# ESTRUCTURA DE VARIACIÓN DE ATRIBUTOS EDÁFICOS Y TOPOGRÁFICOS EN UNIDADES GEOMORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO CARAMACATE

**Ángel Valera Valera**[1] **y Jesús Viloria Rendón**[2]

[1]*Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas, CIESA-UNERG. San Juan de los Morros, Guárico, Venezuela, angelvalera@cantv.net.* [2]*Laboratorio de Agrología, Facultad de Agronomía, UCV, Aragua, Venezuela, jesus.viloria@gmail.com.*

## RESUMEN

En este estudio se utiliza un diseño de muestreo de suelos de múltiples escalas de variación, tomando como base un modelo digital de elevación (MDE) de 15m de resolución espacial y la clasificación digital del terreno, expresada en clases geomorfométricas representativas de paisajes de montañas de la cuenca del río Caramacate. El objetivo de la investigación fue cuantificar la variabilidad del suelo en muestras superficiales y determinar el aporte de diferentes niveles de detalle: una celda, una ventana de 3x3 celdas, diferentes clases geomorfométricas y distintas unidades litogeomorfológicas, a la variación total del suelo en el área de estudio. Con el muestreo anidado se demostró que la variación de atributos edáficos y topográficos ocurre sobre un amplio rango de escalas, presentando diferentes contribuciones a la variación total. Las variables morfológicas y algunas propiedades físicas muestran alta variación de corto alcance. El nivel que contribuye con mayor proporción a la varianza total de los suelos es el tipo de relieve (laderas de montaña o clases morfométricas del terreno), indicando que las clases geomorfométricas se consideran un nivel apropiado para realizar posteriores muestreos, interpolaciones y la generalización de atributos en la cartografía digital de suelos.

**Palabras Claves:** *Variación espacial, geomorfometría, muestreo anidado, cartografía digital de suelos.*

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los sistemas de información geográfica ha promovido el uso de modelos digitales de elevación (MDE) e imágenes satelitales como fuentes de datos ambientales para la cartografía digital de suelos. Tanto en un MDE como en una imagen satelital, el terreno es representado como una malla continua de celdas de igual tamaño, cada una de las cuales es identificada por tres valores (x, y, z). Los dos primeros indican la ubicación geográfica de la celda y el tercero representa la altura del terreno en el MDE o su reflectancia en la imagen satelital. El tamaño de la celda determina la resolución espacial del modelo. La predicción de propiedades del suelo a partir de un modelo digital de terreno (MDT) derivado de un MDE o de una imagen satelital o de ambos, requiere que las propiedades edáficas determinadas en cada sitio de muestreo (pedón) sean generalizadas a toda una celda del modelo. Aún más, corrientemente se generalizan a una ventana constituida por las cuatro (2x2) o nueve (3x3) celdas más cercanas al sitio de muestreo, para tomar en consideración posibles errores de ubicación en el terreno. En consecuencia, si la variabilidad del suelo en cortas distancias es importante, este procedimiento podría limitar seriamente la calidad de las predicciones. Por esta razón, es importante conocer

¿Cómo es la estructura de la variabilidad espacial del suelo dentro de una celda, en una ventana de nueve celdas, entre celdas de una misma clase del MDT y entre celdas de clases diferentes? En este sentido, es necesario cuantificar la variabilidad del suelo a través de múltiples escalas, con la finalidad de mejorar el uso de la información edáfica en diversas aplicaciones. La cuantificación de la variabilidad del suelo en múltiples escalas es de gran importancia para el modelado y la predicción, ya que suministra las bases para el desarrollo y la comprensión de la escala de influencia sobre dicha variabilidad, y proporciona un marco sobre el cual puede ser posible la representación de los datos (Arnold y Wilding, 1991; Lin *et al.,* 2005; Esfandiarpoor *et al*., 2009). Los atributos del suelo presentan escalas de variación diferentes y complejas (Burrough, 1993), por lo que la evaluación de su estructura de variación de se realiza mediante un análisis de varianza anidado o jerárquico (AVA). Este análisis permite estimar la variabilidad existente en diferentes niveles o escalas de variación espacial, y la determinación de los componentes de variación en un área determinada, como resultado de la acción de los factores formadores de suelos que actúan sobre un continuo de escala espacial. En esta investigación, se consideran agrupamientos anidados de la resolución espacial, equivalente a la unidad mínima (tamaño de celda o píxel) representativa de clases digitales continuas o clases geomorfométricas. En la evaluación realizada se determinaron los niveles jerárquicos que aportan la mayor variación, partiendo de la resolución espacial del MDE (una celda=15m) considerado en la obtención de unidades digitales de paisaje, hasta las principales unidades litogeomorfológicas presentes en un sector de la cuenca del río Caramacate.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en un área muestra de 6 761 ha de la cuenca del río Caramacate, en la región centro-norte costera, al sur del estado Aragua. En el área de estudio se presentan dos zonas bioclimáticas (Spósito y Elizalde, 2004): Bosque Seco Tropical en las zonas más bajas y Bosque Húmedo Premontano en las más altas. El paisaje está constituido principalmente por laderas de montaña, con pendientes medias del orden del 45% y altitudes que oscilan entre 334 y 1405 msnm. En el área muestra afloran materiales de las formaciones, geológicas El Caño-El Chino (VCñc) y El Carmen (VCca), constituidas por asociaciones meta-volcano-sedimentarias del Grupo Villa de Cura. Se dispone de un MDT del área de estudio, constituido por 10 clases geomorfométricas que se distribuyen en el terreno siguiendo una estructura sistemática de variación espacial. Una de estas clases se relaciona con las vegas de valles intramontanos, otra corresponde a crestas y vigas de montañas y las clases restantes se ubican en laderas de montañas, con diferencias en altura relativa, exposición, curvatura del terreno y cobertura vegetal (Valera y Viloria, 2010). Una vez obtenida la clasificación geomorfométrica se ubicaron las unidades representativas de la cuenca y en cada una de ellas se realizó el muestreo y evaluación de los suelos. El muestreo jerárquico se basó en cinco niveles (*N1* (±1500m): Unidades Litogeomorfológicas; *N2* (±700m): Tipo de Paisaje; *N3* (±90m): Tipo de Relieve (Clases Geomorfométricas); *N4* (±45m): Ventana de 3x3 celdas; *N5* (±15m). La evaluación se inició con cuatro puntos de muestreo en el nivel 4, con dos repeticiones en el resto de los niveles (2x2x2x4x2), obteniendo un diseño anidado balanceado con 64 sitios evaluados, representados por 110 horizontes genéticos.

En cada sitio seleccionado se realizaron evaluaciones de las propiedades morfológicas por

cada horizonte genético (USDA, 2007), haciendo énfasis en el tipo de perfil (secuencias 1:A/C, 2:A/BC/C, 3:A/Bw/C, 4:A/Bt/C), espesor del horizonte A (Esp_A), espesor del solum (Esp_AB) y color del suelo. Se tomaron muestras disturbadas para análisis de laboratorio: distribución de tamaño de partículas (DTP) y esqueleto grueso (%EG); pH en agua 1:1 y KCl; carbono orgánico (%CO); P disponible (P Disp.), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases cambiables por acetato de amonio 1N, a pH 7; Acidez Total por KCl 1N y sales solubles (CE). En las muestras no disturbadas se determinó la retención de humedad a bajos potenciales (0, -500 kPa); los índices estructurales: conductividad hidráulica saturada (Ks), porosidad total (%PT) y densidad aparente (Da). Se evaluaron los índices de consistencia: (IP); los agregados estables al agua (%AE); microagregados (Mic: <250μm) y macroagregados (Mac: 250-2000μm), el diámetro medio ponderado (DMP); y el grado de estructuración de los suelos (IA= Mac/Mic) (Valera, 2003).

En cada sitio de muestreo se determinaron las coordenadas UTM y se derivaron las covariables ambientales: Altitud, Posición Relativa, Pendiente del terreno, Orientación de la pendiente, Área de Captación (Área_C), Índice de Humedad (ITH), Perfil de Curvatura (Perfil_C), Plano de Curvatura (Plano_C), Índice de Transporte de Sedimentos (ITS), Índice del Potencial de Escorrentía (IPE) y el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI).

Los datos se sometieron a un análisis exploratorio; se realizaron pruebas de normalidad (Smirnov-Kolmogorov), diferencias de medias (prueba t) y homogeneidad de varianzas (prueba F). Se aplicó la prueba de ji cuadrada de Bartlett ($X^2$) para demostrar la homogeneidad de varianzas y se realizó el análisis de varianza anidado. La estimación de los componentes de la varianza se corroboró con la aplicación del módulo NEST del conjunto de programas para análisis geoestadístico PC-GEOSTAT, el cual realiza el análisis de varianza anidado hasta para seis niveles de jerarquía.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los variogramas obtenidos reflejan patrones con diversos comportamientos en los niveles jerárquicos considerados, los cuales se representan en la figura 1 mediante pares de variables con tendencias similares. El primer patrón se caracteriza por presentar un variograma con alta variación de corto alcance, con varianzas residuales o aleatorias comprendidas entre 60 y 80% en los primeros 15m de distancia, es decir dentro de una celda (figura 1a). Los atributos que presentan esta tendencia está formado por la totalidad de las variables morfológicas, las físicas relacionadas con la porosidad, las partículas < 0,25 mm (%af, %amf) y la retención de humedad a muy bajos potenciales (>-10 kPa).

Estos resultados parecen estar asociados a los procesos de erosión que ocurren en las laderas, los cuales son tan intensos que tienen una gran influencia en el área equivalente a una celda. Las variaciones de corto alcance crean problemas al momento de cartografiar las variables responsables, por lo que es aconsejable utilizar valores promedios de múltiples observaciones dentro de un área pequeña (e.g. 1 px, 3x3 px), o muestras compuestas en vez de una muestra simple (Burrough *et al.*, 1988).

El segundo patrón refleja una estructura similar al variograma anterior (figura 1b), pero en estos casos los atributos presentan varianzas residuales de 20 a 35%, y alcanzan un 90 a 100% de variación en los primeros 45m (ventana 3x3).

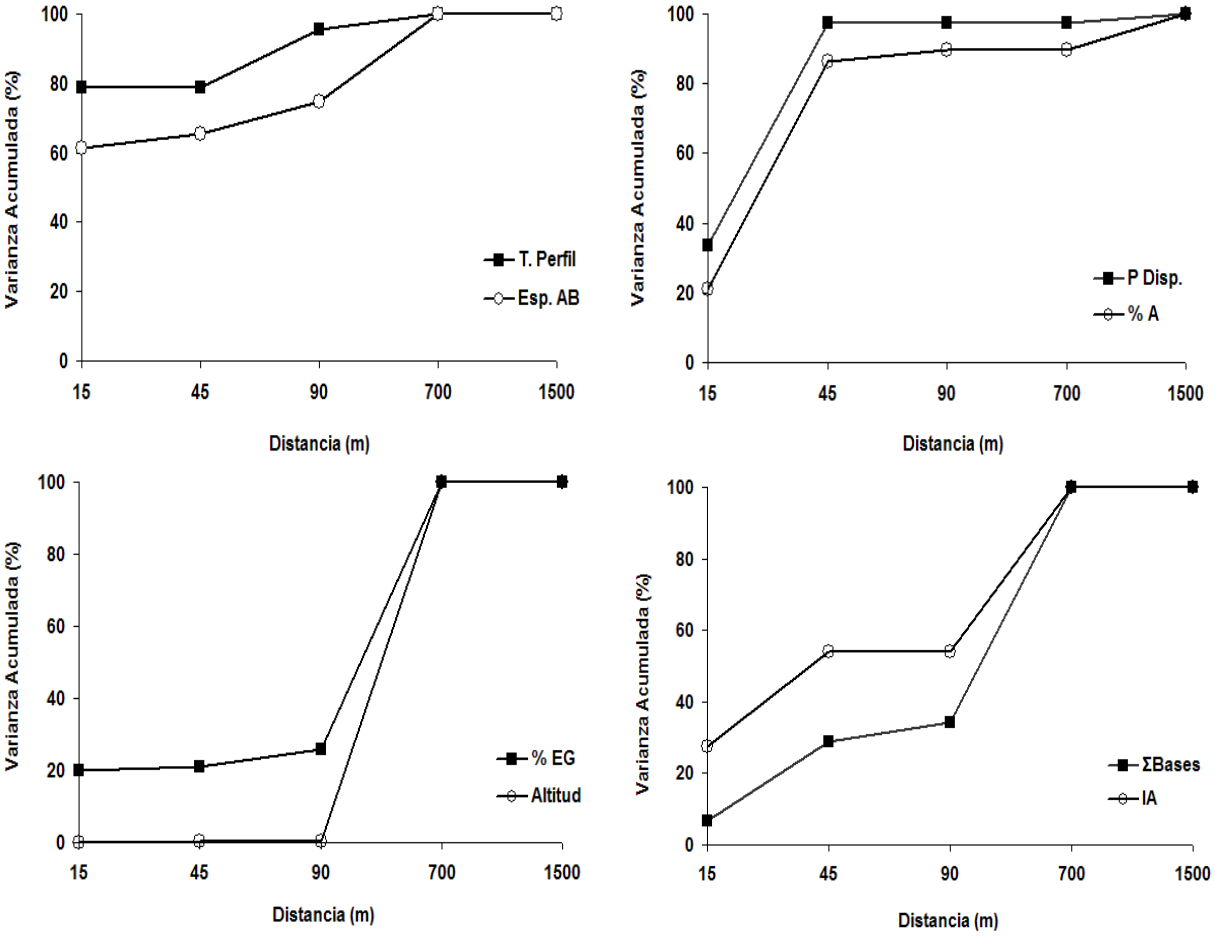


**Figura 1**. Variogramas representativos de los atributos en la cuenca del río Caramacate: (a) corto alcance en N5, (b) corto alcance en N4, (c) transicional N3-N2, y (d) transicional N5-N4 y N3-N2.

Estas variaciones se deben posiblemente al arrastre de materiales en las posiciones relativas altas y a la acumulación de partículas y nutrientes en las posiciones relativas más bajas. Las variables que presentan estas tendencias son de naturaleza física relacionadas con tamaño de partículas e índices de consistencia (%A, LSP, LIP), química (P disponible); y algunos atributos topográficos relacionados con el área de captación, posición relativa, forma del terreno (Perfil C y Plano C), escorrentía superficial (IPE) y cobertura vegetal (NDVI). Estos atributos presentan un patrón de variación que puede cartografiarse a escalas locales comprendidas entre 1:5.000 y 1:10.000.

El tercer patrón se presenta en variogramas con un comportamiento constante en las primeras distancias (sin dependencia espacial) con cambios evidentes a partir de tercer nivel de abstracción (figura 1c). Es decir, los atributos inician con cierto grado de varianza residual (entre 0 y 20 %), permaneciendo invariables en los niveles jerárquicos más bajos del sistema, y posteriormente ocurre una máxima contribución de la varianza en el rango de

90 a 700 m. Las variables representativas de estos variogramas ejercen una gran influencia en la acumulación de la varianza en el segundo nivel jerárquico (tipo de paisaje), lo que significa que a partir del tercer nivel (clases geomorfométricas) se resuelve la estructura de variación presente en los suelos. Los atributos que muestran el cambio abrupto a partir del N3 son $Ca^{2+}$, las partículas > 0,5 mm (%am, %ag, %EG), RH (-33, -500 kPa), y los atributos relacionados con el grado de estructuración de los suelos (DMP, AE 2-4mm, AE 1-2mm). Situación similar presenta el gradiente de altitud, el cual no expresa variaciones en los primeros 90m, siendo el atributo topográfico que define con mayor claridad la estructura de variación a nivel de clases geomorfométricas. Todas estas variables tienen un patrón de variación que puede cartografiarse a escalas que varían de 1:20.000 a 1:100.000.

El cuarto patrón refleja una estructura transicional a medida que aumenta el intervalo de la distancia (figura 1d), presentando cierto grado de variación residual a cortas distancias (entre 7 y 45%), pero con claros saltos en la varianza ocurrida a distancias entre 90 y 700m. Esta estructura contribuye a definir la escala espacial a partir del tercer nivel jerárquico, es decir a nivel de clases geomorfométricas o del tipo de relieve considerado en el muestreo. Los atributos identificados con este comportamiento son CIC, PSB, ΣBases, Ca/Mg, $Mg^{2+}$, CE, pH KCl; %a, AE< 2 mm, IA; también juega un papel importante la pendiente del terreno, el comportamiento hidrológico (ITH) y el transporte de sedimentos (ITS). Todos estos atributos son de gran importancia para la diferenciación de unidades de suelo a nivel de tipos de relieve en la zona de estudio, cuyo patrón de variación puede cartografiarse a escalas regionales que varían entre 1:20.000 y 1:100.000.

Otro patrón de menor relevancia lo presentan algunas variables como Da, ya que mantienen una tendencia sin ascensos, ni saltos entre los diferentes niveles de abstracción, indicando que son espacialmente independientes de la escala, y por ende de poca utilidad en la distinción de unidades de suelo en la cuenca del río Caramacate. Otras variables, tales como acidez total y %CO, se incrementan hasta el nivel superior del sistema jerárquico sin estabilizar la varianza estructural, por lo que solamente podrían ser utilizados en pequeñas escalas cartográficas (< 1:250.000).

## CONCLUSIONES

La investigación demostró que la variación de los atributos edáficos y ambientales ocurre sobre un amplio rango de escalas, donde cada uno presenta diferentes contribuciones a la variación total. Los variogramas de las variables evaluadas presentan diferentes tendencias y comportamientos de los patrones de distribución espacial de los atributos edáficos y topográficos, lo cual refleja la presencia de solapamientos de la escala de variación. Las variables morfológicas de gran importancia en la taxonomía de suelos, muestran una alta variación de corto alcance, dentro de una celda o en el área ocupada por un grupo de 3x3 celdas adyacentes, lo que significa que no presentan dependencia espacial a nivel local; esto sugiere que tales atributos son de poca utilidad práctica en la distinción de unidades de suelos a cualquier escala. La mayoría de las variables físicas relacionadas con la distribución de tamaño de partículas, retención de humedad, índices de consistencia y estabilidad de agregados al agua, la totalidad de las variables químicas y las ambientales, definen con claridad el aporte de dichos atributos a partir del tercer nivel del análisis de varianza anidado. Las clases geomorfométricas y el paisaje montañoso de la zona son los niveles jerárquicos que contribuyen con mayor proporción a la varianza total de los suelos

en la cuenca, indicando que el patrón de variación se resuelve a partir del tercer nivel jerárquico. Este nivel de detalle es el más apropiado para realizar posteriores muestreos, interpolaciones y la generalización de atributos, sin limitar la calidad de las predicciones, sirviendo como base para la cartografía digital de suelos a escalas comprendidas entre 1:20.000 y 1:100.000.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Arnold, R.W.; L.P. Wilding. 1991. The need to quantify spatial variability. In: M.J. Mausbach y L.P. Wilding (Eds.), Spatial Variabilities of Soils and Landforms, SSSA Special Publication #28. Soil. Sci. Soc. A., Inc. Madison, WI, p. 1-8.

Burrough P.A.; M.E.F. van Mensvoort; J. Bos. 1988. Spatial analysis as a reconnaissance survey technique: an example from acid sulphate soil regions of the Mekong Delta, Vietnam. *In*: H. Dost (editor). Selected papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils, 68-89. International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication No. 44, Wageningen

Burrough, P.A. 1993. Soil variability: a late 20th century view. Soils and Fertilizers, 56: 529-562.

Esfandiarpoor, B; M.H Salehi; N. Toomanian; J. Mohammadi; R.M. Poch. 2009. The effect of survey density on the results of geopedological approach in soil mapping: A case study in the region, Central Iran. Catena, 79: 18-26.

Lin, H.; D. Wheeler; J. Bell; L. Wilding. 2005. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. Ecological Modelling, 182: 271-290.

Spósito, M.; G. Elizalde. 2004. Caracterización climática de la cuenca alta del Río Guárico. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Núcleo de Investigación y Excelencia Manejo Integral de la cuenca alta del Río Guárico. Maracay. 39 p.

USDA, 2007. National Soil Survey Handbook, title 430-VI. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service,Washington DC.

Valera, A.; J. Viloria; Á. Viloria. 2010. Aplicación de redes neuro-difusas en la clasificación geomorfométrica de paisajes montañosos de Venezuela. En: Resúmenes. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Morales, C.; J. Cuervo y H. Franco (compiladores). SCCS. Risaralda, Pereira. Colombia. p. 97.

Valera, A. 2003. Relación entre la estructura y la fertilidad de los suelos en la cuenca media del río Tiznados. Tesis de Maestría en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay. 207 p.

Yemefack, M.; D.G. Rossiter; R. Njomgang. 2005. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. Geoderma, 125: 117-143.