

## COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

**Carlos A. Luengas<sup>1</sup>, Fabio R. Leiva<sup>2</sup>, Jesús H. Camacho-Tamayo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Agronomía, Ciudad Universitaria

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Departamento de Ing. Civil y Agrícola, Ciudad Universitaria, [jhcamachot@unal.edu.co](mailto:jhcamachot@unal.edu.co)

**Resumo-** La medición de la resistencia a la penetración (RP) de un suelo es un indicador de zonas de compactación de un suelo. La influencia de algunas propiedades del suelo como las densidades aparente (DA) y real (DR), el contenido de arcilla y la porosidad total sobre la RP puede ser analizada y explicada mediante el uso del análisis estadístico tradicional y la geoestadística. El estudio fue realizado en dos áreas (Oxisol) al oriente Colombiano, con diferentes niveles de intervención agrícola, en donde se establecieron dos mallas de 42 puntos con una distancia de 25 m entre puntos, con muestreos a las profundidades entre 0-100 y 100-200 mm. La variabilidad espacial de los atributos físicos del suelo se modifica con la intervención de hombre en labores de cultivo. La aplicación de enmiendas y su incorporación al suelo por medios mecánicos genera un efecto sobre la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, reflejándose en el valor de los rangos y modelos obtenidos.

**Palavras-chave:** geostatística; textura, propiedades físicas, semivariogramas

**Área do Conhecimento:** Ciências Agrárias

### Introdução

La Orinoquía Colombiana tiene un área de 25,31 millones de hectáreas. Se estima que el 70,6% de esta área está ocupada por la Altiplanura, 19% de Orinoquía inundable y 10,3% de Piedemonte (RODRÍGUEZ; ROJAS. 1999). Los órdenes predominantes de suelos en esta región son los Oxisoles y los Ultisoles y desde el punto de vista físico son suelos de una alta fragilidad, siendo fácilmente degradados por erosión hídrica. Sumado a esto se encuentran en una zona que está bajo un régimen de lluvias monomodal, en la que se presentan meses con alta intensidad pluviométrica, que puede generar, si el suelo está poco protegido, pérdidas elevadas del mismo por escorrentía superficial.

La variabilidad espacial del suelo se genera por intensidad en el espacio y tiempo de los procesos formadores de suelo, Burrough (1993), que producen diferencias en los valores de las propiedades químicas y físicas del mismo. Wilding y Dress (1983), citado por Muñoz, (2005), agrupan la variabilidad espacial en dos categorías, la sistemática que está en función de la geomorfología, factores formadores y el manejo y la aleatoria la cual no se relaciona con alguna condición de suelo especial.

La resistencia a la penetración es un parámetro que presenta un inconveniente de tipo metodológico para el establecimiento de estándares fijos de medición, esto debido a que el análisis estadístico o geoestadístico se realiza con diferentes profundidades dependiendo del criterio del investigador, que en algunos casos toma como

referencia los datos obtenidos desde los 50 hasta los 250 mm con incrementos de 25 mm (RODRÍGUEZ et al., 2004), dando como resultado alcances desde 2,6 m hasta 67,6 m en un mismo suelo o como en otro estudio en donde los rangos de muestreo fueron de 100 mm, desde 0 mm hasta los 300 mm de profundidad y en donde se reportan alcances entre 61,23 m hasta 80,52 m (MERCANTE et al., 2003).

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en dos oxisoles, así como su relación con la densidad del suelo, la porosidad y el contenido de arcillas.

### Material y Métodos

Para el desarrollo de esta investigación se seleccionaron dos zonas geográficas ubicadas en Oxisoles, en el Municipio de Puerto López (Meta - Colombia). La primera, la Estación Experimental Taluma (EET) está ubicada en las coordenadas 4° 22' 30,9" N y 72° 13' 52,7" W y la segunda, la finca Santa Cruz (FSC) en las coordenadas 4° 10' 14" N y 72° 39' 09" W. En la EET se tiene un Typic Haplustox y en la SC un Typic Hapludox. Los dos lotes presentaban diferentes ciclos de intervención agrícola en el momento del estudio. En la EET, antes de la intervención, la especie dominante era pasto nativo (*Trachypogon vestitus*), y en el momento de la evaluación sólo se había realizado un ciclo de cultivo con soya. Previo a la siembra de soya, se incorporó cal dolomita con arado de discos y dos pases de rastra. Por su parte, la FSC tenía un tiempo de

intervención de tres años consecutivos, con siembras alternadas entre maíz y soya. Antes de la intervención agrícola predominaba el pasto *Brachiaria*. Previo al primer ciclo de cultivo se incorporó cal dolomita con arado de cincel y dos pases de rastra. La incorporación de cal se realizó a una profundidad media de 0,20 m para las dos localidades. En los dos lotes del estudio, la preparación del suelo corresponde a prácticas de labranza de conservación, mediante el uso de arado de cincel y de rastra de discos.

Para la toma de datos en campo se diseñó una malla con 42 puntos distanciados 25 m X 25 m. Las muestras fueron recolectadas por punto a dos profundidades (0 – 0,10 m y 0,10 – 0,20 m) en el mes de agosto de 2004. Las propiedades del suelo estudiadas fueron resistencia a la penetración (RP), densidad real (DR) y del suelo (DA) mediante picnómetro y contenido de arcilla por el método de Bouyucos. La porosidad total (Poros), fue determinada mediante la relación de la DA y DR. Para la época del muestreo la zona estaba en periodo de lluvias y el contenido de humedad del suelo era cercano a capacidad de campo; pero se tuvo la precaución de tomar las muestras en un día no lluvioso.

Inicialmente los datos fueron procesados mediante estadística descriptiva para determinar la media, desviación estándar (SD), máximo y mínimo, mediante el paquete estadístico SPSS15. Para el análisis especial de las propiedades del suelo se hallaron los semivariogramas, para el cual se empleó el programa GS+ (Gamma Design Software).

## Resultados

Para la EET los promedios de la resistencia a la penetración (RP) están entre 0,30 MPa, para la primera profundidad y 0,83 MPa para la segunda (Tabla1), valores bajos comparados con los encontrados por Silva et al. (2003), Veronese Junior et al (2005), Mercante et al. (2003), Kiliç et al. (2004), Abreu et al. (2003) y Rubiano (2005), inclusive el estudio realizado por Jaimes et al. (2003) en la EET mostró valores de resistencia mecánica a la penetración (RP) entre 1,73 MPa y 3,37 Mpa. Todo esto indica que la RP encontrada es atribuible al proceso de incorporación de la enmienda realizado recientemente, lo que permite establecer las ventajas de esta labor para el desarrollo radical de los cultivos a establecer.

El la FSC los promedios de la RP son de 1,57 y 1,89 MPa para las dos profundidades (Tabla 2), en este caso estos valores se ajustan a los encontrados por los autores mencionados y demuestran que con varios ciclos de intervención sin el empleo de labranza primaria la RP recuperan los valores esperados para este tipo de suelos.

**Tabla 1** - Medidas descriptivas de las propiedades físicas del suelo de la Estación Experimental.

Atributo	Media	SD	Mínimo	Máximo
0 - 100 mm de profundidad				
RP, MPa	0,30	0,16	0,05	0,76
DA, g.cm <sup>-3</sup>	1,43	0,09	1,20	1,59
DR, g.cm <sup>-3</sup>	2,44	0,08	2,25	2,59
Poros, %	41,36	3,71	34,67	51,14
Arcilla, %	22,09	2,52	19,04	29,88
100 - 200 mm de profundidad				
RP, MPa	0,83	0,17	0,51	1,27
DA, g.cm <sup>-3</sup>	1,48	0,05	1,38	1,58
DR, g.cm <sup>-3</sup>	2,48	0,07	2,31	2,63
Poros, %	40,02	2,75	34,88	45,02
Arcilla, %	21,89	2,27	19,04	27,04

**Tabla 2** - Medidas descriptivas de las propiedades físicas del suelo de la Finca Santa Cruz.

Atributo	Media	SD	Mínimo	Máximo
0 - 100 mm de profundidad				
RP, MPa	1,57	0,36	1,03	2,72
DA, g.cm <sup>-3</sup>	1,42	0,05	1,31	1,55
DR, g.cm <sup>-3</sup>	2,45	0,13	2,20	2,68
Poros, %	41,83	4,21	33,63	48,70
Arcilla, %	26,28	3,67	16,98	34,08
100 - 200 mm de profundidad				
RP, MPa	1,89	0,22	1,54	2,62
DA, g.cm <sup>-3</sup>	1,43	0,05	1,31	1,56
DR, g.cm <sup>-3</sup>	2,45	0,11	2,17	2,66
Poros, %	41,73	3,26	34,15	46,44
Arcilla, %	25,45	4,53	18,00	39,64

El porcentaje de poros está entre 40,02 y 41,83%, valores que se ubican dentro del intervalo encontrado por Jaimes et al, (2003) (entre 38,5% y 48,0%), que muestran porosidades medias para estos suelos. No se aprecia en estos valores efecto alguno sobre Poros, atribuible al manejo que se ha realizado en las dos localidades. Por la diferencia en la RP podría pensarse que suelos con mayores valores presentan menor porosidad total debido a la disminución en la DA.

La DA está entre 1,42 y 1,48 g.cm<sup>-3</sup>, valores cercanos a los hallados por Rubiano (2005), Carvalho et al (2003) y Jaimes et al, (2003), este último menciona que son densidades aparentemente altas, indicando que son suelos adensados. No se ve el efecto de la intervención realizada en ninguna de las dos localidades, ni la influencia sobre los valores de los Poros comentado anteriormente. La densidad real (DR) encontrada está ubicada entre los 2,44 y 2,48 g.cm<sup>-3</sup>, valores inferiores a los reportados por Jaimes et al, (2003) quien los ubica entre 2,51 y 2,61 g.cm<sup>-3</sup>.

Los contenidos de arcilla son diferentes para las dos localidades, mientras en la EET los porcentajes de arcilla están entre 21,89 y 22,09%, los porcentajes para la FSC están entre 25,45 y 26,28%, datos inferiores a los obtenidos por Rubiano (2005) para suelos de la altillanura

Para la primera profundidad (0 – 100 mm), los alcances en la EET de la RP y DA (375,8 y 349,3 m) muestran una tendencia de rangos elevados y baja variabilidad espacial en comparación con los de la FSC (Tablas 3 y 4). Con respecto a la RP y la DA, el valor se acerca al encontrado por Kiliç et al. (2004) en un Fluvent de Turquía, pero el alcance de la RP encontrada por Da Silva et al. (2002) y Mercante et al. (2003) en suelos del Brasil es menor. En la FSC se encuentra un valor del alcance para la RP cercano al reportado por los dos últimos autores mencionados. La DA según Carvalho et al. (2003) tiene un rango de 4,32 m, algo muy por debajo del encontrado para las dos localidades de estudio. En la EET, la DR y el porcentaje de poros presentan valores casi idénticos en los rangos, inclusive los modelos obtenidos son en cada localidad son iguales.

Los resultados encontrados para la segunda profundidad (Tabla 4), muestran una tendencia diferente para algunas de las propiedades físicas estudiadas, la primera en analizar es la RP, la cual tiene en la EET un efecto pepita puro (EPP), efecto ya reportado por Junior et al, (2005) para un Ferrasol y por Abreu et al, (2003) en un suelo arcilloso, a profundidad similar a este estudio. Algo diferente se aprecia en la FSC en donde el alcance encontrado se aproxima al reportado por Rodrigues et al. (2004), pero que está por debajo de los 75,63 m de Mercante et al. (2003) en un Latossol, y muy por debajo de los 310 m reportados por Kiliç et al. (2004) Typic Ustifluent en Turquía. Lo anterior muestra el efecto de la intervención reciente, sobre la medición de la variabilidad espacial de la RP en esta profundidad.

**Tabla 3** - Parámetros de semivariogramas de las propiedades físicas del suelo de la Estación Experimental Taluma.

Atributo	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	Alcance
0 - 100 mm de profundidad				
RP	Exp.	2,9	8,81	375,8
DA	Exp.	0,0049	0,0158	349,3
DR	Exp.	0,0004	0,007	11,1
Poros	Exp.	0,86	13,03	8,6
Arcilla	EPP	64,729		
100 - 200 mm de profundidad				
RP	EPP	5,18		
DA	Esf.	0,00000	0,00267	37,9
DR	EPP	0,0051		
Poros	EPP	7,58		
Arcilla	EPP	51,021		

**Tabla 4** - Parámetros de semivariogramas de las propiedades físicas del suelo de la Finca Santa Cruz.

Atributo	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	Alcance
0 - 100 mm de profundidad				
RP	Esf.	0,001	0,128	44,2
DA	Esf.	0,00002	0,00288	29,7
DR	Gau.	0,0064	0,0574	181
Poros	Gau.	11,5	42,99	189,9
Arcilla	Exp.	0,77	13,35	8,2
100 - 200 mm de profundidad				
RP	Exp.	0,004	0,050	19,6
DA	Gau.	0,0012	0,0074	163,4
DR	Gau.	0,0078	0,0529	280,5
Poros	Gau.	6,70	30,68	212,8
Arcilla	Esf.	6,81	21,43	84,0

### Discusión

La explicación a la diferencia de la RP para las dos localidades se encuentra en la reciente labranza realizada en la EET, en donde para incorporar el suelo se realizó un volteo de suelo con arado de discos antes del primer ciclo del cultivo, ocho meses antes del muestreo, mientras que la labor de incorporación en la FSC, esta labor se hizo tres años antes, mediante el empleo de cinceles los cuales no generan volteo del suelo y después de esto solo se ha intervenido el suelo con labores de mínima labranza.

La intervención reciente en la EET afectó la medición de la variabilidad espacial para la DR y Poros, porque al disminuir el alcance por debajo de la distancia de muestreo empleada se empieza a generar un efecto pepita puro y los valores del rango no son confiables, disminuyendo su nivel de autocorrelación. Los resultados en cuanto a los alcances de estas propiedades del suelo entre la EET y FSC, confirman la respuesta del suelo a la incorporación de enmiendas por medio de maquinaria, siendo menor la variabilidad espacial en suelos de reciente intervención.

La DR en estos suelos se espera sea homogénea debido a que su alta evolución habría incidido sobre la homogenización de las fracciones constituyentes del mismo, como fue establecido Burrough (1993).

Para la segunda profundidad, la DR y Poros en EET, presentaron efecto pepita puro, repitiendo y confirmando el efecto de la intervención sobre una propiedad que comúnmente presenta baja variabilidad espacial en suelos de alta evolución. Situación diferente se observó en los alcances de la FSC, que inclusive son mayores que para la profundidad entre 0 y 100 mm.

En este caso la arcilla presenta efecto pepita puro en la EET, afirmando el resultado encontrado para la anterior profundidad, sin embargo el efecto

en la FSC, en esta profundidad la estimación de la variabilidad espacial no se ve afectada por la forma de incorporación de la enmienda

La variabilidad espacial de la DA en la segunda profundidad presenta una tendencia a disminuir en la EET y a aumentar en la FSC con respecto a la profundidad anterior. El tipo de implemento con el cual se realiza esta labor influye sobre esta condición, pues los implementos de disco está generando en profundidad una mayor variabilidad del suelo por la mezcla que realiza en el volteo, mientras que el cincel produce fracturación del suelo sin mezclarlo, esta fracturación altera el espacio poroso sin cambiar la distribución espacial de las partículas, por lo que se disminuye la variabilidad de la DA.

### Conclusión

La variabilidad espacial de los atributos físicos del suelo se modifica con la intervención de hombre en labores de cultivo. La aplicación de enmiendas y su incorporación al suelo por medios mecánicos genera un efecto sobre la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, reflejándose en el valor de los rangos y modelos obtenidos.

Los primeros 100 mm de profundidad del suelo presentan mayor susceptibilidad a la intervención respecto al comportamiento espacial de los atributos físicos, principalmente por el tipo de implemento que se utilice en labranza primaria, siendo mayor efecto con implementos de discos que con cinceles.

### Referencias

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; RODRÍGUES, V.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Cienc. Rural** v.33, n.2, p.275-282, 2003.
- BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20<sup>th</sup> century view. **Soils Fert** v.56, n.5, p.529-562, 1993.
- CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob vidieira em Vitória Brasil. **R. Bras. Ci. Solo** v.27, n.4, p.695-703, 2003.
- DA SILVA, G. Métodos auxiliares para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícolas. Dissertação submetida à banca examinadora para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração em Máquinas Agrícolas. Campinas. 2002.

- JAIMES, W.; NAVAS, G.; SALAMANCA, C.; CONDE, A. Estudio Detallado de Suelos de la Estación Experimental de CORPOICA "Sabanas" en la Altillanura Colombiana. 2003.
- KILIÇ, K.; ÖZGÖZ, E.; AKBAŞ, F. Assessment of Spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. **Soil Till. Res.** v.76, n.1, p.1-11, 2004.
- MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **R. Bras. Ci. Solo** v.27, n.6, p.1149-1159, 2003.
- MUÑOZ ROBAYO, J.D. Modelación del comportamiento espacial de variables edáficas y agronómicas en un cultivo de papa en Zipaquirá, Cundinamarca. Disertación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2005.
- RODRIGUES, V.; REICHERT, J. M. REINERT, D, J. 2004. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Cienc. Rural** v.34, n.2, p.339-406, 2004.
- RODRÍGUEZ, L.; ROJAS, L.. 1999. Efecto de la Adición de Materiales Orgánicos sobre la Absorción de Nutrientes en Plantas de Maíz Cultivadas en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. **Memorias**. 14° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Chile.
- RUBIANO, Y. Sistema Georeferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 2005
- SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; STORCK, L.; FEIJO, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico. **R. Bras. Ci. Solo** v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.
- VERONESE JUNIOR, V.; CARVALHO, M.P.; DAFONTE, J.; FREDDI, O.S.; VIDAL, E.; INGARAMO, O.E. 2005. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of brazilian ferralsol. **Soil Till. Res.** v.85, n.1-2, p.166-177, 2006.