

Variabilidad espacial de los atributos de la capa arable de un Inceptisol del piedemonte de la cordillera Oriental (Casanare, Colombia)

Spatial variability of top soil attributes in an eastern range piedmont Inceptisol in Casanare, Colombia

Ricardo Peña¹, Yolanda Rubiano^{2, 4}, Andrés Peña³ y Bernardo Chaves²

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estudiar la variabilidad espacial de los atributos del suelo, enfocado a optimizar futuros muestreos en suelos similares. El estudio se realizó en una superficie de 58 ha, ubicada en Tauramena, departamento de Casanare, Orinoquia colombiana. El suelo del estudio corresponde a un Oxic Dystrudept de textura franco arenosa a franco arcillosa, localizado sobre un abanico de terraza del piedemonte de la cordillera Oriental. A través del análisis del semivariograma y de análisis de varianza anidado se encontró la distancia de muestreo óptima para cada variable analizada. Se halló que no hay diferencia entre las distancias óptimas encontradas bajo un método u otro cuando la varianza del atributo en cuestión tiene dependencia espacial.

Palabras clave: llanos Orientales, variograma, oxisol.

ABSTRACT

With the aim of optimizing future samplings in similar soils, the present work studied spatial variability of soil attributes in a 58 ha plot in the municipality of Tauramena, department of Casanare, in the Colombian Orinoquia. Located at an alluvial fan terrace of the Eastern Mountain Range, the studied soil is an Oxic Dystrudept with loamy sand to clay loam texture. The optimal sampling distance for each studied variable was calculated by means of a Semivariogram Analysis and a Nested Analysis of Variance. No difference between the calculated optimal distances was found with either method when the variance of the specified attribute was spatial dependent.

Key words: Eastern plains, variogram, oxisol.

Introducción

Debido a la complejidad de los factores y procesos que intervienen en la formación del suelo, la variabilidad es una condición inherente a su naturaleza (Jaramillo, 2003). Es así como cambios de posición en la forma del terreno de una misma unidad de paisaje se reflejan en cambios de espesor de los horizontes superficiales. La heterogeneidad es entonces una de las principales características de los suelos, la cual puede ser de alta o baja magnitud, y afecta, en cualquiera de los casos, el manejo y las predicciones que se hagan con ella (Jaramillo, 2002). Para Gho (2004) y Jaramillo (2002), la variabilidad del suelo depende de la propiedad que se analice, las propiedades químicas varían más que las físicas; se encuentra menor variabilidad en las propiedades en su condición natural, que en condiciones de cultivo. Aquellas propiedades que más se afectan por el manejo del suelo son las que presentan mayor variabilidad; otros contenidos, como el contenido de nitrógeno y fósforo,

son más inestables y difíciles de predecir (Schepers *et al.*, 2004). Los resultados del estudio realizado por Gho (2004) indican que la variabilidad espacial se puede expresar a través del coeficiente de variación, y que hay propiedades, tales como el pH y la materia orgánica, que son más estables en el espacio, lo que permite hacer una predicción más certera de su comportamiento a través del terreno y, por ende, de la influencia sobre el rendimiento de los cultivos.

Aunque la variabilidad espacial ha sido estudiada tradicionalmente a través de los levantamientos de suelos, en los cuales se busca dividir áreas extensas en otras más pequeñas y más homogéneas, actualmente se utilizan técnicas cuantitativas que muestran mayor exactitud, basadas en la geoestadística, las cuales permiten estudiar esta característica en los suelos y mapear el comportamiento de sus propiedades (Webster, 1985). La geoestadística parte del principio de la variable regionalizada para estudiar procesos o fenómenos en el espacio (Viera, 2002). Esta rama

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2008. Aceptado para publicación: 19 de febrero de 2009

¹ Frutos del Casanare, Yopal (Colombia).

² Departamento de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

³ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de La Salle, Bogotá (Colombia).

⁴ Autor de correspondencia. yrubianos@unal.edu.co

de la estadística estudia la estructura espacial a través del variograma, del correlograma o del semivariograma experimental, para predecir o interpolar. No obstante, en ciencias del suelo, el semivariograma se ha utilizado para definir, de manera más precisa, distancias de muestreo (Van Es *et al.*, 1989; Fagroud y Van Meirvenne, 2002). Pese a esto, muchos autores consideran que cuando el objetivo es definir distancias óptimas para muestrear, la mejor herramienta la ofrece el análisis de varianza bajo el modelo jerárquico, en el cual se evalúan los componentes de las varianzas utilizando muestreos de tipo anidado o en pirámide (Ovalles y Rey, 1995; Rubiano, 2005). En estos modelos, cada distancia de muestreo se toma como un factor de variación, de tal modo que al final se puede inferir la distancia que más contribuye a la varianza de la variable dependiente, encontrando así la distancia más apropiada para el muestreo.

Tal como se mencionó, la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, y específicamente su magnitud, depende de los factores, de los procesos formadores y del tiempo de intervención (cultivo); en consecuencia, se pueden encontrar variaciones altas de algunas propiedades en distancias cortas, mientras que otras pueden variar en distancias largas. Esto tiene un gran impacto porque pone de manifiesto que algunas variables deben ser muestreadas a muy corta distancia, mientras que otras pueden ser muestreadas a distancias mayores. El efecto económico de esta afirmación sobre los muestreos de suelos es de relevancia para atributos cuyos análisis tienen un alto costo. Pues bien, este trabajo pretende, a través de un muestreo anidado y del estudio de los semivariogramas experimentales y del análisis de varianza bajo el modelo jerárquico, concluir con respecto a la mejor distancia de muestreo de cada atributo del suelo, de tal modo que se maximicen la eficiencia y la rentabilidad de los muestreos al caracterizar apropiadamente una zona con el mínimo número de muestras posibles.

Materiales y métodos

Características del área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en una finca de 58 ha, ubicada en la vereda Jagüito del municipio de Tauramena, localizado sobre los 5° 01' N, 72° 45' W, ubicado al suroccidente del departamento de Casanare, en la región de la Orinoquia, en el oriente colombiano.

El área de estudio corresponde, según Holdridge, a un bosque húmedo tropical (bh-T), con un promedio anual de lluvias de 3.000 mm (IGAC, 2002); está ubicada sobre una zona de relieve ligeramente plano con pendiente

dominante (1-3%). El paisaje corresponde al pie de monte, el tipo de relieve a un abanico terraza y la forma del terreno al plano del abanico terraza. Los suelos de esta zona fueron caracterizados, según USDA (2006), como Oxic Dystrudept, Francosa fina, Caolínica, subactiva e Isohipertérmica; fase moderadamente profunda con 30% dentro de la unidad y fase profunda con el otro 70% aproximadamente; están caracterizados por tener textura franco arenosa a franco arcillosa, de profundidad efectiva muy superficial a muy profunda, limitados en algunos sectores por pedregosidad. Son bien drenados, con baja saturación de bases y poca capacidad de intercambio catiónico. En la fracción arena y arcilla se encontró un dominio absoluto del cuarzo y la caolinita, que indican una fertilidad potencial y actual muy baja (Peña, 2006).

Forma de muestreo y análisis

Sobre una misma unidad cartográfica se utilizó un muestreo de tipo anidado con cuatro niveles, correspondientes a las distancias entre muestras, es decir, 270, 80, 20 y 4 m, para el estudio espacial de algunas variables físicas y químicas del suelo. Las distancias son arbitrarias y se seleccionaron con base en los criterios descritos por Jaramillo (2002) y los resultados de estudios anteriores adelantados por Ovalles y Rey (1995), Madero (2002), Lozano (2004) y Rubiano (2005), con algunos ajustes, según la forma particular del lote. El diseño corresponde a un factorial $8 \times 2 \times 2 \times 2 = 64$ sitios, es decir, el primer nivel (270 m) tiene ocho repeticiones, mientras que los demás niveles sólo tuvieron dos (Fig. 2).

Para la localización de los puntos de muestreo se utilizó fotografía aérea. Esta imagen fue calibrada con las coordenadas a través del software Map Maker (Dudley y Map Maker Ltd., 1996) y sobre ella se colocó el plano de la finca. Los puntos del primer nivel se localizaron dividiendo el área de estudio en 25 cuadrados de 270 x 270 m, cada uno a su vez subdividido en 25 subcuadros de 54 x 54 m. Ocho de estos subcuadros fueron seleccionados al azar, teniendo en cuenta una distancia aproximada de 270 m entre ellos (Fig. 2B). Los puntos subsiguientes fueron ubicados con base en la distancia de muestreo específica, seleccionando transectos al azar (Peña, 2006).

Partiendo de los procedimientos establecidos por el IGAC (1979), en cada uno de los puntos seleccionados se hicieron las determinaciones que se presentan en la Tab. 1.

Métodos estadísticos

Utilizando el programa JMP v 5.1 (SAS Institute Inc., 2001) se determinaron los estadísticos descriptivos, es decir, la

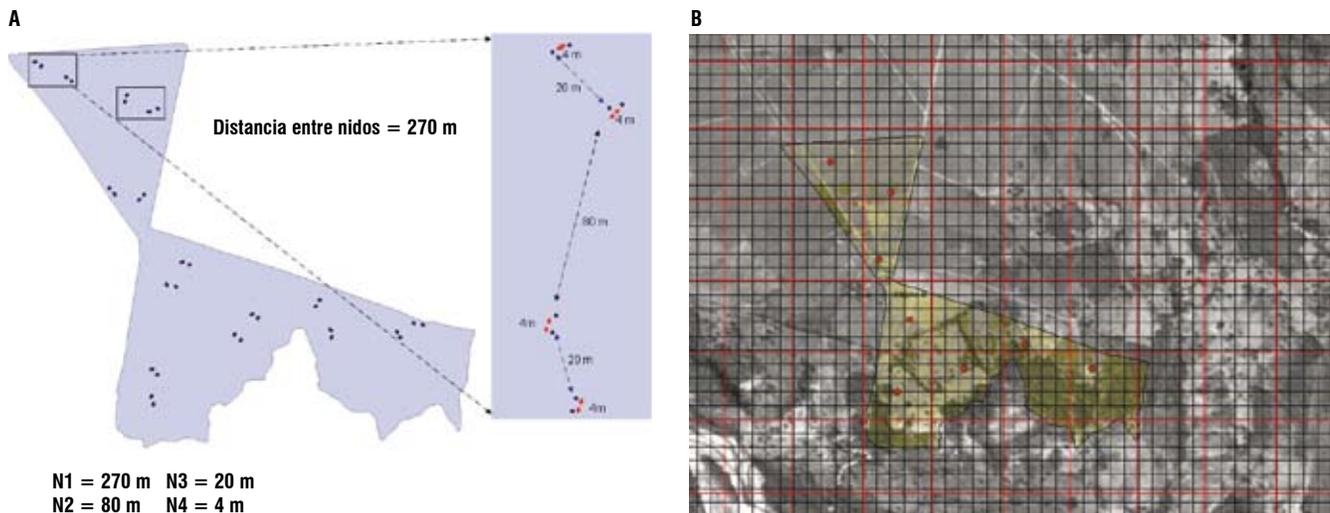


FIGURA 2. Diseño del sistema de muestreo anidado (A) y localización de los puntos asignados para el análisis físicoquímico de un Inceptisol del piedemonte de la cordillera Oriental, en la orinoquía colombiana (B).

media, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, la mediana, la asimetría, la curtosis y los valores mínimo y máximo.

El cálculo de la semivarianza, el semivariograma experimental y el ajuste del modelo al mismo se hizo utilizando GS+ v 7.0 (Gamma Design Software, 2004). Se consideró la mitad de la máxima distancia entre dos puntos de muestreo como rango para calcular la semivarianza y se utilizaron 10 intervalos de esta distancia para construir el semivariograma.

El modelo teórico de mejor ajuste a cada uno de los semivariogramas se estableció teniendo en cuenta el coeficiente de determinación (r^2), la relación entre la pepita y la meseta (pepita/meseta) y el coeficiente de determinación de la validación cruzada (r^2 vc). La validación cruzada es posible en GS+ ya que se pueden generar interpolaciones con “Krigging Puntual” utilizando cada uno de los modelos disponibles en el software para compararlos y definir cuál es el que mejor se ajusta a los datos originales. Para analizar el grado de dependencia espacial se utilizó la clasificación de la relación entre la pepita y la meseta (Prop) propuesta por Cambardella *et al.* (1994), quienes establecieron tres categorías para calificarla: fuerte dependencia espacial cuando este parámetro tiene valores inferiores a 25%, moderada cuando está entre 25 y 75%, y débil cuando es superior a 75%. Utilizando el método de agrupación de Ward y la distancia euclidiana, en el programa StatGraphics Plus v. 4.0 (Manugistics, 1995) se generaron cuatro “semivariogramas tipo” que permiten analizar la totalidad de los atributos físicos y químicos estudiados.

La diferencia fue determinada con el criterio de “regla fija”, establecida con un nivel de similitud de 16, con el cual se obtienen grupos lógicos, es decir que desempeña un papel importante el conocimiento del sistema que se estudia (Herrera, 2000).

Para realizar los análisis de varianza de tipo anidado se utilizó el programa SAS v 8.1. (SAS Institute Inc., 2001). El objeto del análisis de varianza fue estimar los porcentajes de la varianza aportados por cada distancia de muestreo a la varianza total, de tal forma que, junto con el análisis de los semivariogramas, la distancia en la cual se acumule la mayor cantidad de la varianza da una idea acerca de la distancia óptima de muestreo.

Resultados y discusión

Estadística descriptiva

En la Tab. 2 se presentan las estadísticas de las variables analizadas; se encontró que se trata de un suelo muy ácido; en el terreno los valores de pH oscilan entre 4,27 y 5,19 (extremada y fuertemente ácido). Esta acidez se explica por la génesis de estos, determinada por la mineralogía de la fracción arena dominada por el cuarzo y de la fracción arcilla, predominantemente caolinítica. La condición de acidez extrema conlleva a unos valores bajos de Ca, Mg y K. Si bien la interacción Ca/Mg puede ser favorable para algunos cultivos (3,11), las relaciones Mg/K, Ca/K y (Ca+Mg)/K son muy bajas, lo que indica un desbalance por el alto contenido relativo de K dentro del suelo. Este bajo contenido de bases se convierte en el principal limitante para la producción agrícola, por lo que es necesario planear cuidadosamente las prácticas de fertilización y aplicación de enmiendas.

TABLA 1. Variables analizadas para un Inceptisol en la orinoquía colombiana.

Variable	Profundidad (cm)	Abrev.	Método	Unidad de medida
Contenido de arena	0 – 20	A	Bouyoucos	%
Contenido de arcilla	0 – 20	Ar	Bouyoucos	%
Contenido de limo	0 – 20	L	Bouyoucos	%
Densidad aparente	0 – 20	DA	Cilindro biselado	g cm ⁻³
Resistencia a la penetración	2,5	PT a 2.5	Penetrógrafo con cono 30° y 2 cm ²	kg cm ⁻²
Resistencia a la penetración	5,0	PT a 5	Penetrógrafo con cono 30° y 2 cm ²	kg cm ⁻²
Resistencia a la penetración	10	PT a 10	Penetrógrafo con cono 30° y 2 cm ²	kg cm ⁻²
Resistencia a la penetración	20	PT a 20	Penetrógrafo con cono 30° y 2 cm ²	kg cm ⁻²
Aluminio intercambiable	0 – 20	Al	KCI	cmol(+) kg ⁻¹
Carbono orgánico	0 – 20	CO	Walkley-Black	cmol(+) kg ⁻¹
Fósforo disponible	0 – 20	P	Bray II	ppm
Cap. de intercambio catiónico	0 – 20	CIC	Acetato de amonio 1N y Neutro	cmol(+) kg ⁻¹
Calcio	0 – 20	Ca	Acetato de amonio 1N y Neutro	cmol(+) kg ⁻¹
Magnesio	0 – 20	Mg	Acetato de amonio 1N y Neutro	cmol(+) kg ⁻¹
Potasio	0 – 20	K	Acetato de amonio 1N y Neutro	cmol(+) kg ⁻¹
Sodio	0 – 20	Na	Acetato de amonio 1N y Neutro	cmol(+) kg ⁻¹
pH 1:1	0 – 20	pH	Potenciómetro	-
Bases totales	0 – 20	BT	Cálculos indirectos	cmol(+) kg ⁻¹
CIC efectiva	0 – 20	CICE	Cálculos indirectos	cmol(+) kg ⁻¹
Saturación de bases	0 – 20	SB	Cálculos indirectos	%
Saturación de Al	0 – 20	Sat. Al	Cálculos indirectos	%
Saturación de Ca	0 – 20	Sat. Ca	Cálculos indirectos	%
Saturación de Mg	0 – 20	Sat. Mg	Cálculos indirectos	%
Saturación de K	0 – 20	Sat. K	Cálculos indirectos	%
Saturación de Na	0 – 20	Sat. Na	Cálculos indirectos	%
Rel. Ca/Mg	0 – 20	Ca/Mg	Cálculos indirectos	-
Rel. Mg/K	0 – 20	Mg/K	Cálculos indirectos	-
Rel. Ca/K	0 – 20	Ca/K	Cálculos indirectos	-
Rel. Ca+Mg/K	0 – 20	(Ca+Mg)/K	Cálculos indirectos	-

Las bases totales (BT) y la saturación de las mismas (SB) es baja, lo que coincide con los valores reportados por IGAC (1993); ORAM (1995) y IGAC (2000) para suelos del mismo subgrupo taxonómico (Oxic Dystrudepts), ubicados en los distintos paisajes aluviales de la Orinoquia colombiana. El complejo de cambio es dominado por la dinámica del aluminio con saturaciones por encima de 60%, valor reportado como tóxico para cultivos de maíz y soya. El P y el CO presentan valores muy variables a lo largo del área de estudio; el carbono orgánico (CO), por ejemplo, varía entre 0,49 y 3,73%; no obstante, el valor medio es similar al reportado para suelos de la altillanura (Rubiano, 2005), para suelos aluviales e incluso para suelos del piedemonte del departamento del Meta (IGAC, 2000). Por su parte, el P presenta una alta variación debido al historial productivo del lote, en el cual algunos sectores fueron fertilizados (229,24 mg kg⁻¹) y otros no (17,97 mg kg⁻¹). Los valores bajos de la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE)

tienen un comportamiento determinado por el dominio absoluto de la caolinita en la fracción arcilla y por las texturas predominantemente gruesas.

La familia textural que da el nombre a la consociación es Francosa fina; sin embargo el rango de variación del horizonte superficial es amplio, se encuentran áreas de textura franco arenosa, franca, franco arcillo arenosa e incluso franco arcillosa. El dominio textural lo ejerce la fracción arena con un porcentaje promedio de 60,84%, un mínimo de 44,43% y un máximo de 77,97%; las otras dos fracciones tienen un promedio de 21,36% (L) y 17,80% (Ar). Se trata entonces de un suelo calificado localmente como liviano, en el cual, como ya se explicó, la participación porcentual de la arena condiciona el comportamiento químico. La densidad aparente oscila entre 1,16 y 1,66 g cm⁻³ con un promedio de 1,51 g cm⁻³. Este valor es considerado como limitante para el normal desarrollo radical, de acuerdo

con lo explicado por Hoyos *et al.* (2004) para suelos de textura liviana en los llanos orientales de Colombia. Los valores bajos de densidad aparente están relacionados con contenidos de gravilla en los sitios muestreados y los altos, calificados por Lal (1994) como muy fuertemente limitantes, son similares a los reportados por Hoyos *et al.* (2004) y Rubiano (2005). Los promedios de resistencia a la penetración (PT) para todas las profundidades estudiadas oscilan entre 25 y 30 kg cm⁻², con valores mínimos de 12,33 kg cm⁻² a 2,5 cm de profundidad y el máximo de 50 kg cm⁻² a 20 cm de profundidad. Es evidente que los valores de PT a diferentes profundidades son mayores a 10 kg cm⁻², lo cual indica por lo menos una restricción ligera a moderada que se hace mayor en profundidad. Los valores obtenidos

para este atributo son comparables a los reconocidos por Rubiano (2005), Silva (2003) y Mercante (2003).

Tanto pH, como DA, A y Sat. Al presentaron bajos coeficientes de variación, en tanto que las mayores variaciones se encontraron para las variables PT a 20 cm y P; en las demás variables analizadas, los coeficientes oscilaron entre 15 y 65%. El coeficiente de variación del pH (4,79) coincide con valores reportados por otros autores para suelos de otras clases taxonómicas (Cox *et al.*, 2003; Gho, 2004 y Muñoz, 2005), en tanto que los valores obtenidos para el P (193,73 mg kg⁻¹) coinciden con los datos de Ovalles (1999) y Obando *et al.* (2006). La baja variación de la densidad aparente (6,29) contrasta con los datos de Jury *et al.* (1999), citado

TABLA 2. Estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos de un Inceptisol de la orinoquía colombiana.

Atributo	Media	Desviación estándar	Error estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Mediana	Moda	Curtosis	Rango	Mín.	Máx.
pH	4,68	0,22	0,03	0,05	4,79	4,76	4,81	-0,90	0,92	4,27	5,19
Al	2,17	0,80	0,10	0,65	37,04	2,11	2,53	1,12	3,92	0,91	4,83
Sat. Al	83,89	4,60	0,57	21,15	5,48	84,53	ND	7,78	28,72	62,28	91,01
CO	1,30	0,59	0,07	0,35	45,40	1,19	0,68	6,11	3,24	0,49	3,73
CIC	10,08	5,17	0,65	26,76	51,31	9,28	8,60	3,43	27,40	2,49	29,89
Ca	0,19	0,10	0,01	0,01	54,73	0,17	0,08	4,87	0,57	0,07	0,64
Mg	0,07	0,04	0,01	0,00	67,26	0,05	0,04	6,23	0,24	0,02	0,26
K	0,11	0,03	0,00	0,00	31,61	0,11	0,08	-0,02	0,15	0,04	0,19
Na	0,05	0,02	0,00	0,00	50,16	0,04	0,03	0,82	0,11	0,01	0,12
BT	0,41	0,17	0,02	0,03	42,29	0,40	0,44	2,66	0,93	0,16	1,09
SB	16,11	4,60	0,57	21,15	28,55	15,47	ND	7,78	28,72	8,99	37,72
CICE	2,58	0,91	0,11	0,83	35,38	2,54	2,78	0,87	4,34	1,07	5,41
Sat. Ca	7,37	3,21	0,40	10,28	43,49	6,84	7,34	7,38	18,91	3,24	22,15
Sat. Mg	2,48	1,30	0,16	1,69	52,44	2,13	2,02	13,45	7,66	1,34	9,00
Sat. K	4,33	1,05	0,13	1,10	24,21	4,04	4,04	0,87	4,88	2,65	7,53
Sat. Na	1,93	0,80	0,10	0,65	41,71	1,79	1,52	-0,32	3,36	0,32	3,68
Ca/Mg	3,11	0,88	0,11	0,77	28,21	3,16	4,00	0,69	4,38	1,63	6,00
Mg/K	0,59	0,31	0,04	0,10	53,05	0,50	0,50	11,76	1,75	0,25	2,00
Ca/K	1,76	0,77	0,10	0,60	44,02	1,72	1,00	5,40	4,23	0,69	4,92
(Ca+Mg)/K	2,35	1,04	0,13	1,09	44,49	2,25	2,50	8,30	5,92	1,00	6,92
P	17,97	34,80	4,35	1211,34	193,73	5,72	1,80	22,54	229,24	0,00	229,24
A	60,84	8,08	1,01	65,34	13,29	60,52	75,97	0,04	33,54	44,43	77,97
L	21,36	3,65	0,46	13,32	17,08	22,14	14,02	-0,32	14,24	14,02	28,26
Ar	17,80	5,02	0,63	25,23	28,21	18,14	18,13	0,62	22,62	8,01	30,63
DA	1,51	0,09	0,01	0,01	6,29	1,52	ND	2,06	0,51	1,16	1,66
PT a 2.5 cm	24,46	5,34	0,67	28,53	21,84	24,00	22,33	-0,24	24,33	12,33	36,67
PT a 5 cm	27,78	4,87	0,61	23,73	17,53	27,50	28,33	-0,31	24,33	16,00	40,33
PT a 10 cm	29,34	5,25	0,66	27,51	17,88	28,50	27,67	-0,42	23,00	17,33	40,33
PT a 20 cm	27,04	6,05	0,76	36,65	202,38	26,17	24,67	5,00	34,33	15,67	50,00
Esp. 1er Hte	41,17	20,99	2,62	440,62	50,98	37,00	30,00	2,46	88,00	12,00	100,00
Prof. efectiva	104,66	43,45	5,43	1887,82	41,52	102,50	150,00	-1,15	135,00	15,00	150,00

por Jaramillo (2002), mientras que el valor para A (13,29) es similar al hallado por Guimaraes (2000) y Obando *et al.* (2006).

Análisis espacial

Análisis de semivariogramas

La Tab. 3 muestra los atributos del semivariograma experimental para cada una de las variables analizadas en este trabajo. Se observa que el modelo esférico fue el de mejor ajuste a los modelos experimentales de los atributos químicos, similar a lo reportado por Oliveira *et al.* (1999) y Verges (2004), mientras que los atributos físicos no tienen un modelo de mejor ajuste típico.

Para efectos de análisis, los semivariogramas fueron clasificados en cuatro grupos bien diferenciados utilizando un análisis de conglomerados, tal como se muestra en la Fig. 3.

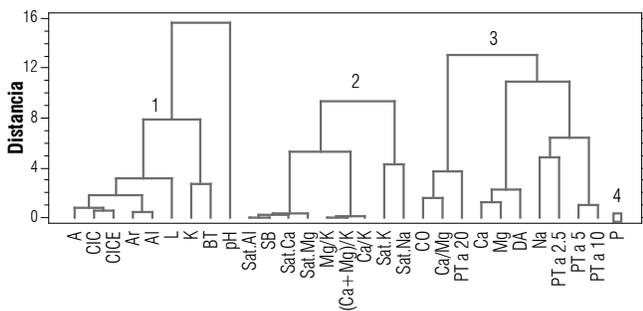


FIGURA 3. Diagrama de agrupación de los atributos del suelo según el análisis de conglomerados. Método de Ward, distancia euclidiana.

Las características promedio de cada grupo (centroide) se presentan en la Tab. 4, y se observa que las variables que pertenecen a los grupos 1 y 2 tienen, según Cambardella *et al.* (1994), una fuerte dependencia espacial, mientras que las variables que pertenecen a los grupos 3 y 4 tienen una dependencia espacial moderada. Hay mayor ajuste del modelo teórico al semivariograma en las variables pertenecientes al grupo 1, lo cual se refleja en una buena interpolación (alto r^2 vc). Aunque los atributos pertenecientes al grupo 2 tienen, en promedio, una mayor dependencia espacial, el ajuste del modelo teórico es bajo (bajo r^2), y por tanto las interpolaciones hechas con estos modelos tienen menor r^2 vc, en comparación con las del grupo 1.

Las variables pertenecientes a los grupos 3 y 4 tienen, en promedio, mejor ajuste del modelo teórico al semivariograma experimental, en comparación con los atributos del grupo 2. De otro lado, vale la pena anotar que el grupo 4 está conformado por una sola variable (P), ya que esta

tiene características diferentes a los demás atributos, relacionadas con su alto coeficiente de variación, tal como se mencionó.

Con base en lo anterior, se infieren distancias óptimas de muestreo a partir de los valores del rango, para las variables pertenecientes a los grupos 1 y 2, que tienen fuerte dependencia espacial. Es lógico pensar que si el rango es el máximo trayecto en el que hay dependencia espacial, dicha variable debería ser muestreada por lo menos una vez en esta distancia para poder tener una idea clara de su distribución en el espacio. En promedio, las variables del grupo 1 deben ser muestreadas a 547,33 m, mientras que las del grupo 2, a 43,33 m. No obstante, para futuros estudios, si es necesario muestrear una sola de las variables, puede utilizarse el valor de rango consignado en la Tab. 3. La idea del agrupamiento es generar una distancia óptima de muestreo para un grupo de variables, con miras a un estudio detallado, ya que resultaría engorroso para un estudio de gran magnitud diseñar muestreos (grillas) dependiendo de cada variable.

Análisis de varianza anidado

En la Tab. 5 se observa que las variables A, L, Ar, pH, Al, CIC, BT y CICE acumulan la mayor cantidad de varianza en el nivel 1 ($N_1 = 270$ m); sin embargo, debido a que no estabilizan su varianza antes de 270 m, es muy posible que la variabilidad espacial esté controlada por procesos que actúan en distancias mayores y, por ende, en futuros trabajos se debe muestrear a distancias mayores, lo cual corrobora lo encontrado por Ovalles y Rey (1995), Guimaraes (2000), Shukla *et al.* (2004) y Rubiano (2005). P, CO, Ca, Mg, K, PT a 5 y PT a 10 también encuentran su máxima varianza dentro del rango máximo de espaciamiento entre muestras, lo cual es consistente con lo reportado por Luengas (2005), El P concentra también gran parte de su varianza en el nivel 2 ($N_2 = 80$ m), explicando la dependencia espacial entre nidos y entre transectos del mismo nido.

El comportamiento de las características físicas y químicas indirectas, generadas con base en variables medidas en el laboratorio, no siempre es concordante con los datos originales. Así, la saturación de K encuentra su máxima variación en los niveles 4 y 3 ($N_4 = 4$ m y $N_3 = 20$ m) y es totalmente nula en el nivel 1, contrario al comportamiento del K, cuyo mayor porcentaje de varianza se concentra en el nivel 1 (50,82%). Lo expuesto induce un proceso de toma de decisión que involucra el análisis y la interpretación de los resultados con base en uno de los parámetros, el de disponibilidad medido en laboratorio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$), o el de saturación calculado con base en la CICE. Presentan

TABLA 3. Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales de variables fisicoquímicas de un inceptisol de la Orinoquía colombiana.

Variable	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	r^2 ¹	Prop ²	r^2 vc ³
A	Esférico	3,00	86,9	402,0	0,585	0,965	0,930
L	Esférico	0,31	13,8	287,0	0,510	0,978	0,815
Ar	Esférico	2,20	37,53	456,0	0,615	0,941	0,878
pH	Esférico	0,009	0,077	1455,0	0,859	0,879	0,764
Al	Esférico	0,063	0,919	470,0	0,569	0,931	0,849
Sat, Al	Esférico	0,010	19,05	47,0	0,053	0,999	0,450
CO	Esférico	0,18	0,418	241,0	0,147	0,569	0,321
CIC	Esférico	0,90	40,22	487,0	0,572	0,978	0,886
Ca	Esférico	0,003	0,008	214,0	0,441	0,676	0,538
Mg	Esférico	0,00	0,002	208,0	0,357	0,738	0,506
K	Esférico	0,00	0,002	537,0	0,694	0,864	0,600
Na	Esférico	0,00	0,001	560,0	0,502	0,626	0,149
BT	Esférico	0,005	0,028	353,0	0,550	0,814	0,666
SB	Esférico	0,01	19,05	47,0	0,053	0,999	0,451
CICE	Esférico	0,001	1,181	479,0	0,576	0,999	0,935
Sat. Ca	Esférico	0,01	8,790	47,0	0,070	0,999	0,420
Sat. Mg	Esférico	0,001	1,478	41,0	0,017	0,999	0,453
Sat. K	Esférico	0,086	1,10	44,0	0,103	0,922	0,291
Sat. Na	Esférico	0,001	0,569	32,0	0,043	0,998	0,067
Ca/Mg	Exponencial	0,347	0,807	219,0	0,278	0,570	0,277
Mg/K	Esférico	0,00	0,088	46,0	0,032	0,999	0,538
Ca/K	Esférico	0,001	0,491	43,0	0,050	0,998	0,530
(Ca+Mg)/K	Esférico	0,001	0,904	43,0	0,035	0,999	0,555
P	Exponencial	699,0	1.878,0	945,0	0,375	0,628	0,206
DA	Esférico	0,004	0,011	310,0	0,306	0,664	0,412
PT a 2,5	Exponencial	12,38	34,02	582,0	0,354	0,636	0,372
PT a 5	Exponencial	7,65	32,95	723,0	0,336	0,768	0,540
PT a 10	Exponencial	10,18	38,41	849,0	0,370	0,735	0,489
PT a 20	Esférico	22,01	45,61	200,0	0,142	0,517	0,127

¹ r^2 , coeficiente de determinación del modelo.

² Prop, relación entre la pepita y la meseta.

³ r^2 vc, coeficiente de determinación de la validación cruzada.

TABLA 4. Valores promedio (centroides) de los grupos generados.

Grupo	Pepita	Meseta	Rango	r^2 ¹	Prop ²	r^2 vc ³
1	0,72	20,07	547,33	0,61	7,23	0,81
2	0,01	5,72	43,33	0,05	0,98	0,42
3	5,28	15,22	410,60	0,32	35,01	0,37
4	699,00	1878,00	945,00	0,38	37,20	0,21

¹ r^2 , coeficiente de determinación del modelo.

² Prop, relación entre la pepita y la meseta.

³ r^2 vc, coeficiente de determinación de la validación cruzada.

máxima variación a la mínima distancia de muestreo (N4) Na, Sat. K, Sat. Na, Ca/Mg, PT a 2,5, PT a 20.

El nivel N2 es el que concentra el menor porcentaje de la varianza para la mayoría de las características, excepto para Sat. K, lo que sugiere, para posteriores estudios, un cambio en la distancia entre transectos, que podría pensar

en reducirse o en ampliarse de acuerdo con los objetivos específicos de estas y con las variables por estudiar.

Comparación entre el análisis de varianza anidado y el análisis de semivariogramas

Se encontró que las variables que cumplen con el supuesto de “variable regionalizada” (semivariogramas del tipo 1)

TABLA 5. Componentes de varianza en porcentaje respecto al total de los atributos medidos en el suelo.

Atributo	Varianza aportada por nivel (%)			
	N4	N3	N2	N1
pH	12,68	8,05	11,05	68,22
Al	3,46	13,70	16,39	66,44
Sat. Al	29,96	51,88	6,38	11,78
CO	25,32	28,35	3,48	42,95
CIC	4,01	16,59	5,50	73,91
Ca	20,55	27,50	0,00	51,95
Mg	20,96	35,02	0,00	44,02
K	22,80	17,42	8,96	50,82
Na	71,07	0,00	0,00	28,93
BT	9,49	13,13	0,00	77,39
SB	20,15	54,19	0,00	25,67
CICE	3,56	24,15	7,94	64,35
Sat. Ca	32,87	41,67	6,54	18,93
Sat. Mg	27,14	55,87	0,00	16,99
Sat. K	40,06	38,53	21,41	0,00
Sat. Na	69,36	7,39	0,00	23,25
Ca/Mg	40,95	26,44	0,00	32,62
Mg/K	23,79	54,92	0,00	21,30
Ca/K	29,60	32,80	8,34	29,26
(Ca+Mg)/K	23,79	55,22	0,00	21,00
P	17,76	12,07	29,38	40,79
A	2,63	24,31	1,86	71,20
L	9,31	16,83	0,00	73,86
Ar	4,64	28,75	5,35	61,25
DA	22,52	50,04	0,00	27,45
PT a 2.5 cm	44,43	9,59	8,29	37,69
PT a 5 cm	31,06	5,81	11,87	51,27
PT a 10 cm	32,77	9,04	8,67	49,51
PT a 20 cm	46,63	44,51	0,00	8,86
Esp. 1er Hte	16,61	42,55	40,84	0,00
Prof. efectiva	7,45	30,13	0,67	61,76

tienen rangos o alcances con valores similares a las distancias en que se acumula la mayor cantidad de la variación. Por ejemplo, A, CIC, CICE, Ar, Al, L, K, BT y pH, con alta dependencia espacial de la varianza y que tienen, en promedio, un rango de 547 m, acumulan todas, sin excepción, la mayor varianza a distancias superiores a los 270 m, mostrando una relación entre los resultados obtenidos con los dos métodos.

Por el contrario, variables con escasa dependencia espacial, como por ejemplo las pertenecientes al grupo 3 de semivariogramas, tienen valores de rango ostensiblemente diferentes a los valores a los que se acumula la máxima varianza. Un ejemplo de ello lo constituye la DA, con 310

m de rango y que acumula la máxima varianza a distancias superiores a 20 m e inferiores a 80 m.

Conclusiones

Tanto los análisis del semivariograma experimental, como el análisis de varianza anidado proveen una herramienta para determinar distancias óptimas para futuros muestreos. El análisis de varianza de tipo anidado no presupone una relación espacial entre distancia y varianza, y por tanto puede aplicarse con mayor libertad para este fin. Al utilizar el rango del semivariograma experimental como base para decidir la distancia óptima de muestreo, se debe tener en cuenta que sólo es válido cuando la relación pepita/meseta muestre dependencia espacial de la variable analizada.

Cuando la variable analizada tiene fuerte dependencia espacial, como es el caso de las variables cuyos semivariogramas pertenecen al grupo 1 y 2, los resultados obtenidos utilizando una u otra metodología son similares; tal es el caso de A, CIC, CICE, Ar, Al, L, K, BT y pH, que según el rango del semivariograma, la distancia óptima de muestreo es, en promedio, 547,33 m, y según el análisis de varianza, es superior a 270 m. Otro caso lo confirman las variables cuyo semivariograma experimental pertenece al grupo 2; según el rango obtenido, Sat. Al, SB, Sat. Ca, Sat. Mg, Mg/K, (Ca+Mg)/K, Ca/K, Sat. K y Sat. Na, deberían muestrearse a una distancia máxima de 43,33 m, mientras que el análisis de varianza sugiere, para estos mismos atributos, distancias de muestreo superiores a 20 m e inferiores a 80 m.

En los casos en que las variables cuyo semivariograma experimental pertenece a los grupos 3 y 4, es decir que no tienen relación entre distancia y varianza, las distancias de muestreo óptimas no tienen relación entre un método y otro. Por otra parte, vale la pena anotar que el grupo 4 de semivariogramas está conformado por una sola variable, es decir, el P, que tiene una alta variabilidad y por ello conforma una variable especial.

La distancia de muestreo 2 o nivel 2 (N2) no acumula la máxima varianza en ninguna de las variables. Este resultado es claro utilizando las dos metodologías.

Literatura citada

- Cambardella, C., T. Moorma, J. Novak, T. Parkin, D. Karlen, R. Turco y A. Konopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 58, 1501-1511.
- Cox, M., P. Gerard, M. Wardlaw y M. Abshire. 2003. Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 67, 1296-1302.
- Dudley, E. 1996. Map maker popular. El procesador de mapas para Windows. CIAT, Cali, Colombia.

- Fagroud, M. y M. van Meirvenme. 2002. Accounting for soil autocorrelation in the design of experimental trials. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 66, 1134-1142.
- Gamma Design Software. 2004. GS+. Geostatistics for the environmental sciences. Gamma design software. Plainwell, MI.
- Gho, B.C. 2004. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y su relación con los rendimientos de maíz (*Zea mays* L.). Departamento de Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Guimarães, E.C. 2000. Variabilidade espacial de atributos de um latossolo vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional. Tesis de doctorado. Universidad Estatal de Campinas, Campinas, Brasil.
- Herrera, A. 2000. La clasificación numérica y su aplicación en ecología. Instituto Tecnológico de Santo Domingo, Santo Domingo.
- Hoyos, P., E. Amézquita y D.L. Molina. 2004. Mejoramiento de las características del suelo a través del concepto de crear una capa arable en dos suelos de la Altillanura plana del departamento del Meta, Colombia. *Suelos Ecuat.* 34(2), 93-97.
- IGAC. 2002. Manual de códigos. Atributos de los levantamientos de recursos de tierras. Subdirección de Agrología, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- IGAC. 2000. Estudio general de suelos del departamento del Meta. IGAC, Bogotá.
- IGAC. 1993. Estudio general de suelos del departamento del Casanare. IGAC, Bogotá.
- IGAC. 1979. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. Subdirección de Agrología, IGAC, Bogotá.
- Jaramillo, D.J. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Jaramillo, D.J. 2003. La variabilidad de las propiedades del suelo y su efecto sobre el manejo de la fertilidad. En: Curso teórico práctico sobre interpretación de análisis de suelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Lal, R. 1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. SMSS Monografía técnica No. 21. Departamento de Agronomía, Ohio State University, Columbus, OH.
- Lozano, J.F. 2004. Validación de índices para conductividad hidráulica y compactación en algunos suelos del Valle del Cauca. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Luengas, C.A. 2005. Estudio de la variabilidad espacial en un suelo con diferentes ciclos de intervención agrícola en la altillanura colombiana. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Madero, E.E. 2002. The cartography of soil compaction. En: Memorias XI Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 18 de septiembre de 2002. Cali, Colombia.
- Manugistics. 1995. Statgraphics plus for Windows. Manugistics, Rockville, IN.
- Mercante, E., M.A. Uribe-Opazo y E.G. Souza. 2003. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo a penetração em áreas com E sem manejo químico localizado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 27, 1149-1159.
- Muñoz, J.D. 2005. Modelación del comportamiento espacial de variables edáficas y agronómicas en un cultivo de papa en Zipaquirá, Cundinamarca. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Obando, F.H., A.M. Villegas, J.H. Betancur y L. Echeverri. 2006. Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands, arenoso de la región andina central colombiana. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 59(1), 3217- 3235.
- Oliveira, J.J., L.H.G. Chaves, J.E. Queiroz y J.G. de Luna. 1999. Variabilidade espacial de propiedades químicas em um solo salino-sódico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 23, 283-289.
- ORAM. 1995. Informe del proyecto: Estudio comparativo de la fisiografía, suelos y vegetación de la Orinoquia y Amazonia colombianas. IGAC, Colciencias, Bogotá.
- Ovalles, F.A. 1998. Herramienta para la evaluación de tierras en zonas tropicales. Uso de la geoestadística. Universidad de Lleida, España.
- Ovalles, F.A. y B.J. Rey. 1995. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del lago Valencia. *Agron. Tropical* 44(1), 41-65.
- Peña, R.A. 2006. Caracterización de la variabilidad espacial de los atributos del suelo como base para el manejo por sitio específico en el cultivo de piña "Gold". Estudio de caso Tauramena - Llanos Orientales. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Rubiano, Y. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Schepers, A., J. Shanahan, M. Liebig, J.S. Schepers, S. Johnson y A. Luchiari. 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agron. J.* 96, 195-203.
- Shukla, M.K., B.K. Slater, R. Lal y P. Cepuder. 2004. Spatial variability of soil properties and potential management classification of a chemozem field in lower Austria. *Soil Sci.* 169(12), 852-860.
- SAS Institute Inc. 2001. SAS User's guide. Version 8.1 ed. SAS Institute, Cary, NC.
- SAS Institute Inc. 2001. JMP User's guide. Version 5.1 ed. SAS Institute, Cary, NC.
- Silva, V.R., J.M. Reichert, L. Storck y S. Feijó. 2003. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho-amarelo distrófico arenico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 27, 1013-1020.
- USDA. 2006. Soil Survey Division Staff. Keys to soil taxonomy. 10th ed. Soil Conservation Service, Blacksburg, WA.
- Van Es, H., C. Van Es y D. Cassel. 1989. Application of regionalized variable theory to large-plot field experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 53, 1179-1183.
- Verges, G. 2004. Uso de modelos espaciales para el análisis estadístico de experimentos agronómicos de gran tamaño. Tesis de

maestría en ciencias vegetales. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

Viera, M. 2002. Introducción a la geoestadística. Instituto Mexicano del Petróleo, México D.F.

Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. pp. 1-70. En: Stewart, B. (ed.). Advances in soil science. Vol 3. Springer-Verlag, New York, NY.