

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL EPIPEDÓN DE UN ANDISOL HIDROMÓRFICO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO (COLOMBIA)

SPATIAL VARIABILITY OF THE EPIPEDON CHEMICAL PROPERTIES IN AN HYDROMORPHIC ANDISOL FROM THE ANTIOQUIA EAST (COLOMBIA)

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo¹

Resumen. Se estudió la variabilidad espacial de algunas propiedades químicas del epipedón de un Andisol de régimen de humedad ácuico. La mayoría de las propiedades estudiadas presentó una dependencia espacial alta, con una variabilidad estructurada de más del 50% de la variabilidad total y con rango relativamente corto de 20 m en promedio, situación que puede estar reflejando una alta intensidad de uso y manejo del suelo en actividades agropecuarias como la aplicación de fertilizantes y enmiendas.

Palabras claves: Andisoles, régimen ácuico, variabilidad espacial, geoestadística.

Abstract. The spatial variability of some chemical properties of the epipedon in an Andisol with aquic humidity regime was studied. The most properties presented a high spatial dependence ($C/Sill > 50\%$) and a relatively short range average (20 m), possibly caused by the intensive use of soil that has involved the application of fertilizers and amendments.

Key words: Andisols, aquic regime, spatial variability, geostatistic.

Una característica dominante de los suelos es su heterogeneidad, aún en pequeñas áreas que podrían considerarse como homogéneas. Esta heterogeneidad induce una variabilidad en sus propiedades, que puede llegar a ser de considerable magnitud y que puede afectar grandemente las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas.

La variabilidad es una condición inherente a los suelos y su origen está influenciado tanto por condiciones naturales (variados factores y procesos pedogenéticos), como por condiciones inducidas por el uso y el manejo de los mismos. La variabilidad del suelo depende, aparte del tipo de suelo, de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando ha estado sometido a uso. Aquellas propiedades que más se alteran por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz González *et al.*, 2000).

Upchurch y Edmonds (1991) señalan que cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas

conocidas, se define como variabilidad aleatoria o debida al azar, mientras que si la variabilidad puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles, se denomina variabilidad sistemática. La variabilidad sistemática tiene dos componentes: uno de tendencia relacionada con la localización de las muestras y que puede llamarse tendencia espacial (T) y otro de dependencia espacial (DE).

La DE se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo del espaciamiento entre las muestras o de la distancia y la dirección en que ellas sean recolectadas; las variables que tienen este comportamiento son llamadas variables regionalizadas. Para estudiar variables que presentan dependencia espacial se tiene un conjunto de procedimientos estadísticos que se conoce como geoestadística. La herramienta fundamental de esta técnica es el semivariograma, el cual es una gráfica que relaciona la semivarianza de los pares de puntos de muestreo que están separados una determinada distancia, con los incrementos en la distancia de separación entre ellos. Si la variable que se estudia presenta dependencia espacial, la semivarianza irá aumentando su valor al irse incrementando la

¹ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <djaramal@unalmed.edu.co>

distancia de separación entre los puntos de muestreo hasta llegar, idealmente, a un valor constante de la semivarianza a partir de una determinada distancia.

Los Andisoles son suelos desarrollados a partir de materiales provenientes de erupciones volcánicas (ceniza, pómez, lava, etc.) y/o de materiales volcánicoclasticos en los que la fracción coloidal está dominada por minerales de bajo rango de ordenamiento o por complejos Al-humus (Soil Survey Staff, SSS, 1999)

Los materiales característicos de estos suelos le dan a los mismos, unas características únicas y distintivas, llamadas *propiedades ándicas*, las cuales se manifiestan en una baja densidad aparente, una alta carga variable y una alta capacidad de retención de fosfatos y de humedad (Arnalds y Stahr, 2004).

En general, los Andisoles del Oriente Antioqueño que se han desarrollado bajo régimen de humedad údico se caracterizan por presentar, en la capa arable, pH fuertemente ácido, alto contenido de materia orgánica, colores muy oscuros, alta carga variable, bajos contenidos de bases intercambiables y de fósforo disponible, desbalances entre las bases y contenidos de Al intercambiable que dominan la saturación catiónica del suelo (Jaramillo, 1995; Jaramillo *et al.*, 2006).

En Andisoles del Oriente Antioqueño se han llevado a cabo unos pocos estudios de variabilidad espacial de algunas de sus propiedades químicas y físicas en los que se ha podido comprobar la alta variabilidad de sus propiedades y el alto componente espacial en varias de ellas (Castillo y Gómez, 1995; Abril y Ortiz, 1996; Lopera y López, 1997; Jaramillo, 2008).

Con este trabajo se pretende establecer si las principales propiedades químicas del epipedón de un Andisol de régimen ácuico del Oriente Antioqueño, presentan algún tipo de variabilidad espacial y cuantificar, de manera preliminar, dicha variabilidad estructurada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción y localización del área de estudio.

El estudio se llevó a cabo en una finca ubicada en cercanías a la vía que conduce de la autopista

Medellín-Bogotá al aeropuerto José María Córdova, en la vereda Ranchería del municipio de Guarne (Antioquia, Colombia), localizada en las siguientes coordenadas: 6° 11' 46.02" N, 75° 26' 18.51" W. Altitudinalmente, el lote experimental está ubicado entre los 2184 y los 2189 msnm.

La parcela experimental se encontraba desarrollada sobre depósitos aluviales con un recubrimiento espeso de ceniza volcánica; relieve inclinado con pendiente alrededor de 7% y problemas de mal drenaje con nivel freático alto la mayor parte del tiempo; además, estaba bajo cobertura vegetal de gramas. El clima de la zona es frío húmedo. Los suelos estudiados corresponden a Andisoles con régimen de humedad ácuico y de temperatura isomésico y al nivel de subgrupo se clasificaron como Typic Endoaquand.

Muestreo. Se realizó un muestreo sistemático, casi en cuadrícula regular como puede apreciarse en la Figura 1d, en el mes de mayo de 2007. Cada sitio de muestreo fue georreferenciado mediante un sistema de coordenadas planas cartesianas con origen arbitrario. Se recolectaron en total 64 muestras espaciadas, en promedio, 8,66 m.

En cada uno de los sitios de muestreo se midió el espesor del horizonte A (EHA, cm) y la profundidad a la cual se encontraba el nivel freático (PNF, cm). Luego, se tomó una muestra disturbada de aproximadamente 1 kg del horizonte superficial y se empacó en una bolsa plástica hermética, que se destinó para hacer los análisis de laboratorio respectivos.

Propiedades químicas evaluadas en el laboratorio.

Con las muestras disturbadas se hizo la caracterización de algunas propiedades químicas del suelo, siguiendo las metodologías estándar descritas en Motta *et al.* (1990), Soil Survey Laboratory (SSL, 1996) y Soil Survey Staff (SSS, 2006). Todos los análisis se hicieron con las muestras sin secar (Jaramillo, 2000).

Se determinaron el pH en agua 1:1 v:v (pHa) y el pH en KCl 1N 1:1 v:v (pHk), el contenido de materia orgánica (MO, %) mediante oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio (método de Walkley-Black), los contenidos de bases intercambiables y la CIC a pH 7 (Ca, Mg, K y CIC,

cmol (+) kg⁻¹ de suelo) mediante extracción con acetato de amonio 1N y neutro, el contenido de fósforo disponible (P, ppm) por el método de Bray II y el contenido de aluminio intercambiable en las muestras que presentaron pH en agua menor a 5,5 (Al, cmol (+) kg⁻¹ de suelo) extraído con KCl 1N. Se estimaron, además, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE, cmol (+) kg⁻¹ de suelo) mediante la suma de las bases más el Al intercambiable, la CIC variable (CICV, cmol (+) kg⁻¹ de suelo) con la relación (CIC-CICE) y la CIC variable, en porcentaje (CICVP, %).

Análisis estadístico. Los resultados obtenidos con todas las variables fueron sometidos a análisis estadísticos exploratorios: media, desviación estándar, valores máximo y mínimo, coeficiente de variación, asimetría y distribución, con el fin de caracterizar las propiedades del suelo. Después de este análisis se procedió a establecer si se cumplían los supuestos de estacionaridad y de normalidad requeridos para los análisis de semivariografía.

Para comprobar el supuesto de estacionaridad se llevó a cabo un análisis de tendencia espacial, mediante una regresión múltiple donde la variable en estudio fue la variable dependiente y las coordenadas de los puntos de muestreo las independientes (Jaramillo, 2008). El modelo estadístico para hacer este análisis fue del estilo:

$$\text{Variable} = a + b(x) + c(y) + d(xy) + e(x^2) + f(y^2)$$

Donde **x**, **y** son las coordenadas.

Cuando se obtuvo un modelo de regresión significativo al 95%, se procedió a confirmar los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza de los residuales de dicho modelo y, cuando estos supuestos se cumplieron, se tomaron los residuales del mismo para hacer el análisis de semivarianza; cuando el modelo de regresión no era significativo, la semivariografía se hizo con los valores originales de la variable.

La normalidad se probó con el estadístico de Shapiro-Wilk. En caso de que la distribución de los datos (originales o residuales, según el caso) en alguna variable no fuera normal, se aceptó que por lo menos fuera simétrica y si esta condición tampoco cumplía, se procedió a hacer transformaciones sencillas de los datos originales de la variable (logarítmica, raíz cuadrada o inversa) para ver si se lograba la normalización o, por lo menos, la simetrización de los datos. Cuando hubo que transformar los datos se volvió a hacer todo el proceso de análisis de tendencia con los datos transformados.

Si con los procedimientos anteriores se corregía el problema, la semivariografía se hacía con los datos transformados o con los nuevos residuales, si no, como lo que se busca en este trabajo es conocer si las variables presentan variabilidad espacial y su comportamiento aproximado, sin pretender establecer modelos que permitan hacer estimaciones de los valores de ellas con fines de elaborar mapas de isolíneas, los semivariogramas se establecieron con los datos (originales, transformados o residuales) que menores conflictos presentaron con los supuestos requeridos para este análisis. Todos los análisis estadísticos se hicieron con los programas Statgraphics 5.1 plus y GS+ 3.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadística descriptiva. En la Tabla 1 se presentan los estadísticos básicos que caracterizaron las variables estudiadas. En la PNF aparecen estadísticos correspondientes a 61 datos porque hubo tres sitios en los cuales no se encontró el nivel freático dentro de los 150 cm superficiales del suelo. En el caso del Al, éste sólo se determinó en las 15 muestras que presentaron pH en agua <5,5.

Tabla 1. Estadísticos básicos de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

| Variable | n | Media | Desv. Est. | C. V. (%) | Mínimo | Máximo | Asimetría | Valor p Shapiro-Wilk |
|----------|----|-------|------------|-----------|--------|--------|-----------|----------------------|
| EHA | 64 | 31,62 | 13,54 | 42,83 | 10 | 75 | 2,93 | 0,00803634 |
| PNF | 61 | 41,49 | 28,56 | 68,83 | 4,5 | 125 | 3,79 | 3,21423E-7 |
| pHa | 64 | 5,83 | 0,41 | 6,96 | 5,1 | 6,9 | 1,33 | 0,0411 |
| pHk | 64 | 4,76 | 0,38 | 8,05 | 4,1 | 5,8 | 2,11 | 0,0132 |
| MO | 64 | 17,67 | 2,7 | 15,31 | 8,2 | 23,8 | -2,11 | 0,4482 |
| Al | 15 | 1,75 | 0,62 | 35,35 | 0,8 | 3 | 0,64 | 0,7209 |
| P | 64 | 5,06 | 8,05 | 159,04 | 1 | 52 | 14,69 | 0 |
| Ca | 64 | 4,76 | 3,9 | 82,09 | 0,1 | 17,3 | 3,37 | 0,00001 |
| Mg | 64 | 1,94 | 2,28 | 117,35 | 0,1 | 12 | 7,00 | 3,27072E-13 |
| K | 64 | 0,64 | 0,55 | 86,02 | 0,09 | 3,44 | 8,99 | 4,75175E-14 |
| CICE | 64 | 7,75 | 5,78 | 74,62 | 1,1 | 25,7 | 3,91 | 2,983E-8 |
| CIC | 64 | 50,33 | 5,15 | 10,24 | 28,26 | 60,94 | -5,41 | 0,00000108633 |
| CICV | 64 | 42,58 | 6,10 | 14,33 | 24,66 | 55,99 | -2,71 | 0,0163591 |
| CICVP | 64 | 84,91 | 10,72 | 12,63 | 49,1 | 97,83 | -4,14 | 1,59765E-7 |

Desv. Est.: Desviación estándar.

C. V.: Coeficiente de variación.

En algunas variables (P, Mg, K, CIC, CICV y CICVP) se identificaron valores anómalos (outliers) y en todas se presentaron valores extremos (sin ser outliers) que fueron responsables de la fuerte asimetría que se dio en la mayoría de las variables estudiadas, aunque en esta parte del trabajo, no se les hizo ningún tratamiento. Solamente el pHa mostró una distribución simétrica y el Al y la MO una distribución normal. Los coeficientes de variación fueron altos en buena parte de las variables, condición notada ya en otros Andisoles (Jaramillo, 1995; Abril y Ortiz, 1996).

Al comparar los resultados de la Tabla 1 con los obtenidos por Abril y Ortiz (1996) en Andisoles de régimen údico y con plantaciones forestales de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, se observan grandes diferencias entre ellos. Los Andisoles de

régimen údico son fuertemente ácidos, muy pobres en bases y en fósforo y tienen contenidos muy altos de MO; además, tienen altos contenidos de Al intercambiable. Estas propiedades pueden ser el reflejo de unas condiciones ambientales muy húmedas que, con un buen drenaje, producen una alta lixiviación en el suelo (Jaramillo *et al.*, 2006).

Los resultados de la Tabla 2 permiten caracterizar más detalladamente los Andisoles estudiados. Sólo el 25% de las muestras, presentaron pH en agua menor a 5,5; casi en el 75% de las muestras, la carga variable representa más del 80% de la carga del suelo a pH 7 y algo menos del 50% de las muestras, presentan valores bajos de Ca, Mg y K; además, todas las muestras, tuvieron valores altos de MO y bajos en P (Tabla 2).

Tabla 2. Percentiles de las principales propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

| Percentiles (%) | EHA (cm) | PNF (cm) | pHa | pHk | MO (%) | P (ppm) | Ca | Mg | K | CICE | CIC | CICV | CICVP (%) |
|-----------------|----------|----------|-----|-----|--------|---------|------|------|-------|------|-------|--------|-----------|
| 1,0 | 10,0 | 4,5 | 5,1 | 4,1 | 8,2 | 1,0 | 0,1 | 0,1 | 0,09 | 1,1 | 28,26 | 24,66 | 49,1 |
| 5,0 | 13,0 | 11,0 | 5,3 | 4,3 | 13,8 | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 0,15 | 2,2 | 42,17 | 31,13 | 65,02 |
| 10,0 | 16,0 | 16,0 | 5,3 | 4,3 | 14,1 | 1,0 | 0,8 | 0,1 | 0,17 | 2,5 | 45,89 | 35,86 | 68,97 |
| 25,0 | 22,0 | 20,0 | 5,5 | 4,5 | 15,9 | 2,0 | 1,65 | 0,3 | 0,33 | 3,2 | 48,56 | 39,465 | 79,59 |
| 50,0 | 29,5 | 31,5 | 5,8 | 4,7 | 17,95 | 3,0 | 3,8 | 1,1 | 0,47 | 5,35 | 50,91 | 43,255 | 88,525 |
| 75,0 | 39,0 | 56,5 | 6,1 | 5,0 | 19,6 | 5,0 | 7,35 | 2,65 | 0,745 | 9,8 | 52,61 | 46,075 | 92,81 |
| 90,0 | 47,0 | 79,0 | 6,3 | 5,3 | 20,5 | 11,0 | 10,3 | 4,9 | 1,31 | 15,8 | 55,34 | 49,38 | 95,22 |
| 95,0 | 56,0 | 108,0 | 6,5 | 5,5 | 21,2 | 13,0 | 11,0 | 5,8 | 1,52 | 18,1 | 57,81 | 51,18 | 95,89 |
| 99,0 | 75,0 | 125,0 | 6,9 | 5,8 | 23,8 | 52,0 | 17,3 | 12,0 | 3,44 | 21,7 | 60,94 | 55,99 | 97,83 |

En la Figura 1 se presenta la distribución espacial de los valores obtenidos en las variables estudiadas. En las gráficas el tamaño de cada círculo, es proporcional al valor tomado por la variable en cada sitio de muestreo: un mayor tamaño indica un mayor

valor. En todas las variables, excepto en el P, los datos fueron centrados (valor en el punto correspondiente, menos el valor menor general de la variable) para observar mejor los cambios que se dieran en ellos.

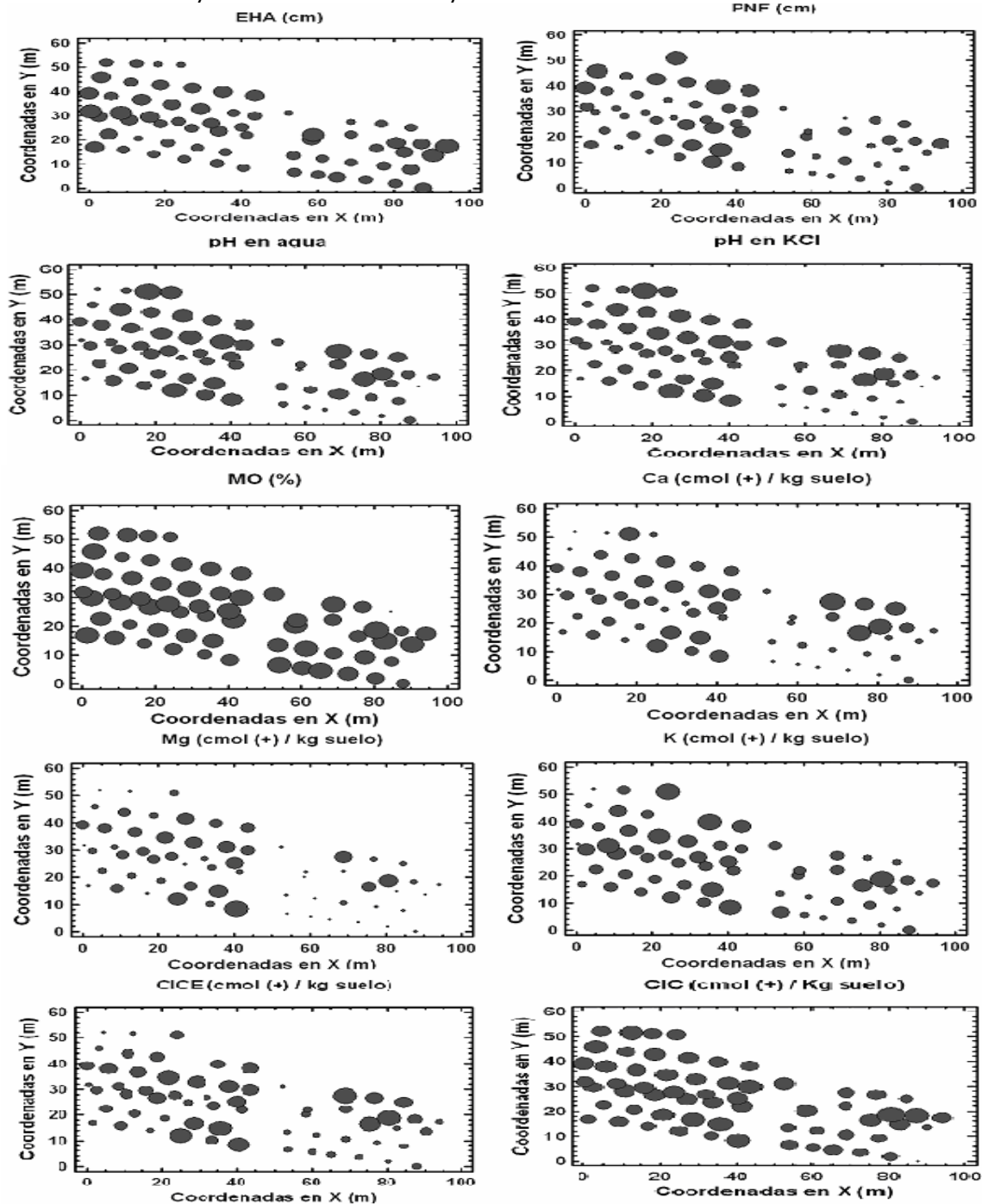


Figura 1. Distribución espacial de los valores de las propiedades químicas en el epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

En la Figura 1 puede verse que en casi todas las variables se insinúa una tendencia espacial en la distribución de sus valores; este efecto es menos notorio en la MO, la CIC y la CICV y bastante notable en el contenido de las bases y del P, comportamiento que puede estar relacionado con el efecto del manejo intensivo en fertilización y aplicación de enmiendas a que ha estado sometido este lote.

Gadea (1993) encontró, para Andisoles de Costa Rica, los siguientes niveles críticos generales para Ca, Mg y K, mediante extracción con acetato de amonio normal y neutro: 3,3; 0,9; 0,22 cmol (+) kg⁻¹ suelo, respectivamente, y el IGAC (2007) utilizó como nivel crítico para la CICE un valor de 4 cmol (+) kg⁻¹ suelo. Teniendo en cuenta los niveles críticos mencionados anteriormente, se elaboraron los diagramas de dispersión que se presentan en la Figura 2, en la cual se confirma que hay una cierta tendencia espacial en la distribución de los contenidos de bases y en la CICE que están por encima y por debajo del valor del nivel crítico

correspondiente. No se elaboró gráfica para P porque todos los puntos tuvieron contenidos por debajo del nivel crítico de 20 ppm establecido por León (2000).

Análisis de semivarianza. Atendiendo a la insinuación de tendencia espacial que se detectó en las variables representadas en la Figura 1, se procedió a hacer el correspondiente análisis de la misma, mediante un análisis de regresión múltiple, como se indicó en materiales y métodos. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 3 en la cual puede verse que, efectivamente, en la mayoría de las variables estudiadas, excepto en MO, P y CICV, se confirmó la presencia de tendencia espacial en la distribución de los valores que ellas tomaron, aunque todos los coeficientes de determinación (R²) obtenidos con los modelos de regresión son bajos. El comportamiento de la mayoría de las variables estudiadas viola uno de los supuestos del análisis de variabilidad espacial, cual es la estacionaridad de segundo orden.

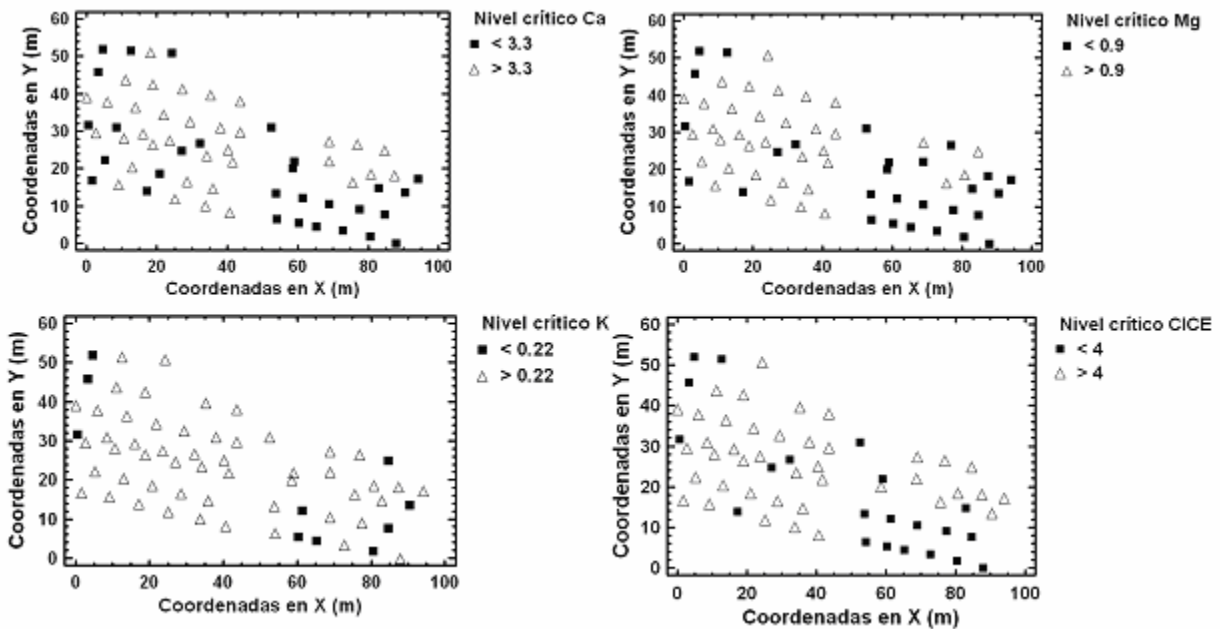


Figura 2. Distribución espacial de los contenidos de Ca, Mg y K y de la CICE, con respecto a sus valores críticos, en el epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

Tabla 3. Análisis de regresión para determinar la tendencia espacial de las propiedades químicas en el epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

| Variable | Modelo | R ² (%) | Valor p del modelo |
|----------|--|--------------------|--------------------|
| EHA | $EHA = -30,3923 + 0,7585*X + 3,98034*Y - 0,0342939*X*Y - 0,0514534*Y^2$ | 22,15 | 0,0008 |
| PNF | $PNF = 98,1542 - 0,871496*X - 4,46245*Y + 0,0359127*X*Y + 0,0819985*Y^2$ | 23,56 | 0,0007 |
| pHa | $pHa = 5,96573 - 0,00984829*X - 0,00625639*Y + 0,000547177*X*Y$ | 24,12 | 0,0002 |
| pHk | $pHk = 5,58347 - 0,0170436*X - 0,056004*Y + 0,000874194*X*Y + 0,000736012*Y^2$ | 30,6 | 0,0000 |
| MO | Sin Modelo Significativo | - | - |
| Al | $Al = 2,25646 - 0,0238653*Y$ | 39,45 | 0,0072 |
| P | Sin Modelo Significativo | - | - |
| Ca | $Ca = 6,13106 - 0,0849905*X - 0,0989827*Y + 0,00589238*X*Y$ | 23,42 | 0,0003 |
| Mg | $Mg = 0,862754 + 0,0447224*Y$ | 5,19 | 0,0390 |
| K | $K = 1,71063 - 0,0182962*X - 0,0834933*Y + 0,000895878*X*Y + 0,00133065*Y^2$ | 20,86 | 0,0013 |
| CICE | $CICE = 9,04983 - 0,106324*X - 0,0881215*Y + 0,00678653*X*Y$ | 14,36 | 0,0063 |
| CIC | $CIC = 46,8424 + 0,144728*Y$ | 12,28 | 0,0026 |
| CICV | Sin Modelo Significativo | - | - |
| CICVP | $CICVP = 82,9363 + 0,191027*X + 0,160304*Y - 0,012744*X*Y$ | 15,00 | 0,0051 |

Al hacer la comprobación de la normalidad y homogeneidad de varianza, en los residuales de las regresiones anteriores, se obtuvieron los resultados de la Tabla 4, en la que puede apreciarse que los residuales de casi todas las variables (pHk y K, las excepciones) presentaron homogeneidad de varianza. Solamente las variables pHa y Al cumplieron con todos los supuestos exigidos en los residuales para que el análisis de regresión sea válido. El Al no se tendrá en cuenta para los análisis de semivariografía por presentar un bajo número de

muestras que no proporcionan suficiente cantidad de pares de puntos para establecer la semivarianza en todos los lag posibles. En la Tabla 4 se incluye la comprobación de los supuestos mencionados para MO, P y CICV, ya que estos supuestos son necesarios para hacer el análisis de semivariografía y, así se esté trabajando con los datos originales de las variables que no presentaron tendencia espacial, ellas también deben cumplirlos.

Tabla 4. Comprobación de los supuestos* de normalidad y de homogeneidad de varianza, para los residuales del análisis de tendencia espacial de las propiedades del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia, que presentaron modelo de regresión significativo.

| Residuales de la variable | Valor p Shapiro-Wilk | Asimetría | Valor P Levene's |
|---------------------------|----------------------|-----------|------------------|
| EHA | 0,0005 | 3,136 | 0,2182 |
| PNF | 0,0098 | 2,783 | 0,2713 |
| pHa | 0,1619 | 1,224 | 0,1228 |
| pHk | 0,00686 | 2,233 | 0,0167 |
| Al | 0,3162 | 1,287 | 0,1838 |
| Ca | 0,0234 | 2,335 | 0,5959 |
| Mg | 6,6E-12 | 6,815 | 0,0646 |
| K | 0,000021 | 4,741 | 0,0421 |
| CICE | 0,000012 | 3,884 | 0,1250 |
| CIC | 2,3E-7 | -4,676 | 0,0602 |
| CICVP | 0,000056 | -3,923 | 0,2254 |
| MO | 0,4482 | -2,103 | 0,6013 |
| P | 0 | 14,692 | 0,2309 |
| CICV | 0,0164 | -2,708 | 0,4303 |

* Los supuestos de MO; P y CICV comprobados en datos originales.

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 4, se procedió a transformar los datos en las variables que

no presentaron ni normalidad ni simetría en la distribución de sus residuales, luego se llevó a cabo

el respectivo análisis de regresión para definir si se continuaba presentando tendencia espacial y, por último, se volvieron a confirmar los supuestos en los nuevos residuales resultantes. La mejor transformación (la que produjo una distribución más normal y más simétrica en los datos transformados, Tabla 5) fue la logarítmica; sólo con la CIC, la CICV y la CICVP la mejor transformación fue la raíz cuadrada.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en el análisis de tendencia espacial hecho con las variables transformadas, en donde llaman la atención tres aspectos: primero, que la mayoría de los modelos obtenidos presentan superficies de

tendencia y no tendencias lineales; segundo, que la coordenada que mayor control tiene sobre la tendencia espacial es la Y y, tercero, que los coeficientes de determinación (R^2) de los modelos son bajos. Estos aspectos parecen estar relacionados con la topografía del terreno (Figura 4) que, a su vez, puede estar controlando las condiciones de drenaje y los flujos superficiales y subsuperficiales de agua en el lote con las consiguientes traslocaciones de elementos y materiales en el suelo. En la Tabla 7 está la confirmación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza para los nuevos residuales de este análisis de tendencia.

Tabla 5. Asimetría y normalidad de la distribución de los valores transformados de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

| Variable | n | Asimetría | Valor p Shapiro-Wilk |
|------------------------|----|-----------|----------------------|
| Log EHA | 64 | -0,6289 | 0,80017 |
| Log PNF | 61 | -0,6141 | 0,45555 |
| Log pHk | 64 | 1,55944 | 0,0533075 |
| Log P | 64 | 2,63898 | 0,00006021 |
| Log Ca | 64 | -2,57688 | 0,0227967 |
| Log Mg | 64 | -0,724751 | 0,00584874 |
| Log K | 64 | -0,112622 | 0,702204 |
| Log CICE | 64 | 0,363641 | 0,139283 |
| (CIC) ^{1/2} | 64 | -6,802 | 4,77399E-9 |
| (CICV) ^{1/2} | 64 | -3,7348 | 0,0003828 |
| (CICVP) ^{1/2} | 64 | -4,72176 | 1,0681E-8 |

Tabla 6. Análisis de regresión para determinar la tendencia espacial de las propiedades químicas transformadas en el epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

| Variable | Modelo | R ² (%) | Valor P del modelo |
|------------------------|---|--------------------|--------------------|
| Log EHA | $\log EHA = 0,573441 + 0,0112713*X + 0,0582701*Y - 0,000530427*X*Y - 0,000761216*Y^2$ | 26,58 | 0,0002 |
| Log PNF | $\log PNF = 1,30366 + 0,00952242*Y$ | 12,75 | 0,0028 |
| Log pHk | $\log pHk = 0,748462 - 0,00153341*X - 0,00484616*Y + 0,0000781153*X*Y + 0,0000631054*Y^2$ | 31,78 | 0 |
| Log P | $\log P = -0,110491 + 0,0058669*X + 0,0315007*Y - 0,000536946*Y^2$ | 14,70 | 0,0057 |
| Log Ca | $\log Ca = 0,970316 - 0,0155032*X - 0,0205035*Y + 0,000853414*X*Y$ | 31,15 | 0 |
| Log Mg | $\log Mg = 0,53009 - 0,0199918*X - 0,0137616*Y + 0,000777646*X*Y$ | 32,37 | 0 |
| Log K | $\log K = -0,450114 + 0,0147679*X - 0,000190464*Y^2$ | 17,06 | 0,0012 |
| Log CICE | $\log CICE = 0,990995 - 0,00887399*X - 0,00913433*Y + 0,0004818*X*Y$ | 22,58 | 0,0004 |
| (CIC) ^{1/2} | $(CIC)^{1/2} = 6,82874 + 0,0105984*Y^2$ | 11,80 | 0,0032 |
| (CICV) ^{1/2} | Sin Modelo Significativo | - | - |
| (CICVP) ^{1/2} | $(CICVP)^{1/2} = 9,12084 + 0,0100965*X + 0,00790172*Y - 0,000695539*X*Y$ | 14,08 | 0,0070 |

De acuerdo con criterios expuestos en los Materiales y Métodos para la selección de las variables a utilizar en la semivariografía, este análisis se hizo con los siguientes datos:

- Datos originales de MO y de CICV.
- Residuales de la tendencia de pHa y de CICVP.
- Residuales de la tendencia de log EHA, de log PNF, de log pHk, de log P, de log Ca, de log Mg, de log K, de log CICE y de $(CIC)^{1/2}$.

En la Tabla 8 se presentan los resultados del análisis de semivarianza hecho con las variables referidas

anteriormente. Se utilizó un alcance de 60 m y un intervalo lag de 8 m para definir los semivariogramas. Con dichas condiciones se compararon los siguientes pares de puntos para calcular la semivarianza en cada lag: lag 1: 86 pares; lag 2: 262 pares; lag 3: 307 pares; lag 4: 302 pares; lag 5: 233 pares; lag 6: 183 pares y lag 7: 162 pares, cantidades suficientes para que el semivariograma producido sea estable, según recomendaciones de autores como Hamlett *et al.* (1986), McBratney y Webster (1986), Ovalles (1992) y Dhillon *et al.* (1994).

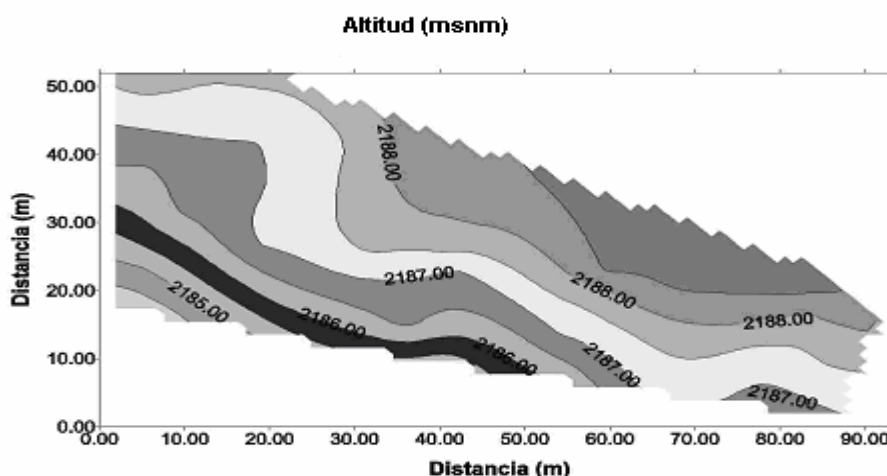


Figura 3. Distribución topográfica del lote correspondiente al epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

Tabla 7. Comprobación de los supuestos* de normalidad y de homogeneidad de varianza para los residuales del análisis de tendencia espacial de las propiedades transformadas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia, que presentaron modelo de regresión significativo.

| Residuales de la variable* | Valor p Shapiro-Wilk | Asimetría | Valor P Levene's |
|----------------------------|----------------------|-----------|------------------|
| Log EHA | 0,249381 | 1,14545 | 0,133257 |
| Log PNF | 0,340304 | -1,46003 | 0,383613 |
| Log pHk | 0,032711 | 1,85195 | 0,0161224 |
| Log P | 0,019707 | 2,60675 | 0,58544 |
| Log Ca | 0,686055 | -1,0474 | 0,869646 |
| Log Mg | 0,770684 | 0,418506 | 0,763128 |
| Log K | 0,539556 | 0,353588 | 0,318707 |
| Log CICE | 0,706732 | 0,277473 | 0,90743 |
| $(CIC)^{1/2}$ | 1,4023E-9 | -6,38035 | 0,113151 |
| $(CICVP)^{1/2}$ | 0,00000585507 | -4,48639 | 0,451469 |
| $(CICV)^{1/2}$ | 0,000382768 | -3,73484 | 0,427921 |

*En $(CICV)^{1/2}$ los supuestos se confirmaron con los valores de la raíz cuadrada de los datos originales y no con los residuales.

Tabla 8. Variabilidad espacial de algunas propiedades del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, Colombia.

| Residuales de la variable* | Modelo | Nugget | Sill | Rango (m) | C/Sill** (%) | R ² (%) |
|----------------------------|-------------|----------|----------|-----------|--------------|--------------------|
| Res log EHA | Esférico | 0,00184 | 0,02668 | 18,3 | 93,1 | 97,3 |
| Res log PNF | Esférico | 0,0102 | 0,0974 | 29,8 | 89,5 | 82,8 |
| Res pHa | Esférico | 0,0213 | 0,1246 | 18,1 | 82,9 | 80,6 |
| Res log pHk | Esférico | 0,00015 | 0,00077 | 14 | 80,4 | 62,6 |
| MO | Nugget puro | 7,019398 | 7,019398 | - | 0 | - |
| Res log P | Esférico | 0,0262 | 0,1324 | 14 | 80,2 | 70,1 |
| Res log Ca | Esférico | 0,0259 | 0,1408 | 18,2 | 81,6 | 92,0 |
| Res log Mg | Esférico | 0,0828 | 0,2366 | 25,8 | 65,0 | 97,6 |
| Res log K | Esférico | 0,0433 | 0,0867 | 27,7 | 50,1 | 97,3 |
| Res log CICE | Exponencial | 0,0216 | 0,081 | 19,5 | 73,3 | 79,0 |
| Res (CIC) ^{1/2} | Lineal | 0,09089 | - | - | - | 64,9 |
| CICV | Nugget puro | 37,4049 | 37,4049 | - | 0 | - |
| Res CICVP | Exponencial | 26,4 | 98,4 | 16,5 | 73,2 | 60,7 |

* Res: Residuales de la regresión de tendencia espacial. log: logaritmo. Para significado de otros símbolos ver Materiales y métodos.

** C/Sill: Variabilidad estructurada o espacial.

De las variables estudiadas, sólo la MO y la CICV no presentaron dependencia espacial: toda su variabilidad fue aleatoria. Con la CIC no se alcanzó a resolver el semivariograma, es decir, en las distancias trabajadas no se alcanzó a llegar al Sill y, por lo tanto, no se pudo definir un rango de variabilidad espacial para esta propiedad en este suelo, lo que no quiere decir que no tenga dependencia espacial, sino que en los 60 m de alcance del semivariograma, ésta no se logró detectar.

En todas las otras propiedades del suelo, se detectó la presencia de dependencia espacial representada, en la mayoría de ellas, por un modelo esférico y por una variabilidad espacial de rango relativamente corto. Según los criterios de Cambardella *et al.* (1994), la mayoría de las propiedades estudiadas presentaron una dependencia espacial predominantemente alta (C/Sill > 75%), siendo media para Mg, K, CICE y CICVP.

Al comparar los resultados de este estudio con los obtenidos por Abril y Ortiz (1996) se aprecia que hay diferencias importantes en el comportamiento espacial de las mismas propiedades entre los dos suelos. En el estudio de Abril y Ortiz (1996), en términos generales, la dependencia espacial fue mucho menor: C/Sill > 40% sólo en MO, Ca y P; los rangos ligeramente mayores y el ajuste de los

modelos definitivamente mucho más bajo que en el presente.

El comportamiento expuesto en el párrafo anterior puede estar relacionado con las diferencias en uso y manejo existentes entre los dos sitios analizados. Mientras que en el estudio de Abril y Ortiz (1996) se trabajó con un Andisol de régimen údico sometido a explotación forestal con *Pinus patula* durante 27 años antes de hacer el trabajo, en el presente se trabajó con un Andisol de régimen ácuico y sometido a explotación agropecuaria (no se tiene información sobre el tiempo que duró la misma) y, en los últimos 5 años antes de hacer el trabajo, estuvo utilizado en recreación (finca de descanso) con siembra y fertilización completa esporádica de frutales (manzano, aguacate), sin mucho éxito, y de gramas naturales.

Como se ve, en el sitio empleado por Abril y Ortiz (1996), no se ha hecho intervención antrópica en el suelo, por lo que es de esperarse que haya estado evolucionando en una situación "cuasi" natural, mientras que en el lote de este trabajo, sí se ha presentado esa intervención. Estas diferencias pueden afectar la dependencia espacial de las propiedades del suelo, sobre todo aquellas que son sometidas a mayor intervención antrópica, como lo advierten Ovalles (1992) y Paz-González *et al.* (2000).

Las condiciones de drenaje en los dos sitios también son muy diferentes y pueden afectar diferencialmente el comportamiento de la variabilidad espacial de los suelos. El régimen ácuico dificulta los procesos de lixiviación y con ayuda de las aguas del nivel freático, se pueden redistribuir nutrientes en el suelo con una localización más autocorrelacionada que en el suelo de régimen údico.

Resultados similares a los encontrados en esta investigación, fueron hallados por Obando *et al.* (2006) en Udivitrands del departamento de Caldas (Colombia). Ellos establecieron que el modelo que mejor se ajustó a la variabilidad espacial de la mayoría de las propiedades químicas del suelo, también fue el esférico y que el grado de dependencia espacial también fue alto en ellas. Sin embargo, a diferencia de este trabajo, en los Udivitrands, los rangos de todas las variables superaron los 30 m, llegando a valores tan altos como 479,4 m en el log de P.

CONCLUSIONES

En la mayoría de las propiedades estudiadas se presentó tendencia espacial cuadrática en la distribución de sus valores y una alta dependencia espacial de rango relativamente corto en su variabilidad, situación que puede estar reflejando una alta intensidad de uso y manejo del suelo en actividades agropecuarias. Sólo la MO y la CICV no mostraron dependencia espacial.

AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera Agrónoma Bibiana Caballero por facilitar el lote experimental. A los estudiantes Diego A. Rojas y Julián González por su colaboración en el muestreo de campo. Al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por la realización de los análisis.

BIBLIOGRAFÍA

Abril, M. A. y B. A. Ortiz. 1996. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-químicas del horizonte A de Andisoles hidrofóbicos, bajo plantaciones de *Pinus patula*. Trabajo de Grado Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 75 p.

Arnalds, O. and K. Stahr. 2004. Volcanic soil resources: occurrence, development, and properties. *Catena* 56: 1-2.

Cambardella, C.A., T.B. Moorman, T.B. Parkin and D.L. Karlen. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1501-1511.

Castillo, A. y S. Gómez. 1995. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-químicas en el horizonte A hidrofóbico de Andisoles, bajo cobertura de *Pinus patula*. Trabajo de Grado Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 116 p.

Dhillon, N.S., J.S. Samra, U.S. Sadana and D.R. Nielsen. 1994. Spatial variability of soil test values in a Typic Ustochrept. *Soil Technology* 7 (2): 163-171.

Gadea, R.A.J. 1993. Niveles críticos de calcio, magnesio y potasio en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. Tesis Magister Science. Facultad de Agronomía. Universidad de Costa Rica. San José. En: <http://orton.catie.ac.cr>. 135 p.; Consulta: abril 2008.

Hamlett, J.M., R. Horton and N.A.C. Cressie. 1986. Resistant and exploratory techniques for use in semivariograms analysis. *Soil Science Society America Journal* 50: 868-875.

IGAC, 2007. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Departamento de Antioquia. IGAC Bogotá. 992 p.

Jaramillo, D.F. 1995. Andisoles del Oriente Antioqueño: Caracterización química y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 35 p.

Jaramillo, D.F. 2000. Efecto del secado de las muestras sobre la extracción selectiva de Fe y Al activos en andisoles del norte de la cordillera central colombiana. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*. 53 (2): 1077-1090.

Jaramillo, D. F. 2008. Variabilidad espacial de rango largo de algunas propiedades químicas de Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Suelos Ecuatoriales* 38 (1): 60-74.

- Jaramillo, D.F., M.T. Flórez y L.N. Parra. 2006. Caracterización de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Oriente Antioqueño, Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 36 (1): 61-71.
- León, L. A. 2000. Los elementos mayores nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo. pp. 186-196. En: *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. 3ª. Ed. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá.
- Lopera, M. y L. C. López. 1997. Variabilidad espacial de la salinidad en suelos con cultivo de flores bajo invernadero. Trabajo de Grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 66 p.
- Malagón, D., C. Pulido y R. Llinás. 1991. Andisoles. *Investigaciones Vol. 3 N° 1*. Subdirección Agrológica. IGAC. Santafé de Bogotá D. C. 118 p.
- McBratney, A.B. and R. Webster. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science* 37 (4): 617-639.
- Motta, B., C. Rodríguez y H. Montenegro. 1990. *Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos*. 5ª ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- 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.
- Ovalles, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales, FONAIAP. Maracay. Serie B. 44 p.
- Paz, A., Vieira, S.R. and M. Taboada. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma* 97: 273-292.
- Soil Survey Laboratory (SSL). 1996. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Report N° 42, version 3.0. Soil Survey Investigations. Washington D. C. 693 p.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Second edition. USDA. Washington. 871 p.
- Soil Survey Staff (SSS). 2006. *Keys to soil taxonomy*. Tenth edition. USDA. Washington D. C. 332 p.
- Upchurch, D.R. and W.J. Edmonds. 1991. Statistical procedures for specific objectives. pp. 49-71. In: *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication Series (USA). No. 28. 2ª Ed. Soil Chemistry And Physics. Madison.