

23

APLICACIÓN

**DE MODELOS GEOESTADÍSTICOS PARA DEFINIR LA
VARIABILIDAD DE UN PERFIL DEL SUELO**

APLICACIÓN

DE MODELOS GEOESTADÍSTICOS PARA DEFINIR LA VARIABILIDAD DE UN PERFIL DEL SUELO APPLICATION OF GEOSTATISTICAL MODELS TO DEFINE THE VARIABILITY OF A SOIL PROFILE

Rafael Enrique Niebla Torres¹

E-mail: reniebla_est@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0193-4502>

Salomón Alejandro Barrezueta Unda¹

E-mail: sabarrezueta@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4147-9284>

Ángel Luna Romero¹

E-mail: aeluna@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4311-9445>

Julio Chabla Carrillo¹

E-mail: jechabla@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9761-5890>

¹ Universidad Técnica de Machala. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Niebla Torres, R. E., Barrezueta Unda, S., Luna Romero, Á., & Chabla Carrillo, J. (2021). Aplicación de modelos geoestadísticos para definir la variabilidad de un perfil del suelo. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 188-195.

RESUMEN

El análisis geoestadístico es utilizado para visualizar y graficar la distribución espacial de varias propiedades del suelo. En este contexto, los objetivos fueron: Describir varias propiedades fisicoquímicas del suelo de dos perfiles en una finca bananera; para luego estimar el mejor método de interpolación, y mediante gráficas interpretar la variabilidad espacial. Se construyó dos calicatas de 2,50 m de ancho por 0,70 m de profundidad ubicadas diagonal a una planta de banano a distancia de 40 cm. En cada perfil se colocó una malla de 2 m de largo por 0.6 m de ancho con cuadrículas de 20x 20 cm, de donde se tomó muestras para análisis de suelo. El análisis geoestadístico se realizó en ArcGis versión 10.3. Para mostrar la distribución de los datos del perfil, se utilizó el método de interpolación kriging. Los modelos de semivariograma de tipo empíricos usados fueron: lineal, esférico, circular y gaussiano. Se identificó áreas con diferente variabilidad en su dirección concentración de datos en función de la distancia. El modelo de interpolación esférico fue más preciso. Los mapas mantuvieron la continuidad de los valores en profundidad, aspecto que permitió caracterizar los dos perfiles de suelo, al ser comparado con la estadística descriptiva.

Palabras clave:

Sistema de información geográfico, Krigien, semivariograma, error cuadrático medio.

ABSTRACT

Geostatistical analysis is used to visualize and graph the spatial distribution of various soil properties. In this context, the objectives were: to describe several physicochemical properties of the soil of two profiles in a banana farm; then to estimate the best interpolation method, and through graphs to interpret the spatial variability. Two 2.50 m wide by 0.70 m deep pits were constructed diagonally to a banana plant at a distance of 40 cm. A 2 m long by 0.6 m wide mesh with 20 x 20 cm squares was placed in each profile, from which samples were taken for soil analysis. The geostatistical analysis was performed in ArcGis version 10.3. To show the distribution of the profile data, the kriging interpolation method was used. The empirical semivariogram models used were: linear, spherical, circular and Gaussian. Areas with different variability in their direction and data concentration as a function of distance were identified. The spherical interpolation model was more accurate. The maps maintained continuity of the values in depth, an aspect that allowed the characterization of the two soil profiles, when bought with the descriptive statistics.

Keywords:

Geographic information system, Krigien, semivariogram, mean square error.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un medio biofísico heterogéneo y complicado de describir (Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura, 2009). Los primeros investigadores de las ciencias del suelo propusieron cavar una fosa y en una de las paredes a la que denominaron perfil se delimitaron las capas u horizontes basados en propiedades observadas en el campo (Zhang & Hartemink, 2018). Estas propiedades generalmente incluyen color, textura y estructura (Grauer-Gray & Hartemink, 2018). Después de la delineación del horizonte, se toma una muestra de suelo del horizonte para el análisis de laboratorio; resultado, solo se mide la variación vertical de un perfil de suelo, la cual es usualmente confusa a medida que aumenta en profundidad. Sin embargo, con el muestreo tradicional se asume que el valor del horizonte es un atributo particular que lo distingue de los demás horizontes (Malone, et al., 2009).

Con el desarrollo de los Sistema de Información geográfico (SIG), las aplicaciones van más allá del campo de la medición, delimitación y clasificación de terrenos (Rubiano Sanabria, et al. 2005). También se aplican a estudios de geología y edafología, que permitido ser más exacto en la medición del espesor de los horizontes y preciso en la transición entre horizontes; por tanto, se puede establecer el movimiento vertical de los nutrientes (Kozłowski & Komisarek, 2018). En este marco, desde inicio del siglo XXI varios científicos están analizando al suelo de forma vertical y lateral mediante técnicas geoestadísticas que son conducidas mediante programas informático que surgieron con las SIG.

La geoestadística se introdujo en la ciencia del suelo en la década de los 80 como una alternativa a la clasificación edáfica (Garbanzo-León, et al., 2017). La geoestadística analiza información espacial mediante modelos estadístico y se relaciona con variables medidas en una zona con continuidad espacial, se fundamenta en el estudio de la autocorrelación espacial, es decir, asume que las observaciones de ambos sitios serán más similares en la medida en que estos sean más cercanos (López-Granadps, et al., 2005). El fundamento estadístico es que la variable $Z(x)$, es al azar y espacialmente autocorrelacionados. En su forma más simple, el modelo es lineal (ecuación 1).

(1)

Dadas las capacidades predictivas de la geoestadística y la alta variabilidad de las propiedades del suelo a medida que se profundiza; esto hace, que el mapeo digital de los terrenos en áreas con datos limitados se pueden predecir cuantitativamente las variaciones tanto verticales y como laterales de las propiedades del suelo en un área definida (Malone, et al., 2009). Por tanto, esta técnica se puede emplear para analizar la variabilidad espacial del perfil del suelo.

Otra aplicación de la geoestadística es la delimitación de los horizontes del suelo, hecho que puede ser problemática y son generalmente cualitativas o semicuantitativas, debido que se requiere decisiones basadas en la experiencia pedológica. En algunos casos los horizontes son discontinuos o delgados y pueden ser pasados por alto (Grauer-Gray & Hartemink, 2016). A este problema se tiene una alternativa, el muestreo tipo grilla (raster), con el cual se pueden caracterizar los perfiles de suelo en dos dimensiones (variación lateral y horizonte), facilitando la delimitación de los horizontes del suelo.

En este marco, los suelos cultivados con banano tienen un alto grado de intervención antrópica, producto del excesivo uso de fertilizantes sintéticos y pesticidas químicos, que coadyuvan la degradación del suelo (Stoorvogel & Segura, 2018). Aunque las enmiendas orgánicas y las prácticas amigables ayudan a reducir los efectos de la compactación del suelo, salinización o acidez del suelo, estos cambios son analizados a una profundidad no representativa (< 30 cm) y solo de forma vertical.

El banano es el principal producto de origen vegetal que exporta Ecuador y principal fuente de ingresos económicas para la provincia de El Oro. Surge la necesidad de realizar un estudio descriptivo de varios perfiles en una hacienda bananera mediante un muestreo en raster por lo cual se proponen los siguientes objetivos. Describir varias propiedades fisicoquímicas del suelo de dos perfiles en una finca bananera; para luego estimar el mejor método de interpolación, y mediante gráficas interpretar la variabilidad espacial.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en una finca bananera ubicada en el sitio El Motuche (Machala, provincia El Oro, Ecuador). El clima es tropical húmedo, la media anual de temperatura es de 24,1 °C y la precipitación acumulada de 550 a 1100 msnm. El suelo es de origen aluvial, con planicies en la zona costera donde predominan los órdenes alfisol y entisol, tipos de textura franco-arcillosa y franco arenoso.

Se tomó al azar dos parcelas de 3ha en donde se procedió a realizar en cada sitio una calicata de 2,50 m de ancho por 0,70 m de profundidad para la toma de muestras. Las calicatas se codificaron como perfil 1 y perfil 2, y se construyeron diagonal a una planta de banano a una distancia de 40 cm. En los dos perfiles se colocó una malla de 2 m de largo por 0.6 m de ancho con cuadrículas de 20x 20 cm (Figura 1). A continuación, se recolectaron las muestras de suelo del centro de cada cuadrado. El total de muestra fueron 30 por cada perfil, los cuales fueron secadas al aire por 72 horas, luego trituradas y tamizadas a 2 mm. Procedimiento adaptado de Grauer-Gray & Hartemink (2018).



Figura 1. Esquema del muestreo.

Las propiedades físicas determinadas fueron: arena, limo y arcilla por el método de la pipeta. También se realizó la medición del pH en pasta de saturación con agua relación 1:2.5 y la conductividad eléctrica ($dS\ m^{-1}$). La propiedad física densidad aparente (D_a), fue calculada con la ecuación (2) propuesta (Bernoux, et al.1998), que incluye el valor de arcilla ($g\ cm^3$) y de carbono orgánico (CO) obtenido por el método de dicromato de potasio. Todas las determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Técnica de Machala (Ecuador).

$$D_a = 1,398 - 0,0047 * clay - 0,042 * CO \quad (2)$$

El análisis estadístico fue realizado mediante la herramienta ArcToolbox en Spatial Analyst Tools, dentro del programa ArcGis versión 10.3 (ESRI, 2014); la secuencia lógica de cómo se obtuvieron se describe a continuación.

Los valores de arena, limo, arcilla, densidad aparente, pH y Conductividad eléctrica fueron ingresadas como coordenadas geográficas (valores x,y), con el fin de diseñar gráficas que muestran la distribución de los datos y la concentración de las propiedades del suelo, dentro de la unidad estudiada (perfil). Para ello, se utilizó el método de interpolación kriging (Ecuación 3), a partir de los análisis de los semivariogramas. Los modelos de semivariograma de tipo empíricos usados fueron: lineal, esférico, circular y gaussiano.

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (3)$$

Donde: $Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i , λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i , s_0 = la ubicación de la predicción, N = la cantidad de valores medidos.

Con los datos interpolados, se graficaron cada uno de los resultados de las interpolaciones y se realizó

también una comparación visual entre ambos métodos

Todas las pruebas estadísticas se realizaron mediante el programa SPSS, versión 23.0 (IBM Corp, 2013). Las propiedades físico-químicas del suelo en estudio fueron tratados con la media estadística, el error estándar de la media (EE), y los rangos máximos y mínimos. Se asume que los dos perfiles son diferentes por lo que se utilizó el estadístico de Levene para determinar la homogeneidad de varianza al ($P < 0,05$), también se realizó una prueba T con significancia al 5 %, entre los valores observados.

Para la validación de los modelos obtenidos de los semivariogramas, se calcularon el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (Root Mean Square Error-RMSE) con la ecuación (4).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_{xi} - M_{xi})^2}{n}} \quad (4)$$

Donde P_{xi} es la estimación de cada propiedades física y química por los diferentes modelos, M_{xi} es el valor observado en campo y n es el número de muestras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis descriptivo de cada perfil se presenta en la tabla 1. Los porcentajes de arcilla oscilaron entre $42,19\% \pm 1,43$ a $39,64\% \pm 1,05$ y fueron superiores a los valores de arena ($24,11\% \pm 0,36$; $25,92\% \pm 0,54$) y de limo ($33,70\% \pm 1,46$; $34,44 \pm 0,83$) en los dos perfiles, sin obtener diferencias significativas ($p < 0,05$). Caso contrario sucede con la D_a que indicó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los perfiles, con una variación de $1,27\ g\ cm^3$ (rango: $1,23-1,31\ g\ cm^3$) a $1,20\ g\ cm^3$ (rango: $1,12-1,24\ g\ cm^3$) para el perfil 1 y 2 respectivamente; diferencia que esta relaciona con el porcentaje de arcilla que es moderadamente superior en el perfil 1.

La conductividad eléctrica se comportó de forma diferente en cada perfil e indicó diferencias significativas ($p < 0,05$). La media en el perfil 2 se ubicó en $0,59\ dS\ cm^3$ con un rango de $0,38-1,09\ dS\ cm^3$, valores muy superiores a los obtenidos en el perfil 1 (media: $0,29\ dS\ cm^3$; rango: $0,15-0,65\ dS\ cm^3$). En cuanto al pH del suelo, los valores indicaron una tendencia hacia la alcalinidad, el mayor pico fue en el perfil 2 con $8,67$; mientras que el valor mínimo se registró en el perfil 1 con $7,60$. La prueba t de indicar significancia estadística ($p < 0,05$).

Tabla 1. Análisis descriptivo por perfil.

	Perfil 1					
	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	D_a ($g\ cm^{-3}$)	CE ($dS\ cm^{-3}$)	pH
Media	24,11	33,70	42,19	1,27	0,29	7,94
Error Estándar	0,36	1,46	1,43	0,01	0,02	0,04
Mínimo	20	22,3	30,7	1,23	0,15	7,60

Máximo	28	47,3	52,7	1,31	0,65	8,60
Perfil 2						
	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Da (g cm-3)	CE (dS cm-3)	pH
Media	25,92	34,44	39,64	1,20	0,59	8,23
Error Estándar	0,54	0,83	1,05	0,01	0,03	0,04
Mínimo	20	25,3	30	1,12	0,38	7,76
Máximo	32	42	50	1,24	1,09	8,67
Sig. 0,05	sn	sn	0,02	0,01	0,01	0,02

La Tabla 2, muestra la comparación de cuatro métodos de interpolación, que se obtuvieron con la técnica de Kriging, para las propiedades de suelo en estudio en función de las técnicas de predicción RMSE y R².

En general los valores entre los cuatro métodos fueron muy ajustados dentro del perfil, pero muy distantes al comparar los resultados entre los perfiles, en especial la arena, limo y arcilla. El método de K-Esférico predominó en los dos perfiles, a excepción de la arena en el perfil 1 que indico los mejores ajuste para el método K-lineal con un RMSE de 1,13 y R² de 0,77 y de la Da también en el perfil 1 cuando se comparó por el método de R², los modelos k-esférico (0,64) y modelo k-lineal (0,62), fueron muy próximos.

La predicción con RMSE las variables cercanas a cero fueron en el perfil 1 fueron: CE (0,01), Da (0,04) y pH (0,20); mientras que las propiedades granulométricas limo (7,65) y arcilla (7,32) fueron las más distantes. Cuando se aplicó el método de predicción R² los valores próximos a 1 fueron los más ajustado en las variables limo (0,95), arcilla (0,93), CE (0,98) y el valor más distante fue en el pH (0,47).

En el perfil 2, los dos métodos de predicción en el modelo k-esférico muestran una relación directa entre los valores, hecho no observado en el perfil 1. Los valores cercanos a cero en el método RMSE corresponden a las variables físicas, arena, arcilla y Da obtuvieron un valor de 0,01, seguida de la CE (0,06), el pH (0,15) y el limo (4,06). El factor R², del modelo en mención se obtuvo ajustes próximos a 1 en las variables arena (0,99), arcilla (0,98), Da (0,95) y CE (0,94), mientras que el pH (0,63) y el Limo (0,28) mostraron los valores más lejanos a 1.

Tabla 2. Comparación métodos de interpolación por perfil de suelo.

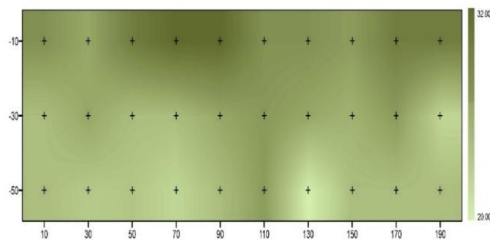
Modelo		Perfil 1					
		Arena	Limo	Arcilla	Da	CE	pH
K Esférico	RMSE	1,28	7,65	7,32	0,04	0,01	0,20
	R ²	0,69	0,95	0,93	0,64	0,98	0,47
K Gauss	RMSE	1,47	7,98	7,82	0,04	0,01	0,21
	R ²	0,50	0,00	0,00	0,37	1,00	0,28
K circular	RMSE	1,32	7,98	7,82	0,04	0,01	0,20
	R ²	0,66	0,00	0,00	0,62	1,00	0,45
K Lineal	RMSE	1,13	7,98	7,82	0,04	0,01	0,21
	R ²	0,77	0,00	0,00	0,62	1,01	0,28
Modelo		Perfil 2					
		Arena	Limo	Arcilla	Da	CE	pH
K Esférico	RMSE	0,01	4,06	0,01	0,01	0,06	0,15
	R ²	0,99	0,28	0,98	0,95	0,94	0,63
K Gauss	RMSE	0,23	4,26	1,70	0,02	0,10	0,16
	R ²	0,99	0,13	0,94	0,85	0,72	0,46
K circular	RMSE	0,01	4,08	0,91	0,02	0,06	0,15
	R ²	1,00	0,26	0,99	0,89	0,92	0,59
K Lineal	RMSE	0,23	4,26	1,70	0,02	0,10	0,16
	R ²	0,99	0,13	0,94	0,85	0,72	0,46

La variable arena en ambos perfiles (Figura 1) muestra una menor variabilidad espacial, concentrando los mayores valores del centro hacia la parte superior derecha de las dos graficas, oscilación que no sobrepasa el 32% de arena.

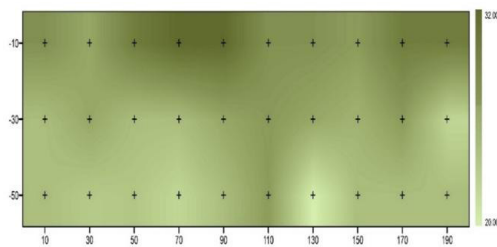
Las gráficas de limo entre los perfiles marcan diferencias en una mayor concentración de limo entre los 50 a 60 cm en el perfil 1, mientras en el perfil 2 el mayor porcentaje se ubica en los primero 30 cm hacia la derecha. En el caso de la variable arcilla la variabilidad espacial es mayor entre los perfiles, los porcentajes más altos (40% a 44,42 %) en el perfil 1 se distribuyen entre cero a los 50 m, mientras en el perfil 2 la distribución es lo contrario, pero con menor uniformidad entre 30 a 50 cm. La Da en el perfil 2 se comportó de forma similar a la gráfica obtenida de la variable arcilla, en el caso del perfil 1 el rango es menor con una disminución hacia el lado superior derecho de la gráfica.

Perfil 1

Arena



Perfil 2



Limo

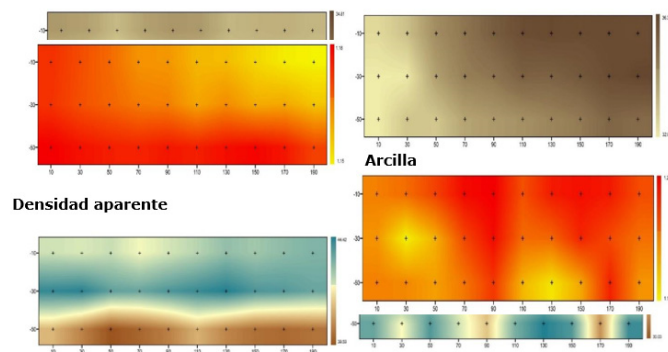


Figura 1. Distribución espacial por interpolación esférica, modelo de Kriging de las propiedades físicas.

La diferencia del pH (Figura 2) entre los perfiles eran similares, con un mayor grado de alcalinidad en el lado donde se ubicaba la planta (lado de la izquierda de la

gráfica), con rangos homogéneos entre los cero a 30 cm. El comportamiento de la CE fue distintos en los dos perfiles; se observó una mayor acumulación (0,55-0,65 dS cm³) de cero a 20 cm a una distancia de 30 cm de la planta (lado superior izquierdo) en el perfil 1 y en el perfil 2 la mayor CE se encuentra hacia el lado derecho desde los 130 cm hasta los 18° cm desde 20 cm hasta los 60 cm de profundidad.

Perfil 1 Perfil 2

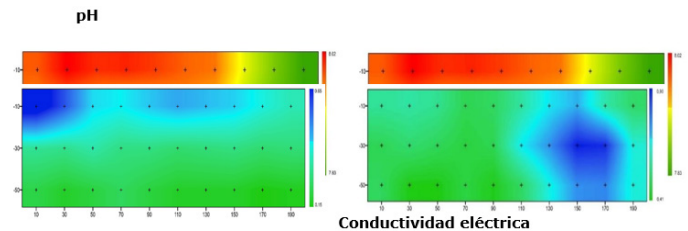


Figura 2. Distribución espacial por interpolación esférica, modelo de Kriging de las propiedades químicas.

Los valores obtenidos en los dos perfiles de las variables físicas y químicas estudiadas, están en el rango de otras investigaciones realizadas a igual profundidad y en suelos de la zona en estudio. La alcalinidad observada en los suelos pudo estar relacionada con la aplicación de nitrógeno en forma amoniacal (NH₄), al fósforo y potasio que se agregan como enmienda al terreno (Rodríguez & López, 2014).

Las diferencias significativas encontradas en los perfiles, se debe a que las variables como el pH, CE y Da son más susceptible a la labranza del suelo en comparación con las variables arena, limo y arcilla.

Los cuatro métodos de interpolación tuvieron en general un ajuste muy similar; posiblemente, por el tipo de muestreo. Villatoro, et al. (2008), recomiendan disminuir la densidad de muestreo con un mayor de rango de distancia con el fin de obtener diferencias marcadas entre los diferentes métodos de interpolación. Cordova Jaramillo (2009), indica que kriging ordinario es el más robusto y el más utilizado para variables simples estacionarias como el pH y CE y concuerda con Villatoro, et al. (2008), que las propiedades físicas que son de tipo estructural (arena, limo y arcilla) son las más complicadas de predecir por su alta heterogeneidad en su formación, variación que es más notoria en suelos aluviales como los de la provincia El Oro.

Las variables físicas mostraron valores que estuvieron en el rango de los valores calculados con el modelo esférico, lo que permite un análisis espacial de los datos con gran aproximación a los datos observados. Erazo-Mesa & Sandoval-López (2015), expresan que la distribución espacial de un suelo es anisotropía, debido a que las variables son muy heterogéneas por tanto la representación gráfica toma diferentes direcciones. Por otra parte, Grauer-Gray & Hartemink (2018), indican que la variación

lateral mediante es normal en los perfiles del suelo y es el principal factor para delimitar los horizontes, en este caso entre cero a 30 cm y de 30 a 60 cm se identifica variaciones que pueden ser consideradas como sub-horizontes.

El rango de la variabilidad espacial del pH del suelo (7,83-8,0) estuvo fuera del rango mínimo en ambos perfiles (7,60-7,76); aunque la tendencia fue hacia la alcalinidad del suelo esta variación se asocia que la media del pH fue calculada como un único transecto vertical, y la geoestadística utiliza mediciones cualitativas y semi-cuantitativas de las propiedades del suelo (Grauer-Gray & Hartemink, 2018).

Dentro del horizonte la variación de las propiedades puede cambiar de forma alternada con la profundidad, y dicha variación difiere, por varios factores como: el material parental, la vegetación, la fertilización, la labranza, el drenaje y el tiempo (Grauer-Gray & Hartemink, 2018). La diferencia observada en la CE está en relación con el sistema de manejo de la plantación, la mayor acumulación de CE en la superficie del perfil 1 puede obedecer a un deficiente sistema de drenaje en la parcela, mientras que la acumulación centralizada en el perfil 2 está relacionada a una mayor Da y porcentaje de arcilla que ocasiona esa retención (Moreno, et al., 2013).

CONCLUSIONES

El uso de la geoestadística por medio de kriging permite identificar áreas parciales con diferente variabilidad en su dirección y concentración en función de la distancia. El modelo de interpolación esférico fue más preciso y los mapas muestran que la concentración de las variables presentó una distribución heterogénea en el perfil del suelo, pero tuvo continuidad en profundidad, aspecto que permitió caracterizar los dos perfiles de suelo, al ser comprado con la estadística descriptiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernoux, M., Cerri, C., Arrouays, D., Jolivet, C., & Volkoff, B. (1998). Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 62(3), 743–749.
- Erazo-Mesa, E., & Sandoval-Lopez, D. (2015). Desarrollo de una herramienta geoestadística para elaborar mapas de variabilidad espacial de suelos. *Suelos Ecuatoriales*, 1(1), 36–40.
- ESRI. (2014). *ArcGIS* (10.3). <http://www.esri.com>
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., & Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (93), 20–41.
- Grauer-Gray, J., & Hartemink, A. (2016). Variation of Soil Properties in a Mollisol Profile Wall. En, A. Hartemink & A. Mcbratney (Eds.), *Digital Soil Morphometrics*. Springer International Publishing.
- Grauer-Gray, J., & Hartemink, A. E. (2018). Raster sampling of soil profiles. *Geoderma*, 318, 99–108.
- IBM Corp. (2013). *SPSS Statistics for Windows* (No. 21). <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/spss-predictive-analytics-enterprise>
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su Estudio. *Revista de La Facultad de Ciencias*, 1(1), 73–87.
- Kozłowski, M., & Komisarek, J. (2018). Influence of terrain attributes on organic carbon stocks distribution in soil toposequences of central Poland. *Soil Science Annual*, 69(4), 215–222.
- López-Granads, F., Jurado-Expósito, M., Peña-Barragán, J., & García-Torres, L. (2005). Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. *European Journal of Agronomy*, 23(3), 279–289.
- Malone, B. P., McBratney, A. B., Minasny, B., & Laslett, G. M. (2009). Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154(1–2), 138–152.
- Moreno, M., Pirela, H., Medina, M., Molina, N., Polo, V., & Urdaneta, M. (2013). Evaluación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos cultivados con cacao (Theobroma Cacao L.) en la Sierra de Perijá. *Revista Luz*, 4(8), 8–28.
- Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura. (2009). Guía para la descripción de suelos. FAO. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016000087>
- Rodríguez, M., & López, T. (2014). Comportamiento de la zona radical activa del banano en un Ferrasol bajo riego por goteo superficial y subsuperficial. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(3), 5–10.
- Rubiano Sanabria, Y., Amézquita Collazos, E., & Beaulieu, N. (2005). Sistema georreferenciado de indicadores de calidad de suelos para los Llanos Orientales de Colombia : Estudio de caso: Municipio de Puerto López, Meta. *Acta Agronómica (Colombia)*, 54(3), 1-9. http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/112/245
- Stoorvogel, J., & Segura, R. (2018). Nutrition and soil management in banana cultivation. En, G. Kema & A. Drentj (Eds.), *Achieving sustainable cultivation of bananas*. (pp. 1–15). Burleigh Dodds Science Publishing.

Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95–105.

Zhang, Y., & Hartemink, A. E. (2018). Special issue article: Digital mapping of a soil profile. *European Journal of Soil Science*, 70(1), 27–41.