

Cartografía de las propiedades generales del suelo a escala de cuenca

Mapping of some soil properties at catchment scale

ULLOA GUITIÁN, M.¹; TABOADA CASTRO, M. T.¹ y DAFONTE DAFONTE, J.²

ABSTRACT

The spatial structure of gravel content and three textural fractions (sand, silt, clay) was investigated in a 19.8 ha mixed, agricultural and forest catchment through of geostatistical techniques. Three different depths (0-15 cm, 15-30 cm and 30-45 cm) were sampled in order to describe the spatial variability from 0 to about 300 m. It was shown a spatial structure for all the studied variables, which could be described by different types of semivariograms (sphericals, exponentials an gaussians) with nugget effect component and a spatial component ranging from 3,5 to 365 m. Maps were performed using the information contained in the semivariograms by block kriging, so that contour maps were drawn for the different texture fractions and also showing the kriging errors. It was found greater spatial dependence of the studied variables in the first 15 cm than in the other depths.

Key words: geostatistical techniques, spatial structure, semivariogram, nugget effect, kriging.

¹ Fac. de Ciencias, Univ. de A Coruña. A Zapateira. 15071, A Coruña. España.

² EPS Lugo. Univ. de Santiago de Compostela. 27002 Lugo. España

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de un suelo depende frecuentemente de la fase sólida del suelo, constituida por una fracción mineral y otra orgánica; esta fase resulta una fuente de nutrientes para las plantas y supone además del orden del 50% del volumen del suelo, de ahí la importancia de su estudio. Los criterios cuantitativos para el estudio de la fracción mineral están basados en el análisis granulométrico que diferencia los elementos minerales del suelo según su tamaño. La distribución de las distintas fracciones en la cuenca depende en gran medida de la pendiente del terreno así como de la localización de la red de drenaje (ya sea permanente o efímera) lo que demuestra la importancia de la cartografía de mapas de alturas del terreno, gradiente de pendientes, red de drenaje, profundidad del perfil...

La agricultura de precisión que propone un uso sostenible del suelo (VOLZT, 1997) -es decir una producción óptima y un mínimo daño al medio ambiente- es posible hoy en día debido por un lado a los avances tecnológicos y por otro a la interpolación de los patrones espaciales de la características del suelo mediante métodos geoestadísticos y sistemas de información geográfica para obtener una cartografía de calidad. La clave fundamental de la agricultura de precisión es el mapa que muestre el patrón espacial de las propiedades del suelo. (MULLA, 1997).

La hipótesis de la independencia de los datos en la que se basa la Estadística Clásica (HARRADINE, 1949) no siempre se cumple, a veces las propiedades están autocorre-

lacionadas, es decir, presentan dependencia espacial; en ese caso hay que echar mano de herramientas como la Geoestadística. Por esta razón McBRATNEY & WEBSTER (1983) resaltan la importancia del conocimiento de la estructura espacial de las propiedades del suelo para la reducción del esfuerzo de muestreo, ya que los principios de la Estadística Clásica exige un mayor número de muestras.

La Geoestadística, basada en la idea de que medidas separadas a pequeñas distancias es más probable que se parezcan que aquellas más apartadas, nos permite el estudio de la variabilidad espacial (mediante la construcción y validación de semivariogramas experimentales) y además la estimación (a través del kriging) de valores de las propiedades a estudio en puntos de la cuenca no muestreados, así como la varianza de los errores estimación. La realización del análisis geoestadístico requiere una serie de consideraciones respecto a la toma de muestras en estudios tradicionales: es necesario recoger mayor número de muestras, los puntos de muestreo deben estar separados a diferentes distancias (para poder estudiar la variabilidad a distancias pequeñas y grandes) y se ha de conocer sus coordenadas geográficas.

El principal objetivo de este artículo es el estudio y cartografía de la distribución espacial de las gravas y de las fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla) de una cuenca de uso mixto: agrícola y forestal.

MATERIAL Y MÉTODOS

La cuenca de estudio está localizada en Seixas en el ayuntamiento de Taboada

(Lugo). En la figura 1 se puede ver un mapa de la misma.

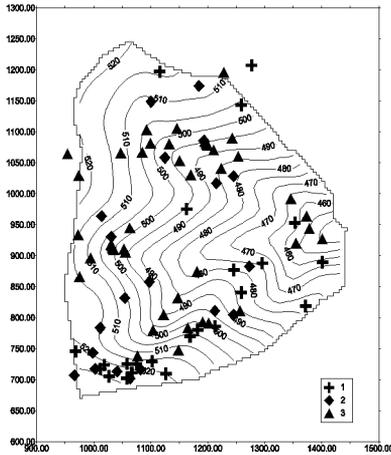


Fig. 1.- Mapa de la cuenca con las curvas de nivel y los puntos de muestreo (1: toma de muestras en el nivel 0-15 cm; 2: en el nivel 0-15 y 15-30; 3: en el nivel 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm).

En esta cuenca experimental también se han llevado a cabo estudios de erosión hídrica para lo cual se instaló una estación meteorológica, un pluviógrafo y una estación de aforo para la recogida de las aguas de escorrentía. La cuenca tiene una extensión de 19,8 ha, con 496 m de altura media y una pendiente media del 21,1%. Esta cuenca pertenece a una explotación ganadera con diversos usos del suelo (DAFONTE, 1998): pradera que ocupa un 46,89% de la superficie total, matorral (39,94%), arbolado (11,23%), terreno de cultivo (0,58%) y superficie impermeable constituida por una casa y un establo (1,36%).

El material geológico sobre el que están desarrollados los suelos son esquistos

pelíticos. Según la clasificación de la FAO-ISRIC (1994) se pueden reconocer Leptosoles en las zonas más altas y de mayor pendiente; Umbrisoles y Cambisoles en las zonas de vaguada; también se observaron Gleysoles en las zonas más bajas (en el cierre de la cuenca).

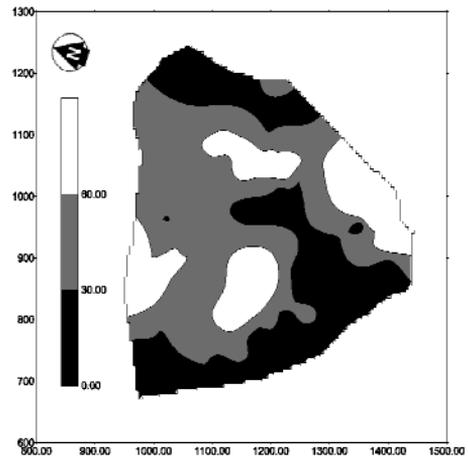


Fig. 2.- Mapa de profundidad de suelos (cm) de la cuenca.

La figura 2 muestra el diferente desarrollo en profundidad de los suelos de esta cuenca; debido a esto el estudio se realizó a 3 niveles (0-15cm, 15-30 cm, 30-45cm) según el espesor del suelo en cada punto de muestreo. Las coordenadas geográficas de cada punto se tomaron con una estación total (Sokkia Set 5A).

Las muestras se secaron al aire, se separaron las gravas de la tierra fina con un tamiz de 2mm; ésta posteriormente fue separada en 3 fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla) según los métodos descritos en GUITIÁN Y CARBALLAS (1976).

El análisis estadístico clásico, se llevó a cabo a través del cálculo de: media, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, máximo, mínimo, coeficiente de asimetría y curtosis para las cuatro fracciones en los tres niveles estudiados. También se estudió la correlación entre pares de fracciones y de éstas con la profundidad del suelo, la altura sobre el nivel del mar y la pendiente de la cuenca.

El análisis de la dependencia espacial se realizó mediante la geostatística (VIEIRA *et al.*, 1983; CARRERA and SAMPER, 1990), aceptando las hipótesis de estacionariedad de 2º orden y la de ergodicidad, y suponiendo la existencia de isotropía. Se utilizó como medida de esta dependencia la semivarianza que se estima como

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

Donde γ^* es el valor de la semivarianza muestral, $N(h)$ es el número de pares de puntos $Z(x_i)$ y $Z(x_i + h)$ separados por un vector h . Usando los modelos teóricos de semivariograma gaussiano, esférico y exponencial para el ajuste al semivariograma experimental, pudiéndose encontrar

más información sobre estos modelos en SAMPER & CARRERA (1990). Mediante el método del Jack-Knifing (VIEIRA *et al.*, 1983), que se basa en el cálculo de la pendiente y el coeficiente de correlación de la recta que relaciona los valores de la variable medidos y estimados, además este método también usa el valor de la media de los errores reducidos y la varianza de los mismos.

Para la obtención los mapas de estimación y de varianza del error de estimación de las distintas fracciones granulométricas, se empleó el krigeado ordinario en bloques de 5 x 5 m, utilizando el método de la cuadratura de Gauss mediante el programa GSTAT (PEBESMA, 1997), que permite además obtener los mapas de salida en formato PCRaster (PCRaster Environmental Software, 1997), que es un Sistema de Información Geográfico (SIG) tipo raster.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales momentos estadísticos calculados para las cuatro fracciones a estudio se presentan en la tabla 1.

	Un	N	Media	Var	C.V.	Min.	Max.	Asim.	Curt.
GRAVA-A	%	83	39,51	159,7	31,98	10,97	83,50	0,73	4,63
ARENA-A	%	89	34,07	49,96	20,74	14,91	52,51	-0,09	3,04
LIMO-A	%	89	47,90	44,2	13,88	32,73	67,87	0,51	3,59
ARCILLA-A	%	89	18,03	31,57	31,17	7,71	33,83	0,56	3,18
GRAVA-B	%	55	43,94	122,3	25,16	23,02	77,06	0,54	3,15
ARENA-B	%	66	36,84	69,19	22,58	19,69	69,60	0,91	5,15
LIMO-B	%	66	46,88	69,65	17,80	23,71	67,95	0,02	3,04
ARCILLA-B	%	66	16,28	22,12	28,89	6,42	27,95	0,23	2,62
GRAVA-C	%	41	45,99	161,5	27,63	20,09	86,07	0,46	3,69
ARENA-C	%	43	38,27	96,05	25,61	22,64	64,80	0,85	3,49
LIMO-C	%	43	45,49	81,37	19,83	25,70	62,40	-0,07	2,42
ARCILLA-C	%	43	16,26	32,72	35,20	7,53	30,75	0,46	2,46

Tabla 1.- Datos estadísticos para los 3 niveles muestreados A: 0-15 cm; B:15-30 cm y C:30-45 cm. (Un: unidad; N: número de muestras; Var.:varianza muestral; C.V.: coeficiente de variación; Min.: mínimo; Max.: máximo; Asim: coeficiente de asimetría; Curt.: curtosis.)

La proporción media de gravas en las muestras de suelo aumenta en profundidad y varía desde un 39,51% en el nivel 0-15cm, pasando por el 43,94% en el nivel 15-30 cm y hasta casi alcanzar la mitad de la muestra en el nivel 30-45 cm con un 45,99%; aunque hay muestras donde las gravas llegan a constituir el 80% del contenido y otras donde sólo hay un 10,97%. La mayoría de las muestras son de textura franca o franco-limosas. Las 3 fracciones granulométricas en las que se separó la tierra fina apenas varían en profundidad; pero mientras la arena al igual que ocurría con las gravas aumenta ligeramente con la profundidad el comportamiento del limo y la arcilla es el contrario, es decir, disminuye en profundidad. El contenido medio de arena varía entre 34-38% pero se encuentran diferencias de un 55% entre los valores máximos y mínimos. El limo es la fracción más abundante, estando su contenido medio en torno al 45%, pero se han detectado muestras con un 23% de esta fracción y otras que alcanzan un 68%. Por otro lado, la proporción media de arcilla en las muestras está en torno al 17% aunque hay muestras con cantidades de arcilla en torno al 7% y otras que contienen un 34%.

Los coeficientes de variación de las 3 fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla) oscilan entre 13,88-35,20%, pudiendo decirse por tanto, que presentan una variación media. El comportamiento de estos coeficiente es el mismo en todos los niveles estudiados, así se puede observar que crecen de la siguiente manera: limo < arena < arcilla; también se puede apreciar que mientras para la arena y el limo los coeficientes de variación son mayores en profundidad, para el caso de la arcilla el valor es menor en el nivel 15-30cm. En el caso de las gravas, los coeficientes de variación oscilan entre 25,16-31,98 %.

El coeficiente de asimetría y la curtosis indican la proximidad entre la distribución de frecuencias de los datos y la distribución normal cuyos valores son respectivamente, 0 y 3, por lo que puede considerarse que los datos tienen unos valores lo suficientemente aproximados a estos valores para considerarse normales.

En las tablas 2, 3, 4 se puede observar la matriz de correlación entre las fracciones y también su correlación respecto a la cota de altura, la pendiente y la profundidad del perfil para los 3 niveles

	Cota	Pte	Prof	GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA
Cota	1						
Pte	-0.298	1					
Profu	-0.213	-0.115	1				
GRAVA	0.118	-0.213	-0.133	1			
ARENA	0.265	-0.193	-0.173	0.159	1		
LIMO	0.072	-0.203	0.123	0.024	-0.666	1	
ARCILLA	-0.418	0.483	0.073	-0.223	-0.470	-0.346	1

Tabla 2.-Matriz de correlación para profundidad 0-15 cm (Pte: pendiente del terreno, Prof: profundidad del suelo).

	Cota	Pte	Prof	GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA
Cota	1						
Pte	-0.298	1					
Profu	-0.213	-0.115	1				
GRAVA	0.341	0.019	-0.544	1			
ARENA	0.087	-0.049	-0.057	-0.104	1		
LIMO	0.056	-0.188	0.090	0.114	-0.841	1	
ARCILLA	-0.254	0.421	-0.059	-0.038	-0.277	-0.288	1

Tabla 3.-Matriz de correlación para la profundidad 15-30 cm (Pte: pendiente del terreno, Prof: profundidad del suelo).

	Cota	Pte	Prof	GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA
Cota	1						
Pte	-0.298	1					
Profu	-0.213	-0.115	1				
GRAVA	0.252	0.150	-0.458	1			
ARENA	0.028	0.067	-0.470	0.325	1		
LIMO	0.177	-0.293	0.288	-0.212	-0.817	1	
ARCILLA	-0.325	0.346	0.351	-0.247	-0.423	-0.177	1

Tabla 4.-Matriz de correlación para la profundidad 30-45 cm (Pte: pendiente del terreno, Prof: profundidad del suelo).

En el nivel 0-15 cm se observa una alta correlación negativa entre la cota y la arcilla (-0,418), es decir, cuanto más alto esté el punto de muestreo menor cantidad de arcilla se encontrará en la muestra, es lógico porque la arcilla tiende a ser transportada hacia las zonas más altas de la cuenca en caso de producirse escorrentía ya que es la fracción más ligera y por tanto, la última que se sedimenta; una correlación de la misma intensidad pero positiva (0,483) entre pendiente y arcilla, esto no se entiende muy bien porque a más pendiente tendría que haber menos contenido en arcilla, pero podría ser debido a que el cálculo de la pendiente se realizó a partir de un modelo de elevación digital de tamaño de celda 5x5 m usando SIG PC-Raster, por lo cual no se

conoce la pendiente justo en el punto de muestreo, sino la pendiente media de un área con la dimensión de la celda. También se observa una correlación negativa alta entre el limo y la arena (-0,666) que aumenta hasta un -0,8 en las otras dos profundidades estudiadas, lógico porque donde hay mayor proporción de arena tiene que haber menor proporción de limo y arcilla.

En el nivel 15-30 cm se observa una alta correlación negativa (-0,544) entre la profundidad del suelo y contenido en grava, es decir, cuanto más profundo sea el suelo menor cantidad de gravas tendrá porque el suelo estará más evolucionado y por tanto tendrá mayor cantidad de fracción fina de suelo que si el espesor del mismo fuera menor.

En el nivel 30-45 cm se vuelve a encontrar una alta correlación negativa entre la cota y el contenido de arcilla (-0,323) como ocurría en el nivel superficial y al igual que en el nivel 15-30 cm se encuentra una correlación negativa entre profundidad y gravas.

Se calcularon semivariogramas experimentales para las 4 características y los 3

niveles de muestreo y se ajustaron funciones teóricas mediante el método del jackknifing. En la tabla 4 se pueden observar los distintos parámetros (C_0 , C_1 , a) para cada modelo seleccionado, en ella también se indica el número óptimo de vecinos que posteriormente se utilizará en el krigado.

	Mod	C_0	C_1	$C_0^*(\%)$	a(m)	v
GRAVA-A	Exp	2	36,80	1	40	28
ARENA-A	Gau	36,80	18,58	73,6	365,2	8
LIMO-A	Exp	1	48	2,2	25	28
ARCILLA-A	Esf	18,27	14,54	57,8	284,1	16
GRAVA-B	Gau	36	102	29,4	199,1	4
ARENA-B	Exp	32,54	37,31	47	26,1	28
LIMO-B	Exp	0,01	68,79	0	3,5	32
ARCILLA-B	Esf	10	12	44,5	35	32
GRAVA-C	Exp	39	139	24,1	82	28
ARENA-C	Gau	74,62	28,02	77,7	200,7	24
LIMO-C	Esf	62,76	21,90	77,1	133,7	8
ARCILLA-C	Exp	24,2	6,89	73,9	68,9	20

Tabla 5.- Modelos de semivariograma ajustados (Esf: esférico; Exp: exponencial; Gau: gaussiano) con los parámetros (C_0 : efecto pepita; C_1+C_0 : meseta; C_0^* : efecto pepita respecto de la varianza total; a: alcance; v: número óptimo de vecinos que posteriormente se utilizará en el krigado).

El análisis visual de los semivariogramas permite apreciar que la semivarianza aumenta con la distancia hasta valores del orden de la varianza muestral donde en general se observa una meseta más o menos estable. Se puede decir que la arena y la arcilla tarda más en estabilizarse mientras que, en el caso de la grava y el limo sus semivariogramas alcanzan pronto la estabilidad. En conjunto, a mayor profundidad menor es la estructura espacial, es decir, que en los horizontes superficiales hay una estructura espacial mayor (en general, los efectos pepita son menores);

también se puede observar que las gravas presentan una mayor estructura espacial que el resto de fracciones. La importancia del efecto pepita de los semivariogramas es variable desde casi inapreciable como en el caso de las gravas en el nivel 0-15 cm y del limo en el nivel 15-30 hasta del 70% del total de la meseta en el caso de las 3 fracciones de la tierra fina en el nivel 30-45 cm. Como se puede ver en la tabla 5 los modelos ajustados fueron exponenciales, esféricos y gaussianos con alcances que oscilan entre 3,5-365,2 metros.

En la figura 3 se muestra a modo de ejemplo el semivariograma experimental para la arcilla en el nivel 0-15 cm y los dos modelos teóricos que se han probado a ajustar a él.

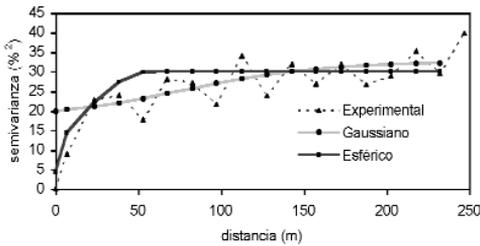


Fig. 3.-Semivariograma experimental y teóricos para la arcilla 0-15 cm.

Para la elección del modelo que mejor describe el semivariograma experimental,

como ya se dijo anteriormente, se utilizó la técnica del jack-knifing que relaciona el número de vecinos con el coeficiente angular, el coeficiente de correlación, la media de los errores reducidos y la varianza de los errores reducidos y que según VIEIRA et al. (1983) la función teórica que más se acerque a 1,1,0 y 1 respectivamente será la elegida. Esta técnica también nos permite elegir el número óptimo de vecinos para realizar posteriormente el krigeado. En la figura 4 se muestra el jack-knifing para el contenido en gravas del nivel 0-15 cm y según este criterio el modelo que mejor se ajusta al semivariograma experimental es el esférico.

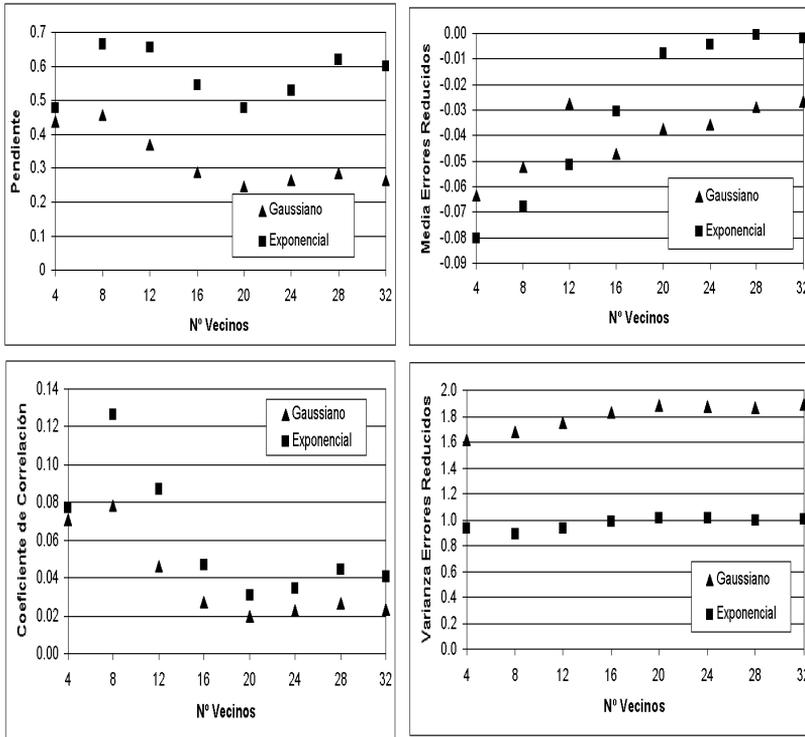


Fig. 4.-Resultados del jack-knifing de los semivariogramas exponencial y gaussiano del contenido en gravas del nivel 0-15 cm.

A continuación se mostrarán unos ejemplos de los mapas de estimación y varianza del error de estimación de algunas de las variables estudiadas.

En el mapa de estimación del contenido en gravas en el nivel 0-15 cm (fig. 5) se puede observar que el contenido en gravas es mayor en las terrenos de monte (con matorral) que corresponde con las zonas donde el suelo está menos desarrollado y hay algún afloramiento rocoso. El contenido estimado de arena (fig. 6) en el mismo nivel es mayor hacia la zona alta de la cuenca (en torno al 35-40%).

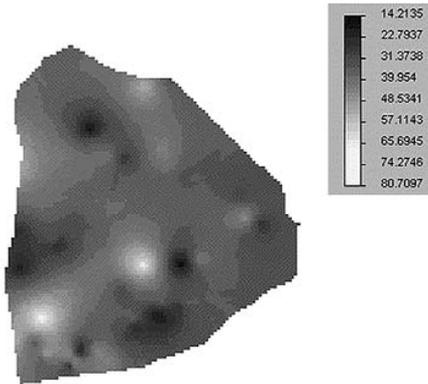


Fig. 5.-Mapa de estimación para el contenido en gravas en el nivel 0-15 cm.

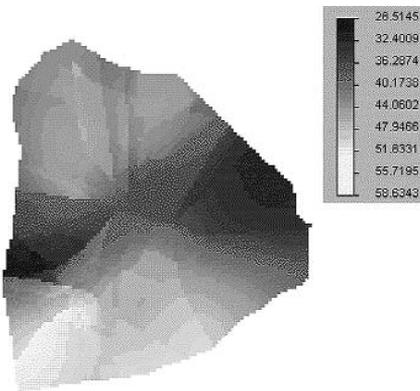


Fig. 6.-Mapa de estimación para el contenido en arena en el nivel 0-15 cm.

Comparando los dos mapas (fig. 5 y 6) se puede denotar que la estimación hecha con más vecinos, como es el caso de las gravas donde se usaron 28, es más suave y gradual que si la estimación se realiza con pocos vecinos como es el caso de la arena en que se utilizaron 8 y resulta una estimación más abrupta.

Como ya se dijo anteriormente, el krigado nos permite conocer la varianza del error de la estimación; en las figuras 7 y 8 se puede observar un ejemplo de este tipo de mapas para el contenido en arena y limo en el nivel 0-15 cm respectivamente. La varianza del error de estimación para la arena es muy baja en toda la cuenca, sus valores más altos están localizados en la zona nordeste de la misma, donde hay menos puntos de muestreo (casi inapreciable en este mapa). Mientras que en la figura 8 se puede observar que en el caso del limo, la varianza de los errores de krigado es baja (1,9%) en torno a los puntos de muestreo pero a medida que nos alejamos de ellos aumenta considerablemente hasta un 48% en la mayoría de la superficie de la cuenca. Este comportamiento distinto depende del alcance del modelo elegido para la realización de la estimación, los modelos con gran alcance como es el caso de la arena en el nivel 0-15 cm dan una varianza del error de estimación pequeña mientras que los modelos donde el alcance es pequeño producen una varianza de los errores de estimación muy alta como ocurre con el contenido en limo en ese mismo nivel.

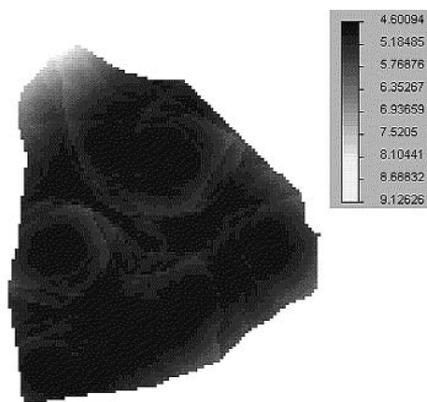


Fig. 7.- Mapa de varianza de los errores de krigado para el contenido en arena en el nivel 0-15 cm.

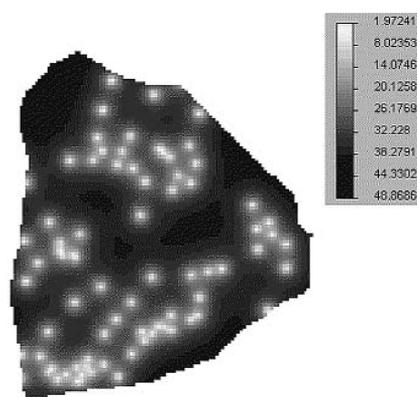


Fig. 8.- Mapa de varianza de los errores de krigado para el contenido en limo en el nivel 0-15 cm.

CONCLUSIONES

Este estudio permitió comprobar que todas las fracciones en los 3 niveles estudiados presentaban estructura espacial a escala de cuenca siendo más importante en el nivel 0-15 cm, ajustándose diversos modelos (esférico, exponencial, gaussiano) con efectos pepita que varían desde 0 al 77% del total de la varianza y con un alcance que va desde 3-365m.

Cabe destacar la variación de la estimación según el número de vecinos usados en el krigado y también la varianza del error de estimación según la magnitud del alcance.

Para la posible explicación de los mapas de estimación de los contenidos de las diferentes fracciones es importante el conocimiento de los mapas de pendientes y altura. Estos mapas de estimación obtenidos son útiles para su aplicación en la agricultura de precisión.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en el marco de los proyectos HID-1085-CO2 financiado por CICYT y XUGA 10306B97 financiado por la Xunta de Galicia.

BIBLIOGRAFÍA

- DAFONTE DAFONTE, J. (1998). *Procesos hidrológicos superficiales en cuencas agrícolas*. Tesis Doctoral, Escola Politécnica Superior, Universidade de Santiago de Compostela, 238 pp.
- FAO-ISRIC, (1994). *World Reference Base for Soil Resources*, Wageningen / Roma, 161pp.
- GUITIÁN, F. CARBALLAS, T. (1976). *Técnicas de análisis de suelos*, Editorial Pico sacro, Santiago de Compostela, 188 pp.
- HARRADINE, F. F. (1949). The variability of soil properties in relation to stage of profile development, *Soil Science Society of American Proceedings*, 14:302-311.
- McBRATEY, A. and WEBSTER, R. (1983). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. *Journal of Soil Science*, 34: 137-162.
- MULLA, D. J. (1997). Geostatistics, remote sensing and precision farming, In: *Precision Agriculture: spatial and temporal variability of environmental quality*, Wiley Chichester (Ciba foundation Symposium 210) p100-115.
- PCRASTER ENVIRONMENTAL SOFTWARE (1997). *PCRaster Version 2*. Department of Physical Geography. Utrecht University. Utrecht. 368 pp.
- PEBESMA, E. J. (1997). *Gstat User's manual V2.0*. ICG Faculty of Environmental Sciences. University of Amsterdam. 81 pp.
- SAMPER, F.J. and CARRERA, J. (1990). *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. 484pp.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D. R. and BIGGAR, J.W. (1983). Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51(3):1-75.
- VOLZT, M. 1997. Spatial variability of soil moisture regimes at different scales In: *Precision Agriculture: spatial and temporal variability of environmental quality*, Wiley Chichester (Ciba foundation Symposium 210) p18-30.