

Variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un haplustert crómico bajo pasto natural

Spatial variability of soil resistance to penetration on a chromic haplustert under natural grassland

Juan Alejandro Villazón Gómez^{1*}, George Martín Gutiérrez², Yakelín Cobo Vidal², Ramón Candelario Núñez Tablada¹ y Roberto Alejandro García Reyes³

RESUMEN

La resistencia a la penetración constituye una forma de determinar la compactación del suelo y es importante precisar su variabilidad espacial para poder realizar un adecuado manejo de este recurso. El trabajo se efectuó con el objetivo de evaluar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un Haplustert Crómico bajo pasto natural. Se escogió un área de 1,08 ha, con un pastoreo extensivo estacional de baja intensidad, perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Holguín. Se dividió en 8 rectángulos de 30x45 m (0,135 ha). Mediante un muestreo aleatorio simple se escogió uno, en el que se muestrearon 70 puntos con 5 m de distancia entre sí. Para la determinación de la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. La evaluación se realizó a las profundidades de 0-10, de 10-20 y de 20-30 cm. La mayor resistencia a la penetración se encontró en la capa de 10-20 cm. Los semivariogramas experimentales fueron ajustados con modelos esféricos y exponenciales, con una semivarianza independiente de la distancia de muestreo similar en las tres profundidades, en las que los valores de resistencia a la penetración presentan una dependencia espacial de fuerte a moderada. La resistencia a la penetración mostró la menor variabilidad espacial en la profundidad de 20-30 cm. La menor resistencia a la penetración se encontró donde los puntos coincidieron con una calva salina. La mayor resistencia a la penetración se observó en los bordes de la calva salina, desde donde parte una lengüeta de suelo compactado que une esta área con sitios de alta resistencia a la penetración.

Palabras clave: semivariogramas, krigeaje, compactación de suelos.

ABSTRACT

Soil resistance to penetration is a way to determine soil compaction and it is important to determine its spatial variability to be able to properly manage this resource. The work was carried out with the objective of evaluating the spatial variability of the resistance to penetration in a Chromic Haplustert under natural grass. An area of 1.08 ha was chosen, with extensive seasonal grazing of low intensity, belonging to the Provincial Research Station of Sugarcane of Holguín. It was divided into 8 rectangles of 30x45 m (0.135 ha). By simple random sampling, one was chosen, in which 70 points with 5 m distance were sampled. For the determination of the soil resistance to penetration, an IAA/Planalsucar-Stolf impact penetrometer was used. The evaluation was performed at depths of 0-10, 10-20 and 20-30 cm. The highest soil resistance to penetration was found in the 10-20 cm layer. The experimental semivariograms were adjusted with spherical and exponential models, with an independent semivariance of the similar sampling distance in the three depths, in which the penetration resistance values show a strong to moderate spatial dependence. The soil resistance to penetration showed the lowest spatial variability in the depth of 20-30 cm. The lowest soil resistance to penetration was found where the points coincided with a saline plaque. The highest soil resistance to penetration was observed at the edges of the saline bald, from where a compacted soil tongue separates this area with sites of high soil resistance to penetration.

Keywords: semivariograms, kriging, soil compaction.

¹ Universidad de Holguín. Sede José de la Luz y Caballero, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Centro de Estudios para Agroecosistemas Áridos (CEAAR), Av. de los Libertadores N° 287, Holguín, Cuba, Tel: 2448 1221.

² Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA), Subdirección de I+D, Guaro s/n, Mayarí, Holguín, Cuba.

³ Universidad de Holguín. Sede José de la Luz y Caballero, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Departamento de Ciencias Agropecuarias.

* Autor por correspondencia: villazon@uho.edu.cu

Introducción

La geoestadística se centra en el estudio de propiedades que adquieren valores diferentes, dependiendo de la ubicación y el espaciamiento entre las muestras utilizadas para caracterizarlas (Jaramillo, 2006). Por ello es considerada la rama de la estadística que se encarga del estudio de fenómenos espaciales (Journel y Huijbregts, 1978).

El análisis geoestadístico está compuesto por tres etapas: el análisis exploratorio de los datos, que utiliza técnicas estadísticas convencionales para determinar la distribución normal de los datos; el análisis estructural, en el que se obtiene un semivariograma experimental, al que se le ajustan diferentes modelos teóricos y, finalmente, las predicciones de los valores de las variables, que se pueden hacer mediante el krigeaje (Jaramillo, 2012).

Este análisis tiene mucha utilidad en diversas ramas de las ciencias aplicadas y las ingenierías (Díaz, 2002), pues resulta de gran conveniencia para determinar la variabilidad espacial (Goovaerts, 1998). La variabilidad espacial se utiliza para estudiar, de forma general, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Largaespada y Henríquez, 2015; Vargas *et al.*, 2015; Araújo *et al.*, 2018). También la fertilidad del suelo y su relación con los rendimientos de cultivos específicos (Santos *et al.*, 2017). Otros trabajos han centrado su atención en la humedad y la resistencia a la penetración (Pinzón *et al.*, 2016; Monroy *et al.*, 2017).

Por lo tanto, a la hora de incrementar la eficiencia del manejo de los agroecosistemas debe tenerse en cuenta la variabilidad espacial y temporal que existe en el campo (Silva *et al.*, 2015). Sobre ella tienen gran influencia el uso de la tierra (Monteverde y del Pino, 2014; Prieto *et al.*, 2014), el manejo (Acevedo *et al.*, 2015) y los sistemas de labranza (Salas *et al.*, 2016).

Una de las propiedades más importantes a la hora de evaluar la calidad física de los suelos es la resistencia que estos suelo ejercen a la penetración por parte de las raíces (Silva *et al.*, 2005). La resistencia a la penetración permite identificar zonas donde la compactación es un factor limitante debido a la impedancia mecánica que ejerce sobre el desarrollo radicular de las plantas, lo cual incide desfavorablemente sobre los rendimientos agrícolas (Medina *et al.*, 2012; Gubiani *et al.*, 2013; Toigo *et al.*, 2015).

Las gramíneas constituyen la fuente fundamental de alimentación para los rumiantes (Nantes *et al.*, 2013). Cuando existen valores adecuados de propiedades físicas relacionadas con la compactación (densidad aparente, densidad real y porosidad total) disminuye el período de recuperación y aumenta la producción de biomasa en los pastos, lo cual se revierte en mayores producciones de forraje verde con un buen balance nutritivo más rápidamente (Zambrano *et al.*, 2014).

El objetivo de este trabajo es evaluar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico bajo pasto natural.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó en áreas de la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) de Holguín, en un suelo Vertisol Crómico bajo pasto natural con fines pecuarios, con un pastoreo extensivo estacional de baja intensidad. Las coordenadas centrales del sitio son 20°40'19,2" de latitud N y 75°47'14,3" de longitud W, a 27 msnm (metros sobre el nivel medio del mar).

La zona presenta una precipitación media anual de 1074,9 mm y una temperatura media mensual de 25,3 °C. El paisaje es de llanura con aportes aluviales-deluviales, deluviales y aluviales antiguos.

Se escogió un área de 1,08 ha que se dividió en 8 rectángulos de 30x45 m (0,135 ha) y dispuestos de norte a sur. Mediante un muestreo aleatorio simple se escogió uno, en el que se muestrearon 70 puntos con 5 m de distancia entre sí.

Para la determinación de la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf (Stolf, 1983), con la masa impactadora de 4 kg regulada a 0,40 m de altura. La transformación de la cantidad de impactos por dm a megapascuales (MPa) se realizó a través de la expresión matemática planteada por Stolf *et al.* (1991):

$$RP \text{ MPa} = 0,547 + 0,675 * N \quad (1)$$

Donde *RP* es resistencia a la penetración y *N* es la cantidad de impactos por dm. Estos resultados fueron expresados en intervalos constantes (10 cm), hasta los 30 cm de profundidad.

Se determinó la semivarianza en función de la distancia y se realizó el ajuste del semivariograma experimental mediante modelos teóricos. El

semivariograma experimental $\gamma(h)$ puede ser obtenido a partir de la expresión:

$$\gamma h = 12Nphi = 1NphZxi - Zxi + h2 \quad (2)$$

En la que $Np(h)$ es el número de pares de observaciones comparadas en cada distancia (deben ser más de 50), $Z(xi)$ es el valor de la variable en el sitio xi y $Z(xi + h)$ es el valor de la variable en un sitio ubicado a una distancia h del sitio xi .

Una vez establecidos los modelos teóricos, se verificó el grado de dependencia espacial mediante los índices siguientes:

$$GD(\%) = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) * 100 \quad (3)$$

Propuesto por Cambardella *et al.* (1994), en el que GD es el grado de dependencia, C_0 es el efecto pepita y C_1 es la variabilidad estructural. El grado de dependencia tiene la siguiente clasificación: fuerte dependencia espacial ($GD \leq 25\%$), moderada dependencia espacial ($25 < GD \leq 75\%$) y débil dependencia espacial ($GD > 75\%$).

$$IDE(\%) = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) * 100 \quad (4)$$

Propuesto por Biondi *et al.* (1994), en el que IDE es el índice de dependencia espacial, C_1 es la variabilidad estructural y C_0 es el efecto pepita. De acuerdo a la clasificación propuesta para el GD por Cambardella *et al.* (1994), Seidel y Oliveira (2016) plantean para el IDE de Biondi *et al.* (1994) las siguientes categorías: fuerte dependencia espacial ($IDE > 75\%$), moderada dependencia espacial ($25 < IDE \leq 75\%$) y débil dependencia espacial ($IDE \leq 25\%$).

Se utilizó además el índice de dependencia espacial (IDE) propuesto por Seidel y Oliveira (2014) y Seidel y Oliveira (2016), que está dado por las siguientes expresiones para los modelos esférico, exponencial y gaussiano, respectivamente:

$$IDE_{esférico}(\%) = 0,375 * \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) * \left(\frac{a}{0,5MD} \right) * 100 \quad (5)$$

$$IDE_{exponencial}(\%) = 0,317 * \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) * \left(\frac{a}{0,5MD} \right) * 100 \quad (6)$$

$$IDE_{gaussiano}(\%) = 0,504 * \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) * \left(\frac{a}{0,5MD} \right) * 100 \quad (7)$$

En el que IDE es el índice de dependencia espacial, C_1 es la variabilidad estructural, C_0 es el efecto pepita, a es el alcance práctico y MD es la distancia máxima. Seidel y Oliveira (2016) proponen las siguientes clasificaciones: fuerte dependencia espacial ($IDE_{esférico} > 15\%$, $IDE_{exponencial} > 13\%$, $IDE_{gaussiano} > 20\%$), moderada dependencia espacial ($7 < IDE_{esférico} \leq 15\%$, $6 < IDE_{exponencial} \leq 13\%$, $9 < IDE_{gaussiano} \leq 20\%$) y débil dependencia espacial ($IDE_{esférico} \leq 7\%$, $IDE_{exponencial} \leq 6\%$, $IDE_{gaussiano} \leq 9\%$).

Se determinó la humedad gravimétrica a lo largo de un transecto de 30 m de longitud, diagonal al área estudiada. Las determinaciones se realizaron en 10 puntos con una distancia de 3 m entre sí. El análisis exploratorio de datos efectuado a la humedad gravimétrica se muestra en la Tabla 1.

Para el análisis exploratorio de los datos se utilizó el software Statistica 8. Los semivariogramas y los mapas de contorno se realizaron mediante el Surfer 8.

Resultados y discusión

En el análisis exploratorio de datos que se muestra en la Tabla 2 se observa que el mayor valor de la media se encontró en la capa intermedia (10-20 cm, con una resistencia a la penetración (RP) de 2.592 MPa), la cual difiere significativamente de las medias de la resistencia a la penetración (RP) determinadas en las capas de 10-20 y de 20-30 cm (2.341 y 2.402 MPa, respectivamente).

Tabla 1. Análisis exploratorio de datos de la humedad gravimétrica.

Prof. (cm)	Media	Mediana	Error estándar	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. estándar	C.V. (%)	Asimetría	Curtosis
0-10	0,212	0,210	0,005	0,190	0,246	0,0003	0,017	7,97	0,763	0,457
10-20	0,208	0,206	0,005	0,189	0,237	0,0002	0,015	6,96	0,830	0,498
20-30	0,254	0,258	0,007	0,217	0,290	0,0005	0,023	9,20	-0,217	-0,755
0-30	0,225	0,222	0,004	0,208	0,246	0,0001	0,012	5,41	0,705	-0,155

Prof.: Profundidad; Desv. estándar: Desviación estándar; C.V.: Coeficiente de variación.

Tabla 2. Análisis exploratorio de datos con las medidas de localización, dispersión y forma de la distribución de la resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico bajo pasto natural (p-0.005417).

Prof. (cm)	Media	Mediana	Error estándar	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. estándar	C.V. (%)	Asimetría	Curtosis
0-10	2,341b	2,235	0,073	1,066	4,597	0,368	0,607	25,92	0,981	2,075
10-20	2,592a	2,589	0,092	1,356	5,272	0,587	0,766	29,57	1,133	2,404
20-30	2,402b	2,344	0,064	1,511	4,597	0,286	0,535	22,27	1,212	3,071
0-30	2,445	2,407	0,062	1,418	4,147	0,267	0,516	21,12	1,093	2,237

Prof.: Profundidad; Desv. estándar: Desviación estándar; C.V.: Coeficiente de variación.

Entre estas últimas no se hallaron diferencias significativas.

Los valores de la media y la mediana, cercanos entre sí, indican que no existen observaciones extremas de resistencia a la penetración en los conjuntos de datos que hagan desplazarse a la primera medida de localización mencionada. En la capa de 20-30 cm es donde las diferencias entre estas dos medidas son más notables.

Los valores mínimos y máximos fueron mayores en la capa de 10-20 cm, donde también se encontró una mayor diferencia o rango entre dichas medidas. De esta forma, las colas de la distribución de los valores de resistencia a la penetración en la capa de 10-20 cm aparecen más alejadas del centro que en las demás profundidades.

El mencionado comportamiento del rango en la capa intermedia hace que, en cuanto a las medidas de dispersión, en dicha profundidad se observen los mayores valores de varianza, desviación estándar y coeficiente de variación. No obstante, en el caso de la última medida de dispersión citada, en ninguna profundidad la resistencia a la penetración supera el 30%, considerado por Espino y Arcia (2009) como el límite máximo aceptado para las investigaciones agronómicas.

La variabilidad de la resistencia a la penetración, sobre todo en las dos primeras profundidades, puede estar dada por la distribución espacial heterogénea del pisoteo animal, según Zerpa *et al.* (2013), que, en suelos bajo pasturas, encontraron un mayor coeficiente de variación por encima de los 20 cm de profundidad.

En el caso de las medidas de forma, la menor asimetría se observó en la capa de 0-10 cm. En esta capa, al igual que en las otras dos, la asimetría tiene valores superiores a 0, por lo que todas las distribuciones, que en general no presentan nunca simetría con algún valor, están sesgadas

positivamente, al mostrar la cola de distribución hacia la derecha.

Además, el comportamiento de la curtosis en las tres profundidades indica que la distribución de la resistencia a la penetración muestra un pico más agudo (curtosis leptocúrtica) que la distribución normal, al presentar valores por encima de 1 (Freixa *et al.*, 1992). Esto evidencia que en las colas hay menos valores acumulados que en las colas de una distribución normal.

La Figura 1 muestra los semivariogramas obtenidos al realizar el ajuste a los modelos experimentales. Para las profundidades de 0-10, 10-20 y 0-30 cm el modelo teórico más adecuado es el esférico y para la capa de 20-30 cm la semivarianza se ajusta mejor con el modelo exponencial. En los semivariogramas de 10-20 y de 20-30 cm se aprecia que los datos de menor semivarianza se alejan un poco de la semivarianza estimada.

En las cuatro profundidades, la resistencia a la penetración presentó una adecuada estructura espacial, lo que se puede apreciar, según Acevedo *et al.* (2015), por la manera clara en la que se incrementan los valores de la semivarianza.

La Tabla 3 muestra los valores del efecto pepita, de la meseta y el alcance que se obtuvieron al ajustar los semivariogramas experimentales mediante los modelos teóricos adecuados, así como los índices de dependencia espacial. El efecto pepita indica que la semivarianza independiente de la distancia de muestreo es similar en las tres profundidades. En todos los casos la varianza se torna constante (meseta) a partir de distancias (alcance) cercanas entre sí.

Las profundidades de 0-10 y de 10-20 cm fueron ajustadas al modelo esférico con un alcance de 13 m, la capa de 0-30 cm, también con un modelo esférico, pero con un alcance de 12 m. En

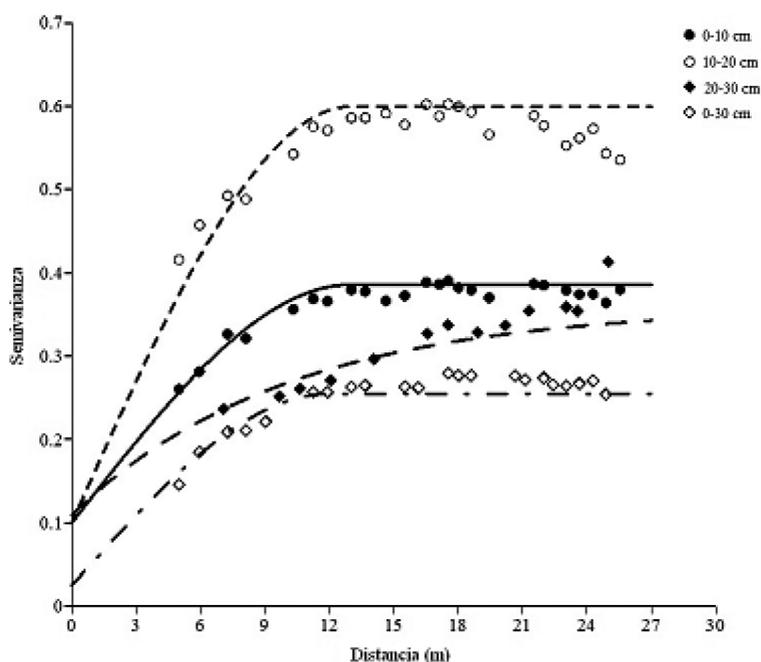


Figura 1. Semivariogramas experimentales ajustados mediante modelos teóricos para la resistencia a la penetración en las cuatro profundidades.

Tabla 3. Parámetros de los modelos teóricos e índices de dependencia espacial.

Prof. (cm)	Modelo	Efecto pepita	Meseta	Alcance (m)	Índices de Dependencia Espacial		
					Cambar Della <i>et al.</i> (1994)	Biondi <i>et al.</i> (1994)	Seidel y Oliveira (2014)
0-10	Esférico	0,099	0,286	13,00	34,62	65,38	11,81
10-20	Esférico	0,100	0,500	13,00	20,00	80,00	14,44
20-30	Exponencial	0,110	0,250	10,00	44,00	56,00	6,57
0-30	Esférico	0,025	0,230	12,00	10,87	89,13	14,86

Prof.: Profundidad.

el caso de la profundidad de 20-30 cm el modelo exponencial tuvo un alcance de 10 m.

Con respecto a los índices de dependencia espacial, se aprecia que para las profundidades de 10-20 y de 0-30 cm, según Cambardella *et al.* (1994), existe una fuerte dependencia espacial. En cambio, para las capas de 0-10 y de 20-30 cm la dependencia espacial es moderada.

Según los índices de dependencia espacial propuestos por Seidel y Oliveira (2014), para el modelo teórico esférico, entre los valores de resistencia a la penetración para las profundidades de 0-10, de 10-20 y de 0-30 existe una moderada dependencia espacial. En la misma categoría de moderada, pero para un modelo exponencial, se

clasifica la dependencia espacial de la resistencia a la penetración en la profundidad de 20-30 cm.

La Figura 2 representa la distribución de la resistencia a la penetración en el terreno en cada una de las profundidades estudiadas. Puede apreciarse que en la profundidad de 20-30 cm la resistencia a la penetración mostró una menor variabilidad espacial.

La resistencia a la penetración es más homogénea en la parte central del área estudiada, con pocos cambios de una profundidad a la siguiente. Este comportamiento es más perceptible en los sitios enmarcados en las coordenadas 10;35 y 20;25. La menor resistencia a la penetración se encontró entre las coordenadas 30;20 y 30;30,

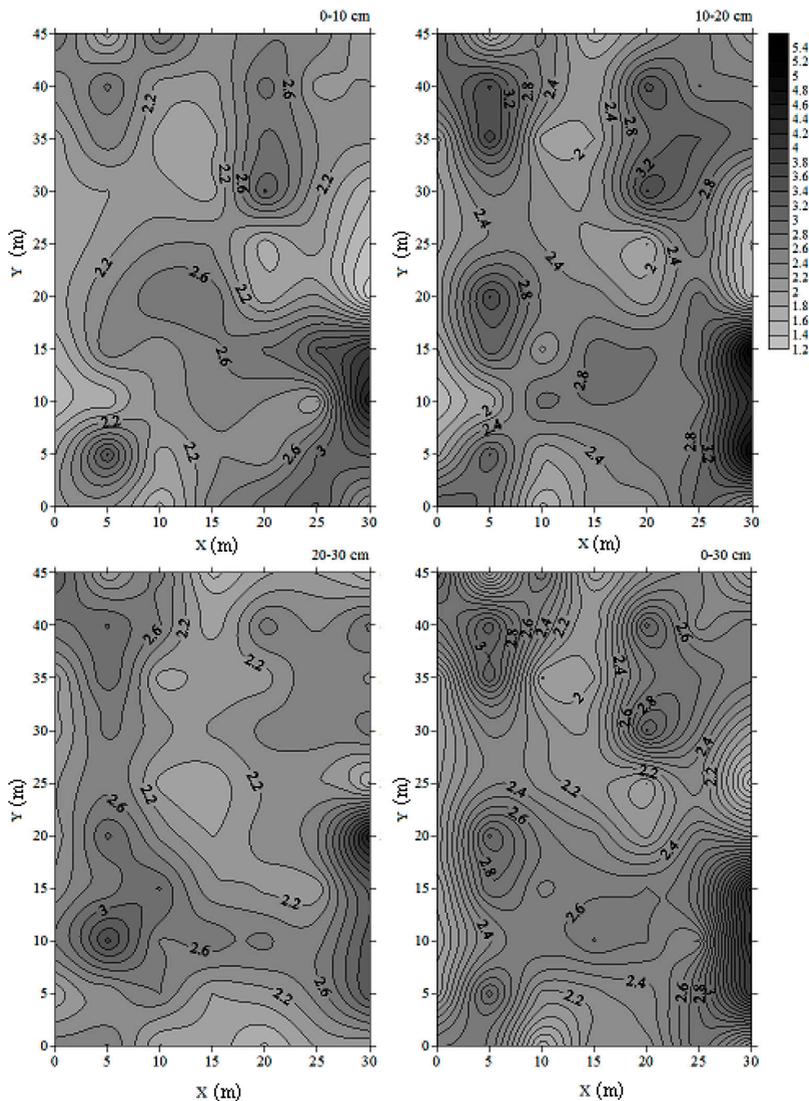


Figura 2. Mapas de contorno para la resistencia a la penetración evaluada por profundidades en el área de pasto natural.

área que coincidió con la existencia de una calva salina, la cual, a pesar de mostrar una estructura deteriorada, se hallaba poco afectada por el tránsito del ganado, al no resultar atrayente para este.

En sentido contrario, los mayores valores de RP se determinaron en las coordenadas 30;5 y 30;15, área que coincide con los bordes de la calva salina y sitio por donde el ganado bordea dicha zona salinizada en busca de mejores pastos. A partir de este sitio se aprecia la prolongación de una lengüeta de suelo compactado que conecta los bordes de la calva salina con áreas donde también existe una alta resistencia a la penetración.

Conclusiones

La capa de suelo con mayor resistencia a la penetración fue la de 10-20 cm. Así lo confirman los valores de la media, el mínimo y el máximo. La diferencia entre estas dos últimas medidas de posición hace que la dispersión (varianza, desviación estándar y coeficiente de variación) de los valores de resistencia a la penetración sea la más alta.

Los semivariogramas experimentales fueron ajustados con modelos esféricos y exponenciales, con una semivarianza independiente de la distancia de muestreo similar en las profundidades de 0-10,

de 10-20 y de 20-30 cm. Los valores de resistencia a la penetración muestran una dependencia espacial de fuerte a moderada.

La resistencia a la penetración presentó la menor variabilidad espacial en la profundidad de 20-30 cm. En las coordenadas 10;35 y 20;25 la RP varía poco con la profundidad. La menor

resistencia a la penetración se encontró en el transecto 30;20 hasta 30;30, donde los puntos muestreados coincidieron con una calva salina.

La mayor resistencia a la penetración se observó en los bordes de la calva salina, desde donde parte una lengüeta de suelo compactado que une esta área con sitios de alta resistencia a la penetración.

Literatura citada

- Acevedo, D.C.; Hernández Acosta, Elizabeth; Maldonado Torres, R.; Álvarez Sánchez, María Edna.
2015. Variabilidad espacial del carbono en un suelo después de 10 años de retiro e incorporación de residuos de cosecha. *Terra Latinoamericana*, 33: 199-208.
- Araújo, D.C. dos S.; Montenegro, Suzana M.G.L.; Montenegro, A.A. de A.; Silva Junior, V. de P.; Santos, Sylvania M. dos.
2018. Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22 (1): 38-44.
- Biondi F.; Myers, D.E.; Avery Ch.C.
1994. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 24 (7): 1354-1368.
- Cambardella, C.A.; Moorman, T.B.; Novak, J.M.; Parkin, T.B.; Karlen, D.L.; Turco, R.F.; Konopka, A.E.
1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58: 1501-1511.
- Díaz, M.A.
2002. Geoestadística aplicada. UNAM-CITMA. México. 131 p.
- Espino Soto, Ayda; Arcia Porrúa, J.
2009. Estadística aplicada para las ciencias y la docencia. Estadística aplicada a las ciencias biológicas y agrícolas. Editora Publicina. La Habana. 89 p.
- Freixa I Blanxart, Monserrat; Salafranca I Cosialls, J.; Guàrdia I. Olmos, R.; Ferrer I Puig, J.; Turbany I Oset, J.
1992. Análisis exploratorio de datos: Nuevas técnicas estadísticas. Poblgràfic S.A., Barcelona. 296 p.
- Goovaerts, P.
1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 27 (4): 315-334.
- Gubiani, P.I.; Goulart, R.Z.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.
2013. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37 (6): 1502-1511.
- Jaramillo, D.F. 2012. Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 1 (1): 73-87.
- Journel, A.G.; Huijbregts, Ch.J.
1978. Mining Geostatistics, Academic Press, New York. 600 p.
- Largaespada, K.; Henríquez, C.
2015. Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Agronomía Costarricense*, 39 (3): 137-147.
- Medina, Cecilia; Camacho Tamayo, J.H.; Cortés, C.A.
2012. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Engenharia Agrícola*, 32 (1): 91-101.
- Monroy Rodríguez, Fanny Liliana; Álvarez Herrera, J.G.; Alvarado Sanabria, Ó.H.
2017. Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja Tunguavita, Paipa. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20 (1): 91-100.
- Monteverde, S.; Pino, A del.
2014. Variabilidad espacial en las propiedades químicas del suelo en un sistema de producción con cerdos en pastoreo. *Ciencias Agronómicas*, 23 (14): 37-45.
- Nantes, N.N.; Euclides, V.P.B.; Montagner, D.B.; Lempp, B.; Barbosa, R.A.; Gois, P.O.
2013. Desempenho animal e características de pastos de capimiatã submetidos a diferentes intensidades de pastejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48 (1): 114-121.
- Prieto Méndez, Judith; Prieto García, F.; Acevedo Sandoval, O.A.
2014. Variabilidad espacial de la materia orgánica en un suelo dedicado al cultivo de cebada maltera (*Hordeum distichum* L.). *Revista Facultad de Ingeniería*, 71: 141-152.
- Salas, R.; Ordóñez, I.; Valle, S.; López, I.; Dec, D.; Descalzi, C.; Dörner, J.
2016. Variación espacial de propiedades físicas de un suelo derivado de cenizas volcánicas sometido a distintas estrategias de mejoramiento de una pradera degradada. *Agro Sur* 44 (3): 29-40.
- Santos, Railton O. dos; Franco, Laís B.; Silva, S.A.; Sodré, G.A.; Menezes, Agna A.
2017. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21 (2): 88-93.
- Seidel, E.J.; Oliveira, M.S.
2014. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 699-705.
- Seidel, E.J.
2016. A classification for geostatistical index of spacial dependence. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40: 1-10.
- Silva, S.A.; Queiroz, D.M. de; Ferreira, W.P.M.; Correa, P.C.; Rufino, J.L.S.
2015. Mapping the potential beverage quality of coffee produced in the Zona da Mata, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 96: 1-11.
- Silva, R.R.; Silva, M.L.N.; Ferreira, M.M.
2005. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na Bacia Alto do Rio Grande-MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 29 (4): 719-730.
- Stolf, R.
1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 15: 229-235.

- Stolf, R.; Fernández, J.; Furlani, V.L.
1983. Recomendação para uso do penetrómetro de impacto medelo IAA/planasucar-Stolf. *Revista Açúcar, Alcool e Subprodutos*. 1 (3): 235-241.
- Toigo S.; Braida, J.A.; Possenti, J.C.; Brandelero, E.M.; Baesso, M.M.
2015. Atributos físicos de um Nitossolo Vermelho cultivado com trigo, em sistema plantiodireto, submetido à compactação e escarificação. *Engenharia Agricultura*, 23 (1): 19-28.
- Vargas, Rocío del Pilar; Serrato, F.; Torrente, A.
2015. Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas-Huila. *Revista Ingeniería y Región*, 13 (1): 113-123.
- Zambrano, Gema; Apráez, J.E.; Navia, J.F.
2014. Relación de las propiedades del suelo con variables bromatológicas de pastos, en un sistema lechero de Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31 (2): 106-121.
- Zerpa, G.; Sosa, O.; Berardi, J.; Bolatti, J.P.; Galindo, A.; Maldonado, J.
2013. La resistencia mecánica a la penetración en pasturas. *Agromensajes*, 35: 64-68.