

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ANDISOLES EN LA REGIÓN CAFETERA COLOMBIANA

Luz Adriana Lince Salazar*, Siavosh Sadeghian Khalajabadi*

LINCE S., L.A.; SADEGHIAN K., S. Variabilidad espacial de las propiedades físicas de Andisoles en la región cafetera de Colombia. *Revista Cenicafé* 70(1):65-80. 2019

Las propiedades físicas del suelo presentan variabilidad espacial, formada tanto por las características intrínsecas como por los cambios generados por el manejo. Dado que el tema es de importancia para la agricultura, se llevó a cabo una investigación tendiente a evaluar dicha variabilidad por el método determinístico y geoestadístico, en dos lotes de suelos provenientes de cenizas volcánicas, ubicados en el departamento de Quindío (Colombia). En cada lote se demarcó 1,0 ha y se tomaron muestras de suelo en forma de red, cada 10 m, y se evaluaron las siguientes propiedades: arenas, limos y arcillas, retención de humedad a capacidad de campo-CC y punto de marchitez permanente-PMP, densidad real-DR y aparente-DA, estabilidad de agregados al agua-EAA, conductividad hidráulica-CH y resistencia a la penetración-RP. La mayoría de las propiedades presentaron distribución normal y coeficientes de variación de bajo a medio. La variabilidad espacial de las propiedades fue diferente en ambos lotes, lo cual se atribuyó a la influencia de la geomorfología, pues en el lote con geomorfología heterogénea, cinco propiedades presentaron tendencia espacial, dos efecto Nugget, y en dos la predicción no fue confiable, mientras que en el lote más homogéneo tres propiedades presentaron tendencia y las siete restantes se ajustaron a modelos teóricos con resultados confiables, por lo cual el sistema de muestreo en retícula en lotes de topografía heterogénea no fue el más adecuado para estudios con fines geoestadísticos, además, el método determinístico resultó útil para exponer la variabilidad espacial de las propiedades que no cumplieron los supuestos geoestadísticos.

Palabras clave: Geoestadística, geomorfología, Kriging, método determinístico, rango, tendencia espacial.

SPATIAL VARIABILITY OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF ANDISOLS IN THE COLOMBIAN COFFEE ZONE

The soil physical properties show spatial variability due to the intrinsic characteristics and the changes generated by soil management. Since this is important for agriculture, a research was carried out in order to evaluate that variability by the deterministic and geostatistical method in two plots of soils coming from volcanic ash and located in the Department of Quindío–Colombia. In each farm, 1.0 ha was delimited and soil samples were taken in a grid pattern every 10 m. Sand, silt and clay, humidity retention to field capacity (FC) and wilting point (WP), particle density (DP) and bulk density (DB), aggregates stability (AS), hydraulic conductivity (HC) and penetration resistance (PR) were evaluated. Most of the properties showed normal distribution and coefficients of variation from low to intermediate. The spatial variability of the properties was different in both plots, which was attributed to the influence of the geomorphology because in the plot with heterogeneous geomorphology, 5 properties showed spatial tendency, 2 showed Nugget effect, and in 2 the prediction was not reliable. In the most homogeneous plot, 3 properties showed spatial tendency and the remaining 7 were adjusted to theoretical models with reliable results. Therefore, the sampling grid system in plots with heterogeneous topography was not the most appropriate for studies with geostatistical purposes. Besides, the IDW method was useful to expose the spatial variability of the properties that did not meet the geostatistical assumptions.

Keywords: Geostatistics, geomorphology, Kriging, deterministic method, range, spatial tendency

*Investigador Científico I e Investigador Científico III, respectivamente. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

Las propiedades físicas del suelo desempeñan un papel fundamental en la producción de los cultivos, especialmente la textura-T y la densidad aparente-DA (Do Nascimento *et al.*, 2019), las cuales en conjunto con la materia orgánica-MO son indicadores frecuentes de aireación, compactación, capacidad de almacenamiento de agua-CAA (Pachepsky y Park, 2015), y hacen parte de los controladores de nitrificación y mineralización (Schjonning *et al.*, 2003); además, la resistencia a la penetración-RP, la conductividad hidráulica-CH, la distribución de agregados, la infiltración y la estabilidad de agregados al agua-EAA, sirven para identificar las condiciones del suelo para el desarrollo de raíces, percolación y susceptibilidad a la erosión (Haruna *et al.*, 2018).

Algunas propiedades físicas, tales como DA, RP, CH y EAA son el resultado de la interacción de propiedades primarias como la T y profundidad del horizonte A, que dependen en su mayoría del material parental y el clima, con características químicas como MO, bases intercambiables (Bronick y Lal, 2005) y la acción antrópica (Kinoshita *et al.*, 2017); por tal razón, cambios en manejo (Jacobs *et al.*, 2004), material parental, topografía, clima o sus interacciones, generan variabilidad espacial del suelo (de Moraes *et al.* 2016; Silva *et al.*, 2015).

Una forma de evaluar la variabilidad espacial es a través de la geoestadística, técnica que utiliza algo semejante a la interpolación por media móvil ponderada (Bohling, 2007) y se basa en la teoría de regionalización de variables, con un nivel de confianza determinado (Wilding y Drees, 1983), a diferencia de los métodos determinísticos, como el inverso del peso de la distancia-IDW, que predicen partiendo del supuesto de que el valor en un punto no muestreado puede ser aproximado como un promedio ponderado de los valores en puntos situados a una cierta distancia de referencia

(Mitasova, 2008); sin embargo, ambos métodos permiten visualizar y cuantificar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a nivel de lote y cuenca (Glendell *et al.*, 2014).

Con geoestadística se pueden analizar y predecir valores de una variable que está distribuida en el espacio de una forma continua, mediante las herramientas de análisis exploratorio de datos, análisis estructural, semivariograma y predicción o Kriging (Bohling, 2007). De estas herramientas, las dos primeras se utilizan para verificar los supuestos geoestadísticos, la distribución normal de los datos, la no tendencia y la estacionariedad, es decir, cuando el análisis estructural indica que los valores aumentan o disminuyen progresivamente en cierta dirección, es indicio de una tendencia, lo que rompe el supuesto de estacionariedad, el cual implica que el nivel promedio de la variable debe ser constante en todos los puntos del área de interés (Giraldo, 2002). Una tercer herramienta es el semivariograma, que permite determinar parámetros importantes de la distribución espacial de la variable, tales como: i) efecto Nugget, el cual indica que la variabilidad se presenta a una distancia inferior a la de muestreo o que hay errores de medición o pobre precisión analítica, ii) Sill que representa el máximo valor que alcanza el semivariograma cuando la variable es estacionaria, y iii) rango de variabilidad que define la distancia a la cual el semivariograma se estabiliza y representa la distancia a la cual la propiedad de interés se relaciona espacialmente, para ello se emplea el modelo teórico (pepita puro, gaussiano, potencia, esférico, lineal y exponencial) que más se ajuste al variograma experimental (Goovaerts, 1999).

Los rangos de variabilidad reportados para las propiedades físicas del suelo, utilizados en la agricultura para definir planes de muestreo de suelos o para evaluar el impacto de una

actividad (Goovaerts, 1999), en su mayoría son altamente contrastantes, tanto a nivel regional como a nivel de lote. Algunos rangos reportados en diferentes países son: para DA, 8 m en Sri Lanka (Rosemary *et al.*, 2017), y en Colombia 105 m (Vargas *et al.*, 2015), 349 m (Ramírez-López *et al.*, 2008) y 95 m (Jaramillo *et al.*, 2008); para DR, 10.000 m en Cuba (Medina *et al.*, 2017), y en Colombia 11 m (Ramírez-López *et al.*, 2008) y 185 m (Vargas *et al.*, 2015); para arena-A, 9.000 m en Cuba (Medina *et al.*, 2017), 24 m en Brasil (Santos *et al.*, 2017) y 155 m en Colombia (Vásquez *et al.*, 2010); para limo-L, 7.000 m en Cuba (Medina *et al.*, 2017) y 258 m en Colombia (Vargas *et al.*, 2015); para arcilla-Ar, 21 m en Brasil (Santos *et al.*, 2017) y 109 m en Colombia (Vásquez-Polo *et al.*, 2010); para CH, 5.700 m en Turquía (Erşahin *et al.*, 2017) y 93 m en Colombia (Vargas *et al.*, 2015); para RP, 86 m en Brasil (Andrade *et al.*, 2018), y en Colombia 594 m (Vásquez *et al.*, 2010), 375 m (Ramírez-López *et al.*, 2008) y 14 m (Jaramillo *et al.*, 2008).

Los rangos de variabilidad de las propiedades físicas asociados a investigaciones a nivel de lote en el cultivo de café, indican que hay dependencia espacial y que conocer dicho parámetro resulta útil al generar recomendaciones de manejo (Andrade *et al.*, 2018; Salamanca *et al.*, 2018). En el caso de Andrade *et al.* (2018), en Brasil, para RP evaluada en diferentes sitios del sistema productivo como en profundidades, reportaron rangos mayores para los sitios por donde transita el tractor y en las calles del cultivo (181 y 155 m, respectivamente), en comparación con lo reportado bajo el dosel del árbol (86 m), esto para una profundidad del perfil entre 0,1 y 0,2 m, y atribuyen los resultados al manejo del cultivo. En el caso de Salamanca *et al.* (2018), en Colombia, se centraron en DA, en suelos de tipo andisol e

inceptisol, y sus resultados mostraron rangos que difieren hasta en 195 m, en evaluaciones a 5 cm de profundidad del perfil, y en 10 m, en evaluaciones a 0,1 y 0,2 m, y atribuyen las variaciones a la geomorfología y al manejo del cultivo.

Dado que el conocer la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo permite mejorar el manejo del sistema productivo, ya que con esta información pueden elaborarse diseños de muestreos sensibles y aceptables, definir zonas homogéneas para manejo y que los antecedentes en cultivo de café en Colombia son pocos, se realizó una investigación tendiente a evaluar dicha variabilidad en suelos de origen volcánico donde se cultiva café en Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el año 2011 en dos fincas cafeteras (Tabla 1), ubicadas en el departamento de Quindío, región central de Colombia. En cada finca se seleccionó un lote con café Variedad Castillo[®], con edades entre 26 y 36 meses, a plena exposición solar, con densidades de siembra de 7.000 plantas/ha y manejo recomendado por Cenicafé.

En cada lote, con la ayuda de un GPS de precisión, se demarcó aproximadamente 1,0 ha y se tomaron tres tipos de muestras de suelo en forma de red, cada 10 m (Figura 1), estas fueron: i) muestras disturbadas, tomadas con palín en cuatro puntos circundantes al sitio georreferenciado, a una profundidad de 20 cm; ii) muestras disturbadas, en las mismas condiciones que el anterior tipo, pero a 5 cm de profundidad; iii) muestras sin disturbar, tomadas con un cilindro de acero de 25 cm³ en cuatro puntos circundantes al sitio georreferenciado, a 15 cm de profundidad. Al mismo tiempo, se realizó *in situ* la prueba de resistencia a la penetración, con un penetrómetro de impacto.

En las muestras tipo i se evaluaron: carbono orgánico-CO (Walkley-Black), textura en términos de porcentaje de A, L y Ar (bouyoucos), DR (picnómetro), retención de humedad a capacidad de campo-CC y punto de marchitez permanente-PMP (ollas de presión de Richards a 0,033 y 1,5 MPa, respectivamente). En las de tipo ii se evaluó la EAA (tamiz húmedo de Yoder) y en las de tipo iii se evaluó la DA (cilindro de Coile) y CH (permeámetro de cabeza constante).

Las muestras tipo i y iii se tomaron en la profundidad en que se encuentra la mayor concentración de raíces de la planta de café (20 cm), debido a que las propiedades evaluadas con dicha muestra están directamente relacionadas con el desarrollo de la planta de café, y la muestra tipo ii se tomó en la parte superficial, debido a que la EAA se relaciona con la erosión del suelo y por ello se evalúa en los primeros centímetros del perfil. Para las propiedades CO, T, CC, PMP y DR, se realizó una repetición por sitio, ya que la muestra analizada estuvo conformada por cuatro muestras tomadas en los puntos circundantes al sitio georreferenciado, cada 0,5 m en forma de cuadrado; para las propiedades DA y EAA se realizaron tres repeticiones, con muestras tomadas a una distancia de 0,5 m, en forma de triángulo; para la CH se tuvieron cuatro repeticiones con muestras tomadas a una distancia de 0,5 m en forma de cuadro, y para la RP tres repeticiones hasta una profundidad de 0,6 m, en forma de triángulo.

El análisis geoestadístico se realizó con las herramientas de exploración, análisis estructural, construcción del semivariograma y predicción. La etapa de exploración de los datos se realizó con el *software* Statgraphics y se tuvo en cuenta la normalidad, evaluada con curtosis y sesgo, la cual según George y Mallery (2010) debe presentar valores

entre 2 y -2 para ser normal; en los casos en los cuales no se cumplió el supuesto se extrajeron los datos extremos hasta lograr la normalidad. Una vez lograda la distribución normal, se realizó la estadística descriptiva que incluyó media, mínimo, máximo, coeficiente de variación (C.V.), asimetría y curtosis, para ello se empleó el *software* Statgraphics. El C.V. se interpretó según lo recomendado por Warrick y Nielsen (1980), así: C.V. $\leq 12\%$ se interpreta como variabilidad baja, de $12 < C.V. \leq 60\%$ como variabilidad media y C.V. $> 60\%$ como variabilidad alta.

El supuesto de estacionariedad espacial se comprobó con el *software* ArcGis10.3.1, mediante la herramienta de análisis geoestadístico y las funciones de análisis de datos para tendencias y diagramas de Voronoi, como lo sugieren Kamble y Aggrawal (2011), y se tomó como valor de cálculo la opción simple. Los semivariogramas también se realizaron con el Software ArcGIS 10.3.1, con la misma herramienta y la función geoestadistical wizard, en la que se seleccionó el método Kriging, del tipo ordinario de predicción y las variables no fueron sometidas ni a transformación ni a remoción de tendencia. Posterior a ello, se procedió con cálculo de Nugget real y Sill parcial real, con tamaño de lag de 10 m (distancia de muestreo), 12 lags, con un número máximo de vecinos cercanos de cinco (según el análisis de los diagramas de Voronoi), se aplicaron los cuatro modelos teóricos más comunes para las propiedades de interés, que según Goovaerts (1999) son gaussiano, esférico, circular y exponencial, y se seleccionó el de menor error cuadrático medio (RMS). Con la información anterior se generaron los mapas de variabilidad espacial y se clasificaron en cuatro clases mediante la opción de intervalo geométrico, con el *software* ArcGIS 10.3.1, herramienta análisis geoestadístico y clasificación.

Las herramientas de construcción del semivariograma se aplicaron a todas las variables, inclusive aquellas que no cumplieron con los supuestos de tendencia y estacionariedad; con aquellas que cumplieron los supuestos de normalidad y estacionariedad se prosiguió hasta generar el mapa de predicción por Kriging ordinario, mientras que para las variables que no cumplieron los supuestos geoestadísticos, la información resultante de los semivariogramas se empleó para generar los modelos de interpolación por el método determinístico – IDW, con el menor error, extrayendo de este el número máximo y mínimo de vecinos, tipo de sector, valor de semieje mayor y menor, los cuales según Glendell *et al.* (2014) son igualmente válidos que los geoestadísticos.

La dependencia espacial en términos de la relación porcentual Nugget/Sill (variabilidad

aleatoria/variabilidad total), evaluada para las propiedades que siguieron la ruta geoestadística, se interpretó según Cambardella (1994), quien considera que si es menor a 25% es fuerte, entre 25 y 75 % media y mayor a 75% débil.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades analizadas presentaron valores similares en los dos lotes (Tabla 1), a excepción de la CH que fue mayor en el lote de Buenos Aires, y la CC y PMP que fueron más altos en el Cortijo. Lo anterior se puede deber a que los contenidos de CO fueron mayores en El Cortijo (Tabla 2), lo que favorece la capacidad de almacenamiento de agua y, por ende, disminuye la CH (Stock y Downes, 2008). En cuanto al coeficiente de variabilidad, en los dos lotes las variables A, DA, DR y EAA presentaron valores bajos (< 12 %), y

Tabla 1. Características de los sitios seleccionados.

Característica	Fincas	
	Buenos Aires	El Cortijo
Ubicación del muestreo		
Municipio	Armenia	Armenia
Vereda	El Caimo	Mesopotamia
Coordenadas	4°29'01''N, 75°42'00'' W	4°34'50'' N, 75°38'43'' W
Características químicas del suelo*		
pH	5,23	5,07
CO (%)	6,41	12,03
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2,35	1,32
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,74	0,41
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,26	0,42
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,71	1,06
P (mg kg ⁻¹)	66,85	15,03
Unidad cartográfica FNC**	Chinchiná	Quindío
Material parental	Ceniza volcánica	Ceniza volcánica
Taxonomía	Typic melanudands	Typic hapludands

* Propiedades evaluadas siguiendo las recomendaciones de muestreo de suelos de Cenicafé y análisis descrito por Carrillo (1985); ** FNC (1986).

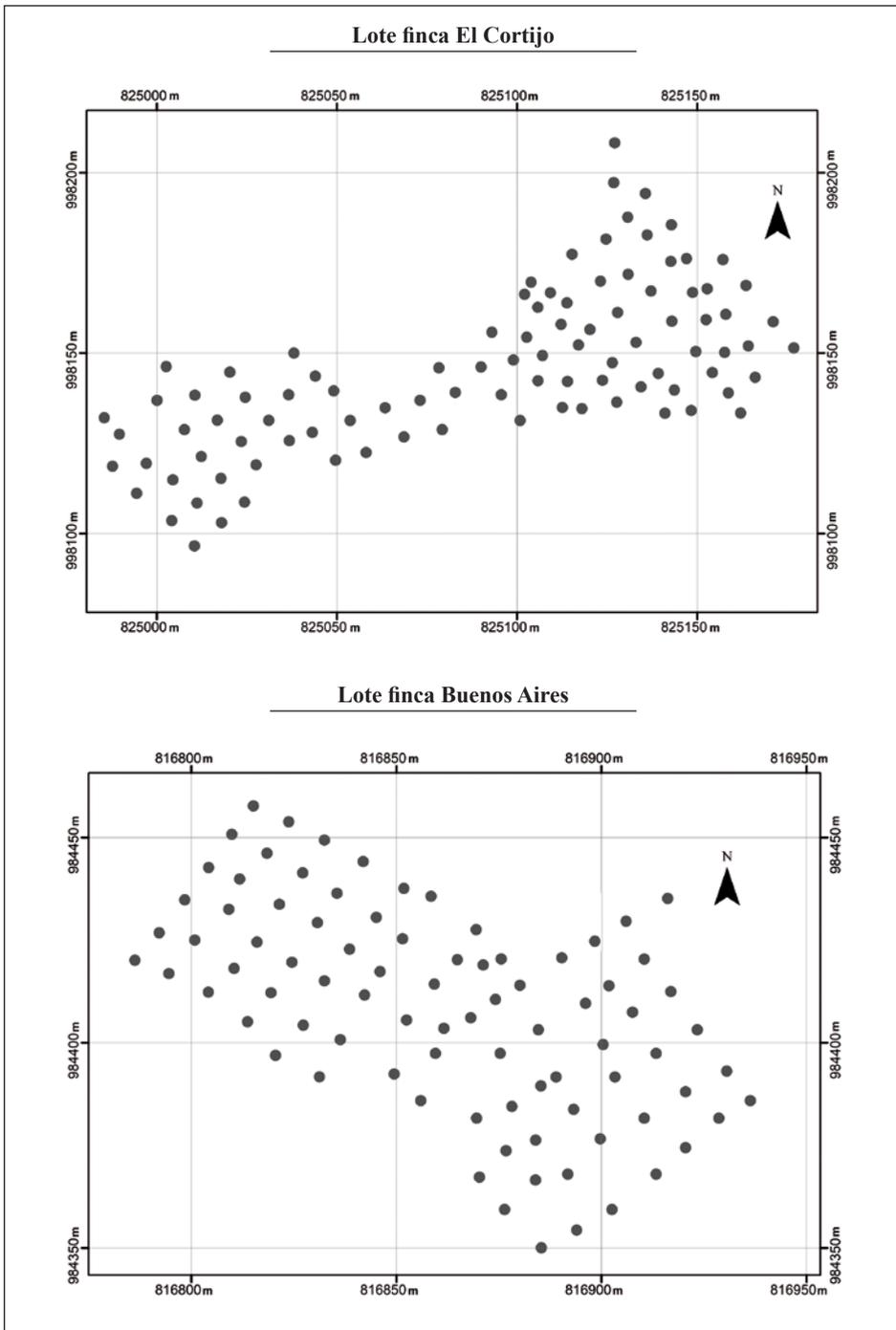


Figura 1. Puntos de muestreo en los lotes seleccionados.

RP, CC y PMP valores medios (12% – 60%). La única variable que presentó coeficiente de variación alto (> 60%) fue la CH, lo cual es común para esta propiedad (Bagarello *et al.*, 2019), ya que es extremadamente sensible a la forma de muestreo y análisis (Ilek *et al.*, 2019) y a las características hidrológicas del suelo (Reynolds *et al.*, 2000).

El análisis exploratorio de los datos indicó que las variables CH y EAA en ambos lotes, la CC en el lote de la finca El Cortijo y la DA en el lote de la finca Buenos Aires, no

presentaron distribución normal, y para alcanzarla se extrajeron seis datos extremos de CH, dos de EAA y uno de CC, para la finca El Cortijo, y dos datos extremos de DA, dos de CH y uno de EAA para la finca Buenos Aires. La presencia de valores extremos y alto coeficiente de variación para la CH se relacionan con las muestras utilizadas en el análisis, las cuales al presentar fragmentos de roca o de plantas, alteran la macroporosidad (Ilek *et al.*, 2019), además de ser afectada por las variaciones en la densidad aparente y la distribución del tamaño de las partículas (Guatibonza *et al.*, 2009).

Tabla 2. Estadística descriptiva de las propiedades físicas del suelo, para los dos lotes analizados.

Propiedad	n	Media	Mínimo	Máximo	C.V.(%)	Curtosis	Asimetría
Finca El Cortijo							
A (%)	97	57,19	50,00	65,00	6,96	-1,07	-0,20
L (%)	97	22,91	17,00	30,00	15,35	-1,02	0,43
Ar (%)	97	19,93	16,00	22,00	6,99	0,13	-0,89
DA (g cm ⁻³)	100	0,73	0,63	0,91	8,25	-0,15	0,67
DR (g cm ⁻³)	100	2,33	2,18	2,47	2,88	-0,79	0,01
CH (cm h ⁻¹)	94	0,11	0,01	0,42	86,81	1,60	1,43
EAA (DMP, mm)	98	3,06	2,75	3,21	3,17	0,86	-0,88
RP (MPa)	100	0,64	0,41	1,00	19,60	-0,06	0,43
CC (% gravimétrico)	99	48,45	31,75	68,44	14,29	0,31	0,50
PMP (% gravimétrico)	100	23,66	19,66	45,26	17,72	0,03	0,58
Finca Buenos Aires							
A (%)	92	66,12	58,00	75,00	5,09	0,92	0,20
L (%)	92	18,41	14,00	24,00	12,00	0,11	0,48
Ar (%)	92	15,54	7,00	21,00	16,20	1,77	-0,80
DA (g cm ⁻³)	90	0,96	0,81	1,20	7,37	1,11	0,82
DR (g cm ⁻³)	92	2,48	2,32	2,61	2,96	-0,73	-0,56
CH (cm h ⁻¹)	90	0,73	0,24	1,80	48,63	1,94	1,46
EAA (DMP, mm)	91	2,84	2,26	3,12	6,49	0,96	-1,13
RP (MPa)	92	0,46	0,27	0,69	16,36	0,14	0,04
CC (% gravimétrico)	92	29,04	18,37	39,60	17,26	-0,74	-0,08
PMP (% gravimétrico)	92	17,24	8,57	22,91	18,73	-0,01	-0,70

A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica saturada; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración - impedancia; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa.

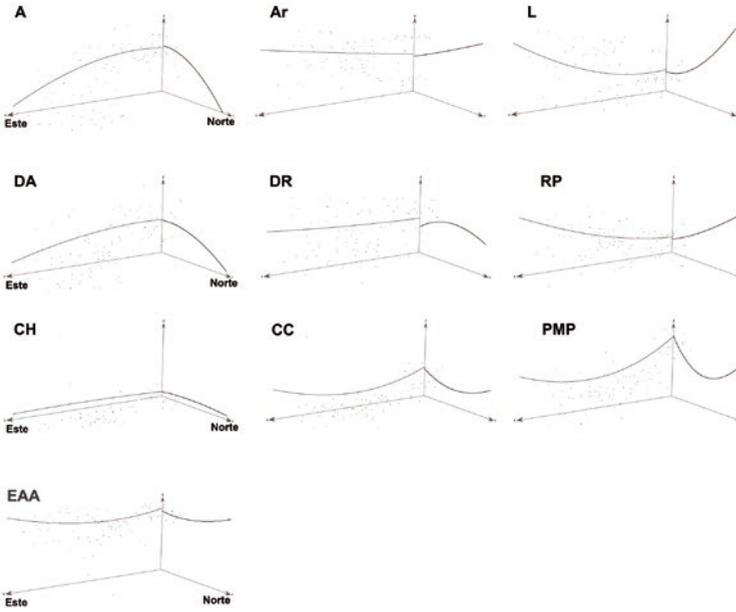
Con relación a la tendencia espacial, las variables que no presentaron tendencia y, por ende, cumplieron los supuestos geoestadísticos fueron Ar, CH, EAA y RP, en ambos lotes; la DR en el lote de El Cortijo, y en el lote de Buenos Aires, L y PMP. Las propiedades para el lote de El Cortijo que presentaron tendencia a aumentar fueron A, DA y CH en dirección Suroeste, L y RP al Noreste, Ar al Norte y DR al Centro, y las que presentaron tendencia a disminuir fueron EAA, CC y PMP al Centro del lote. De estas variables las que presentaron tendencia más pronunciada fueron A, L, DA, CC y PMP, en contraste con DR y Ar (Figura 2). Para el lote de la finca Buenos Aires, las propiedades que tendieron a incrementar su valor fueron A en dirección al centro del lote, RP al Sur Centro Oeste, L al Norte, DA AL Noroeste, DR y CH al Noreste y EAA y PMP al Sureste, y las que presentaron tendencia a disminuir fueron Ar y CC en dirección al centro del lote. Las variables con tendencia pronunciada fueron A, CC, DR y DA, en contraste con L y Ar (Figura 2). Estos resultados indican que la dependencia espacial para L y PMP, puede estar más afectada por la topografía que las demás propiedades, ya que esta solo se presentó en el lote de El Cortijo con topografía más heterogénea que Buenos Aires (Figura 3), lo cual se relaciona con lo mencionado por Kerry y Oliver (2011) al indicar la influencia de la geomorfología en la variabilidad de las propiedades del suelo. La tendencia presente en A, DA y CC, concuerdan con reportado por Jaramillo *et al.* (2008), que para estudios de variabilidad espacial a nivel de lote reportaron tendencias para estas y otras propiedades, sin embargo, Salamanca *et al.* (2018) no reportaron tendencia espacial para DA en lotes de café, por lo cual lograron aplicar herramientas geoestadísticas a esta variable y alcanzar rangos de variabilidad entre 93 y 288 m, e indicaron que esto se debe al manejo y la topografía.

De acuerdo con el análisis estructural de las propiedades mencionadas, la distribución de estas se ajusta a los modelos teóricos de semivariograma esférico y circular, a excepción de DR y CH en el lote de la finca El Cortijo, que ajustaron a Pepita puro.

Las propiedades exhibieron variabilidades diferentes en los lotes, para el lote de la finca El Cortijo, que presenta una topografía ondulada, las Ar, EAA y RP se ajustaron a semivariogramas con dependencia espacial débil y media, es decir, que las propiedades cambian de valor a distancias cortas y medias, y la DR y CH a pepita puro, lo que según Nielsen y Wendroth (2003) se da porque no se logró detectar la correlación entre las muestras; además, los resultados registrados para las propiedades A y EAA, pueden ser imprecisos, debido a que el valor del efecto pepita fue superior al 50% de la meseta (Figura 4), según lo sugerido por Giraldo (2002).

Para el lote de la finca Buenos Aires, con topografía plana a inclinada, las siete propiedades que cumplieron los supuestos geoestadísticos se ajustaron a semivariogramas teóricos esférico y circular, con dependencia especial fuerte y media (cambios de valor a distancias medias y grandes). La diferencia en la variabilidad en los dos lotes, en términos de modelos, dependencia espacial y confiabilidad de los resultados, posiblemente se debe a los contrastes geomorfológicos, donde en el lote de Buenos Aires por ser más plano y homogéneo en comparación con el lote de El Cortijo, las propiedades variaron a mayores distancias y todas se ajustaron a modelos teóricos con resultados confiables. En contraste, en el lote El Cortijo, más irregular y con mayor pendiente, las propiedades variaron a distancias cortas y medias, posiblemente debido a que estas geoformas facilitaron el arrastre y la acumulación de partículas por la acción del agua, y como lo proponen Kerry y

Lote finca El Cortijo



Lote finca Buenos Aires

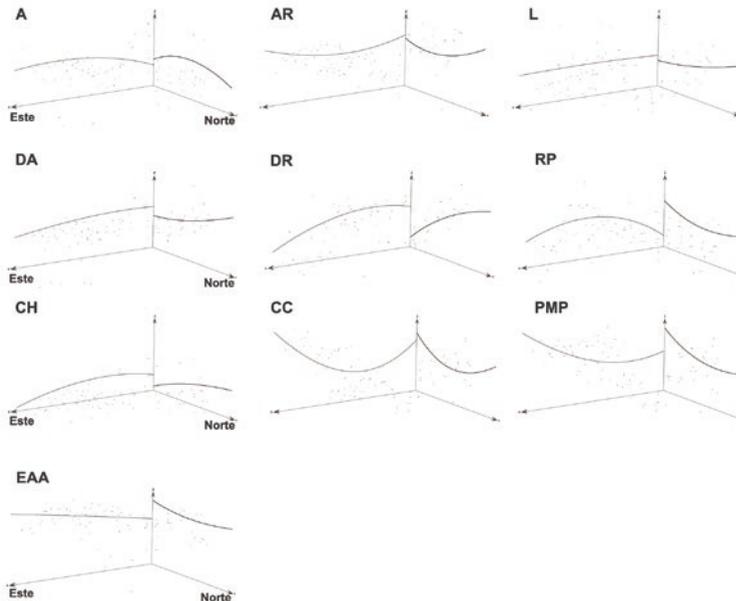


Figura 2. Tendencia espacial de las propiedades evaluadas. A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica saturada; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración-impedancia; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa.

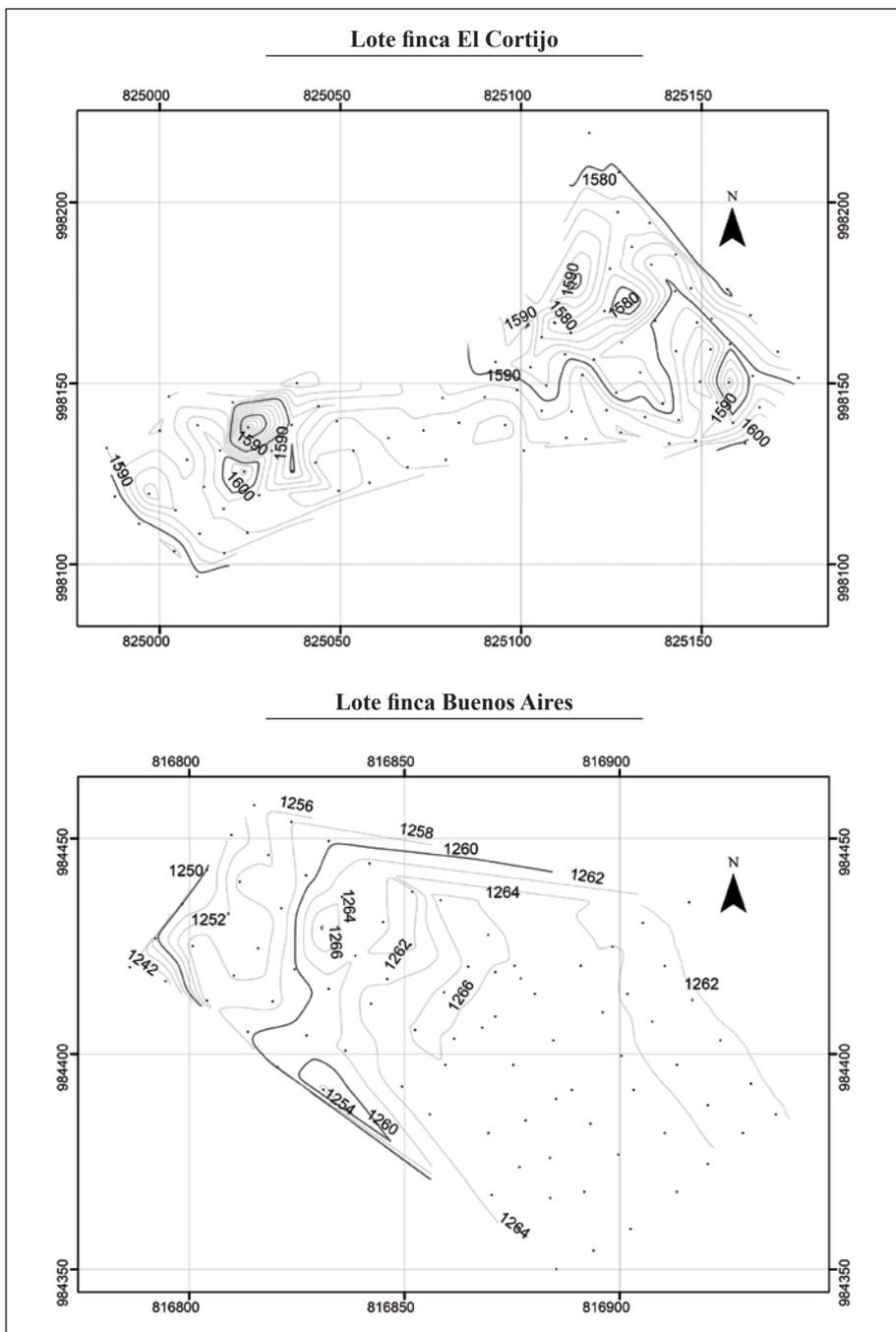


Figura 3. Representación topográfica* de los lotes analizados. a) Finca El Cortijo. b) Finca Buenos Aires.

*Mapas de curvas a nivel con cotas principales cada 10 m y secundarias cada 2 m, realizados con los datos de altitud tomados con GPS en cada punto de muestreo y el *software* ArcGIS 10.3.1, herramientas 3D Analyst y Cartography Tools.

Oliver (2011) la geomorfología se relaciona directamente con la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y debe tenerse en cuenta en el diseño de modelos de muestreo.

Los rangos óptimos de muestreo (Tabla 3, Figura 4) para el lote de El Cortijo variaron entre 16,28 y 103,10 m para EAA y RP, respectivamente, valores coherentes con las condiciones del lote. Para el caso de la EAA, el resultado obtenido se atribuye a la geomorfología que afecta la variabilidad de la materia orgánica (Salamanca *et al.*, 2018) y, por ende, la de EAA (Annabi *et al.*, 2017), con respecto a RP, se atribuye al manejo del lote, que al no ser mecanizado no genera compactaciones diferenciales entre calles y el dosel del árbol, como sucede en cultivos de café en Brasil (Andrade *et al.*, 2018). Para el lote de Buenos Aries, los rangos variaron entre 16,75 y 123,74 m para CH y RP, respectivamente; en cuanto

a la CH, las tendencias registradas pueden explicarse por la estrecha relación de este con Ar (Bagarello *et al.*, 2019), que presentó un rango muy similar (18,85 m); en cuanto a RP, coincide con el valor del lote de El Cortijo y se le atribuyen las mismas explicaciones. En general, los rangos encontrados en el estudio se asemejan en distancia, a los reportados por varios autores (Kılıç *et al.*, 2004; Jaramillo *et al.*, 2008; Kazemi *et al.*, 2008; Guatibonza *et al.*, 2009), pero se consideran bajos en comparación con resultados de estudios realizados en áreas y distancias de muestreo hasta diez veces superiores a las del presente estudio (Hengl *et al.*, 2004; Annabi *et al.*, 2017; Medina *et al.*, 2017; Erşahin *et al.*, 2017). Las diferencias en mención pueden deberse a que en estudios a nivel de lote se detecta una variabilidad causada por el manejo y unidades geomorfológicas detalladas, y no se alcanza a detectar la variabilidad regional.

Tabla 3. Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas para las propiedades evaluadas.

Propiedad del suelo	Nugget	Range	Sill	Modelo	RMS	Dependencia espacial
Finca El Cortijo						
Ar (%)	1,668	29,964	0,046	Circular	1,360	Débil
DR (g cm ⁻³)	0,004	—	0,000	Nugget	0,068	—
CH (cm h ⁻¹)	0,008	—	0,000	Nugget	0,096	—
EAA (mm)	0,005	16,281	0,005	Esférico	0,098	Débil
RP (MPa)	0,007	103,10	0,010	Circular	0,094	Media
Finca Buenos Aires						
L (%)	1,835	34,734	3,685	Esférico	1,916	Media
Ar (%)	1,209	18,852	5,087	Circular	2,106	Fuerte
CH (cm h ⁻¹)	0,013	16,751	0,117	Circular	0,336	Fuerte
EAA (mm)	0,006	21,646	0,029	Esférico	0,166	Fuerte
RP (MPa)	0,003	123,743	0,004	Circular	0,064	Media
CC (% grav)	6,324	70,649	36,608	Circular	3,441	Fuerte
PMP (% grav)	2,432	69,415	16,132	Esférico	2,516	Fuerte

L: limos; Ar: arcillas; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa; RMS: error cuadrático medio.

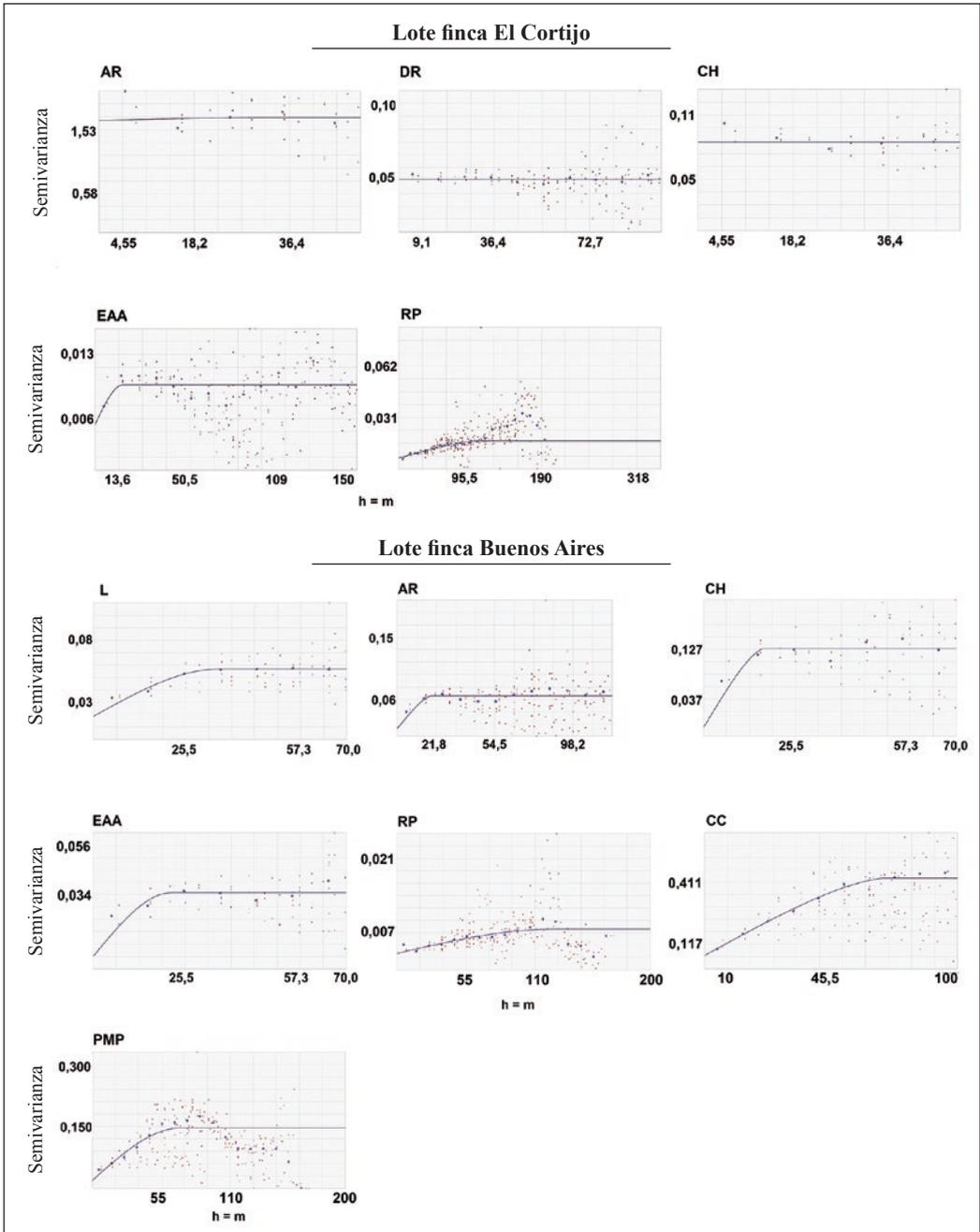


Figura 4. Semivariogramas para las propiedades físicas del suelo evaluadas. A: arenas; L: limos; AR: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CH: conductividad hidráulica saturada; EAA: estabilidad de los agregados al agua; RP: resistencia a la penetración-impedancia; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa.

Una medida para solucionar la detección de la variabilidad a diferentes escalas es realizar estudios con muestreos a diferentes distancias (Rosemary *et al.*, 2017; Goovaerts, 1999), que según este estudio para lotes de geomorfología heterogénea debe ser inferior a los 10 m.

La representación gráfica de la variabilidad espacial en mapas se logró mediante Kriging ordinario para Ar, DR, CH, EAA, y RP, en el lote de El Cortijo; para L, Ar, CH, EAA, RP, CC y PMP en el lote de Buenos Aires; por método IDW para A, L, DA, CC y PMP en El Cortijo, y para A, DA y DR en Buenos Aires. Las distancias de semieje empleadas en el método IDW se presentan en la Tabla 4. Los resultados muestran que los dos métodos, Kriging e IDW, permiten visualizar y cuantificar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a nivel de lote (Figura 5), tal como lo proponen Glendell *et al.* (2014). Sin embargo, al comparar los RMS de L en Buenos Aires por Kriging, con el de L en El Cortijo por

IDW, el de CC en Buenos Aires por Kriging con el de CC en El Cortijo por IDW, y el RMS de PMP en Buenos Aires por Kriging con el de PMP en El Cortijo por IDW, se encontró que en todos los casos los RMS del Kriging son menores y las espacializaciones son más definidas por este método que por el IDW (Figura 5), por lo cual se considera que siempre y cuando las variables cumplan los supuestos es mejor predecir la variabilidad por el método geoestadístico, de lo contrario, cualquier método determinístico puede funcionar, lo que debe evitarse es realizar transformaciones Log (Log, ResLog) o residual, para ajustar el comportamiento de las variables y cumplir los supuestos geoestadísticos, ya que según Wilding y Dress (1983) esto es riesgoso, porque la media tiende a cero, debido a que los datos toman valores positivos y negativos. La especialización de las variables por Kriging (Figura 5) muestra que la propiedad de mayor rango (RP) presentó menos áreas homogéneas que una de rango menor (Ar).

Tabla 4. Parámetros empleados en la especialización IDW.

Propiedad del suelo	Semieje	RMS
Finca El Cortijo		
A (%)	100,730	2,575
L (%)	90,037	2,361
DA (g cm ⁻³)	54,479	0,048
CC (% grav)	73,608	5,119
PMP (% grav)	18,466	3,857
Finca Buenos Aires		
A (%)	20,448	2,582
DA (g cm ⁻³)	42,399	0,054
DR (g cm ⁻³)	68,297	0,055

A: arenas; L: limos; Ar: arcillas; DA: densidad aparente; DR: densidad real; CC: retención de humedad a capacidad de campo 0,033 MPa; PMP: retención de humedad a punto de marchitez permanente 1,5 MPa. RMS: Error cuadrático medio.

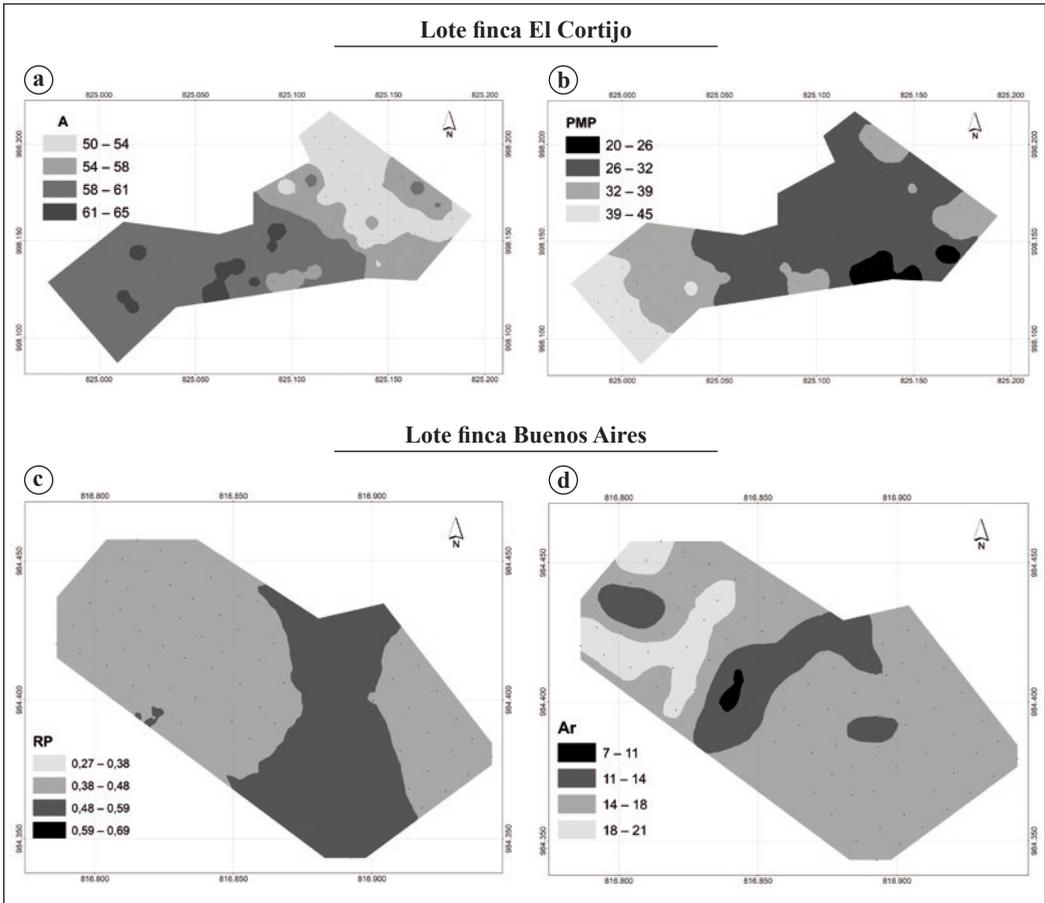


Figura 5. Mapas de variabilidad de propiedades físicas del suelo. A: arenas, %; PMP: retención de humedad en porcentaje gravimétrico a punto de marchitez permanente 1,5 MPa; RP: resistencia a la penetración MPa; Ar: arcillas, %.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo depende de la naturaleza de estas y cambia según la geomorfología. Al respecto, el rango fue mayor para RP que Ar, CH y EAA, y la tendencia fue más pronunciada se registró para A, CC, CH, DR y DA, en comparación con las otras propiedades analizadas.

La selección del método para evaluar la variabilidad depende de la distribución

espacial de cada propiedad y los supuestos geoestadísticos. Cuando estos supuestos no se cumplen y, en consecuencia, el método geoestadístico no permite estudiar la variabilidad, el método determinístico puede ser útil.

AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos a los caficultores propietarios y administradores

de las fincas donde se realizó la investigación, al Comité Departamental de Cafeteros del Quindío, a los integrantes de la disciplina de suelos de Cenicafé y a los colaboradores Anderson Artunduaga y Santiago Arango.

LITERATURA CITADA

- Andrade, A.D., Faria, R.O., Alonso, D.J.C., Ferraz, G.A., Herrera, M.A.D., Da Silva, F.M. (2018). Spatial variability of soil penetration resistance in coffee growing. *Coffee Science*, 13(3), 341-348.
- Annabi, M., Raclot, D., Bahri, H., Bailly, J.S., Gomez, C. y Le Bissonnais, Y. (2017). Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. *Catena* 153, 157-167.
- Bagarello, V., Baiamonte, G. y Caia, C. (2019). Variability of near-surface saturated hydraulic conductivity for the clay soils of a small Sicilian basin. *Geoderma*, 340, 133-145.
- Bohling, G.C. (2007). *Introduction to Geostatistics*. (Open File Report No. 26). Kansas: Kansas Geological Survey.
- Bronick, C.J. y Lal, R. (2005). Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil and Tillage Research*, 81(2), 239-252.
- Cambardella, C.A. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa. *Journal of Soil Science Society of American*, 58(5), 1501-1511.
- Carrillo, I.F. (1985). *Manual de laboratorio de suelos*. Chinchiná: Cenicafé.
- Erşahin, S., Aşkin, T., Tarakçıoğlu, C., Özenç, D.B., Korkmaz, K., Kutlu, T. y Bilgili, B.C. (2017). Spatial variation in the solute transport attributes of adjacent Typic Haplusteps, Mollic Ustifluvents, and Lithic Ustipsamments. *Geoderma*, 289, 107-116.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1986). *Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento de Quindío*. Bogotá: FNC.
- Ferguson, R.B., Lark, R.M. y Slater, G.P. (2003). Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. *Soil Science Society of America Journal*, 67(3), 937-947.
- George, D. y Mallery, M. (2010). *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 update* (10a ed.). Boston: Pearson.
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística.
- Glendell, M., Granger, S.J., Bol, R. y Brazier, R.E. (2014). Quantifying the spatial variability of soil physical and chemical properties in relation to mitigation of diffuse water pollution. *Geoderma*, 214, 25-41.
- Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1-2), 1-45.
- Guatibonza, M., Álvarez H., J.G. y Sanabria, J.E. (2009). Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tanguavita (Paipa, Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(2), 261-271.
- Haruna, S.I., Anderson, S.H., Nkongolo, N.V. y Zaibon, S. (2018). Soil hydraulic properties: Influence of tillage and cover crops. *Pedosphere*, 28(3), 430-442.
- Hengl, T., Gerard, B.M.H. y Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-Kriging. *Geoderma*, 120, 75-93.
- Hu, W., Chau, H.W., Qiu, W. y Si, B. (2017). Environmental controls on the spatial variability of soil water dynamics in a small watershed. *Journal of Hydrology*, 551, 47-55.
- Ilek, A., Kucza, J. y 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.
- Jacobs, J.M., Mohanty, B.P., Hsu, E.C. y Miller, D. (2004). SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 92(4), 436-446.
- Jaramillo, D., González, H. y Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3(2), 10-19.
- Kamale, K.H. y Aggrawal, P. (2011). Geostatistical analyst for deciding optimal interpolation strategies for delineating compact zones. *International Journal of Geosciences*, 2(4), 585-596.
- Kazemi, H.V., Anderson, S.H., Goyne, K.W. y Gantzer, C.J. (2008). Spatial variability of

- bromide and atrazine transport parameters for a Udipsamment. *Geoderma*, 144(3), 545-556.
- Kerry, R. y Oliver, M.A. (2011). Soil geomorphology: Identifying relations between the scale of spatial variation and soil processes using the variogram. *Geomorphology*, 130(1-2), 40-54.
- Kiliç, K., Engin, Ö. y Fevzi, A. (2004). Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research*, 76(1), 1-11.
- Kinoshita, R., Schindelbeck, R.R. y Van Es, H.M. (2017). Quantitative soil profile-scale assessment of the sustainability of long-term maize residue and tillage management. *Soil and Tillage Research*, 174(1), 34-44.
- Medina, H., Van Lier, Q.D.J., García, J. y Ruiz, M.E. (2017). Regional-scale variability of soil properties in Western Cuba. *Soil and Tillage Research*, 166(1), 84-99.
- Mitasova, H. (2008). Interpolation. En: Kemp, K. (Ed.) *Encyclopedia of geographic information science*. (p. 237-241). Thousand Oaks: SAGE Publication.
- Moraes, M.T. de, Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Silva, V.R. da y Luz, F.B. da (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 155, 351-362.
- Nascimento, D.M. do, Cavaliere-Polizeli, K.M.V., Silva, A.H. da, Favaretto, N. y Parron, L.M. (2019). Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil and Tillage Research*, 186(1), 292-299.
- Nielsen, D.R. y Wendroth, O. (2003). *Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation*. Reiskirchen: Catena Verlag.
- Pachepsky, Y. y Park, Y. (2015). Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4), 1094-1100.
- Ramírez L., L., Reina S., A. y Camacho T., J.H. (2008). Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. *Engenharia Agrícola Jaboticabal*, 28(1), 55-63.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Brunke, R.R. y Drury, C.F. y Tan, C.S. (2000). Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2): 478-484.
- Rosemary, F., Indraratne, S.P., Weerasooriya, R. y Mishra, U. (2017). Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *Catena*, 150, 53-61.
- Salamanca J., A., Lince, L.A. y Alzate S., N.A. (2018). Variabilidad espacial de la densidad aparente del suelo a nivel de lote en café. *Cenicafé*, 69(2), 47-59.
- Santos, E.O.D.J., Gontijo, I., Silva, M.B. da. y Partelli, F.L. (2017) Sampling design of soil physical properties in a Conilon coffee field. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41, e0160426. Epub April 27. 2017. doi.org/10.1590/18069657rbcs20160426.
- Schjønning, P., McBride, R.A., Keller, T. y Obour, P.B. (2017). Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. *Geoderma*, 286, 83-87.
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D. y Curi, N. (2015). Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. *Soil and Tillage Research*, 154, 103-113.
- Stock, O. y Downes, N.K. (2008). Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 191-201.
- Valencia A., G. (1999). *Fisiología, nutrición y fertilización del café*. Chinchiná, Cenicafé-Agroinsumos del Café.
- Vargas, R.D.P., Serrato, F. y Trujillo, A.T. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas-Huila. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 113-123.
- Vásquez P., J.R., Baena G., D. y Menjivar F., J.C. (2010). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. *Acta Agronómica*, 59(4), 449-456.
- Warrick, A.W. y Nielsen, D.R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. En D. Hillel (Ed.) *Applications of soil physics* (p. 319-344). New York: Academic Press.
- Wilding, L.P. y Drees, L.R. (1983). Spatial variability. En L.P. Wilding, N.E. Smeck and G.F. Hall (Eds.) *Pedogenesis and soil Taxonomy. I. Concepts and interactions*. (p. 83-116). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.