

Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tinguavita (Paipa, Colombia)

Spatial distribution of hydraulic conductivity in a plot at Tinguavita farm (Paipa, Colombia)

Mauricio Guatibonza¹, Javier Giovanni Álvarez-Herrera^{1,2} y Julián Enrique Sanabria¹

RESUMEN

Dada su influencia en la explotación agrícola, la conductividad hidráulica es considerada una de las propiedades hídricas más relevantes en la agricultura. Se encuentra directamente relacionada con las propiedades estructurales y texturales del suelo, las cuales resultan de los procesos de formación y manejo. Por esta razón, la evaluación geostatística de dichas propiedades es fundamental en el estudio de la conductividad hidráulica. En el presente trabajo, a través del muestreo de 110 puntos en un área de 29 ha en la granja Tinguavita de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, se analizaron la densidad real, la densidad aparente en seco y húmedo, el porcentaje de poros, la aireación, los contenidos de humedad gravimétrico, volumétrico y de saturación, y la relación de vacíos del suelo. Los datos se analizaron mediante una metodología geostatística para determinar la distribución espacial de las diferentes propiedades medidas y su relación con la conductividad hidráulica. De los resultados se obtuvieron 13 semivariogramas y 10 mapas de distribución espacial de las variables analizadas. La conductividad hidráulica presentó un rango de variación que va de valores bajos a muy bajos, influenciada por condiciones de alta densidad aparente y bajo porcentaje de poros. Las propiedades físicas evaluadas presentaron dependencia espacial fuerte a moderada, y los datos de los semivariogramas oscilaron entre 22,5 y 242 m.

Palabras clave: geostatística, semivariograma, kriging, distribución, suelo.

ABSTRACT

Due to its influence on agricultural exploitations, hydraulic conductivity is considered one of the most relevant hydric properties of soil. It is directly related to the structural and textural features of cultivated lands, which in turn result from their soil formation and management processes. For this reason, the geostatistical evaluation of these properties is very important in the study of hydraulic conductivity. In the present work, real density, dry and moist apparent densities, pore percentage, aeration, gravimetric, volumetric and saturation moisture contents, and void ratio were assessed by sampling 110 soil plots in a field of 29 ha at Tinguavita farm (Paipa, Boyaca), which belongs to Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. The data were then analyzed with a geostatistical methodology, in order to determine the spatial distribution of the studied properties, and the relation they hold with hydraulic conductivity. Thirteen semivariograms and 10 spatial distribution maps of the studied variables were obtained. Hydraulic conductivity was observed to range from low to very low values, influenced by high apparent densities and low pore percentages. The evaluated physical properties showed strong to moderate spatial dependency, and the semivariogram data ranged from 22.5 to 242 m.

Key words: geostatistical, semivariogram, kriging, distribution, soil.

Introducción

La conductividad hidráulica (K_s) es una de las propiedades hidráulicas que tiene más importancia en la capacidad máxima de saturación de un suelo y en el movimiento del agua dentro del mismo; por otra parte, es de gran relevancia para el diseño y establecimiento de los canales de drenaje (Smedema y Rycroft, 1988). La determinación de la K_s debe observarse desde un punto de vista más integral que proporcione mayor confiabilidad, como lo es la geostatística.

El análisis geostatístico permite detectar la existencia de la distribución espacial de las medidas estudiadas que constituyen una importante herramienta para el análisis detallado de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Conociendo las coordenadas geográficas de un punto muestreado, se pueden analizar los datos posibilitando representar el área con mayor detalle (Vendrusculo, 2001).

Las propiedades físicas e hídricas de los suelos han sido estudiadas geostatísticamente por diferentes autores (Rogers *et al.*, 1991; Vieira *et al.*, 1992; Romano, 1993; Mo-

Fecha de recepción: 31 de marzo de 2008. Aceptado para publicación: 2 de julio de 2009

¹ Grupo de Investigaciones Agrícolas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Tunja.

² Autor de correspondencia. jgalvarezh@gmail.com

hanty *et al.*, 1994; Moustafa y Yomota, 1998; Sepaskhah y Rezaee, 1998; Fietz *et al.*, 1999; Sousa *et al.*, 1999; Souza *et al.*, 2001; Joaquim-Junior *et al.*, 2002), quienes afirman que estas propiedades varían de un lugar a otro, dependiendo del manejo dado al suelo y sus propias características. Algunos de estos estudios han sido incorporados para el diseño de canales de drenaje.

Melo-Filho y Libardi (2005) encontraron que la Ks presenta una alta variabilidad con coeficientes de variación de más de 190% para un suelo saturado (Typic Hapludox). Reportaron que la alta variabilidad espacial exhibida por la conductividad hidráulica saturada está asociada con la heterogeneidad de las propiedades físicas del suelo.

En otros trabajos se utilizaron métodos diferentes para la medida de la conductividad hidráulica saturada, como el de Buttle y House (1997), quienes usaron infiltrómetros de anillo Simple, y obtuvieron alcances de 23 m en un área forestal de 3,22 ha.

Por otra parte, Moreno *et al.* (2001) obtuvieron coeficientes de variación superiores al 70% para la conductividad hidráulica en dos tipos de suelos (arcilloso y franco), lo cual indica que esta alta variabilidad está fuertemente relacionada con los cambios en la textura del suelo, ajustando los semivariogramas experimentales a modelos esféricos o lineales.

Por lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar la distribución espacial de algunas propiedades físicas y su relación con la conductividad hidráulica en la granja Tinguavita de Paipa (Boyacá).

Materiales y métodos

El estudio se realizó en la granja Tinguavita de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) ubicada en el municipio de Paipa a una altitud de 2.470 msnm, con 5° 45' N y 73° 06' W, temperatura media anual de 14,1°C, precipitación media de 966 mm y con humedad relativa media de 74,9% (Ideam estación No. 2403517). La granja tiene una extensión total de 134 ha.

La zona estudiada presenta un régimen de humedad údico, común para los suelos de climas húmedos, con precipitación bien distribuida. Se realizó un estudio de altimetría con la ayuda del sistema de posicionamiento global (GPS), con el fin de establecer un plano de la zona, y así identificar las áreas con posibles problemas de drenaje e inundaciones frecuentes, al igual que diferentes coberturas vegetales.

Para determinar la variabilidad espacial de las propiedades en estudio, se realizó el muestreo en 110 puntos, con la siguiente distribución: tres submallas, una con 25 puntos que se encuentra en la explotación maderable (*Eucalyptus globulus*), las otras dos mallas (pastos), con 24 puntos cada una cerca a dos reservorios con una separación entre puntos de 10 m, para sumar 73 puntos y los 37 puntos restantes distribuidos de una forma aleatoria (Fig. 1).

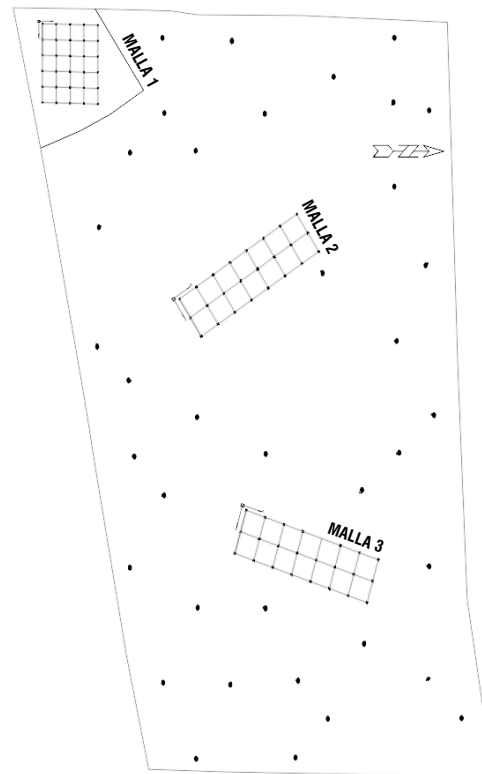


FIGURA 1. Distribución de los puntos de muestreo en el área de estudio de la granja Tinguavita de Paipa (Colombia).

Se determinó Ks por medio del permeámetro de cabeza constante. En cada punto se tomaron muestras a una profundidad de 30 cm, y se determinó el porcentaje de arena, limo y arcilla por el método de Bouyoucos. Se obtuvo la densidad aparente, el contenido de humedad gravimétrica, volumétrica y saturación, así como la porosidad, la aireación y la relación de vacíos por el método del cilindro biselado utilizando el muestreador Bulman modelo 0200 (Beavercreek, OH); se determinó la densidad real por el método del picnómetro.

El estudio estadístico descriptivo y las pruebas de normalidad de las variables se efectuaron utilizando el software SAS® v.8e (SAS Institute Inc., Cary, NC). Para el análisis de la normalidad se utilizó el Test de bondad de Komogorov-Smirnov. Los semivariogramas y el krigeado, se obtuvieron

para determinar la variabilidad espacial de los diferentes parámetros, mediante el *software* Surfer 8.0 (GoldenGate®, San Francisco, CA). Con los datos obtenidos a partir de los muestreos, se determinaron los semivariogramas con la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Siendo $Z(x_i)$ los valores muestrales en los puntos x_i , en los que se tienen datos tanto en x_i como en $x_i + h$; $N(h)$ es el número de pares de datos separados por una distancia h . La representación de los valores seleccionados en cada región, frente a $\gamma(h)$, se considera una distancia media, que da lugar al semivariograma experimental.

Una vez calculados los semivariogramas experimentales, se observó su comportamiento y la tendencia que muestran, por medio de estos se caracterizó la dependencia espacial de las variables analizadas y luego se ajustaron a los modelos teóricos.

Se efectuó la interpolación por Kriging, en donde todos los estimadores son solo variantes del estimador básico $Z^*(x)$, definido así:

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n w_i [Z(x_i) - m(x_i)] \quad (2)$$

donde w_i son los pesos asignados a los datos $Z(x_i)$ siendo estas realizaciones de la variable aleatoria $Z(x_i)$. Los valores esperados de las variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(x_i)$ son $m(x)$ y $m(x_i)$, respectivamente.

Resultados y discusión

Análisis estadístico descriptivo

Los resultados del análisis estadístico de las variables se presentan en la Tab. 1. Las pruebas de normalidad para la conductividad hidráulica saturada (Ks) no muestran distribución simétrica, rechazando la hipótesis de normalidad. Este comportamiento también lo reportaron Moreno *et al.* (2001) y Paz *et al.* (2003), quienes afirman que la conductividad hidráulica saturada presenta una distribución log-normal. Los datos de Ks presentan una alta variabilidad con un coeficiente de variación (cv) de 85,49%. Esta variable se encuentra fuertemente relacionada con los diferentes cambios de la composición textural del suelo (Moreno *et al.*, 2001); así mismo, la alta variabilidad se puede presentar por los diferentes usos a los que está sometido este lote (praderas, cultivos y bosque).

El contenido de arena presenta un cv de 39,19% mayor al reportado por Rodríguez (2004) de 19,62%. Por otra parte, el contenido de arcilla presentó un valor de 32,27%. Este valor se considera dentro de un rango moderado por estar entre el 12 y el 60%, según Warrick y Nielsen (1980).

El contenido de limo presenta un cv de 25,05% similar al obtenido por Lozano *et al.* (2004) del 22,56% para un vertisol de textura arcillosa y el 27,06% para un Entisol de textura arenosa. De igual forma en arena, limo y arcilla presentan una distribución simétrica normal similar a lo reportado por Lozano *et al.* (2004). Estos cv bajos se presentan en arena, limo y arcilla debido a que la textura es una

TABLA 1. Análisis descriptivo de las variables.

Variable	Unidades	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	cv	Curtosis
Conductividad hidráulica	m d ⁻¹	0,035	0,031	0,030	0,001	85,49	6,62
Densidad real	g cm ⁻³	2,33	2,35	0,194	1,870	8,32	0,25
Densidad aparente en seco	g cm ⁻³	1,27	1,27	0,21	0,840	16,62	0,12
Densidad aparente en húmedo	g cm ⁻³	1,60	1,60	0,17	1,140	11,15	0,05
Arena	%	34,02	34,88	13,33	8,880	39,19	0,53
Arcilla	%	34,34	34,74	11,08	9,120	32,27	0,10
Limo	%	31,62	30,00	7,92	12,000	25,05	0,16
Contenido gravimétrico	%	26,95	27,41	10,07	6,810	37,38	0,35
Contenido volumétrico	%	32,64	34,03	8,31	12,410	25,46	0,28
Contenido saturación	%	71,86	71,59	15,46	30,680	21,51	0,14
Porosidad	%	45,51	46,95	7,23	26,540	15,89	0,25
Aireación	%	12,86	11,64	7,37	0,520	57,30	0,25
Relación de vacíos	-	0,86	0,88	0,24	0,360	28,75	1,33

propiedad física muy estable y que varía poco en el tiempo y en el espacio. La textura del suelo se considera una propiedad básica porque los tamaños de las partículas minerales y la proporción relativa de los grupos por tamaño varían considerablemente entre los suelos, pero no se alteran tan fácilmente (Montenegro y Malagón, 1990).

Las propiedades físicas que presentaron menores cv fueron la densidad real con 8,32%, la densidad aparente en seco y en húmedo con un 16,82 y 11,15%, respectivamente. La porosidad fue de un 15,89%, resultados similares a los obtenidos por Rodríguez (2004); esto se debe a que estas propiedades se encuentran muy relacionadas a la génesis del suelo y a su formación. La densidad real y la densidad aparente presentan asimetría y curtosis compatibles con la distribución normal.

El contenido gravimétrico con un valor medio de 26,95% concuerda con los datos expuestos por Sellés *et al.* (2003) en un suelo de textura franco arcillosa clasificado como Fluventic Haploxeroll. El contenido volumétrico presenta un valor medio de 32,64%, valor menor al encontrado por Tobón *et al.* (2004), quienes encontraron un valor medio de 65,3% para un suelo de texturas arcillosas y arcillo limosas. Este valor menor probablemente se debe a que la toma de muestras se realizó en un periodo de bajas precipitaciones (noviembre, 125,8 mm, y diciembre, 38,0 mm).

El contenido de saturación presenta un cv del 21,51% similar al encontrado por Mallants *et al.* (1996) con un valor de 22%, quienes estudiaron la variabilidad de las

propiedades hidráulicas para varios tipos de suelo. Los contenidos gravimétricos, volumétricos y de saturación muestran distribuciones simétricas a la normal, similares a lo expuesto por Castrignano y Buttafuoco (2004).

La relación de vacíos con un valor medio de 0,86 se encuentra entre los parámetros establecidos por Lambe y Whitman (1979); esta coincide con otros estudios (Bustamente y Alva, 2002), los cuales reportan un valor medio de 0,92. Américo (2002) encontró que la relación de vacíos ideal para suelos agrícolas debe ser de 1.

La aireación del suelo con un valor medio de 12,86%, es acorde con los valores obtenidos por Bravo *et al.* (2004) de 14,18 y 23,60% en un Entisol de textura arenosa (profundidad de 30 cm). La relación de vacíos y la aireación presentan distribuciones de frecuencia normal.

Análisis geoestadístico

Se realizó el ajuste de los modelos de semivarianza para cada variable, indicando que estas presentan estructuras de dependencia espacial. En la Tab. 2 se presentan los parámetros de los semivariogramas estimados para cada una de las variables.

Los rangos obtenidos varían entre 22,5 y 242 m. Los semivariogramas experimentales encontrados presentan estructuras de dependencia espacial ya que en las variables evaluadas a excepción del limo, arena y contenido de saturación, todas tienen la semivarianza constante en función de la distancia.

TABLA 2. Análisis geoestadístico.

Variable	Unidades	Modelo	Efecto pepita (Co)	Meseta (C+Co)	Rango (A) m	Co/C+Co x 100
Conductividad hidráulica	M d ⁻¹	Esférico	0,00029	0,00067	179,0	43,0
Densidad real	g cm ⁻³	Gaussiano	0,016	0,0328	125,3	48,0
Densidad aparente en seco	g cm ⁻³	Gaussiano	0,018	0,0423	121,3	42,5
Densidad aparente en húmedo	g cm ⁻³	Esférico	0,0071	0,0303	121,5	22,6
Arena	%	EPP	-	-	-	-
Arcilla	%	Exponencial	64,300	129,000	242,0	49,8
Limo	%	EPP	-	-	-	-
Contenido gravimétrico	%	Esférico	1,1600	85,500	48,6	1,3
Contenido volumétrico	%	Esférico	24,600	51,200	65,3	48,0
Contenido saturación	%	EPP	-	-	-	-
Porosidad	%	Esférico	11,900	46,000	93,1	25,0
Aireación	%	Exponencial	17,940	43,000	22,5	41,7
Relación de vacíos	-	Gaussiano	0,013	0,047	37,8	27,6

EPP, efecto pepita puro; Co/C+Co x 100, % efecto pepita.

Por otra parte, de los resultados obtenidos se puede afirmar que tanto la conductividad hidráulica, la densidad real, la densidad aparente en seco y húmedo, la arcilla, los contenidos de humedad gravimétrico y volumétrico así como

el porcentaje de poros, la relación de vacíos y la aireación tienen una fuerte dependencia espacial. También presentan estacionariedad fuerte a moderada puesto que sus modelos son acotados (Samper y Carrera, 1990; Biau, 1999).

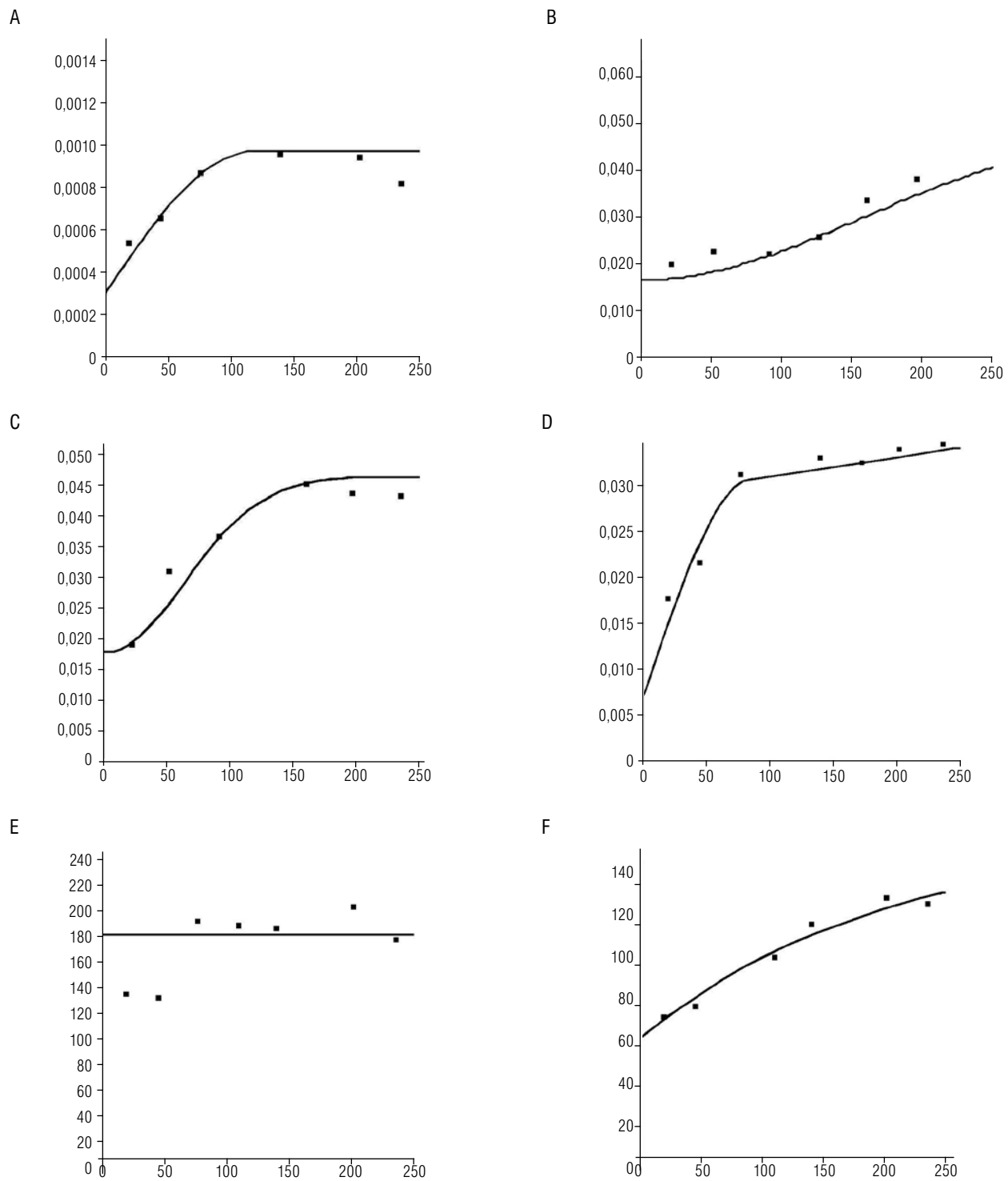


FIGURA 2. Semivariogramas experimentales y ajuste de modelos para cada variable. A, conductividad hidráulica; B, densidad real; C, densidad aparente en seco; D, densidad aparente en húmedo; E, arena; F, arcilla.

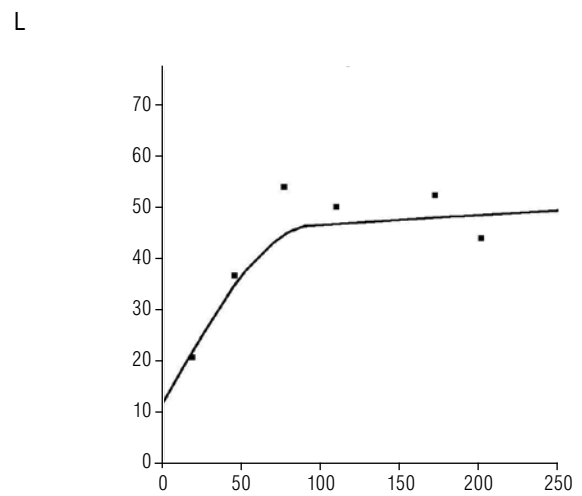
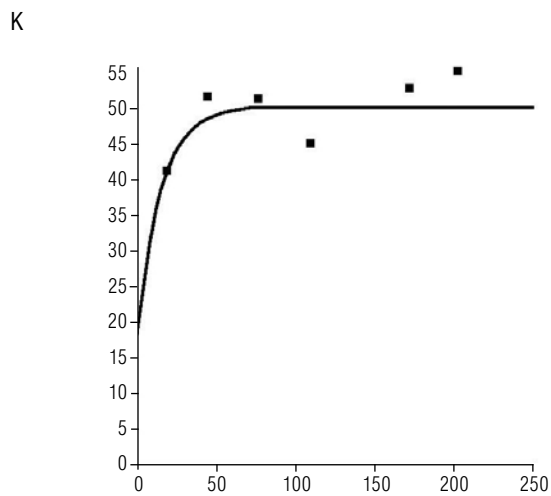
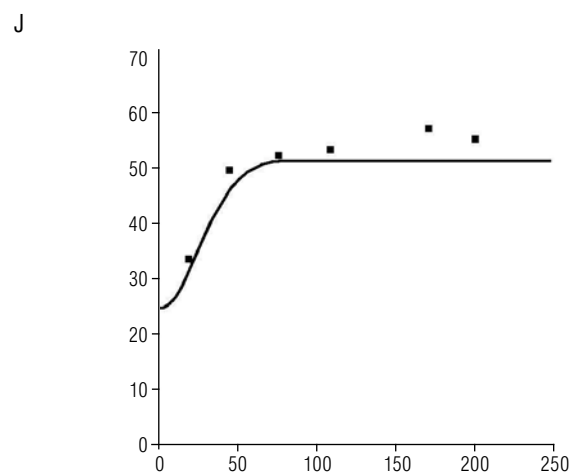
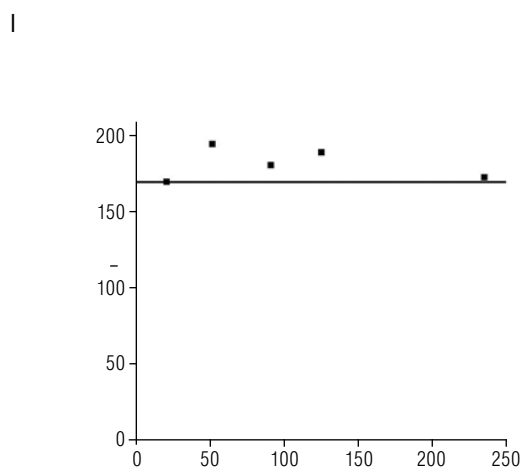
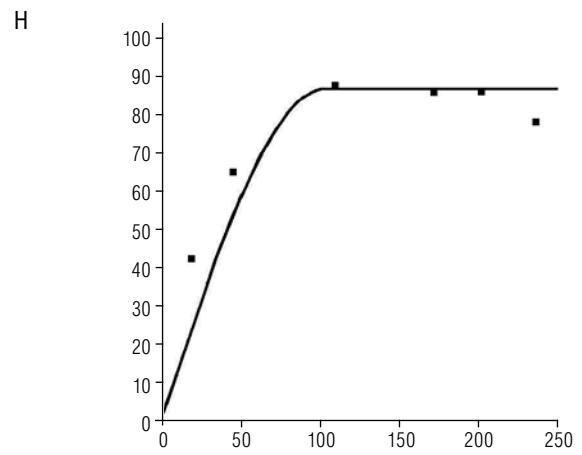
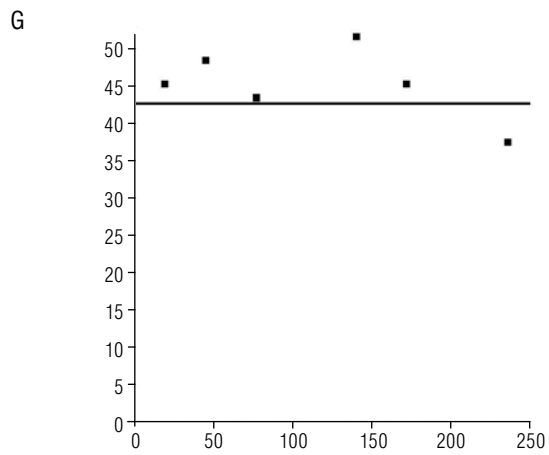


FIGURA 2. Semivariogramas experimentales y ajuste de modelos para cada variable. G, limo; H, contenido gravimétrico; I, contenido a saturación; J, contenido volumétrico; K, aireación; L, porosidad.

M

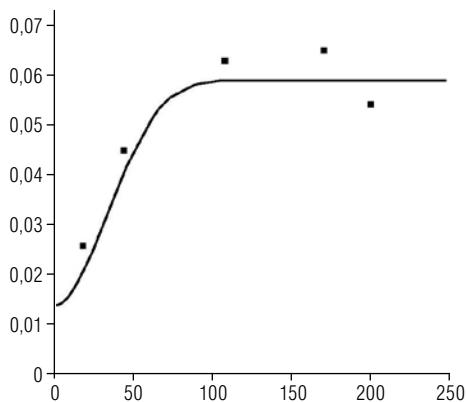


FIGURA 2. Semivariogramas experimentales y ajuste de modelos para cada variable. M, relación de vacíos.

Todas las variables presentaron un claro efecto pepita, lo que sugiere la presencia de una microvariabilidad no explicada por el muestreo utilizado (Arrouays *et al.*, 2000), que se da porque la concentración de mallas y los sitios de muestreo presentan características diferentes.

El contenido de saturación, limo y arena presentan un efecto pepita puro o independencia espacial, lo que significa que estas variables en el área de estudio no tienen ninguna correlación entre los puntos tomados. Es decir que el valor obtenido en un punto de la malla no presenta ninguna dependencia espacial, no hay autocorrelación con otro punto cercano y se comporta de una manera aleatoria, debido a que probablemente el limo y la arena son partículas más grandes y más difíciles de trasladar de un punto a otro, mientras que la arcilla, por poseer un tamaño menor, se trasloca con más facilidad tanto en el perfil como espacialmente. El contenido de saturación no presentó dependencia espacial porque depende de la microporosidad de cada punto, similar a lo encontrado por Ovalles y Rey (1995), quienes encontraron que la semivarianza se mantuvo estable con los incrementos de la distancia reflejando la ausencia de dependencia espacial en un suelo clasificado como Typic y Fluventic Ustropepts.

Los rangos más elevados los presentaron la arcilla y la conductividad hidráulica, lo que demuestra que la autocorrelación espacial es fuerte, ajustándose a un modelo de semivariograma esférico y exponencial, que puede atribuirse a los cambios de la composición textural del suelo en el área de estudio. Libardi y Melo-Filho (2006) encontraron un modelo igual para dos tipos de suelo (arcilloso y franco) con un efecto pepita importante.

En otros trabajos con diferentes métodos para la medida de la conductividad hidráulica saturada, como el de Buttle y House (1997) usando infiltrómetros de anillo simple, se obtuvieron alcances de 23 m en un área forestal de 3,22 ha.

La densidad real, la densidad aparente en seco y húmedo, así como el porcentaje de poros mostraron una moderada autocorrelación espacial, debido a que estas propiedades están íntimamente relacionadas con los factores formadores de suelo, clase de material parental, clima, topografía, entre otros. Grego y Vieira (2005) encontraron dependencia espacial de moderada a fuerte a una profundidad de 0 a 25 cm.

Los contenidos volumétrico y gravimétrico, con rangos entre 65,3 y 48,6 m, respectivamente, presentan dependencia espacial debido a los contenidos de arcilla y su capacidad de almacenamiento de agua y mayor microporosidad existente. La relación de vacíos y aireación presentaron una dependencia espacial débil, debido a sus rangos que oscilan entre 22,5 y 37,5 m.

Es importante resaltar que las relaciones pepita - meseta para algunas variables en ningún caso sobrepasan el 50% (Tab. 2), por lo que la interpolación presenta una mayor confiabilidad. Según Díaz-Francés (1993), esto es recomendable para que el modelo de correlación describa la realidad con mayor confiabilidad.

Distribución espacial de las características hidráulicas y físicas

En la Fig. 3 se presentan los mapas de distribución espacial para cada variable obtenidos mediante Kriging ordinario. La arcilla (Fig. 3B) varió entre un 13 y 61%, presenta los valores más altos en el noreste y sur del mapa, y los valores menores en el oeste y noroeste del mapa. Esta distribución espacial está influida por la geomorfología de la zona de estudio, la cual tiene una pendiente del 1 al 3%.

Los valores más altos para la conductividad hidráulica (Fig. 3C) se presentaron hacia la parte noreste, este y sureste del lote, con valores de 0,11 a 0,17 $m d^{-1}$; los valores más bajos se encuentran hacia el noroeste, oeste y suroeste, con 0,01 a 0,03 $m d^{-1}$. La conductividad hidráulica se encuentra clasificada en un rango bajo a muy bajo (SSDS, 1993), la cual está influida por valores altos de las densidades aparentes y por el manejo dado a esta zona con la explotación intensiva de pasturas para ganado bovino que generan compactación del suelo.

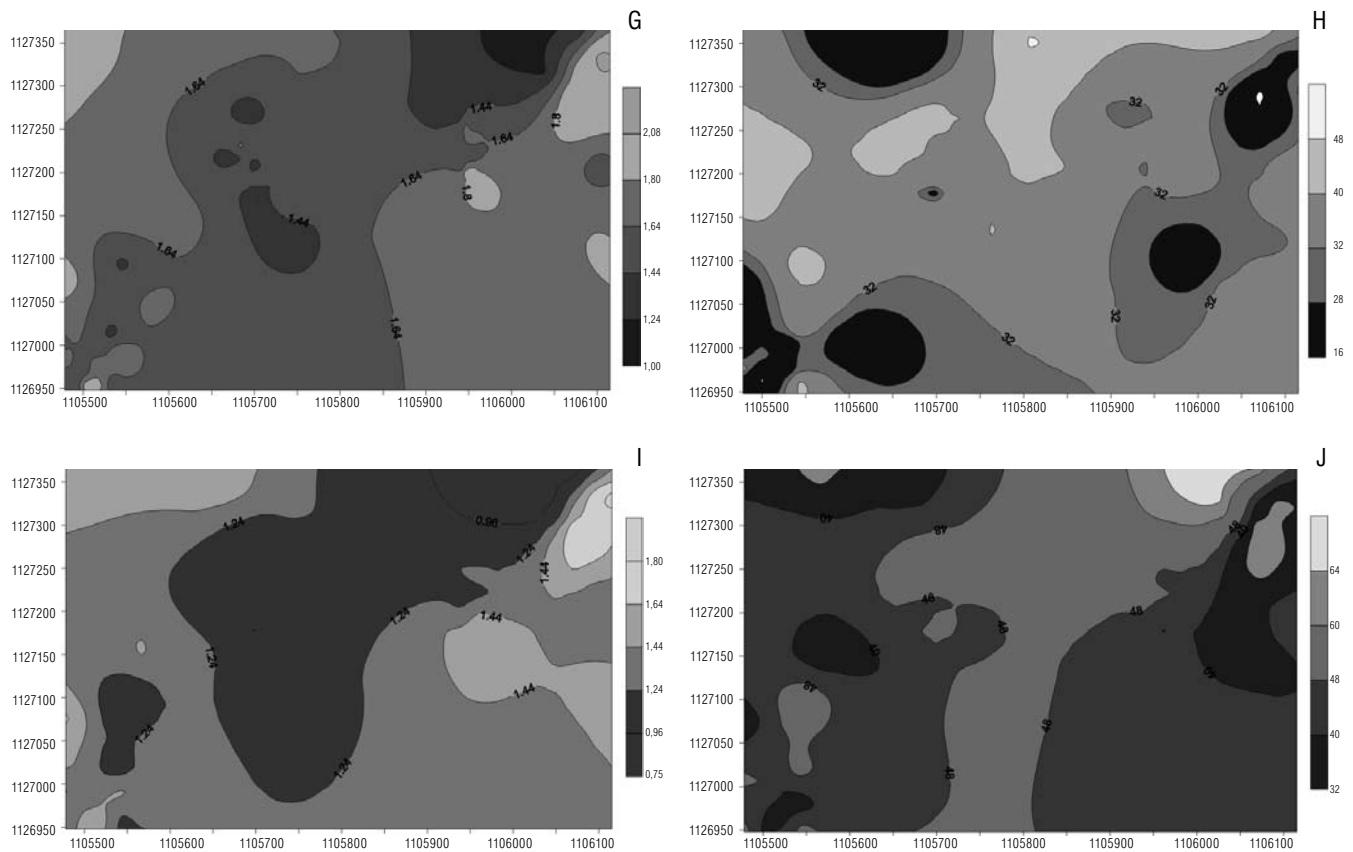


FIGURA 3. Mapas de distribución espacial para: G, densidad aparente en húmedo (g cm^{-3}); H, contenido de humedad volumétrico (%); I, densidad aparente en seco (g cm^{-3}); J, poros (%).

aparentes más altas. Lo anterior pone de manifiesto una relación espacial entre el porcentaje de poros y el contenido de humedad, que a su vez afecta la conductividad hidráulica, ya que el porcentaje de poros controla el comportamiento del agua y otros procesos importantes para el desarrollo de la vida en el suelo.

La relación de vacíos (Fig. 3A) presenta valores menores de 1,0 en gran parte de la zona de estudio, a excepción de los valores más elevados de 1,2 a 1,8 en la zona sureste del mapa; esto se da porque son los suelos más cercanos a los lagos construidos, situación que disminuye el volumen de suelo por muestra recolectada.

El contenido de humedad gravimétrico (Fig. 3F) presenta valores altos en la zona central y hacia el noreste que varían del 30 al 50% y los valores menores de 10 al 26% del sur al suroeste del mapa. El contenido volumétrico (Fig. 3H) presenta valores altos en gran parte del mapa oscilando entre 32 y 48%. Esto muestra el volumen de suelo que está ocupado por agua. Los menores valores se presentaron en algunas zonas aisladas al suroeste, donde se encuentra una explotación maderable (*Eucalyptus globulus*), con

valores de 16 al 28%, lo que indica que los contenidos de humedad permanecen el mayor tiempo con valores bajos, probablemente por la presencia de árboles que demandan gran cantidad de agua. Según la ONU (1999), el eucalipto posee un sistema de toma de agua muy eficiente, y por tanto el consumo de agua es mayor.

La aireación (Fig. 3D) presentó una distribución heterogénea, similar al porcentaje de poros luego de hacer la comparación visual, lo cual permite detectar una relación directa entre estas dos variables.

En el análisis de los mapas se encontraron relaciones espaciales que influyen en el comportamiento de la K_s en el suelo, las densidades aparentes, el porcentaje de poros, la arcilla, los cuales son los factores más influyentes en la K_s . La acción de los factores formadores y sus interacciones muestran la gran heterogeneidad del sistema suelo.

Conclusiones

El contenido de humedad gravimétrica es menor en la explotación maderable que en el lote de pastoreo.

La mayor parte de la zona estudiada presenta valores bajos a muy bajos de conductividad hidráulica.

El limo, la arena y el contenido de saturación no presentaron dependencia espacial. Las demás variables presentaron dependencia espacial de fuerte a moderada con rangos entre 22,5 y 242,0 m.

La conductividad hidráulica se ve afectada principalmente por el porcentaje de poros, la densidad aparente en seco y húmedo.

La presencia de bosque introducido ha afectado negativamente los contenidos de humedad en el suelo.

Literatura citada

- Américo, H. 2002. Valoración física conformante del ambiente radical (en línea). Revista Científica UDO Agrícola 2(1), 84-94.
- Arrouays, D., S. Martín, A. Lepretre y H. Bourennane. 2000. Short-Range spatial variability of metal content in soil on a one hectare agricultural plot. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31, 387-400.
- Biau, G. 1999. Estimation of precipitation by kriging in the EOF space of the sea level pressure field. *J. Climate* 12, 1070-1085.
- Bravo, C., Z. Lozano, R. Hernández, L. Piñango y B. Moreno. 2004. Efecto de diferentes especies de coberturas sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa de maíz. *Bioagro* 16(3), 163-172.
- Bustamente, A. y J. Alva. 2002. Características geotécnicas del suelo de Iquitos en Perú. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. En: Cismid, http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis04_a.pdf; consulta: junio de 2009.
- Buttle, J. y D. House. 1997. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *J. Hydrol.* 203, 127-142.
- Castrignano, A. y G. Buttafuoco. 2004. Geostatistical stochastic simulation of soil water content in a forested area of south Italy. *Bio. Eng.* 87(2), 257-266.
- Díaz-Francés, E. 1993. Introducción a conceptos básicos de geoestadística. En: Memorias Seminario Estadística y Medio Ambiente. Centro de Investigación en Matemáticas, Cimat, Guanajuato, México.
- Fietz, C., M. Folegatti, S. Vieira y J. Frizzone. 1999. Efeito da variabilidade do armazenamento de agua no solo na qualidade da irrigação por aspersão. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 3(2), 150-153.
- Grego, C. y S. Vieira. 2005. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo e uma parcela experimental. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 29, 169-177.
- Joaquim-Junior, G., R. Cichota, F. Condini y Q. Van Lier. 2002. Padrões de variabilidade espacial para densidade e umidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo álico. (CD) En: Reunião Brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 14, Cuiabá, Brasil.
- Lambe, T. y R. Whitman. 1979. *Soil mechanics*. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Libardi, P. y J. Melo-Filho. 2006. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica e um experimento de perfil instantâneo. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 30, 197-206.
- Lozano, P., C. Bravo, F. Ovalles, R. Hernández, B. Moreno, L. Piñango y J. Villanueva. 2004. Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro* 16(1), 61-72.
- Mallants, D., P. Binayak, J. Diederik y J. Feyen. 1996. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci.* 161, 167-181.
- Melo-Filho, J. y P. Libardi. 2005. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transeção. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 29, 497-506.
- Mohanty, B., R. Kanvar y C. Everts. 1994. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 672-677.
- Montenegro, H. y D. Malagón. 1990. Propiedades físicas de los suelos. IGAC, Bogotá.
- Moreno, F., F. Cabrera, J. Fernández e I. Girón. 2001. Propiedades hidráulicas y concentración de metales pesados en los suelos y en las aguas de drenaje de dos zonas afectadas por el vertido. *Bol. Geol. Minero* 112, 178-184.
- Moustafa, M. y A. Yomota. 1998. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage on spatial variability of soil-water properties. *Agr. Water Mgt.* 37(1), 1-19.
- Organización de las Naciones Unidas. 1999. The ecological effects of eucalyptus. FAO Forestry Paper No. 59. Roma.
- Ovalles, F. y B. Rey. 1995. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del lago de Valencia. *Agron. Trop.* 44(1), 41-65.
- Paz G.A., A.I. Thonon, F.C. Bertolani, M.M. Taboanada C., V. Vidal V. y J. Dafonte D. 2003. Variabilidad espacial de la infiltración en una ladera determinada con permeámetro de Guelph e infiltrómetro de tensión. En: López R., J.J. y M. Quemada S.-B. (eds.). *Temas de Investigación en Zona no Saturada*. Vol. 5. Pamplona, España.
- Rodríguez, A. 2004. Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiaikov. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Rogers, J., H. Selim, C. Carter y J. Fouss. 1991. Variability of auger hole hydraulic conductivity values for a commerce silt loam. *Trans. ASAE* 34(3), 876-882.
- Romano, N. 1993. Use of an inverse method and geostatistics to estimate soil hydraulic conductivity for spatial variability analysis. *Geoderma* 60, 169-186.
- Samper, F. y J. Carrera. 1990. Geoestadística. aplicaciones a la hidrogeología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Sellés, G., R. Ferreira, G. Contreras, R. Ahumada, J. Valenzuela y R. Bravo. 2003. Manejo de riego por goteo en uva de mesa cv. Thompson cultivada en suelos de textura fina. *Agric. Téc.* 63(2), 180-192.
- Sepaskhah, A. y A. Rezaee. 1998. Hydraulic conductivity measurement for subsurface drainage system. *Iran Agr. Res.* 17, 139-150.

- Smedema, L.K. y D.W. Rycroft. 1988. Land drainage: planning and design of agricultural drainage systems. Batsford Academic, London.
- Sousa, J., J. Queiroz y H. Gheyi. 1999. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de agua disponível em um solo aluvial no semi-árido paraibano. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.* 3(2), 140-144.
- Souza, M., M. Silva, G. Guimarães, D. Ampos, M. Carvalho y G. Pereira. 2001. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *Rev. Bras. Cienc. Solo* 25, 699-707.
- Soil Survey Division Staff (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C.
- Tobón, C., J. Sevink y J. Verstraten. 2004. Solute fluxes in throughfall and stemflow in four forest ecosystems in northwest Amazonia. *Biogeochem.* 70, 1-25.
- Vendrusculo, L. 2001. Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística. Tesis de maestría. Universidad de Campinas, Brasil.
- Vieira, S., I. De Maria, F. Lombarda, S. Dechen y O. Castro. 1992. Caracterização da variabilidade espacial de propriedades físicas. pp. 41-51. En: Lombardi, N.F. y O.A. de Camargo (coords.). *Microbacia do Córrego São Joaquim (Pirassununga, SP)*. Documentos IAC 29. Instituto Agronômico, Campinas, Brasil.
- Warrick, A. y D. Nielsen. 1980. Spatial variation of soil physical properties in the field. pp. 318-355. En: Hillel, D. (ed.). *Applications of soil physics*. Academic Press, New York, NY.