

UN ANALISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL: APLICACION A VARIABLES EDAFICAS

J. Martínez Fernandez

Dpto. Geografía.
Universidad de Salamanca.
Cervantes 3.
37002 SALAMANCA

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis de la variabilidad espacial desde dos aproximaciones metodológicas. La primera está dentro de lo que se considera como enfoque clásico, a partir de técnicas de análisis estadístico unidimensional, con el objeto de caracterizar a una variable en un espacio dado. Dentro de dichas técnicas el coeficiente de variación tiene un papel muy destacado. La segunda aproximación es la que aborda el análisis estructural mediante herramientas geoestadísticas. El análisis del semivariograma aporta en este caso una información muy valiosa sobre el comportamiento espacial de una variable. Ambos enfoques son complementarios y conjuntamente ofrecen una visión bastante precisa de cualquier variable distribuida espacialmente. El trabajo se materializa en el análisis de una serie de variables edáficas estudiadas a varias escalas y diferentes esquemas de muestreo.

Palabras clave: variabilidad espacial, coeficiente de variación, geoestadística, semivariograma, variables edáficas.

Introducción

La constatación de que el espacio casi nunca es uniforme e isótropo no resulta extraña para el geógrafo. Se trata de una realidad estructurada, resultado de un pasado geológico, geomorfológico, climático, ..., y funcional, sobre la que se ha dado un conjunto de procesos naturales y la postrera acción antrópica. Como consecuencia de todo ello, la complejidad es la norma y la uniformidad y homogeneidad excepciones. Sin embargo, es frecuente al estudiar un espacio que aflore un cierto grado de organización. Paradójicamente, heterogeneidad y estructuración aparecen unidas con frecuencia en el análisis espacial.

El medio físico constituye, pues, un sistema de interacciones heterogéneo y discontinuo, cuyas características varían de un lugar a otro. Estas variaciones pueden tener un alcance diferente y ser de distinta índole. Por tanto, la variabilidad espacial se constituye en un rasgo esencial del medio. El estudio de cualquiera de sus elementos, que tenga una dimensión espacial, no puede ignorar esa circunstancia. Esto supone un incremento en la complejidad del análisis. Se trata de considerar la validez y representatividad de

mediciones y datos, que están en la base del conocimiento de ese medio, compatibilizándolos con la heterogeneidad de la unidad espacial en cuestión. Es básico tomar conciencia, en todo momento, del deterioro de la información en función de la distancia al punto de medida.

La variabilidad espacial de los suelos y, en sentido amplio, de las formaciones superficiales, viene siendo objeto de interés y estudio desde hace bastante tiempo. BECKETT, WEBSTER (1971), WEBSTER (1994) y BURROUGH et al. (1994), citan trabajos de principios de siglo, cuando diversos investigadores comienzan a plantearse cuestiones acerca de la validez de las delimitaciones de las unidades cartográficas o la necesidad de planificar los muestreos en función de la heterogeneidad de los suelos.

La producción científica en este ámbito ha sido numerosa en las dos últimas décadas. Se trata de trabajos que provienen, en su mayor parte, del campo de la Edafología, pero también desde la Geomorfología (BRIGGS, SHISHIRA 1985, HARRISON et al. 1990; FITZJOHN et al. 1998), la Hidrología (NIELSEN et al. 1973; GASCUEL-ODOUX, 1984; MORAL, GIRALDEZ 1995), la Ecología (VAN DER BROEK et al. 1981) y, naturalmente la Geografía (BURROUGH 1991, 1993). Muestra de ese interés fue la celebración en 1992 de una importante reunión internacional, en donde incluso se acuñó el término *Pedometrics* (BURROUGH et al. 1994) en referencia al ámbito cuantitativo del estudio del suelo, y muy especialmente al tema de la variabilidad espacial (WEBSTER, 1994).

El presente trabajo pretende aportar un enfoque al análisis de la variabilidad espacial, a partir de determinados instrumentos estadísticos, y utilizando como ejemplo de aplicación variables edáficas, cuya dimensión espacial es insoslayable. Este enfoque puede ser, por tanto, extrapolable a muchas otras variables geográficas.

METODOS

La estadística proporciona una variada gama de técnicas y métodos para el análisis de la variabilidad espacial de los suelos (GASCUEL-ODOUX, 1984), dependiendo del objetivo último del estudio y de la metodología a emplear. Una opción podría ser la de combinar lo que, en ocasiones, se ha denominado como “análisis estadístico clásico” (VAUCLIN, 1983; WEBSTER, 1994), que permite la caracterización de lo que sería la variabilidad intrínseca de una variable dada, y el análisis estructural, destinado a identificar la componente estructurada en la distribución espacial y, a partir de ahí, la estimación de valores de la variable en localizaciones sin información.

El enfoque clásico

Este enfoque consiste, básicamente, en la utilización de técnicas de análisis estadístico unidimensional, para estudiar a una variable medida en un gran número de puntos en el espacio. Se trata de caracterizar su variabilidad en el espacio o variabilidad intrínseca. Comporta para una variable y un espacio dados, el cálculo de la ley de distribución, la media, el intervalo de confianza y el coeficiente de variación, como estadístico que informa de la magnitud de dicha variabilidad. En un segundo nivel, persigue la caracterización estadística del medio concreto y la optimización del muestreo realizado. El coeficiente de variación (CV) desempeña un papel muy destacado en este análisis. Cada variable edáfica va a estar caracterizada por un valor o rango de coeficiente. Esto permite contar con una información muy valiosa *a priori*. Permite llevar a cabo una planificación del muestreo en términos de división del espacio y densidad de muestreo. Un valor alto de CV plantea siempre un grado elevado de incertidumbre en la caracterización de una variable y, por tanto, la necesidad de reducir el intervalo muestral o el volumen elemental representativo. La división del espacio en unidades homogéneas con criterios edafogeográficos puede ser contrastada y validada mediante el análisis del CV (MARTINEZ FERNANDEZ, 1996). Al tratarse de un estadístico cuya aplicación es inmediata, es relativamente sencilla su obtención a partir de caracterizaciones edáficas rutinarias y bases de datos llevadas a cabo con fines taxonómicos o cartográficos.

El análisis geoestadístico

El estudio de la variabilidad de los suelos desde el enfoque de la estadística clásica, parte de la asunción de que las observaciones de una variable dada son independientes unas de otras, estén próximas o alejadas. Sin embargo, muchos trabajos llevados a cabo en las dos últimas décadas se han basado en la consideración de que las variaciones de una propiedad del suelo no siempre aparecen desordenadas en el campo y que una cierta estructura espacial debe tenerse en cuenta en el tratamiento de los datos (VAUCLIN et al. 1983). Este nuevo enfoque se ha abordado mediante el análisis geoestadístico. Se trata de una metodología basada en la Teoría de las Variables Regionalizadas, desarrollada en estudios relacionados con la minería en los años 60, que ha ido extendiéndose paulatinamente a otros campos de las Ciencias de la Tierra. Incluso hay quien estima que se ha adaptado mejor al estudio del suelo que al de la explotación mineral, para la que fue desarrollada (WEBSTER, 1994). El análisis geoestadístico ha

sido muy útil al proporcionar un adecuado marco teórico para el estudio de la variabilidad espacial, la interpolación, el análisis estructural y el diseño de esquemas óptimos de muestreo (BURROUGH et al. 1994).

Una variable distribuida en el espacio de forma que presenta una estructura espacial de correlación se dice que está regionalizada (SAMPER, CARRERA 1990). Dichas variables poseen dos características aparentemente contradictorias (JOURNEL, HUIJBREGTS 1989): un aspecto local, aleatorio, errático, que hace alusión a la noción de variable aleatoria, y otro aspecto general, estructurado, que requiere una cierta representación espacial. Un suelo presenta, con mucha frecuencia, características similares en lugares próximos, y las diferencias tienden a incrementarse cuando la distancia se hace mayor, incluso dentro de unidades bien definidas. Es decir, esas características están correlacionadas espacialmente (WEBSTER, 1994). Las propiedades de los suelos son consideradas, en este sentido, producto de variables aleatorias espacialmente correlacionadas o variables regionalizadas. La teoría asume que dichas variables son localmente estacionarias en la media y que tienen una varianza que depende solo de la separación. Esto viene expresado en la función denominada variograma (o semivariograma):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{VAR}[Z_{(x)} - Z_{(x+h)}]$$

donde $Z_{(x)}$ es una función aleatoria que representa la variable estudiada en el punto x , y h el intervalo de medida. Esta función puede estimarse mediante:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

donde $\gamma^*(h)$ es el semivariograma experimental, $z(x_i)$ son los valores en los puntos x_i , en los que se dispone de datos tanto en x_i como en x_i+h y $N(h)$ es el número de pares de puntos separados por la distancia h .

El semivariograma proporciona información sobre el grado de deterioro de la influencia de un dato respecto a otro, es decir, cuando desaparece la correlación entre dos puntos; regularidad, estructuración y errores de medida; direcciones particulares de variabilidad;

y periodicidades o superposiciones de estructuras de variación a escalas diferentes (CHICA OLMO, 1988). El semivariograma experimental, los modelos asociados y los parámetros que los definen, proporcionan la información necesaria para la aplicación de determinadas técnicas, como el *kriging*, para la estimación de una variable en puntos sin muestrear.

DISCUSION

Es muy importante la determinación previa de la ley de distribución de los datos, cuando se va a tratar la información en términos de valores medios para diferentes intervalos de confianza o de probabilidad de encontrar un valor inferior a un determinado límite. En la mayor parte de los casos, las variables edáficas van a seguir bien una ley normal o log-normal. La presencia de distribuciones bi o multimodales está asociada a la existencia de un suelo heterogéneo o bien es la evidencia de una anómala división del espacio o estratificación del muestreo.

| <i>Variables</i> | <i>Ley de distribución</i> | <i>Variabilidad</i> |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Densidad aparente | Normal | Baja |
| Materia orgánica | Normal | Media-Alta |
| Textura (tierra fina) | Normal | Media |
| Fracción gruesa | Normal | Media-Alta |
| Carbonato cálcico | Bi-modal | Media |
| Humedad a saturación | Normal | Baja |
| Capacidad de campo | Normal | Baja |
| Punto de marchitamiento | Normal | Baja |
| Conductividad hidráulica saturada | Log-normal | Alta |

Tabla 1. Ley de distribución y variabilidad espacial de algunas variables edáficas estudiadas en la cuenca de la Rambla de Perea (Murcia). La variabilidad espacial está expresada en términos de coeficiente de variación: baja (CV < 10%), media (CV 10-50%) y alta (CV > 50%).

En un estudio anterior (MARTINEZ FERNANDEZ, 1996), se comprobó que la mayor parte de un conjunto de variables analizadas presentaban una ley normal (Tabla 1). Únicamente la conductividad hidráulica saturada seguía una distribución log-normal. Se trata de una variable con una elevada y compleja variabilidad casi siempre, lo que dificulta enormemente su interpretación, hasta el punto que en lugares en los que su coeficiente de variación es reducido (BYERS, STEPHENS 1983), resulta difícil determinar si la ley de distribución es normal o log-normal. Algunas variables, como el contenido en carbonato cálcico (Tabla 1), pueden presentar una ley de distribución diferente. En este caso, la causa es de origen geomorfológico y edáfico. Dentro de una misma unidad homogénea se detectaron, por un lado, sectores de lavado de carbonatos

en localizaciones muy afectadas por la escorrentía superficial y, por otro, sectores de acumulación, en áreas de topografía favorable. Lo reducido de unos y otros hacía imposible su individualización a las escalas de trabajo utilizadas.

El coeficiente de variación de las variables edáficas dentro de unidades de suelo homogéneas es muy diverso según el tipo que se trate. Afortunadamente se dispone de abundante información referida a este estadístico, lo que ha permitido, incluso establecer tipologías de variables según su valor de CV. VAUCLIN (1983) propuso catalogar como baja variabilidad a aquellas variables edáficas con un valor de CV inferior al 10%, variabilidad media cuando estaba entre 10% y 50%, y variabilidad alta para las que tuvieran un valor superior al 50%.

Propiedades hídricas del suelo como los contenidos de humedad a saturación, capacidad de campo y punto de marchitamiento, o la densidad aparente tienen una baja variabilidad espacial (Tabla 1). Esto es característico de las propiedades denominadas estáticas (VAUCLIN, 1983). Este nivel bajo de variabilidad posibilita la caracterización de una unidad de suelo con un reducido número de mediciones, al tiempo que queda disminuido el grado de incertidumbre. Las fracciones texturales o el contenido en carbonato cálcico tienen una variabilidad media, lo que denota variaciones notables tanto laterales (ya aludidas en el caso del carbonato cálcico), como verticales en ambas variables. El contenido de materia orgánica y la fracción gruesa ($t > 2$ mm) aparecen catalogados con variabilidad media-alta, pues en ambos casos el coeficiente de variación es inferior al 50% en el caso de las unidades homogéneas delimitadas en el citado trabajo, mientras que a nivel global (cuenca) el valor es superior a dicho umbral. La mayor variabilidad en el caso de la materia orgánica está relacionada con la dinámica de la vegetación y la microbiológica del suelo. Factores como los usos del suelo, fenología, producción de hojarasca, descomposición de la materia orgánica o distribución de la biomasa radicular (MARTINEZ FERNANDEZ et al. 1995), influyen decisivamente en dicha variabilidad. En el caso de la fracción gruesa la respuesta hay que buscarla en la litología, erosión hídrica, usos del suelo, etc.

La conductividad hidráulica saturada presenta siempre un análisis complejo. De las variables reseñadas es la única tipificada con una variabilidad alta a cualquier escala. Estaría dentro del grupo de las variables dinámicas (VAUCLIN, 1983). Casi siempre va a presentar valores de CV muy elevados, incluso por encima del 100%. Esto plantea problemas de diferente índole. Por un lado, la necesidad de contar con un elevadísimo

número de mediciones para alcanzar un cierto grado de fiabilidad, siendo esto muy oneroso en términos de tiempo y recursos. Por otro, el elevado nivel de incertidumbre en la interpretación del medio, a cualquiera de las escalas a las que se trabaje.

La relación entre variabilidad y escala de análisis permite caracterizar con rigor el comportamiento de una determinada propiedad. En la tabla 2 se da un ejemplo para las variables reseñadas y tres niveles de análisis espacial. Esta aproximación permite constatar cómo determinadas variables, caso de la densidad aparente, la textura o los contenidos de humedad del suelo, apenas experimentan variaciones de CV al pasar de nivel espacial, aunque sí suficientes como para evidenciar el incremento de complejidad que ocurre al pasar de un nivel a otro más amplio. Otras como la fracción textural gruesa o la conductividad hidráulica, sin embargo, tienen una variabilidad espacial muy alta a la escala más elemental. En el caso de la conductividad esto es especialmente acusado, ya que a nivel de perfil (1 m²) se alcanza un porcentaje muy elevado de la variabilidad global. MALLANTS et al. (1997) han encontrado resultados similares a un nivel de análisis espacial semejante, incluso con valores de CV más altos, al comparar la variación de la variabilidad en función del volumen de muestra recogida.

| <i>Variables</i> | <i>Perfil</i> | <i>Unidad</i> | <i>Cuenca</i> |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Densidad aparente | 3.4 - 10.5 | 3.7 - 7.9 | 9.9 |
| Materia orgánica | 25.0 - 39.6 | 39.7 - 48.1 | 84.4 |
| Carbonato cálcico | 2.1 - 17.3 | 4.2 - 36.2 | 44.7 |
| Fracción gruesa | 26.1 - 67.3 | 41.8 - 73.7 | 104.8 |
| Arena | 2.1 - 14.6 | 8.4 - 16.2 | 38.0 |
| Limo | 2.3 - 9.4 | 5.1 - 11.2 | 18.0 |
| Arcilla | 3.8 - 10.1 | 6.4 - 11.8 | 18.6 |
| Humedad a saturación | 2.4 - 6.1 | 3.5 - 7.3 | 14.2 |
| Capacidad de campo | 3.7 - 8.8 | 4.8 - 7.4 | 13.3 |
| P. marchitamiento | 6.4 - 10.9 | 6.2 - 9.0 | 18.2 |
| Conductividad hidráulica saturada | 51.2 - 89.1 | 75.6 - 106.8 | 157.4 |

Tabla 2. Coeficientes de variación (%) de diversas variables edáficas en tres niveles de análisis espacial: perfil (1 m²), unidad (5-27 km²), cuenca (56 km²). Cuenca de la Rambla de Perea (Murcia).

Este tipo de análisis permite verificar la bondad de la división del espacio o la estratificación del muestreo (MARTINEZ FERNANDEZ, 1996). Valores de CV más bajos en las unidades delimitadas que en el espacio en su conjunto, son un buen indicador de lo acertado de dicha delimitación. Se puede decir que el comportamiento del CV no es suficiente, pues hace falta un análisis estadístico más robusto, pero si necesario. Una metodología similar facultaría para abordar el estudio del denominado volumen representativo elemental (MALLANTS et al. 1997), definido como el más

pequeño dominio cuasi-homogéneo para el que una propiedad es invariable con respecto al tamaño de muestra.

El análisis del semivariograma puede ser interpretado para descubrir las características de la distribución de una variable regionalizada (BURGUESS, WEBSTER 1980). La interpretación se basa, fundamentalmente, en el alcance. Este informa sobre el tamaño de la zona de influencia, es decir, el área en la que los puntos están estadísticamente asociados. El tipo de modelo ajustado y sus características proporciona información sobre la estructura espacial de una variable dada. Los modelos de semivariograma más usuales son lineal, esférico, gaussiano, exponencial, logarítmico y cúbico (JOURNEL, HUIJBREGTS 1989).

En la figura 1 se muestran cuatro ejemplos de semivariogramas de otras tantas variables con comportamientos diferentes. Corresponden a un mismo perfil de suelo en el que se analizaron muestras cada 5 cm en vertical y 10 cm en horizontal, con una superficie aproximada de 1 m². La densidad aparente presenta un semivariograma de tipo esférico con un alcance de 60 cm, lo que da idea de una buena estructuración y correlación espacial en todo el perfil. Este comportamiento está relacionado con la tendencia a la compactación del perfil en profundidad, derivada de ciertas prácticas agrícolas.

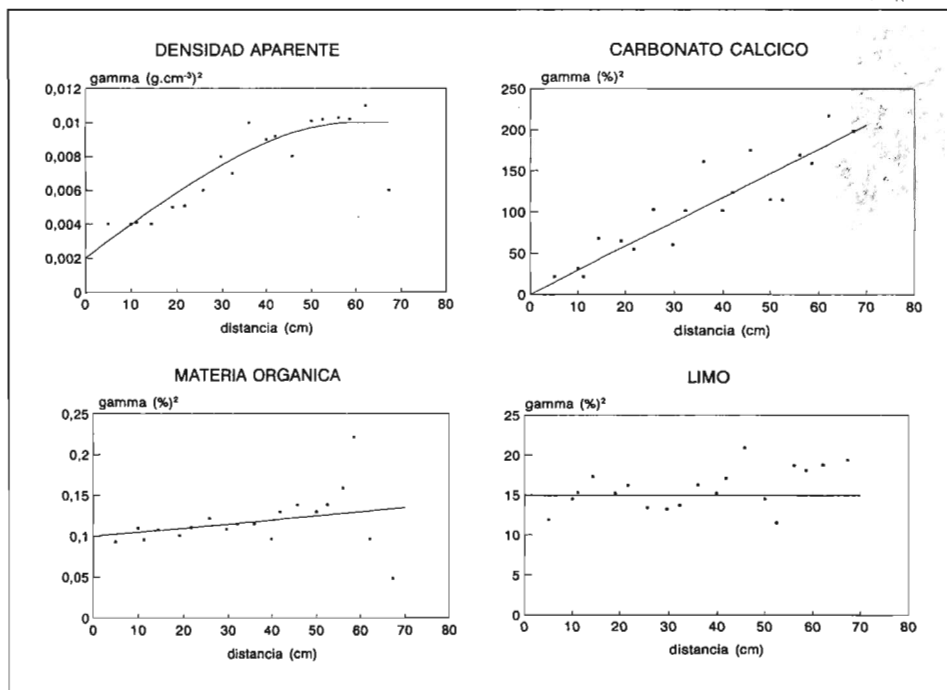


Figura 1. Semivariogramas experimentales y modelos ajustados de cuatro variables edáficas medidas en un perfil de *Xerosol cálcico* en El Ardal (Murcia).

Carbonato cálcico y materia orgánica tienen ajustado un modelo de tipo lineal, aunque con caracteres diferentes en cada caso. La primera evidencia cierta estructuración aunque poco definida, ya que este tipo de modelo no tiene un alcance concreto. Este atisbo de estructuración quizá esté relacionado con la dinámica migratoria vertical del CO_3Ca . El contenido de materia orgánica presenta un modelo similar pero con discontinuidad en el origen, es decir, $\hat{\gamma}(h)$ no tiende a cero cuando lo hace h . Es el denominado “efecto pepita” (*nugget effect*) (CHICA OLMO, 1988). Cuando esto ocurre, la variable muestra mayor irregularidad y la presencia, bien de estructuración a un nivel espacial más detallado que el intervalo de muestreo, bien de errores analíticos. El semivariograma parte ya de una elevada proporción de la varianza (80%) a muy corta distancia. La gran irregularidad de esta variable se debe a la enorme alteración en el contenido y distribución de la materia orgánica como consecuencia de las labores agrícolas en el suelo estudiado.

El semivariograma de la fracción textural limo es del tipo denominado de “efecto pepita puro” o aleatorio puro, característico de aquellas variables en donde la componente aleatoria es máxima. La varianza experimental se alcanza en los primeros intervalos y el resto de los puntos oscilan en torno a ese valor. Este comportamiento denota una ausencia total de estructuración.

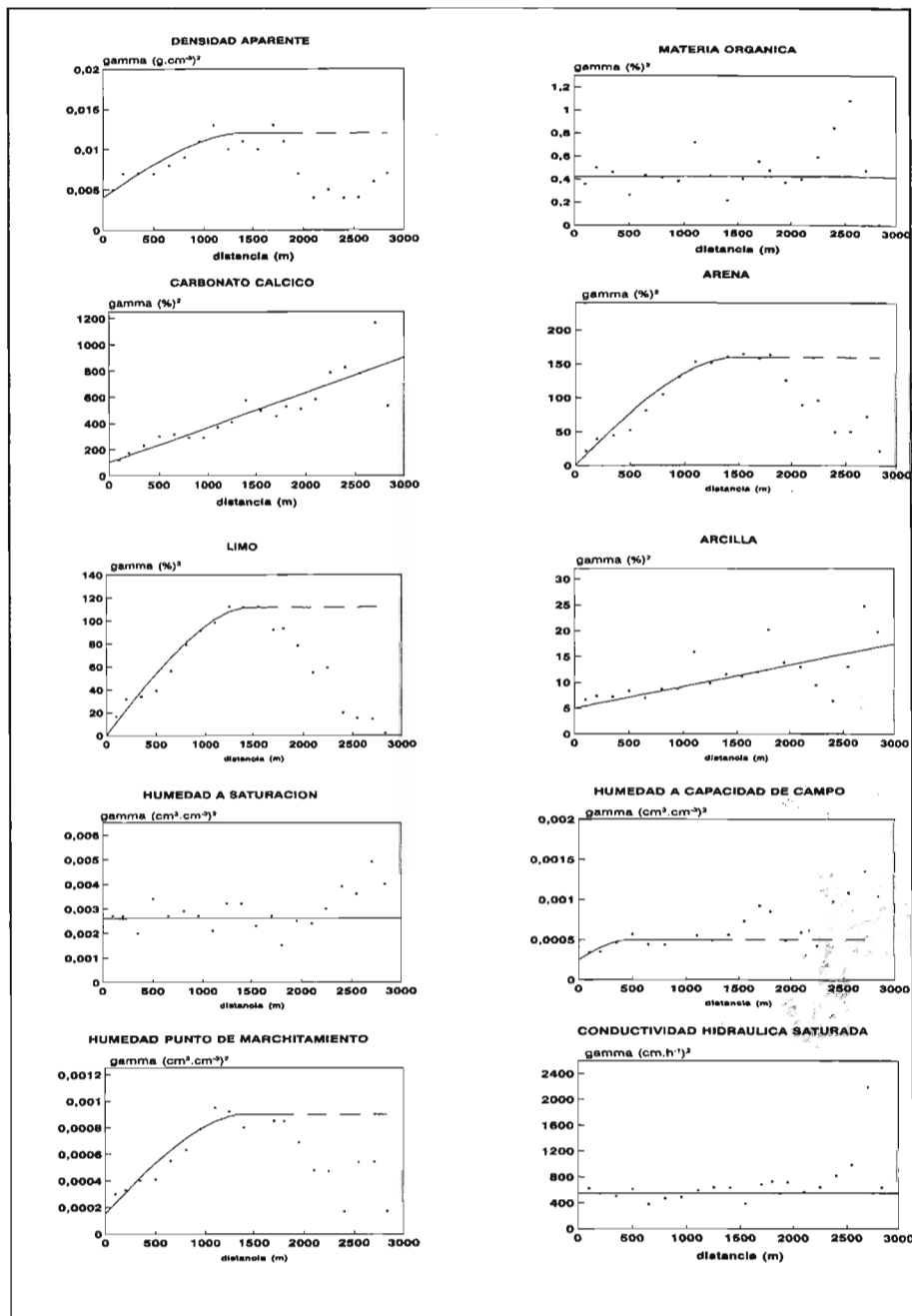


Figura 2. Semivariogramas experimentales y modelos ajustados de una serie de variables edáficas medidas en un transecto de 3 km en El Ardal (Murcia). El transecto es una técnica de muestreo muy útil para estudios de variabilidad espacial. En la figura 2 se muestran los semivariogramas de diez variables edáficas medidas en un trabajo anterior (MARTINEZ FERNANDEZ, 1996), a lo largo de un transecto de 3 km de longitud, en el que se analizaron muestras a intervalos de 100 m. En general, se

observa un paralelismo entre el grado de variabilidad, en términos de CV (Tablas 1 y 2), y el de estructuración espacial. Variables como la densidad aparente, fracciones texturales o humedad del suelo, tipificadas como de baja variabilidad, presentan un buen nivel de correlación espacial a lo largo del transecto. La única excepción es el contenido de humedad a saturación, con un semivariograma aleatorio puro. La respuesta puede estar en la enorme dependencia de esta variable con la macroporosidad del suelo. Esta última propiedad tiene una enorme variabilidad (MALLANTS et al. 1997), incluso para volúmenes de suelo reducidos.

VARIABLES COMO EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA O LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA, QUE SE CARACTERIZAN POR VALORES ALTOS DE VARIABILIDAD, TIENEN EN EL TRANSECTO UN SEMIVARIOGAMA ALEATORIO PURO. POR TANTO, LA ENORME IRREGULARIDAD QUE SE INTUÍA EN EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN SE CONFIRMA EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL. SE TRATA, PUES, DE DOS ENFOQUES COMPLEMENTARIOS Y NECESARIOS PARA UNA BUENA CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL.

LOS SEMIVARIOGRAMAS DE TIPO ESFÉRICO DE DENSIDAD APARENTE, ARENA, LIMO Y HUMEDAD EN EL PUNTO DE MARCHITAMIENTO (Fig. 2), MUESTRAN UN COMPORTAMIENTO PECULIAR. $\hat{\gamma}(h)$ AUMENTA HASTA UN DETERMINADO UMBRAL (DENOMINADO "MESETA"), EN EL QUE SE ESTABILIZA, APROXIMADAMENTE A 1500 m DE DISTANCIA, PARA VOLVER A DISMINUIR. ESTO SE DENOMINA "EFECTO AGUJERO" (SAMPER, CARRERA 1990) Y ES INDICATIVO DE COMPORTAMIENTOS PERIÓDICOS. EL TRANSECTO ESTUDIADO CORTA TRANSVERSALMENTE UN VALLE Y ESE COMPORTAMIENTO DEL SEMIVARIOGAMA PONE DE MANIFIESTO UNA SIMETRÍA EN AMBAS VERTIENTES EN LAS VARIABLES ANALIZADAS. PRUEBA DE ELLO ES, ASIMISMO, QUE EL ALCANCE SE SITUÁ A UNA DISTANCIA COINCIDENTE CON EL PUNTO INTERMEDIO DEL TRANSECTO.

CONCLUSION

LA UTILIZACIÓN CONJUNTA Y COMPLEMENTARIA DE ÚTILES ESTADÍSTICOS DE CORTE CLÁSICO, COMO LA LEY DE DISTRIBUCIÓN Y EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN, CON EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL A PARTIR DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS, CONDUCE A UNA VISIÓN BASTANTE PRECISA DEL COMPORTAMIENTO DE VARIABLES DISTRIBUIDAS ESPACIALMENTE. ESTE ENFOQUE PUEDE SER ÚTIL PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE UNA VARIABLE EN UN ESPACIO CONCRETO, LA VALIDACIÓN DE LA DIVISIÓN ESPACIAL Y LA OPTIMIZACIÓN DEL MUESTREO. EL ANÁLISIS DEL SEMIVARIOGAMA APORTA UNA VALIOSA INFORMACIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE UNA DETERMINADA VARIABLE, BIEN PARA ABUNDAR EN LA INTERPRETACIÓN DEL MEDIO, BIEN PARA COMPLETAR EL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL CON FINES CARTOGRÁFICOS, DE ESTIMACIÓN O MODELIZACIÓN.

REFERENCIAS

- BECKETT, P.H.T.; WEBSTER, R. (1971): Soil variability: a review. **Soils and Fertilizers**. 34. 1. pp. 1-15.
- BRIGGS, D.J.; SHISHIRA, E.K. (1985): Soil variability in geomorphologically defined survey units in the Albudeite area of Murcia province, Spain. **Catena Supplements**. 6. pp. 69-84.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. (1980): Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. **J. of Soil Science**. 31. pp. 315-331.
- BURROUGH, P.A. (1991): Sampling designs for quantifying map unit composition. In (M. Mausbach, L. Wilding Eds.) **Spatial variabilities of soils and landforms**. SSSA. Special Pub. 28. pp. 89-125.
- BURROUGH, P.A. (1993): Soil variability revisited. **Soils and Fertilizers**. 56. pp. 529-562.
- BURROUGH, P.A.; BOUMA, J.; YATES, S.R. (1994): The state of the art in pedometrics. **Geoderma**. 62. pp. 311-326.
- BYERS, E.; STEPHENS, D.B. (1983): Statistical and stochastic analysis of hydraulic conductivity and particle size in a fluvial sand. **Soil Science Society of America Journal**. 47. pp. 1072-1081.
- CHICA-OLMO, M. (1988): **Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales**. Serv. Pub. Universidad de Granada. 387 pp.
- FITZJOHN, C.; TERNAN, J.L.; WILLIAMS, A.G. (1998): Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. **Catena**. 32. pp. 55-70.
- GASCUEL-ODOUX, C. (1984): **Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol**. Thèse docteur ingénieur E.N.S.M.P. Paris-E.N.S.A. Rennes. 235 pp.
- HARRISON, J.B.J.; McFADDEN, L.D.; WELDON, R.J. (1990): Spatial soil variability in the Cajon Pass chronosequence: implications for the use of soils as a geochronological tool. **Geomorphology**. 3. pp. 399-416.
- JURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, Ch.J. (1989): **Mining Geostatistics**. Academic Press Ed. 600 pp.
- MALLANTS, D.; MOHANTY, B.P.; VERVOORT, A.; FEYEN, J. (1997): Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. **Soil Technology**. 10. pp. 115-131.
- MARTINEZ FERNANDEZ, J. (1996): **Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo**. Serv. Pub. Universidad de Murcia. 191 pp.
- MARTINEZ FERNANDEZ, J.; LOPEZ BERMUDEZ, F.; MARTINEZ FERNANDEZ, J.; ROMERO DIAZ, M.A. (1995): Land use and soil-vegetation relationships in a mediterranean ecosystem: El Ardal, Murcia (Spain). **Catena**. 25. pp. 153-167.
- MORAL, F.J.; GIRALDEZ, J.V. (1995): Influencia de la variabilidad del suelo en la hidrología superficial de una cuenca. **Ingeniería del Agua**. 2. pp. 51-60.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. (1973): Spatial variability of field-measured soil-water properties. **Hilgardia**. 42. pp. 215-260.
- SAMPER, F.J.; CARRERA, J. (1990): **Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea**. CIMNI. Univ. Pol. Barcelona. 484 pp.
- VAN DEN BROEK, M.; AMSTEL, A. van; VERBAKEL, A.; PEDROLI, B. (1981): Variability of soil properties in a landscape ecological survey in the Tuscan Apennines, Italy. **Catena**. 8. pp. 155-170.
- VAUCLIN, M. (1983): Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. **Les Colloques de l'INRA**. n° 15. pp. 9-43.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D.R. (1983): The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**. 47. pp. 175-184.
- WEBSTER, R. (1994): The development of pedometrics. **Geoderma**. 62. pp. 1-15.