

# VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA DENSIDAD APARENTE DEL SUELO A NIVEL DE LOTE EN CAFÉ

Alveiro Salamanca Jiménez\*, Luz Adriana Lince Salazar\*\*, Norbey Antonio Alzate Sánchez\*\*\*

---

**SALAMANCA J., A.; LINCE S., L. A.; ALZATE S., N. A. Variabilidad espacial de la densidad aparente del suelo a nivel de lote en café. Revista Cenicafé 69(2):47-59. 2018**

La densidad aparente ( $D_a$ ) se relaciona con las propiedades físicas y químicas del suelo, brinda información de su uso y manejo, y tiene un efecto directo en el crecimiento de las plantas. La variabilidad espacial (vertical y horizontal) de la  $D_a$  a nivel de lote cafetero se estudió en dos unidades cartográficas de suelo, un andisol ubicado en la Estación Experimental La Catalina, denominado unidad Chinchiná, y un inceptisol derivado de basaltos ubicado en el municipio de Marsella, denominado unidad 200. En cada sitio se seleccionó un lote de 2,5 ha (210 x 120 m), se realizó un muestreo sistemático en cuadrícula cada 30 m, y se midió la  $D_a$  en profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm. Los datos se analizaron por medio de estadística descriptiva y geostatística. Se determinaron los respectivos semivariogramas ajustados a modelos del tipo esférico y se generaron los mapas de variabilidad por interpolación por Kriging. Los análisis realizados permitieron encontrar mayor variabilidad horizontal que vertical y que la distancia de muestreo para hallar variabilidad espacial de la  $D_a$  para las profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, y 20-30 cm, es de 288, 149, 123 y 113 m en la unidad Chinchiná y de 93, 113, 112 y 103 m en la unidad 200 respectivamente. Los mapas generados pretenden orientar actividades de manejo específico a nivel de lote buscando optimizar la producción del cultivo.

**Palabras clave:** Geostatística, Andisol, unidad Chinchiná, Inceptisol, unidad 200.

---

## SPATIAL VARIABILITY OF SOIL BULK DENSITY AT COFFEE-CROP PLOT LEVEL

Bulk density (Bd) relates to other soil physical and chemical properties, provides information about its use and management, and affects directly plant growth. The spatial variability (vertical and horizontal) of Bd at coffee-crop plot level was studied in two cartographic soil units, an andisol at the experimental station La Catalina known as Chinchina, and an inceptisol located in Marsella municipality known as 200. In each site a plot of 2.5 ha (210 x 120 m) was selected for a systematic grid sampling every 30 m, and measurement of Bd at depths of 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm. The data were analyzed using descriptive statistics and geostatistics. The respective semivariograms were determined and later adjusted using mostly spherical models; then the variability maps were generated by interpolation using Kriging. The analyses allowed to find greater horizontal variability than vertical. and sampling distances to find spatial variability of Bd at the depths of 0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm, were respectively 288, 149, 123 and 113 m in Chinchina, and 93, 113, 112 and 103 m in the 200 soil unit. These maps aim to guide specific management activities at the plot level in order to optimize crop production.

**Keywords:** Geostatistics, Andisol, Chinchina unit, Inceptisol, 200 unit.

---

\*Investigador Científico I. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia, hasta 2017.

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

\*\*\*Extensionista. Comité de Cafeteros de Risaralda. Santa Rosa de Cabal, Colombia.

Una de las propiedades físicas más importantes del suelo es la densidad aparente ( $Da$ ), la cual se define como la relación entre la masa del suelo ( $M_s$ ) y su volumen total ( $V_t$ ), es decir, el volumen ocupado por las partículas y el espacio poroso ( $Da = M_s/V_t$ ) (1).

La importancia de la  $Da$  radica en su relación con otras propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y como indicador de su uso y manejo. La  $Da$  se utiliza para calcular la porosidad total del suelo y la relación suelo-agua (7), brinda información sobre la compactación de los suelos, permitiendo determinar condiciones adecuadas para el crecimiento y exploración de las raíces (14) y, además, sirve para determinar las características de permeabilidad y aireación relacionadas con la macroporosidad, que a su vez depende de la estabilidad de los agregados (19).

La  $Da$  tiene un efecto directo en el crecimiento de las plantas y la producción de los cultivos. Para mencionar algunos ejemplos, Venanzi *et al.* (23) encontraron que valores de  $Da$  mayores a  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  redujeron la biomasa de las raíces del trigo, y que a partir de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  se disminuyó el crecimiento de los tallos y el área foliar, lo cual según Reichert *et al.* (15) y Suzuki (20) puede asociarse con una aireación insuficiente ( $<0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) y una alta resistencia a la penetración ( $>2 \text{ MPa}$ ). Efectos similares se encontraron en un suelo de la unidad San Simón, donde incrementos en la  $Da$  afectaron negativamente el crecimiento y desarrollo del café en la etapa de almácigo (17). Los mismos autores reportan que en un suelo derivado de cenizas volcánicas, incluso un valor bajo ( $0,57 \text{ g cm}^{-3}$ ) puede ser limitante para el crecimiento de las raíces, porque se disminuye su contacto con las partículas del suelo y se afecta la nutrición de las plantas.

Las condiciones propicias o desfavorables que presentan los suelos para el crecimiento de los cultivos también se asocian con una característica dominante como es su heterogeneidad, la cual dificulta hacer generalizaciones y predicciones. La variabilidad del suelo es una condición inherente que se presenta en sus propiedades aun en cortas distancias (9), como resultado de sus factores y procesos de formación.

Usowicz y Lipiec (21), citando a varios autores, coinciden en afirmar que se debe evaluar y entender la variabilidad tanto espacial como temporal de las propiedades del suelo y de la producción de los cultivos, para determinar las prácticas de manejo que permitan mejorar la cantidad y calidad de las cosechas, siendo ambientalmente sostenible. Y es aquí donde el análisis geoestadístico facilita la identificación de la variabilidad del suelo en un campo evaluado (13) y aumenta la precisión al modelar el comportamiento de las propiedades objeto de estudio (3).

La variabilidad de la  $Da$  derivada de la heterogeneidad misma de los suelos, puede asociarse con otras propiedades como la textura, donde altos contenidos de arenas la aumentan y bajos contenidos la disminuyen (2), y con la humedad y la materia orgánica cuyos contenidos también pueden modificarla notablemente (10, 16).

Ramírez-López *et al.* (14) afirman que, para entender mejor el comportamiento de la  $Da$  como una de esas propiedades que afecta directamente el desarrollo y exploración de raíces, es conveniente estudiar su variabilidad y dependencia espacial utilizando herramientas como la geoestadística, la estadística clásica y el Kriging, que permitan identificar zonas compactadas y, por lo tanto, realizar un manejo más localizado de este problema. Por ello, el presente estudio buscó determinar la

variabilidad espacial horizontal y vertical de la *Da* en la estación La Catalina (Pereira-Risaralda) y en el municipio de Marsella (Risaralda), con el fin de generar mapas y estudiar la viabilidad de enfocar labores específicas de manejo a nivel de lote en la finca cafetera.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en dos lotes de café de 2,5 ha (210 x 120 m) localizados en el Ecotopo 209A. El primero ubicado en la Estación Experimental La Catalina (Pereira, Risaralda), a una latitud de 4° 45' N, una longitud de 75°44' W y una altitud de 1.321 m; y el segundo en el municipio de Marsella (Risaralda), con una latitud de 4°57' N, una longitud de 75°45' O y una altitud de 1.420 m.

Los suelos objeto de estudio fueron seleccionados con base en su representatividad y su importancia para el cultivo del café en la zona cafetera central. El suelo Andisol de La Catalina pertenece a la unidad Chinchiná (*Melanudand*), la cual como su nombre lo indica es derivada de cenizas volcánicas que le confieren un alto contenido de arcilla amorfa, altos contenidos de materia orgánica, una elevada porosidad total (65%-75%), una baja *Da* (0,6 a 0,8 g cm<sup>-3</sup>) y una alta retención de humedad. En cambio, el suelo inceptisol de Marsella corresponde a la unidad 200 (*Eutropept*), originada de basalto hornbléndico biotítico que le confiere una textura franco arcillosa-limosa o arcillosa, una alta retención de humedad, un color pardo grisáceo muy oscuro o rojo amarillento, un tamaño de poros finos, bajos contenidos de materia orgánica, una fertilidad media y una *Da* promedio de 1,1 a 1,2 g cm<sup>-3</sup> (6).

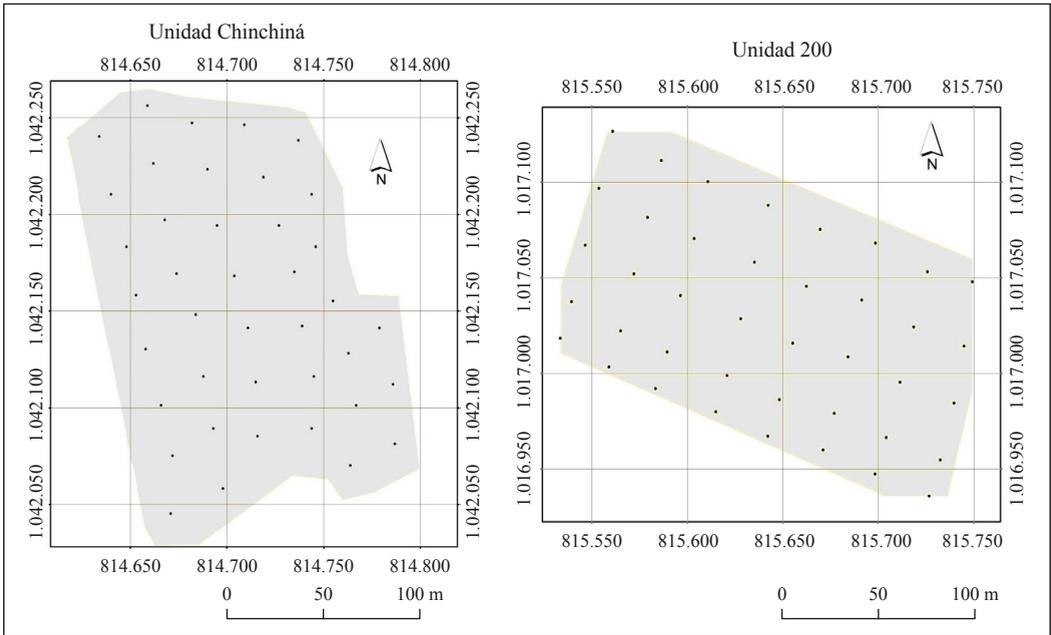
En cada unidad de suelo se seleccionó un lote con historial de uso cafetero, donde se

trazaron cinco transectos de 210 m, con una separación de 30 m y se hizo un muestreo cada 30 m para un total de 40 puntos separados, en una cuadrícula de 30 por 30 m, dentro de un área de 25.200 m<sup>2</sup> (Figura 1). Dado el tamaño determinado, el lote de la unidad Chinchiná comprendía dos áreas establecidas con café variedad Castillo®, de tres y cuatro años, con pendientes entre 5% y 30%, mientras que el lote de muestreo en la unidad 200 correspondió a cuatro áreas, una con café variedad Castillo® de 3 años de edad, una con café Castillo® de primer año y dos áreas de barbecho, todas con pendientes mayores al 40%.

Cada punto se georreferenció con un GPS submétrico Trimble y en cada uno de ellos se muestreó el suelo a cuatro profundidades: 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm. Las muestras no disturbadas se tomaron utilizando un barreno de núcleo y cilindros de acero de 5 cm, para un volumen aproximado de 90,5 cm<sup>3</sup> y se llevaron al laboratorio donde se determinó el peso del suelo seco a 105°C. A partir de cada peso, se estimó la *Da* por el método del cilindro (11) y la humedad del suelo por el método gravimétrico (11). La humedad se midió como variable complementaria, porque juega un papel preponderante en los procesos de expansión-contracción del suelo, que influyen de forma directa en los valores de *Da* del suelo (10).

Los datos obtenidos fueron inicialmente analizados por medio de estadística descriptiva; se estimaron la media, la desviación estándar, la mediana, el coeficiente de variación, y se hizo un análisis de asimetría, curtosis y distribución de frecuencias de los datos para verificar si seguían una distribución normal.

Por medio del programa de ArcGis 10.1 *Geostatistical Analyst Extension* se realizó



**Figura 1.** Distribución de los sitios de muestreo donde se midió la Densidad aparente en cuatro profundidades del perfil.

un análisis exploratorio de los datos, con el fin de comprobar los supuestos (normalidad, estacionariedad y tendencia) necesarios para llevar a cabo los análisis de semivarianza, generar los semivariogramas y determinar el modelo de ajuste. Una vez comprobados los supuestos y la dependencia espacial, se generaron los mapas de distribución espacial para la  $Da$  por profundidad en cada unidad de suelo, a partir de la estimación de este atributo en los lugares no evaluados mediante interpolación por Kriging.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Unidad Chinchiná.** En la Tabla 1 se presentan los valores generados por el análisis estadístico para la  $Da$  del suelo, en cada una de las profundidades de la unidad Chinchiná.

A partir de la Tabla 1 se observa la poca variación de la  $Da$  en esta unidad de

suelo, entre profundidades, con coeficientes menores del 9%, al igual que una distribución normal de los datos indicados por los bajos valores de asimetría y curtosis, con lo que se cumplen los supuestos necesarios para aplicar geoestadística. Estos resultados son similares a los presentados por Ramírez-López *et al.* (14) y por Barrios y Florentino (2).

En la Figura 2 se presentan los valores de la  $Da$  y la humedad a través de la profundidad del perfil de suelo. Se observa la poca variabilidad a través del perfil y una ligera tendencia de la  $Da$  a aumentar con la profundidad, asociada con la diferencia de humedad entre las dos primeras profundidades (0-10 cm) y las dos segundas (10-30 cm), como posible consecuencia de la evaporación y/o una mayor extracción de agua por las raíces de las plantas en las profundidades de 0-5

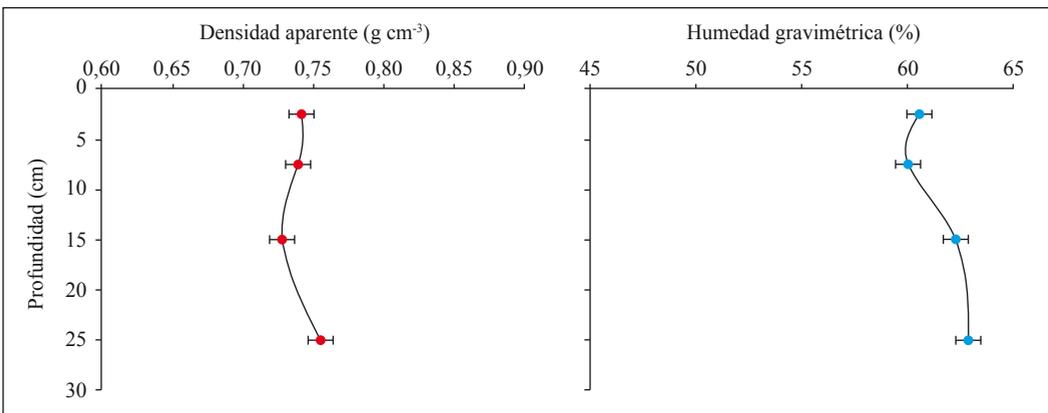
**Tabla 1.** Estadística descriptiva para los datos de *Da* registrados por cada profundidad, en la unidad Chinchiná.

Estadístico	Profundidad (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
Media	0,74	0,74	0,73	0,76
Error estándar	0,01	0,01	0,01	0,01
Mediana	0,73	0,74	0,73	0,76
Desviación estándar	0,06	0,05	0,06	0,07
Coficiente variación	7,42	7,05	8,42	8,67
Mínimo	0,62	0,60	0,63	0,58
Máximo	0,88	0,85	0,84	0,87
Asimetría	0,08	0,69	-1,09	0,40
Curtosis	0,36	-0,20	-0,10	-0,68

y 5-10 cm, que disminuyó la humedad del suelo al momento del muestreo, al igual que con los mayores contenidos de materia orgánica que tienden a disminuir los valores de *Da* en las capas superiores.

A partir de este resultado, se sugiere que para futuros estudios de variabilidad espacial vertical la toma de solo dos muestras, una de 0-10 cm y la otra de 10-30 cm, puede ser suficiente para tener una buena estimación de esta propiedad en la zona de raíces de la planta de café.

Los semivariogramas de la *Da* para la unidad Chinchiná mostraron aumentos de la semivarianza al incrementar la distancia hasta estabilizarse, lo cual corrobora la dependencia espacial. Semivariogramas similares son reportados por Ramírez-López (14), explicando que en ellos se refleja la participación de al menos tres fuentes de variación, la distancia de muestreo, la heterogeneidad del suelo, y una posible variación antrópica. No obstante, en la unidad Chinchiná, la mayor variabilidad estuvo asociada con las distancias de muestreo como se indica en la Tabla 2.



**Figura 2.** Densidad aparente y humedad gravimétrica del suelo a través del perfil en la unidad Chinchiná (las barras corresponden al error estándar para cada profundidad).

**Tabla 2.** Parámetros de los semivariogramas para la Densidad aparente en la unidad Chinchiná.

Prof (cm)	Modelo	Rango	Varianza aleatoria	Varianza parcial	GDE*	Dependencia espacial
0-5	Esférico	288	0,0024	0,0012	200	Débil
5-10	Esférico	149	0,0015	0,0016	94	Débil
10-20	Esférico	123	0,0022	0,0020	120	Débil
20-30	Esférico	113	0,0029	0,0018	160	Débil

\* GDE: Grado de dependencia espacial según Cambardella *et al.* (5).

Con respecto al rango o distancia de muestreo que determina la variabilidad espacial de la *Da*, los valores obtenidos en el suelo de la unidad Chinchiná presentados en la Tabla 2 muestran que, a mayor profundidad fue menor el rango de muestreo. Para la profundidad de 0-5 cm se encontró el mayor rango, de 288 m, el cual fue inferior al encontrado por Vásquez *et al.* (22), quienes reportaron un valor de 594 m. No obstante, el grado de dependencia espacial, para las cuatro profundidades es débil, debido a los bajos valores de la varianza parcial generados por el modelo, lo cual indica que futuros estudios de la *Da*, para similares condiciones de suelo, pueden cubrir mayores áreas de terreno y con ello determinar un adecuado manejo agronómico del cultivo.

A partir de estos parámetros y con el argumento que la variabilidad del suelo se comporta isotrópicamente en el sentido horizontal, en la Figura 3 se representa la distribución espacial horizontal de la *Da*, para las cuatro profundidades.

Los primeros 5 cm exhibieron menor variabilidad con valores entre 0,72 y 0,79 g cm<sup>-3</sup>, los cuales según Salamanca *et al.* (17) estarían por encima del rango óptimo (0,66 - 0,72 g cm<sup>-3</sup>) para el crecimiento del café en la unidad Chinchiná, con posibles efectos negativos en la producción de biomasa de la planta y el peso seco de las raíces. No obstante, el extremo Sureste (SO) del lote

presentó valores desde 0,65 hasta 0,72 g cm<sup>-3</sup>, los cuales estarían relacionados con una zona de acumulación de materia orgánica, que estaría favoreciendo el normal crecimiento del cultivo del café en esta parte del lote.

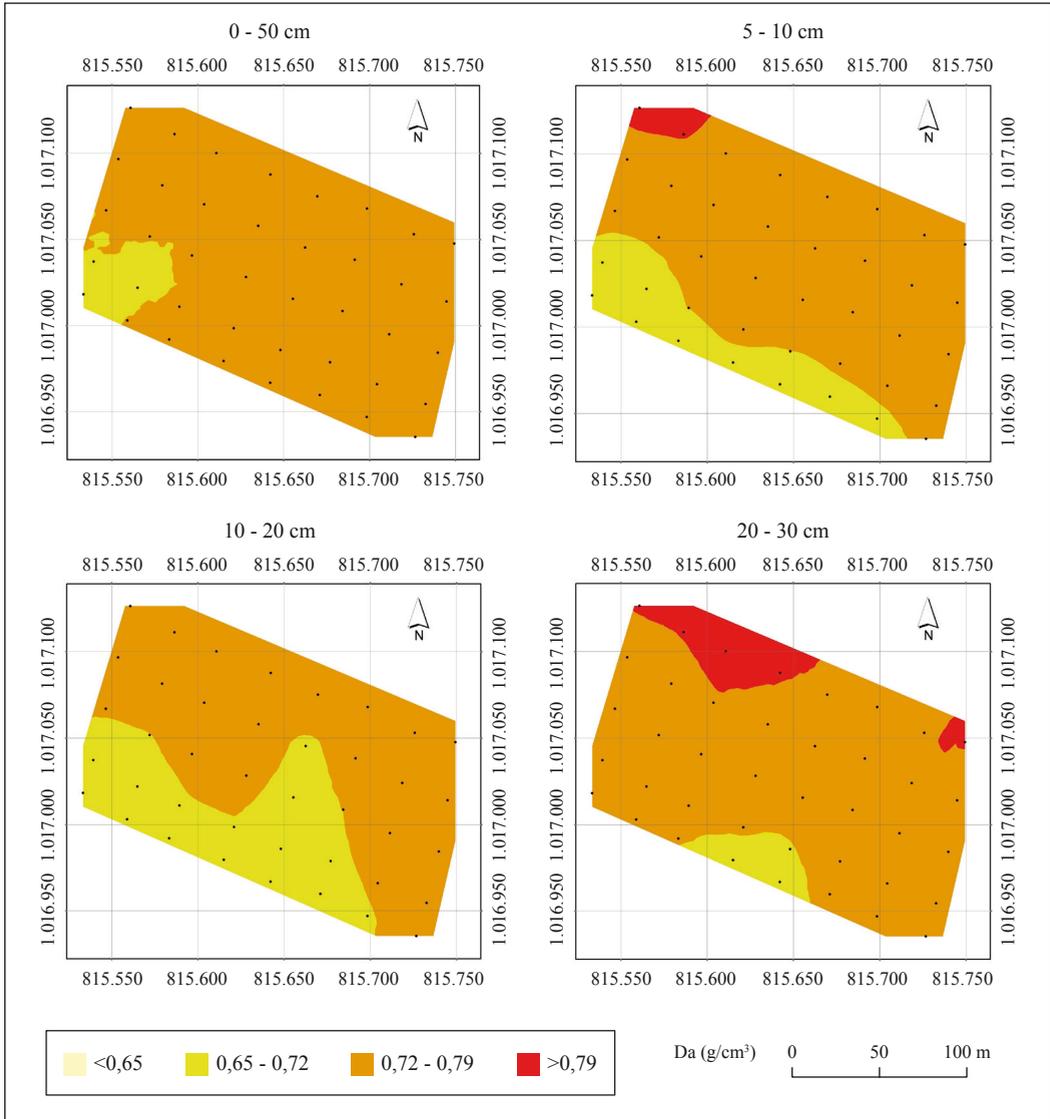
En la profundidad de 5-10 cm se observa mayor variabilidad espacial de la *Da* con valores mayores a 0,79 g cm<sup>-3</sup>, en la parte Noreste (NO) del lote, siendo similares a los encontrados por Salamanca y Sadeghian (18) en estudios realizados en otros suelos de la unidad Chinchiná, y que según Salamanca *et al.* (17) serían desfavorables para el desarrollo radical y crecimiento del café. La parte central del lote presentó valores de *Da* entre 0,72 y 0,79 g cm<sup>-3</sup>, los cuales según Salamanca *et al.* (17), en suelos de la unidad Chinchiná dificultan la absorción de nutrientes como Ca, Mg y Cu en el cultivo del café. En casi toda la parte Sur (S) se encontraron densidades entre a 0,65 y 0,72 g cm<sup>-3</sup>, consideradas dentro del óptimo para el crecimiento del café en esta unidad de suelo (17).

En la profundidad de 10-20 cm hubo variabilidad de la *Da* hacia el centro y sur del lote, con valores entre 0,65 y 0,72 g cm<sup>-3</sup>, los cuales están dentro del rango óptimo para el crecimiento del cultivo del café. En las partes N y SE del lote los valores hallados fueron similares (0,72-0,79 g cm<sup>-3</sup>) a los observados en las profundidades superiores, los cuales son reportados en este tipo de suelos como limitantes para el crecimiento

óptimo y la adecuada absorción de nutrientes del cultivo del café (17).

En la profundidad de 20-30 cm se observó la mayor variabilidad espacial de la *Da*, con valores entre 0,72 y 0,79 g cm<sup>-3</sup> en las partes

SO, N, centro y SE, similar a los encontrados de 10-20 cm; las densidades más altas (> 0,79 g cm<sup>-3</sup>) se encontraron en las partes NO y N E, mientras que en una mínima porción de la parte S del lote se hallaron los valores óptimos para el crecimiento del café (0,65-0,72 g cm<sup>-3</sup>) (17).



**Figura 3.** Mapas de variabilidad espacial de la Densidad aparente para cuatro profundidades en un lote de café ubicado en suelo de la unidad Chinchiná.

En general, la distribución vertical de la variabilidad de la *Da* en la unidad Chinchiná, muestra gran homogeneidad a través del perfil (vertical) y una ligera tendencia a aumentar tanto sus valores como la variabilidad misma al profundizar el perfil, con valores más bajos hacia el S y valores más altos en la parte N del lote. Esta tendencia puede asociarse en parte con la topografía del lote, que presenta una pendiente desde el SE hacia el NO, y que a través del tiempo ha dado lugar a una mayor acumulación de materia orgánica en las partes bajas y, por ende, a una menor *Da* o viceversa, una menor acumulación de materia orgánica con incrementos en la *Da* en ciertos sectores del lote.

Dado que para los cultivos ya establecidos es menos factible modificar la *Da* del suelo, en busca de brindar condiciones más favorables para futuras plantaciones, para aquellas zonas indicadas mas limitantes se recomienda la aplicación de material orgánico o vegetal en el hoyo, que permita reducir los valores de *Da* hasta aquellos considerados óptimos para el desarrollo de raíces y, por consiguiente, obtener una mejor producción del cultivo. Lo anterior, siguiendo las recomendaciones

para una implementación de manejo por sitio específico, de aquellas limitaciones que afectan el rendimiento como lo señala Bertsch *et al.* (4).

**Unidad 200.** En la Tabla 3 se presentan los estadísticos determinados para los valores de *Da* evaluados en cada una de las profundidades estudiadas en el suelo de la unidad 200.

En comparación con el suelo de la unidad Chinchiná, en este suelo se encontraron mayores valores de *Da* a través del perfil y una mayor variación de los datos con coeficientes entre 18% y 23%. No obstante, los valores de asimetría y curtosis cercanos a cero, permiten afirmar que los datos se encontraron dentro de una distribución normal y que es posible aplicar herramientas geoestadísticas para su explicación.

Los promedios de los valores de *Da* para este suelo también presentaron pocas variaciones a través de las profundidades estudiadas (primeros 30 cm) (Figura 4), mientras que la humedad gravimétrica se incrementó al profundizar el perfil, como posible consecuencia de una mayor extracción

**Tabla 3.** Estadística descriptiva para los datos de Densidad aparente registrados por cada profundidad en la unidad 200.

Estadístico	Profundidad (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
Media	0,84	0,83	0,83	0,84
Error estándar	0,02	0,03	0,03	0,03
Mediana	0,85	0,84	0,83	0,83
Desviación estándar	0,16	0,19	0,18	0,19
Coefficiente variación	18,79	22,64	21,64	22,31
Mínimo	0,57	0,51	0,54	0,56
Máximo	1,13	1,22	1,30	1,31
Asimetría	-1,28	-0,98	-0,10	-0,39
Curtosis	0,02	0,16	0,47	0,35

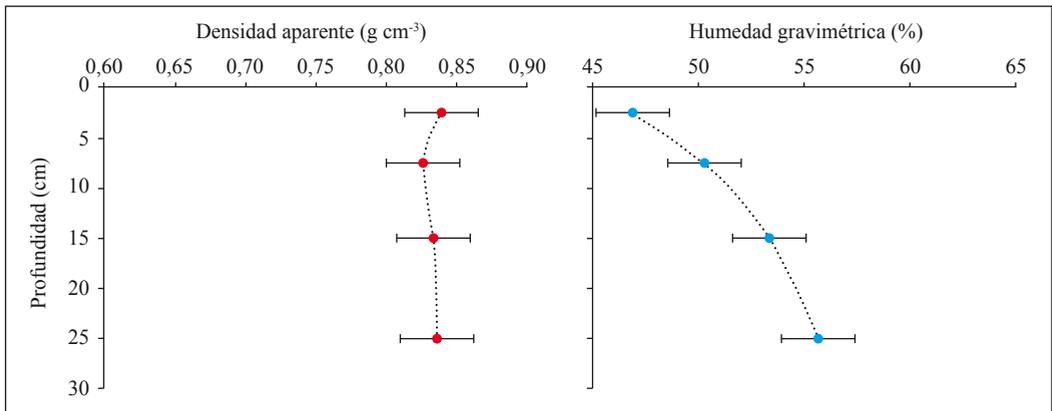
del agua por las raíces, unida a una mayor evaporación en las capas superficiales, asociada a la mayor pendiente del terreno y los menores contenidos de materia orgánica determinados en algún grado por la mayor exposición de la superficie a la acción del sol.

Los semivariogramas obtenidos para la *Da* en este suelo determinaron un mayor grado de dependencia espacial en todas las profundidades evaluadas, asociada principalmente con la distancia de muestreo (Tabla 4).

Los valores del rango o distancia de muestreo en la horizontal requerida para hallar variabilidad espacial en el suelo de

la unidad 200, indican que este valor fue menor en la horizontal pero más variable en la vertical, en comparación con la unidad Chinchiná. Todos estos valores son bajos si se comparan con el rango de 540 m reportado por Vásquez *et al.* (22), pero similares a aquellos reportados por Usowicz y Lipiec (21), con valores alrededor de 120 m. Los modelos de mejor ajuste para los semivariogramas fueron del tipo esférico, lo que concuerda con lo propuesto por Barrios y Florentino (2) en cuanto a modelos para explicar la variación de la *Da* tanto en sentido horizontal como vertical.

Los mapas correspondientes a la variabilidad horizontal de la *Da* y obtenidos mediante



**Figura 3.** Densidad aparente y humedad gravimétrica del suelo a través del perfil en la unidad 200 (las barras corresponden al error estándar para cada profundidad).

**Tabla 4.** Parámetros de los semivariogramas para la Densidad aparente en la unidad 200.

Prof (cm)	Modelo	Alcance	Varianza aleatoria	Varianza parcial	GDE* %	Dependencia espacial
0-5	Esférico	92	0,0041	0,0258	16	Fuerte
5-10	Esférico	113	0,0088	0,0324	27	Moderada
10-20	Esférico	112	0,0075	0,0304	25	Fuerte
20-30	Esférico	103	0,0131	0,0256	51	Moderada

\* GDE: Grado de dependencia espacial según Cambardella *et al.* (5).

extrapolación para cada una de las profundidades en la unidad 200 se presentan en la Figura 4. Para la profundidad de 0-5 cm, se encontró una mayor variación hacia las partes N, S y SE, con valores entre 0,9 y 1,1 g cm<sup>-3</sup>, los cuales podrían considerarse altos para este tipo de suelos. Los valores inferiores a 0,7 g cm<sup>-3</sup> se registraron en la parte central del lote y estuvieron relacionados con la topografía del lote, ya que en esta parte se encuentra una depresión natural del terreno que se convierte en zona de acumulación de materia orgánica y que conlleva a disminuir su *Da* (12).

En las profundidades de 5-10, 10-20 y 20-30 cm se encontró una variación espacial de la *Da* similar a la mencionada en la profundidad de 0-5 cm, donde en las partes N, S y SE, se encontraron valores entre 0,9 a 1,1 g cm<sup>-3</sup>, y hacia el centro valores por debajo de 0,7 g cm<sup>-3</sup>, los cuales, a su vez, se encuentran por debajo de los promedios reportados para esta unidad de suelo (6).

Similar a lo reportado por Fu *et al.* (8) en otros sitios, la variabilidad en esta unidad de suelo puede asociarse con la pendiente del terreno y el manejo mismo de los lotes, ya que los valores más altos se observaron en las áreas de mayor pendiente hacia la parte N del lote, sin que existan reportes o evidencias de limitaciones para las raíces del café.

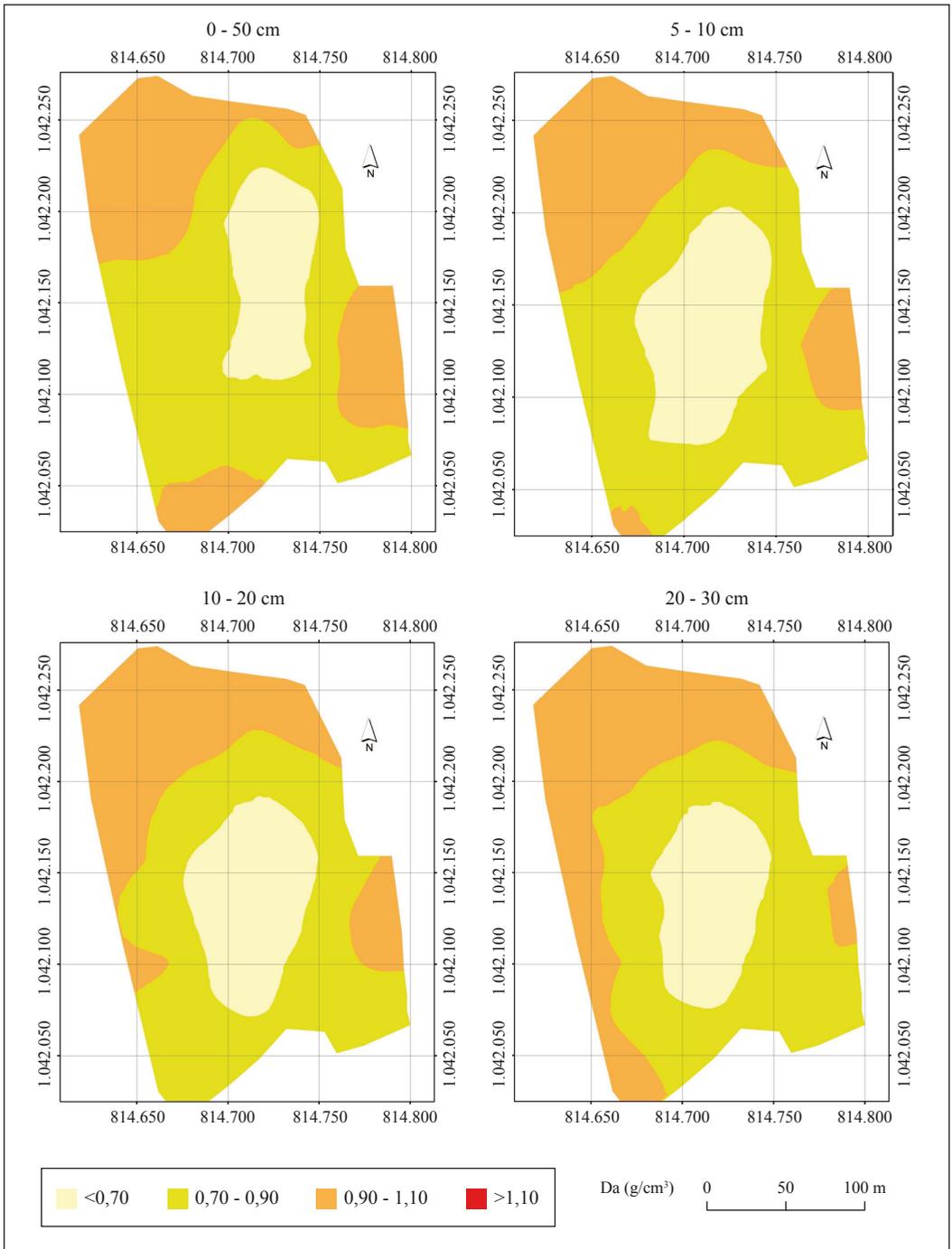
Para las dos unidades de suelo a pesar de haber una tendencia de aumento de la *Da* a través de las profundidades esta variación vertical no fue significativa, por lo que para condiciones similares a los lotes estudiados en las unidades Chinchiná y 200 no es necesario tomar varias muestras de la *Da* a diferentes profundidades; incluso con la toma de una sola muestra de 0-30 cm

se podría estimar la variabilidad espacial de la *Da* en la zona de crecimiento de raíces del café.

Los semivariogramas revelaron un menor grado de dependencia espacial en los valores de la *Da* en el suelo de la unidad Chinchiná, en comparación con aquellos de la unidad 200. Dicha variación horizontal fue asociada con los contenidos de materia orgánica, que en las zonas de alta pendiente tienen menor acumulación, lo cual aumenta la densidad, mientras que en los puntos de menor pendiente hay mayor acumulación de la materia orgánica y donde la *Da* tiende a ser menor.

Los modelos teóricos para todas las profundidades en los dos suelos fueron del tipo esférico y de acuerdo con los valores del rango, la distancia óptima de muestreo que define la variabilidad espacial de la *Da* en el suelo de la unidad Chinchiná es de 289, 148, 123 y 113 m, para las profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm, respectivamente, mientras que en el suelo de la unidad 200 dichos valores corresponden a 92, 112, 112 y 103 m, en las profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm, respectivamente.

Tal como lo afirman Barrios y Florentino (2) y Usowicz y Lipiec (21), los mapas obtenidos utilizando Kriging permiten identificar lugares donde pueden concentrarse factores adversos para la producción de los cultivos, permiten determinar estrategias de manejo por sitio específico y hacer que su aplicación a nivel de lote cafetero sea más efectiva. En este sentido, para zonas con altas densidades de los dos suelos estudiados, se considera una oportunidad para que en futuras siembras lleguen a incorporarse cantidades importantes de materiales orgánicos en el hoyo, con el fin de reducir tales limitaciones y mejorar el desempeño de las plantas durante todo el ciclo del cultivo.



**Figura 4.** Mapas de variabilidad espacial de la Densidad aparente para cuatro profundidades a nivel de lote cafetero ubicado en un suelo de la unidad 200.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a aquellas instituciones y personas que contribuyeron para la realización de este estudio, especialmente a la ONG Solidaridad Andes (doctor Carlos Isaza) por la cofinanciación, al Comité Departamental de Cafeteros de Risaralda por el apoyo, a los propietarios de la finca en Marsella por la colaboración, y a los compañeros de la Disciplina de Suelos de Cenicafé que ayudaron con la obtención de las muestras y la especialización de los datos.

## LITERATURA CITADA

1. ALVARADO, A.; FORSYTHE, W. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelo de Costa Rica. *Agronomía costarricense* 29(1):85-94. 2005.
2. BARRIOS, R.; FLORENTINO, A. Variabilidad espacial de las propiedades físicas de dos suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *UDO Agrícola* 9(4):912-924. 2009.
3. BEHERA, S.K.; SINGH, M.V.; SINGH, K.N.; TODWAL, S. Distribution variability of total and extractable zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. *Geoderma* 162:242-250. 2011.
4. BERTSCH, F.; HENRÍQUEZ, C.; RAMÍREZ, F.; SANCHO, F. Site-specific nutrient management in the highlands of Cartago province. *Better crops international* 16(1):16-19. 2002.
5. CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society America journal* 58(5):1501-1511. 1994.
6. FNC. Estudio de zonificación y uso del suelo en la zona cafetera del departamento de Risaralda. *Manizales: Cenicafé*, 1988. 265 p.
7. FORSYTHE, W.; DÍAZ R., R. La densidad aparente del suelo y la interpretación de análisis de laboratorio para el campo. *Turrialba* 19(1):128-131. 1969.
8. FU, W.; TUNNEY, H.; ZHANG, C. Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. *Soil and tillage research* 106:185-193. 2010.
9. HENRÍQUEZ, M.; VILORIA, J. Numero de observaciones para obtener semivariogramas de algunas propiedades de suelo y distancia de muestreo. *Agronomía tropical* 49(1):5-17. 1999.
10. HOSSNE, G.; AMERICO, J. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra latinoamericana* 26(3):195-202. 2008.
11. IGAC. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6a. ed. Bogotá: IGAC, 2009. 648 p.
12. MURRAY, R.; BOJÓRQUEZ, J.; HERNÁNDEZ, A.; OROZCO, M.; GARCÍA, J.; GÓMEZ, R.; ONTIVEROS, H.; AGUIRRE, J. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Bio ciencias* 1(3):27-35. 2011.
13. NIELSEN, D.; WENDROTH, O. Spatial and temporal statistics: Sampling field soils and their vegetation. *Reiskirchen : Catena-Verlag*, 2003. 614 p.
14. RAMÍREZ L., L.; REINA S., A.; CAMACHO T., J.H. Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos orientales de Colombia. *Engenharia agrícola* 28(1):55-63. 2008.
15. REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil tillage research* 102:242-254. 2009.
16. SADEGHIAN K., S. La materia orgánica: Componente esencial en la sostenibilidad de los agroecosistemas cafeteros. *Manizales: Cenicafé*, 2010. 61 p.
17. SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S.; AMÉZQUITA, C. Densidad aparente de dos suelos de la zona cafetera y efecto sobre el crecimiento del café. *Cenicafé* 55(4):330-340. 2004.
18. SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56(4):381-379. 2005.
19. SEGUEL, O.; GARCÍA, V.; CASANOVA, M. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura técnica* 63(3):287-291. 2003.

20. SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil research* 51:311-321. 2013.
21. USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. *Soil and tillage research* 174:241-250. 2017.
22. VÁSQUEZ, J.; BAENA, D.; MENJIVAR, J. 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. 2010.
23. VENANZI, S.; VALLATI, A.; KRUGER, H. Crecimiento temprano en trigo en función de la densidad aparente del suelo. [En línea]. Buenos Aires: Agrositio, 2001. Disponible en internet: <http://www.agrositio.com/vertext/vertext.php?id=75010&se=19>. Consultado en junio de 2018.