42.92±9.99 ^b	4.91±0.60 ^c
Montenegro (n=3)	2.25±0.03 ^b	1.07±0.05 ^{ab}	52.21±1.75 ^b	26.14±1.99 ^d	15.55±1.06 ^d	11.3±0.60 ^b
Quindío (n=3)	2.15±0.03 ^b	0.82±0.06 ^b	61.98±2.66 ^a	42.64±7.31 ^c	29.70±7.21 ^{bc}	10.57±0.74 ^b
San Agustín (n=3)	1.87±0.07 ^d	0.62±0.05 ^c	66.99±1.92 ^a	83.75±9.83 ^a	63.91±2.44 ^a	11.62±3.87 ^b
Suelos derivados de esquistos						
Catarina (n=3)	2.03±0.09 ^c	0.77±0.06 ^c	62.05±1.14 ^a	59.67±5.90 ^a	21.78±0.89 ^b	28.72±2.42 ^a
Génova (n=3)	2.33±0.02 ^b	1.19±0.02 ^a	48.96±1.04 ^c	32.65±3.21 ^b	17.51±3.31 ^c	17.89±3.59 ^b
Gualí (n=3)	2.45±0.11 ^b	1.05±0.10 ^b	57.54±3.02 ^b	38.76±7.95 ^b	30.53±4.27 ^a	7.78±3.36 ^c
Salgar (n=3)	2.26±0.02 ^b	1.11±0.02 ^b	51.02±1.32 ^c	33.25±0.77 ^b	27.48±1.49 ^a	6.39±0.91 ^d
Suelos derivados de rocas ígneas extrusivas						
Buenavista (n=3)	2.34±0.03 ^b	1.29±0.05 ^a	44.77±1.79 ^b	32.24±0.22 ^c	15.06±0.35 ^c	22.23±1.49 ^a
Doscientos (n=3)	2.27±0.04 ^b	1.11±0.05 ^b	51.09±2.52 ^a	36.26±3.89 ^{bc}	31.78±2.70 ^a	4.86±1.14 ^b
Parnaso (n=3)	2.51±0.09 ^a	1.12±0.07 ^b	55.40±2.13 ^a	43.32±2.41 ^a	21.23±2.81 ^b	24.48±0.87 ^a
Suroeste (n=3)	2.22±0.02 ^b	1.02±0.02 ^c	54.10±1.23 ^a	38.58±3.28 ^{ab}	34.45±1.26 ^a	4.18±2.05 ^b
Suelos derivados de rocas ígneas intrusivas						
Campoalegre (n=3)	2.57±0.06 ^a	1.44±0.03 ^a	43.92±0.25 ^b	23.95±1.79 ^b	16.07±1.55 ^a	11.34±0.39 ^a
El Recreo (n=2)	2.52±0.10 ^a	1.27±0.03 ^b	49.44±0.83 ^a	28.03±0.74 ^a	20.64±4.20 ^a	9.50±4.62 ^a
San Simón (n=2)	2.56±0.03 ^a	1.31±0.08 ^b	48.66±2.73 ^a	28.70±2.52 ^a	20.12±3.16 ^a	11.49±2.18 ^a
Suelos derivados de rocas y cuerpos sedimentarios						
Guadalupe (n=3)	2.48±0.23 ^b	1.14±0.06 ^b	53.72±3.11 ^a	33.20±5.19 ^b	29.03±2.36 ^b	4.38±3.26 ^c
Laboyos (n=3)	2.20±0.05 ^b	1.16±0.10 ^b	47.07±5.06 ^{ab}	35.06±8.94 ^b	30.46±6.98 ^b	4.94±1.71 ^c
Mendarco (n=3)	2.29±0.03 ^b	0.99±0.15 ^{bc}	56.97±6.46 ^a	37.55±4.28 ^b	29.18±3.03 ^b	7.99±0.92 ^b
Tímaná (n=3)	2.58±0.04 ^a	1.36±0.04 ^a	47.19±0.86 ^b	30.36±3.01 ^b	23.12±2.34 ^b	9.80±0.87 ^a
Venecia (n=2)	2.01±0.01 ^c	0.82±0.02 ^c	59.16±0.80 ^a	58.98±3.63 ^a	53.21±7.03 ^a	4.67±2.68 ^c
Resumen por materiales parentales						
Suelos de cenizas volcánicas (n=24)	2.16±0.05 ^c	0.85±0.05 ^c	61.11±1.68 ^a	53.83±5.34 ^b	36.84±4.06 ^a	12.43±1.54 ^{ab}
Suelos de esquistos (n=12)	2.27±0.06 ^{bc}	1.03±0.05 ^b	54.89±1.75 ^b	41.08±3.99 ^b	24.32±1.94 ^{ab}	15.19±2.96 ^a
Suelos de ígneas extrusivas (n=12)	2.33±0.04 ^b	1.14±0.04 ^b	51.34±1.50 ^{bc}	37.60±1.70 ^b	25.63±2.52 ^{ab}	13.94±2.92 ^a
Suelos de ígneas intrusivas (n=10)	2.55±0.03 ^a	1.34±0.04 ^a	47.39±1.50 ^c	27.14±1.46 ^a	19.01±1.79 ^b	11.05±1.27 ^{ab}
Suelos de sedimentaria (n=14)	2.33±0.07 ^b	1.11±0.06 ^b	52.37±2.09 ^{bc}	37.61±3.30 ^b	31.56±3.06 ^a	6.48±0.97 ^b

autores

Para densidad aparente [Da], los suelos de cenizas volcánicas presentaron los menores valores y los de rocas ígneas intrusivas, los mayores [Tabla 3, Figura 2]. Los datos se distribuyeron de una forma normal [Tabla 4] y

el análisis de correlación, para los 72 datos, indicó relación negativa de Da con MO y positiva de MO con Dr. En los suelos de rocas sedimentarias, Da se correlacionó de forma positiva con Dr y Ar, y negativa con MO; en los de esquistos, la correlación fue positiva con Dr y Ar, y negativa con MO y L; en los de ígneas intrusivas, se encontró correlación negativa con MO; y en las extrusivas, correlación positiva con L (Tabla 4).

Resultados similares, en la forma de correlación, fueron reportados por Qiao et al. (2019), con correlaciones negativas para A, L y carbono orgánico, con valores r de -0.17, -0.24, y -0.26, respectivamente, y correlación positiva para Ar, con valor r de 0.33. La relación que se presentó entre Da, A, L, Ar, MO y Dr, ha sido comentada por otros autores, entre ellos Nasta et al. (2020), de lo cual se puede inferir que los bajos valores de Da, en los suelos derivados de cenizas volcánicas, se deben a los altos contenidos de MO y la baja Dr. Por otra parte, los mayores valores de Da, en los suelos provenientes de ígneas intrusivas, se asocian tanto a los bajos contenidos de MO como a la alta presencia de A y la alta Dr. Debido a que las propiedades del suelo que explican las variaciones de Da están ligadas al material parental, se puede inferir que Da también está ligada a aquel, tal como lo indican Jalabert et al. (2010) al señalar que este factor tiene una influencia del 16.8 % en los modelos predictivos de esta propiedad.

Los suelos provenientes de rocas ígneas intrusivas presentaron la menor Pt y los de cenizas volcánicas, la mayor [Tabla 3, Figura 2]; dado que Pt se deriva de Da y Dr, la explicación de estos resultados se soporta por las correlaciones entre la textura y MO [Tabla 4], tal como lo indican Martínez & Souza (2021) al afirman que dicha relación se debe a las relaciones de oclusión física de MO dentro de los agregados, y a la sorción de MO en la superficie de los minerales. Así mismo, estos suelos presentaron el menor promedio de RH y los de cenizas volcánicas el mayor.

Para capacidad de campo [CC, % gravimétrico], el valor más bajo fue de 27.1 ± 1.5 y el más alto de 53.83 ± 5.3 , y para PMP [%], el menor valor fue de 19.0 ± 1.8 y el mayor de 36.84 ± 4.1 . En cuanto a capacidad de almacenamiento de agua [CAA, %], los suelos de sedimentarias exhibieron el promedio más bajo [6.48 ± 0.97] y los de esquistos el más alto [15.19 ± 2.96]. Los valores de CC, punto de marchitez permanente [PMP] y de CAA concuerdan parcialmente con lo reportado en la literatura científica, que relaciona RH y CAA con los porcentajes de A y Ar, de forma tal que los suelos con alto contenido de A tienen mayor CAA que los ricos en Ar (Fernandes et al., 2021). Esta condición no se presentó de manera generalizada en este análisis, pues la mayor CAA [17.26 %] fue la de los suelos derivados de esquistos, pero no fueron los que presentaron el mayor valor de Ar ni el menor de A.

Al comparar casos específicos, como el de las rocas ígneas intrusivas con los esquistos, los primeros tuvieron menor CAA [10.89 %] y mayor contenido de A [56.96 %] que los segundos [CAA de 17.26 % y A de 40.89 %], lo que se asemeja con lo reportado por Saha et al. (2020) al mostrar que los suelos de textura fina retienen más humedad que los de gruesa; con valores de saturación total de 49.9 % para suelos arcillo-limosos, 33.4 % para limoso-arcillosos y 30.25 % para arenosos; con CC de 45 %, 20 % y 5 %, respectivamente, y PMP de 26 %, 8 % y 0 %, respectivamente.

Para las propiedades evaluadas, los valores encontrados están en el rango de lo reportado por diversos estudios para la zona cafetera colombiana. Los valores de A, L y Ar concuerdan con los de Suárez-Vásquez (1980), Cardona y Sadeghian (2005) e Hincapié y Salazar (2011); los de MO, con los de González et al. (2008) y Salamanca y Sadeghian (2005), los de Dr, con los de Cardona y Sadeghian (2005), los de Da, con Salamanca y Sadeghian (2005), los valores de Ks, con Lince-Salazar et al. (2021), y los de RH y CAA, con los de Cardona y Sadeghian (2005) y Lince-Salazar (2021).

TABLA 4.
Valores de coeficiente de asimetría (As), curtosis (g2) y prueba z de normalidad para los suelos analizados.

Propiedad edáfica	Todos los suelos (n=72)				Suelos de cenizas volcánicas (n=24)		Suelos de esquistos (n=12)		Suelos de ígneas extrusivas (n=12)		Suelos de ígneas intrusivas (n=10)		Suelos de sedimentarias (n=14)				
	g ₂	A _s	Valor Z	Valor z	g ₂	A _s	g ₂	A _s	g ₂	A _s	g ₂	A _s	g ₂	A _s			
			g ₂	A _s													
	Valor - P																
A	-0,22	0,09	0.791	0.819	-0,58	0,00	-0,44	0,21	-0,63	-0,44	-0,98	-0,10	-0,61	-0,48			
L	-0,22	0,04	0.799	0.927	-0,27	0,19	-0,99	0,07	-1,39	-0,10	-1,54	0,09	-1,10	0,41			
Ar	-0,86	0,01	0.042	0.983	2,27	1,19	-0,66	0,23	-1,85	-0,45	1,19	-0,18	-1,55	-0,05			
Da	-0,73	-0,41	0.086	0.299	-1,08	0,31	-0,85	-0,75	-0,94	0,62	2,94	-1,58	-1,39	-0,28			
Dr	0,01	-0,11	0.826	0.790	-0,48	0,11	1,60	-0,04	0,73	1,20	-1,38	-0,17	0,91	0,97			
Pt	-0,59	0,40	0.212	0.308	-0,93	-0,22	-1,38	0,42	-0,74	-0,41	2,44	1,63	-0,56	0,07			
CAA	-0,38	0,72	0.525	0.081	-0,40	0,50	-1,35	0,45	-2,16	-0,02	-1,15	-0,40	-1,43	-0,36			
MO	1,98	1,50	0.015	0.002	-0,55	0,58	0,37	1,22	-0,18	0,07	0,34	0,81	2,57	1,47			
CC	2,09	1,59	0.001	0.005	-0,52	0,64	-0,33	0,92	-1,22	0,57	4,59	1,72	-0,46	0,83			
PMP	1,58	1,36	0.032	0.004	-0,89	0,53	0,56	-0,01	-1,69	-0,11	2,61	1,65	1,83	1,45			
Ks	7,17	2,23	<0.00	<0.00	1,63	1,13	-0,46	0,09	0,31	1,29	0,75	1,35	9,74	2,99			
Log10(MO)	-0,39	0,50	0.512	0.207	-0,98	-0,32	-0,63	0,80	0,18	-0,52	-0,32	0,14	-0,06	0,63			
Log10(CC)	-0,18	0,76	0.866	0.068	-1,34	0,03	-0,80	0,51	-1,46	0,44	2,05	1,15	-1,07	0,47			
Log10(PMP)	0,38	0,10	0.047	0.804	0,30	-0,55	1,85	-1,13	-1,69	-0,36	1,07	1,20	0,22	0,86			
Log10(Ks)	1,98	-1,33	0.048	0.06	1,23	-1,00	0,44	-1,09	-0,97	-0,05	2,94	-1,12	0,37	-0,64			

autores.

Dr: densidad real; Da: densidad aparente; MO: materia orgánica; CC: capacidad de campo (retención de humedad a 0.33 bar en % gravimétrico); PMP: punto de marchitez permanente (retención de humedad a 15.00 bar en % gravimétrico); CAA: capacidad de almacenamiento de agua; Pt: porosidad total; A: arenas; L: limos; Ar: arcillas.

Correlaciones de Pearson

Además de las correlaciones ya mencionadas en los resultados de estadística descriptiva, las correlaciones de Pt, CAA, CC, PMP y Ks con las propiedades inherentes [A, L, Ar y Dr] y dinámicas [Da y MO] mostraron que MO y Da fueron las propiedades que presentaron mayor número de correlación con las propiedades hidrofísicas, mientras que A y Ar fueron las de menor número de correlaciones [Tabla 5]. En los suelos derivados de cenizas volcánicas, Dr y MO fueron las propiedades con mayor número de correlaciones; en los de esquistos, MO y L; en los derivados de rocas ígneas extrusivas, L y Dr; en los de intrusivas, MO, Da y Dr; y en los de sedimentarias MO y Da [Tabla 5].

Respecto a Pt, los resultados de correlación [para el análisis con la totalidad de los suelos y los derivados de esquistos] son similares a los reportados por Novillo et al. (2018) para el tamaño de las partículas del suelo, en el que A y L se correlacionaron de forma positiva [r = 0.02; 0.03, respectivamente] con esta propiedad y Ar de forma negativa [r = -0.04]. Pero esto difiere de lo reportado en otros estudios en los que a MO se le atribuye relación negativa [r = -0.16] con Pt, pues tal condición no se presentó para ninguno de los grupos de suelos acá analizados. Por el contrario, los valores obtenidos se asemejan [r = 0.994] a los reportados por Zanor et al. (2018).

Para RH, las correlaciones de CC con MO fueron similares a las registradas por Van Es & Karlen (2019), con valores de r entre 0.65 y 0.87; la correlación de RH con Da y Dr fue negativa, lo que es similar a lo reportado por Vargas et al. (2015), con la diferencia de que la influencia de la RH fue más baja en este estudio [Da r= -0.08 y Dr -0.25]. Además, estos autores hallaron correlación entre CC y los tamaños de partículas del suelo [A r = -0.55; L r = 0.44 y Ar r = 0.51], lo cual no se encontró de manera generalizada en este estudio; al igual que las correlaciones de PMP con Da y Dr, que las reportan con influencia positiva [r = 0.14 y 0.06, para Da y Dr, respectivamente] y en el presente estudio se muestran negativas con una mayor influencia [Tabla 5].

En lo concerniente a Ks, los resultados son similares a los reportados por Osuji et al. (2010), que indican que el tamaño de partículas no ejerce influencia en Ks, debido a que los valores de correlación son bajos [para A r=0.026 y Ar r = 0.085], y en contraste indican una influencia de MO, Pt y Da, las dos primeras positivas [MO r=0.963 y Pt 0.899] y la tercera negativa [Da r = -0.896].

TABLA 5.
Correlaciones de Pearson para las propiedades de retención de agua.

Propiedad	Dr	Da	Pt	A	L	Ar	MO	CC	PMP
Todas las muestras (n=72)									
Pt	AC	AC	AC	0.07	0.27*	-0.26*	0.84***	0.87***	0.71***
CAA	-0.20	AC	0.18	-0.04	0.32**	-0.22	0.23*	AC	AC
CC	-0.75***	-0.90***	0.88***	-0.01	0.16	-0.10	0.86***	AC	0.77***
PMP	-0.54***	-0.71***	0.71***	0.01	-0.09	0.09	0.67***	0.77***	AC
Ks	-0.24	-0.34**	0.33**	-0.02	0.20	-0.12	0.30*	0.18	-0.04
Dr	AC	0.82***	AC	0.03	-0.17	-0.07	-0.71***	-0.75***	-0.54***
Da	0.82***	AC	AC	-0.01	-0.27**	0.20	-0.87***	-0.91***	-0.71***
Suelos derivados de ceniza volcánica (n=24)									
Pt	AC	AC	AC	0.14	-0.39	0.23	0.91***	0.95***	0.84***
CAA	-0.45*	AC	0.29	-0.23	-0.03	0.27	0.38	AC	AC
CC	-0.81***	-0.96***	0.95***	0.09	-0.48	0.34	0.92***	AC	0.85***
PMP	-0.58**	-0.78***	0.84***	0.21	-0.46	0.21	0.75***	0.85***	AC
Ks	-0.46*	-0.35*	0.30	-0.27	0.07	0.22	0.40*	0.16	0.03
Dr	AC	0.88	AC	0.07	0.38	-0.43	-0.89	-0.81	-0.58
Da	0.88***	AC	AC	-0.04	0.39	-0.32	-0.97***	-0.96***	-0.78***
Suelos derivados de esquistos (n=12)									
Pt	AC	AC	AC	0.22	0.63*	-0.77**	0.74*	0.86***	0.36
CAA	-0.73*	AC	0.54	0.13	0.50	-0.57	0.77**	AC	AC
CC	-0.76*	-0.96***	0.86***	0.15	0.72*	-0.78**	0.82**	AC	0.28
PMP	0.05	-0.26	0.36	0.08	0.23	-0.28	0.01	0.28	AC
Ks	0.01	0.12	-0.13	0.69*	-0.66*	-0.11	0.29	-0.14	-0.51
Dr	AC	0.77**	AC	-0.05	-0.47	0.47	-0.77**	-0.76**	0.05
Da	0.77**	AC	AC	-0.17	-0.67*	0.75**	-0.87**	-0.86***	-0.26
Suelos derivados de rocas ígneas extrusivas (n=12)									
Pt	AC	AC	AC	-0.37	-0.25	0.43	0.72*	0.78**	0.56
CAA	0.69*	AC	-0.17	0.19	0.86**	-0.56	-0.02	AC	AC
CC	0.40	-0.57	0.78**	-0.44	-0.10	0.41	0.52	AC	0.38
PMP	-0.33	-0.72*	0.56	-0.53	-0.81**	0.82**	0.30	0.38	AC
Ks	0.64*	-0.05	0.38	-0.05	0.59*	-0.23	0.28	0.24	-0.21
Dr	AC	0.29	AC	-0.46	0.76**	0.02	0.31	0.40	-0.33
Da	0.29	AC	AC	0.14	0.63*	-0.42	-0.55	-0.57	-0.72**
Suelos derivados de rocas ígneas intrusivas (n=10)									
Pt	AC	AC	AC	-0.19	0.17	-0.17	0.73*	0.80**	0.73*
CAA	0.75*	AC	-0.42	0.45	-0.27	-0.32	-0.50	AC	AC
CC	-0.39	-0.84**	0.80*	-0.15	0.18	-0.16	0.80*	AC	0.85**
PMP	-0.70*	-0.86**	0.73*	-0.37	0.30	0.07	0.82**	0.85**	AC
Ks	0.12	-0.41	0.50	0.15	-0.21	0.25	0.08	0.21	0.06
Dr	AC	0.50	AC	0.12	0.05	-0.23	-0.64*	-0.39	-0.70*
Da	0.50	AC	AC	0.20	-0.14	0.09	-0.85**	-0.84**	-0.86**
Suelos derivados de rocas sedimentarias (n=14)									
Pt	AC	AC	AC	-0.18	0.48	-0.5	0.72**	0.69*	0.65*
CAA	0.02	AC	0.03	-0.22	0.21	-0.09	0.00	AC	AC
CC	-0.53	-0.82***	0.69*	-0.19	0.45	-0.44	0.72**	AC	0.95***
PMP	-0.54*	-0.81***	0.65*	-0.10	0.35	-0.38	0.73**	0.95***	AC
Ks	-0.26	-0.53	0.44	0.26	-0.07	-0.13	0.45	0.11	0.21
Dr	AC	0.59*	AC	0.08	-0.27	0.30	-0.32	-0.53	-0.54*
Da	0.59*	AC	AC	0.14	-0.50	0.55*	-0.76**	-0.82**	-0.81**

autores.

* = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$; AC: autocorrelación; Dr: densidad real; Da: densidad aparente; MO: materia orgánica; CC: capacidad de campo [retención de humedad a 0.33 bar en % gravimétrico]; PMP: punto de marchitez permanente [retención de humedad a 15.00 bar en % gravimétrico]; CAA: capacidad de almacenamiento de agua; Pt: porosidad total; A: arenas; L: limos; Ar: arcillas. Cada n [número de datos] está conformado por el valor promedio de cuatro muestras.

Modelos de regresión

En los modelos de regresión para las propiedades de CC, PMP, Pt y CAA [tabla 6], las propiedades MO, A, L, Ar y Da fueron las más frecuentes en las funciones. Para las dos primeras [CC y PMP], lo hallado concuerda con lo mencionado en la literatura por Rawls et al. (1982), Delgado y Barreto (1988), Malavé (1991) y Chicas et al. (2014), con coeficientes de determinación de 0.87, 0.79, 0.85 y 0.59 respectivamente para CC, y 0.8, 0.87, 0.8 y 0.69 respectivamente para PMP.

Para CAA y Pt, no es común encontrar modelos de regresión, ya que, como lo muestran Rubinić et al. (2022), lo que se acostumbra es calcular CC y PMP mediante funciones de edafotransferencia, como las discutidas en el párrafo anterior, y extraer la diferencia para obtener CAA; y para conseguir Pt, se trabaja con

los datos directos de Da y Dr. Sin embargo, acá se presentan los modelos para CAA y Pt, con el fin de tener un mejor coeficiente de determinación y no tener la suma de los errores del cálculo de CC y PMP en CAA, sumado a que Pt se presenta en términos de distribución de partículas del suelo y MO, y estas propiedades son comunes en los análisis de fertilidad de suelos.

TABLA 6.
Modelos de regresión múltiple para las propiedades de retención de agua.

Todas las muestras (n=72)	R²
Log10(CC) = 1.84*** - (0.44*** x Da) + (0.23** x Log10(MO))	0.85
Log10(PMP) = 2.21*** - (0.62*** x Da) - (0.006*** x L)	0.60
Pt = 21.23*** + (32.81*** x Log10(MO)) + (0.18*** x L)	0.74
CAA = -1.85 + (9.00* x Log10(MO)) + (0.23** x L)	0.16
Suelos derivados de ceniza volcánica (n=24)	
Log10(CC) = 2.36*** - (0.79*** x Da)	0.91
Log10(PMP) = 2.17*** - (0.79*** x Da)	0.61
Pt = 25.94*** + (28.65*** x Log10(MO)) + (0.13* x A)	0.86
CAA = 42.10** - (13.76* x Dr)	0.21
Suelos derivados de esquistos (n=12)	
Log10(CC) = 2.32*** - (0.71*** x Da)	0.91
Pt = 27.29** + (0.34 x L) + (20.11* x Log10(MO))	0.71
CAA = -24.52 + (44.15** x Log10(MO))	0.58
Suelos derivados de rocas extrusivas (n=12)	
CC = 1.33*** + (0.30* x Dr) - (0.40** x Da)	0.68
PMP = 1.47*** + (0.008** x Ar) - (0.02** x L)	0.86
Pt = 24.37* + (33.93** x Log10(MO))	0.51
CAA = -26.27** + (1.61*** x L)	0.74
Suelos derivados de rocas intrusivas (n=10)	
CC = 1.99*** - (0.42** x Da)	0.70
PMP = 3.33*** - (0.56* x Da) - (0.51 x Dr)	0.84
Pt = 28.71** + (24.29* x Log10(MO))	0.53
CAA = -84.56* + (37,47* x Dr)	0.56
Suelos derivados de rocas sedimentarias (n=14)	
CC = 1.31*** - (0.007 x Ar) + (0.57** x Log10(MO))	0.65
PMP = 2.04*** - (0.50*** x Da)	0.65
Pt = 41.03** + (32.85** x Log10(MO)) - (0.44* x Ar)	0.70

autores.

* = p<0.05; ** = p<0.01; *** = p<0.001; Dr: densidad real g/cm³; Da: densidad aparente g/cm³; CC: capacidad de campo (retención de humedad a 0.33 bar en % gravimétrico); PMP: punto de marchitez permanente (retención de humedad a 15.00 bar en % gravimétrico); MO: materia orgánica %; CAA: capacidad de almacenamiento de agua %; Pt: porosidad total %; A: arenas %; L: limos %; Ar: arcillas %. Cada n (número de datos) está conformado por el valor promedio de cuatro muestras.

Análisis de funciones discriminantes canónicas

El análisis de funciones discriminantes canónicas, aplicado a los cinco materiales parentales (n = 72), logró identificar las siguientes variables como predictivas: A, Ar, Dr, Da, MO, CC, PMP y Ks. A partir de estas, se generaron tres funciones significativas (P < 0.05), de las cuales, las dos primeras tienen mayor poder discriminante, por presentar valores más bajos de Lambda de Wilks (en su orden 0.145 y 0.353), frente a la tercera (0.672). La primera función explicó el 51.26 % de la varianza; la segunda, el 32.00 % y la tercera, el 15.38 %, con correlaciones canónicas de 0.77, 0.69 y 0.55, respectivamente. Los coeficientes estandarizados de las funciones señalan que las variables de mayor correlación fueron Da (-1.559; -0.429; -0.490, para la primera, segunda y tercera función, respectivamente), MO (-0.905, -1.029, 0.413), Ar (-0.468, 0.263, 0.516) y CC (-0.301, 0.851, -1.06).

De los 72 suelos incluidos, por medio de las funciones de la tabla 7, el análisis logró clasificar correctamente por material parental 47, es decir, el 65.28 %. De manera específica, los resultados fueron los siguientes: para los suelos derivados de rocas ígneas intrusivas, se logró un acierto del 100.0 %; para los de cenizas volcánicas,

del 75.0 %; para los suelos de ígneas extrusivas, del 58.3 %; para los suelos de rocas sedimentarias, del 57.1 %; y para los suelos de esquistos, del 33.3 %. El menor número de aciertos para los suelos provenientes de esquistos se puede deber a una menor resistencia de dichas rocas a la meteorización, lo que induce a que los suelos derivados de estas pierdan más las características del material parental (Velde, 1995). A lo anterior se suma que el estudio se desarrolló en los Andes colombianos, donde el protolito de los esquistos son cuerpos ígneos y sedimentarios, con características fisicoquímicas similares al de las rocas que dieron origen a los suelos incluidos en los otros materiales parentales, lo cual también se evidencia con los resultados del análisis de varianza y las pruebas de contraste de la tabla 8.

TABLA 7.
Funciones para predecir el nivel de material parental al que pertenecen las nuevas observaciones*.

Cenizas volcánicas: -1117.86+8.63*L+2.67*logKs+189.03*logMO+387.7*logCC+50.6*logPMP+78.24*Dr+406.2*Da+8.23*A+6.72*Ar
Esquistos: -1125.29+8.51*L+4.21*logKs+189.64*logMO+396.28*logCC+47.54*logPMP+79.69*Dr+414.19*Da+8.05*A+6.69*Ar
Extrusivas: -1134.51+8.39*L+5.02*logKs+182.57*logMO+407.39*logCC+49.13*logPMP+79.94*Dr+419.36*Da+7.9*A+6.65*Ar
Intrusivas: -1172.48+8.44*L+3.85*logKs+204.22*logMO+394.62*logCC+51.52*logPMP+82.19*Dr+432.96*Da+8.18*A+6.65*Ar
Sedimentarias: -1134.69+8.43*L+1.34*logKs+197.93*logMO+387.86*logCC+53.36*logPMP+77.99*Dr+421.22*Da+8.07*A+6.74*Ar

autores.

* La predicción para muestras de las que se desconoce el material parental se logra insertando, en la hoja del programa, los valores de las variables independientes y dejando en blanco la casilla de material parental. Variables independientes: L: limos; Ks: conductividad hidráulica saturada; MO: materia orgánica; CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; Dr: densidad real; Da: densidad aparente; A: arenas; Arcillas.

TABLA 8.
Valores de contraste de medias entre materiales parentales (el asterisco (*) significa diferencia estadística de Duncan con un nivel de confianza del 95 %). Valores -P del análisis de varianza con fuente de variación materiales parentales y valores -P de la prueba de Levene. La tabla se lee por columnas.

Contraste entre materiales parentales	A	L	Ar	MO	Ks	Dr	Da	Pt	CC	PMP	CAA
C. Volcánica - Esquistos	9.84*	0.91	-10.71*	0.1*	-0.18	-0.12	-0.18*	6.22*	0.09	0.13	-2.76
C. Volcánica - I. Intrusiva	-6.22	13.03*	-4.94	0.23*	0.23	-0.4*	-0.49*	13.72*	0.25*	0.23*	1.38
C. Volcánica - I. Extrusivas	14.99*	3.63	-18.57*	0.21	0.01	-0.18*	-0.28*	9.77*	0.11	0.11	-1.5
C. Volcánica - Sedimentarias	7.75*	12.66*	-20.37*	0.10	0.48*	-0.18*	-0.26*	8.74*	0.13	0.02	5.96
Esquistos - I. Intrusiva	-16.06*	12.12*	5.77	0.13	0.41	-0.28*	-0.31*	7.5*	0.16*	0.1	4.14
Esquistos - I. Extrusivas	5.15	2.71	-7.86	0.11	0.19	-0.06	-0.10	3.55	0.02	-0.01	1.26
Esquistos - Sedimentarias	-2.09	11.74*	-9.66*	0.00	0.67*	-0.06	-0.08	2.52	0.04	-0.11	8.72*
I. Intrusiva - I. Extrusiva	21.21*	-9.41*	-13.63*	-0.02	-0.22	0.22*	0.21*	-3.95	-0.14*	-0.12	-2.89
I. Intrusiva - Sedimentarias	13.97*	-0.37	-15.43*	-0.13	0.25	0.22*	0.23*	-4.98	-0.13*	-0.21*	4.58
I. Extrusiva - Sedimentarias	-7.24	9.03*	-1.80	-0.10	0.47*	0.00	0.02	-1.03	0.02	-0.09	7.46*
Valor-P Análisis de varianza	0.000	0.000	0.000	0.012	0.026	0.000	0.000	0.000	0.001	0.016	0.044
Valor-P Prueba de Levene	0.254	0.361	0.887	0.050	0.053	0.093	0.089	0.059	0.043	0.054	0.047

autores

El análisis discriminante, realizado con los suelos provenientes de rocas ígneas [intrusivas, extrusivas y cenizas], tuvo una predicción correcta del 91.3 % de las muestras, de esta forma: un 100.0 % de acierto para las rocas intrusivas; 91.7 %, para las cenizas y 83.3 %, en el caso de las extrusivas. La discriminación se realizó con dos funciones [de valor P menor que 0.0001]: la primera función, obtenida con Lambda de Wilks, con un valor de 0.089; y la segunda, con un valor de 0.43, además de correlaciones canónicas de 0.89 y 0.75, respectivamente. Adicionalmente, se obtuvieron porcentajes de explicación de la varianza del 75.1 % para el primer valor, y de 24.9 % para el segundo. La mejor predicción se puede relacionar con un mayor contraste entre las propiedades de los suelos que pudieron ser diferenciados por sus materiales parentales [tabla 8].

Para finalizar, el hecho que los materiales parentales se clasificaran de forma correcta solo en un 65.28 % para los cinco grupos, y en un 91.3 % para los tres ígneos, puede deberse a la influencia de otros factores diferentes de los evaluados en este estudio; por ejemplo, la presencia de fenoforras y demás condiciones antrópicas (Amsili et al., 2021; Ajayi et al., 2021) y naturales. Entre estas condiciones se encuentran: las variaciones en los grados de evolución de los suelos por las condiciones climáticas (Corrêa et al. 2020), la composición física y geoquímica de las rocas (Evans et al., 2021), la geomorfología (Yu & Hunt, 2018; Saifuzzaman et al., 2021), la erosión (Reichert et al., 2016), la translocación (Phillips, 2007), la bioturbación (Phillips, 2007) y la actividad microbiana (Erktan et al., 2020). Por último, cabe recordar que a medida que los suelos evolucionan, sus características se alejan de las del material parental (Velde, 1995).

4. CONCLUSIONES

Las propiedades hidrofísicas de los suelos, como las evaluadas en este estudio, tienen relación con los materiales parentales. Por lo tanto, estas propiedades pueden utilizarse como variables discriminantes para el análisis de suelos, especialmente para evaluar los suelos provenientes de rocas ígneas [cenizas volcánicas, extrusivas e intrusivas], lo que resulta útil para generar recomendaciones de manejo agrícola, a escala semidetallada, para zonas que no cuentan con estudios de levantamientos de suelos, pero que sí cuentan con cartografía geológica o identificación de materiales rocosos.

Específicamente, la distribución del tamaño de partículas [contenido de arenas, limos y arcillas] fue la propiedad inherente del suelo más relacionada con los materiales parentales; y de las propiedades dinámicas del suelo, Da, CC y el contenido de MO fueron las más relacionadas con estos materiales. La identificación de los materiales parentales, a partir de las propiedades hidrofísicas evaluadas, guardó relación con el grado de evolución y la composición de los suelos. Esta relación permite que, a partir de datos de variables hidrofísicas, se conozca los materiales parentales de los que proviene el suelo, y de allí se establezcan posibles características químicas que afectan la nutrición vegetal de este, como la disponibilidad de cationes y la fijación de fósforo, tal como lo menciona la literatura científica al respecto (Henaó, 1995; Lince et al., 2016; Díaz y Sadeghian, 2018).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los Comités Departamentales de Cafeteros de Antioquia, Huila, Quindío, Risaralda y Tolima; a la dependencia de suelos de Cenicafé y a la FNC por el apoyo financiero en la investigación.

LITERATURA CITADA

- Abdelbaki, A .M. (2021). Selecting the most suitable pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity according to the available soil inputs. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2603-2615. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.030>
- Ajayi, A. E., Faloye, O. T., Reinsch, T. & Horn, R. (2021). Changes in soil structure and pore functions under long term/continuous grassland management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314(1), 107407. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107407>
- Amsili, J. P., Van Es, H. M. & Schindelbeck, R. R. (2021). Cropping system and soil texture shape soil health outcomes and scoring functions. *Soil Security*, 4, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100012>
- Amundson, R. (2021). Soil Biogeochemistry and the Global Agricultural Footprint. *Soil Security*, 6, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100022>

- Anda, M., Suryani, E. & Subardja, D. (2015). Strategy to reduce fertilizer application in volcanic paddy soils: Nutrient reserves approach from parent materials. *Soil and Tillage Research*, 150, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.005>
- Angst, G., Pokorný, J., Mueller, C. W., Prater, I., Preusser, S., Kandeler, E., Meador, T., Straková, P., Hájek, T., Buiten, G. & Angst, Š. (2021). Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation. *Soil Biology and Biochemistry*, 159, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108302>
- Banakeng, L. A., Zame, P. Z. O., Tchameni, R., Mamdem, L. & Bitom, D. (2016). Mineralogy and geochemistry of laterites developed on chlorite schists in Tchollire region, North Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 119, 264-278. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.03.007>
- Barré, P., Durand, H., Chenu, C., Meunier, P., Montagne, D., Castel, G., Billiou, D., Soucémariadin, L. & Cecillon, L. (2017). Geological control of soil organic carbon and nitrogen stocks at the landscape scale. *Geoderma*, 285, 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.029>
- Bezerra, Y. J. A., Araújo, C. W., Straaten, P., Miranda, C., De Souza, V. S. & Bezerra, Y. J. A. (2017). Effect of I-and S-type granite parent material mineralogy and geochemistry on soil fertility: A multivariate statistical and Gis-based approach. *Catena*, 149, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.001>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L. & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21994-22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Bouma, J. & Droogers, P. (1999). Comparing different methods for estimating the soil moisture supply capacity of a soil series subjected to different types of management. *Geoderma*, 92(3-4), 185-197. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00027-0)
- Cardona, D. A. & Sadeghian, S. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Revista Cenicafé*, 56(4), 348-364. <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/197>
- Chicas, R. A., Vanegas, E. A. & García, N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 41-46.
- Cline, M. G. (1949). Basic principles of soil classification. *Soil Science*, 67(2), 81-92.
- Corrêa, P. S., Do Nascimento, P., Vasconcellos, A. & Da Silva, L. F. (2020). Genesis and classification of soils from granitic hills in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102494. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102494>
- De Lima, R. P., Rolim, M. M., Toledo, M. P. S., Tormena, C. A., Da Silva, A. R., Silva, I. A. C. & Pedrosa, E. M. R. (2022). Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 215, 105215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105215>
- Fernandes, E. R., Bruno, J., Silva, A. & De Faria, S. (2021). Soil texture and functional traits of trees structure communities of epiphytic mosses in a tropical dry forest. *Flora*, 283, 151924. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151924>
- Delgado, F. & Barreto, L. (1988). Una aproximación matemática para la elaboración de curvas de retención de humedad en suelos representativos de Los Llanos Occidentales. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 6(1-2), 45-50.
- Díaz, V. C. & Sadeghian, S. (2018). Adsorción de fósforo en suelos de la zona cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé*, 69(2), 7-16.
- Erktan, A., Or, D. & Scheu, S. (2020). The physical structure of soil: determinant and consequence of trophic interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 148, 107876. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876>
- Espinoza, J. (2004). Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. *Informaciones agronómicas*, 55, 5-8.
- Evans, D. L., Quinton, J. N., Tye, A. M., Rodés, Á., Rushton, J. C., Davies, J. A. C. & Mudd, S. M. (2021). How the composition of sandstone matrices affects rates of soil formation. *Geoderma*, 401, 115337. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115337>

- Farfán, F. & Hincapié, E. (2011). Valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. *Revista Cenicafé*, 62(1), 100-118.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1972). Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del Suroeste de Antioquia. FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1973). Estudio de zonificación y uso potencial del departamento del Tolima. FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1985). Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Huila. FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1986). Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Quindío. FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1988). Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Risaralda. FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1992). Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del oriente de Antioquia. FNC.
- Figuroa, M. L., Martínez, M. R., Ortiz, C. A. & Fernández, D. S. (2018). Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 287-299. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>
- Gómez, L., Caballero, A. & Baldión, J. V. (1991). Ecotopos cafeteros de Colombia. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- González, H., Sadeghian, S., Zapata, R. D. & Mejía, B. (2008). Fraccionamiento de la materia orgánica en suelos de la zona cafetera de Caldas. *Revista Cenicafé*, 59(4), 310-320.
- Haddix, M. L., Gregorich, E. G., Helgason, B. L., Janzen, H., Ellert, B. H. & Cotrufo, M. F. (2020). Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, 363, 114160. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160>
- Henao, M. C. (1995). Evaluación de la disponibilidad del magnesio en dos suelos de la zona cafetera mediante índices relacionados con los factores cantidad e intensidad. *Revista Suelos Ecuatoriales*, 25, 47-50.
- Hincapié, E. & Salazar, L. F. (2011). Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. *Revista Cenicafé*, 62(2), 79-89.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC. 1990. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 5 ed. Bogotá: IGAC. 502 p.
- Ilek, A., Kucza, J. & Witek, W. (2019). Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: Some methodological aspects. *Journal of hydrology*, 570, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.067>
- Jalabert, S. S. M., Martin, M. P., Renaud, J. P., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L. & Arrouays, D. (2010). Estimating forest soil bulk density using boosted regression modelling. *Soil Use and Management*, 26(4), 516-528. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00305.x>
- Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Dover books.
- Kashani, M. H., Ghorbani, M. A., Shahabi, M., Naganna, S. R. & Diop, L. (2020). Multiple AI model integration strategy—application to saturated hydraulic conductivity prediction from easily available soil properties. *Soil and Tillage Research*, 196, 104449. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104449>
- Kim, J. Y. & Kim, Y. (2015). Sorption of cesium on weathered biotite: The effects of cations in solution. *Catena*, 135, 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.017>
- Kubiëna, W. L. (1958). The classification of soils. *Journal of Soil Science*, 9(1), 9-19. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1958.tb01893.x>
- Lal, R. & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. Routledge.
- Li, H., Van den Bulcke, J., Wang, X., Gebremikael, M. T., Hagan, J., De Neve, S. & Sleutel, S. (2020). Soil texture strongly controls exogenous organic matter mineralization indirectly via moisture upon progressive drying—

- Evidence from incubation experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 151, 108051. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108051>
- Lince, L. A., Rodríguez, N. & Sadeghian, S. (2016). Disponibilidad de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en función de las propiedades del suelo, zona cafetera central de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 29-42.
- Lince-Salazar, L. A. (2021). Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas. *Revista Cenicafé*, 72(1). <https://doi.org/10.38141/10778/72101>
- Lince-Salazar, L. A., Sadeghian-Khalajabadi, S. & Díaz-Poveda, V. C. (2021). Soil vulnerability index to climatic variability in coffee regions of Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 38(2), 124-143. <https://doi.org/10.22267/rcia.213802.165>
- Liu, S., Guo, Z. C., Halder, M., Zhang, H. X., Six, J. & Peng, X. H. (2021). Impacts of residue quality and soil texture on soil aggregation pathways by using rare earth oxides as tracers. *Geoderma*, 399, 115114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115114>
- Liu, S., Wang, Y., An, Z., Sun, H., Zhang, P., Zhao, Y., Zhou, Z., Xu, L., Zhou, J. & Qi, L. (2021). Watershed spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity as affected by landscape unit in the critical zone. *Catena*, 203, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105322>
- Lybrand, R. A. & Rasmussen, C. (2018). Climate, topography, and dust influences on the mineral and geochemical evolution of granitic soils in southern Arizona. *Geoderma*, 314, 245-261. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.042>
- Malagón, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27(104), 319-341.
- Malavé, N. (1991). Estudio preliminar de las relaciones entre características de retención de humedad y distribución de tamaño de partículas, materia orgánica y densidad aparente [Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela].
- Martínez, P. & Souza, I. F. (2020). Genesis of pseudo-sand structure in Oxisols from Brazil – A review. *Geoderma Regional*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00292>
- Ma, X. L., Liu, J., Chen, X. F., Li, W. T., Jiang, C. Y., Wu, M., Liu, M. & Li, Z. P. (2021). Bacterial diversity and community composition changes in paddy soils that have different parent materials and fertility levels. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(10), 2797-2806. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63364-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63364-0)
- Meena, R. S., Lal, R. & Yadav, G. S. (2020). Long-term impacts of topsoil depth and amendments on soil physical and hydrological properties of an Alfisol in central Ohio, USA. *Geoderma*, 363, 114164. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114164>
- Nanko, K., Ugawa, S., Hashimoto, S., Iwaya, A., Kobayashi, M., Sakai, H., Ishizuka, S., Miura, S., Tanaka, N., Takahashi, M. & Kaneko, S. (2014). A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma*, 213, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.025>
- Nasta, P., Palladino, M., Sica, B., Pizzolante, A., Trifuoggi, M., Toscanesi, M., Giarra, A., D'Auria, J., Nicodemo, F., Mazzitelli, C., Lazzaro, U., Di Fiore, P. & Romano, N. (2020). Evaluating pedotransfer functions for predicting soil bulk density using hierarchical mapping information in Campania, Italy. *Geoderma Regional*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00267>
- Novillo, I. D., Carrillo, M. D., Cargua, J. C., Moreira, V. N., Alban, K. E. & Morales, F. L. (2018). Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas agrarios*, 23(2), 177-187.
- Nunes, M. R., Veum, K. S., Parker, P. A., Holan, S. H., Karlen, D. L., Amsili, J. P., Van Es, H. M., Wills, S. A., Seybold, C. A. & Moorman, T. B. (2021) The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), 1196-1213. <https://doi.org/10.1002/saj2.20244>
- Osuji, G. E., Okon, M. A., Chukwuma, M. C. & Nwarie, I. I. (2010). Infiltration characteristics of soils under selected land use practices in Owerri, Southeastern Nigeria. *World journal of Agricultural sciences*, 6(3), 322-326.
- Panagos, P., Ballabio, C., Poesen, J., Lugato, E., Scarpa, S., Montanarella, L. & Borrelli, P. (2020). A soil erosion indicator for supporting agricultural, environmental and climate policies in the European Union. *Remote Sensing*, 12(9), 1365. <https://doi.org/10.3390/rs12091365>

- Pandey, B. K., Huang, G., Bhosale, R., Hartman, S., Sturrock, C. J., Jose, L., Martín, O. C., Karady, M., Voesenek, L. A. C. J., Ljung, K., Lynch, J. P., Brown, K., Whalley, W. R., Mooney, S. J., Zhang, D. & Bennett, M. J. (2021). Plant roots sense soil compaction through restricted ethylene diffusion. *Science*, 371(6526), 276-280. <https://doi.org/10.1126/science.abf3013>
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo-Ocaña, R., Buytaert, W. & Ochoa-Tocachi, B. F. (2021). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *Catena*, 202, 105227. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
- Phillips, J. D. (2007). Development of texture contrast soils by a combination of bioturbation and translocation. *Catena*, 70(1), 92-104. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.08.002>
- Pires, A., Imhoff, S., Giarola, N.F.B. & Tormena, C.A. (2001). Análisis multivariado y univariado en la discriminación de sistemas de uso de suelos del centro de Santa Fe. *Edafología*, 8(1), 21-34.
- Pozo, M. Z. & Carrasco, G. I. (2005). Aplicación del análisis discriminante a un conjunto de datos vinícolas mediante paquete estadístico SPSS v10. *Tecnociencia*, 7(1), 7-21. <https://revistas.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/artic le/view/677>
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X., Huang, L. & Shao, M. (2019). Development of pedotransfer functions for predicting the bulk density in the critical zone on the Loess Plateau, China. *Soils Sediments*, 19, 366–372. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2040-1>
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. & Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320. <https://doi.org/10.13031/2013.33720>
- Reichert, J. M., Trevisan, V., Saldanha, E., Peres, D., Horn, R., Reinert, D. J., Sattler, A. & Denardin, J. E. (2016). Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research*, 158, 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>
- Ribeiro, D., Tavares, F. H., Santos, D., Alves, J., Bezerra, R. & Ferreira, R. (2009). Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba: I isoterma de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(3), 623-632. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300015>
- Rossiter, D. G. (2021). Are soil phenofoms the new normal? Soil classification and soil mapping in the Anthropocene. *Soil Security*, 5, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100017>
- Rendón, J. R. & Giraldo-Herrera, A. (2019) Distribución de raíces en café variedad Castillo® bajo dos arreglos espaciales. *Revista Cenicafé*, 70(1), 7-17. <https://doi.org/10.38141/10778/70101>
- Rubinić, V., Husnjak, S., Jungić, D., Bensa, A. & Safner, T. (2022). Comparison of specific and universal linear regression models for predicting soil water retention in eastern Croatia. *Geoderma Regional*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00471>
- Ruehlmann, J. (2020). Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptual fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 375, 114542. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114542>
- Saha, A., Rattan, B., Sekharan, S. & Manna, U. (2020). Quantifying the interactive effect of water absorbing polymer (WAP)-soil texture on plant available water content and irrigation frequency. *Geoderma*, 368, 114310. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114310>
- Saifuzzaman, M., Adamchuk, V., Biswas, A. & Rabe, N. (2021). High-density proximal soil sensing data and topographic derivatives to characterise field variability. *Biosystems Engineering*, 211, 19-34. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.08.018>
- 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://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/163>
- Salvador, F. M. (2000). Análisis discriminante. <http://www.5campus.com/leccion/discrimi>
- Smethurst, P. J. (2000). Soil solution and other soil analyses as indicators of nutrient supply: a review. *Forest Ecology and Management*, 138(1-3), 397-411. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00426-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00426-6)

- Stevenson, B. A., McNeill, S. & Hewitt, A. E. (2015). Characterising soil quality clusters in relation to land use and soil order in New Zealand: An application of the phenoform concept. *Geoderma*, 239, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.003>
- Suárez-Vásquez, S. (1980). Caracterización física de algunos suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario del Tolima. *Cenicafé*.
- Suárez, S., Caballero, R., Chavarriaga, G. & Quevedo, P. (1986). Caracterización física, uso, manejo y conservación de algunos suelos de origen ígneo, metamórfico y sedimentario de la zona cafetera del departamento del Huila. *Revista Cenicafé*, 37(2), 41-60.
- Van Es, H. M. & Karlen, D. L. (2019). Reanalysis validates soil health indicator sensitivity and correlation with long - term crop yields. *Soil Science Society of America Journal*, 83(3), 721-732. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.09.0338>
- Vargas, R. P., Serrato, F. & Torrente, A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas -Huila. *Ingeniería y Región*, 13(1), 113-123. <https://doi.org/10.25054/22161325.713>
- Velde, B. (Ed.). (1995). *Origin and mineralogy of clays: clays and the environment*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-12648-6>
- Villarreal, R., Lozano, L. A., Salazar, M. P., Bellora, G. L., Melani, E. M., Polich, N. & Soracco, C. G. (2020). Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region. *Soil and Tillage Research*, 198, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104528>
- Waroszewski, J., Sprafke, T., Kabała, C., Kobierski, M., Kierczak, J., Musztyfaga, E., Loba, A., Mazurek, R. & Łabaz, B. (2019). Tracking textural, mineralogical and geochemical signatures in soils developed from basalt-derived materials covered with loess sediments (SW Poland). *Geoderma*, 337, 983-997. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.008>
- Webster, R. & Oliver, M. A. (1990). *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford University Press
- Weninger, T., Kreiselmeier, J., Chandrasekhar, P., Julich, S., Feger, K. H., Schwärzel, K., Bodner, G. & Schwen, A. (2019). Effects of tillage intensity on pore system and physical quality of silt-textured soils detected by multiple methods. *Soil Research*, 57(7), 703-711. <https://doi.org/10.1071/SR18347>
- Wilson, M. J. (2019). The importance of parent material in soil classification: A review in a historical context. *Catena*, 182, 104131. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104131>
- Yu, F. & Hunt, A. G. (2018). Predicting soil formation on the basis of transport-limited chemical weathering. *Geomorphology*, 301, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.027>
- Zanor, G. A., López-Pérez, M. E., Martínez-Yáñez, R., Ramírez-Santoyo, L. F., Gutiérrez-Vargas, S. & León-Galván, M. (2018). Mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de un suelo agrícola mezclado con lombricompostas de dos efluentes de biodigestor. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19(4), 1-10. <https://doi.org/10.22201/i.25940732e.2018.19n4.036>
- Zhang, Y., Tigabu, M., Yi, Z., Li, H., Zhuang, Z., Yang, Z. & Ma, X. (2019). Soil parent material and stand development stage effects on labile soil C and N pools in Chinese fir plantations. *Geoderma*, 338, 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.050>
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T. M., Miltner, A. & Schorath, G. (1997). Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, 79(1-4), 117-161. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00040-2)

ENLACE ALTERNATIVO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5891> (html)

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5891/5953> (pdf)