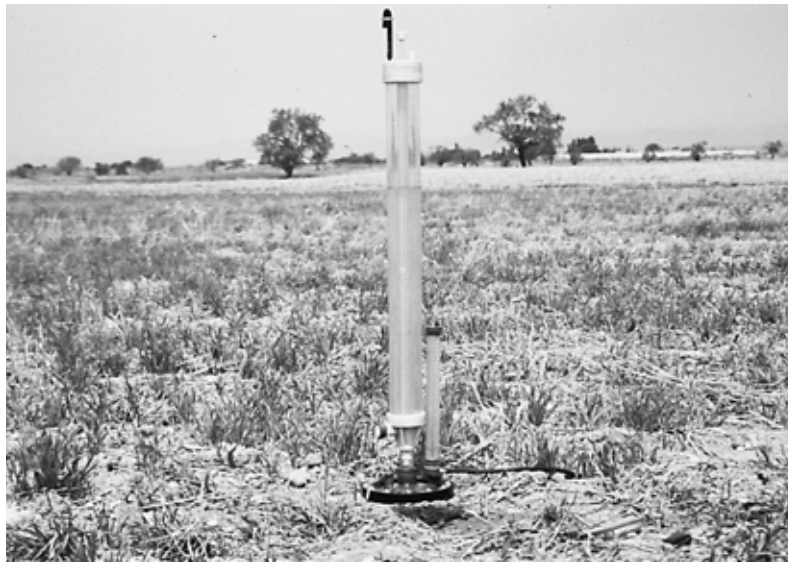


ESTRATEGIAS DE MUESTREO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO EN DOS UNIDADES CARTOGRÁFICAS

Efrain Acuña¹ y Rosa M. Poch².

¹ Departamento de Gestión Ambiental, Universidad Nacional Agraria, UNA Managua, Nicaragua Tel: 2331501, 2331146.

² Universidad de Leida (España)



RESUMEN

Cuando se usan los mapas de suelos para estimar las propiedades hidráulicas del suelo, éstos presentan diversas limitaciones debidas a varios factores, entre los cuales podemos citar, la falta de información a cerca de su variabilidad espacial a escala detallada (finca). En estos casos se hace necesario el muestreo adicional de estas propiedades para obtener una mejor estimación de su variabilidad espacial de cara la planificación y ejecución del riego. Con el objetivo de conocer los requerimientos de muestreo de la conductividad hidráulica saturada y la sorptividad (el horizonte A_p y sobre la superficie del suelo) fueron muestreadas dos unidades cartográficas de suelos a escala 1:25000 del área de influencia del canal Segarra-Garrigues, en Cataluña (NE de España) a través de un muestreo anidado. Los semivariogramas muestran un patrón de variabilidad acorde al tamaño modal de las fincas del área (a nivel de serie) con manejo homogéneo de la superficie del suelo. La sorptividad es la propiedad menos afectada por este factor (manejo del suelo). La distancia optima de muestreo y el número de muestras necesarias para obtener un buen resultado en la estimación de la K_s en el horizonte A_p es impracticable en ambas unidades. Para el resto de las propiedades la distancia de muestreo está dentro del tamaño modal de las fincas (100 m). Únicamente se puede obtener una buena estimación de la K_s y la sorptividad en el orden de magnitud del logaritmo de los datos obtenidos con un número de muestras considerablemente baja.

ABSTRACT

Soil maps, when used for the estimation of hydrological properties, present some limitations due to several factors, being one of them the lack information about their variability at field scale. In these cases additional field work is necessary in order to obtain good estimates of these properties for irrigation and land planing purposes. With the objective of knowing these sampling requirements, hydraulic conductivity and sorptivity measurements (A_p and soil surface) were done in two soil units of a 1:25000 soil map of the area affected by the Segarra-Garrigues channel in Catalonia, (NE Spain) following a nested sampling design. The semivariograms show variability patterns within the modal field sizes, with homogeneous management practices. Sorptivity is the property least influenced by this factor. The optimal sampling distances obtained from the variograms and the necessary number of replications is not practical for the estimation of the A_p horizons in both units. For the rest of the properties, the sampling distance is mostly within the field sizes (100 m). Good estimates of the order of magnitude of surface K_s ($\ln K_s$), and of actual sorptivity values are possible to obtain with limited number of replications.

El uso de los mapas de suelos para la planificación del uso de la tierra y en particular para la planificación de tierras para riego está enmarcado en una serie de limitaciones derivadas de la escala de los mapas, de la calidad de la información a cerca de las propiedades físicas y de la variabilidad espacial de éstas propiedades dentro de las unidades de los mapas de suelos. La determinación de las propiedades relevantes para la planificación del riego como la conductividad hidráulica, la sorptividad o la infiltración puede ser hecha a través de modelos como las funciones de edafotransferencia, aunque su variabilidad dependa de la escala de aplicación y del patrón de variación de las propiedades usadas. El nivel de detalle más útil para ser usado con estos propósitos es a nivel de semi detalle o a escala detallada de los mapas de suelo, donde los suelos representados en cada unidad corresponden con el nivel de serie o consociaciones de suelos.

La variación espacial de las propiedades depende de manera individual de las buenas delimitaciones de las unidades (variación natural de la propiedad) y de la variación espacial inducida por el manejo en otras propiedades (Cook y Coles, 1997).

La generalización de estas propiedades en las unidades de suelos requiere del conocimiento de su patrón espacial, el cual puede ser determinado a través de métodos geoestadísticos. Los resultados permiten determinar la distancia óptima de muestreo y la dependencia espacial de la variables, la influencia de las fuentes de variación y/o la relación entre éstas (Goovarrets, 1998).

En Cataluña las áreas nuevas de riego como las del área de influencia del canal Segarra – Garrigues, con más de 80,000 ha, han sido cartografiadas a escala 1:25000, con el objetivo de evaluar suelos con fines de riego (DARP, 1997). Aunque los mapas de suelos resultantes han sido usados satisfactoriamente para la planificación de las tierras con fines de riego en el ámbito general, su uso para la implementación del riego a escala de finca presenta demasiadas imprecisiones por lo que es necesario el muestreo a escala más de tallada de las propiedades hidráulicas del suelo dentro de las unidades de suelos (series). Por lo cual el objetivo de este estudio es determinar la estrategia de muestreo para la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo, conductividad hidráulica saturada, sorptividad e infiltración a escala de finca, en dos unidades de series representativas del área de influencia del canal Segarra-Garrigues, usando métodos geoestadísticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de actuación del canal Segarra-Garrigues se encuentra en el sector oriental de la Cuenca del Ebro, noroeste de España (Figura 1). El clima del área es. El promedio anual de la precipitación y de la evapotranspiración potencial es de 380 mm y 1100 mm respectivamente, y la temperatura media anual es de 13.4°C. El régimen de humedad y temperatura del suelo es xérico y méxico respectivamente. Los materiales geológicos que dan origen a los suelos son rocas sedimentarias del terciario de origen fluvio-lacustres, incluyen areniscas, margas, limolitas, y yeso (Herreo *et al.*, 1993). El relieve varía de plano a escarpado, el uso actual de la tierra es de cultivos extensivos de cereal y de frutos secos de secano.

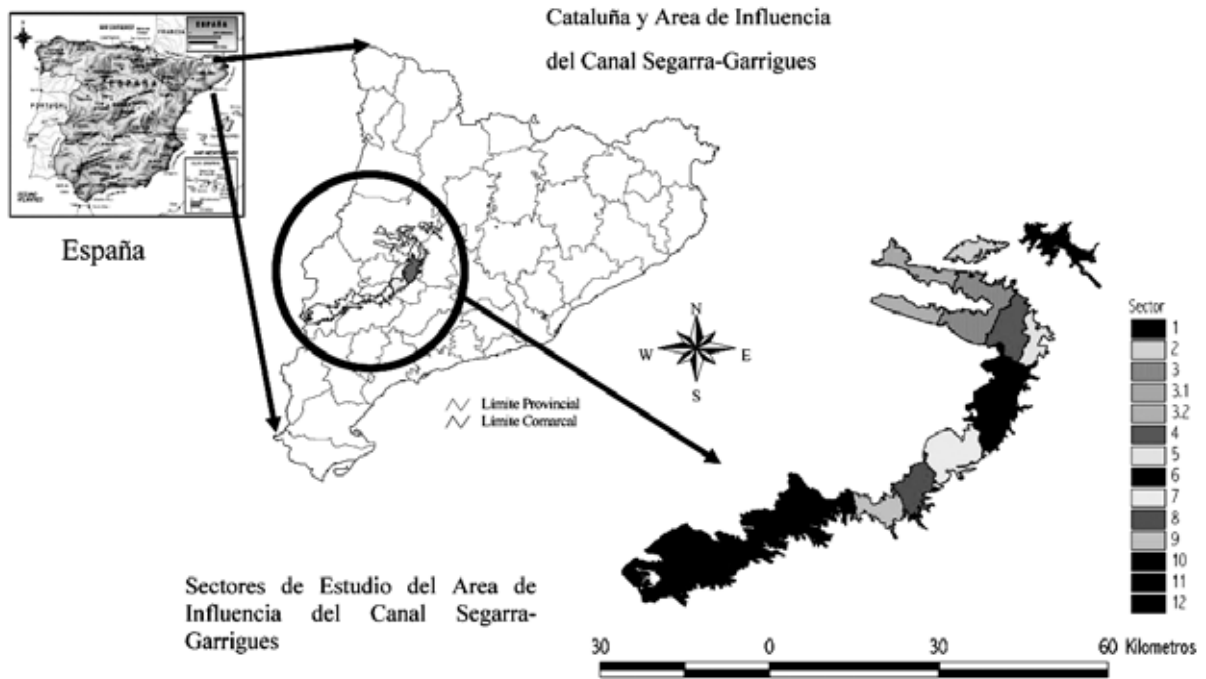


Figura 1. Situación actual del área de estudio

Dos unidades de suelos, de dos series representativas fueron seleccionadas del mapa a escala 1:25000 del área de actuación del canal Segarra-Garrigues (DARP, 1997). Estas áreas son consociaciones de suelos en las cuales está la serie de suelos Comelles (Typic xerofluvent, franco arcillo limoso fino, mezclado, méxico, SSS, 1999) y la serie de suelos Seana (Xeric petrocálcid, franco, mezclado, méxico, superficial, SSS, 1999), estas series son representativas del área tanto por su extensión, potencial agrícola y su problemática particular (serie Seana).

La unidad de suelos seleccionada de la serie Comelles ocupa 757 ha, los suelos son muy profundos, bien drenados, de textura media a moderadamente fina (franco arcillo limoso) y con pocos o muy pocos elementos gruesos. Estos suelos se han desarrollado a partir de sedimentos detríticos terrígenos, están ubicados en los fondos de pendientes suaves (2-5%). Son suelos con poco desarrollo edáfico. La capacidad de retención de agua disponible (CRAD) es muy alta y la conductividad hidráulica saturada determinada con el método del auger-hole es moderada a moderadamente lenta ($K_s = 26.6 \text{ mm h}^{-1}$). Según la evaluación de tierras para riego (USBR) estos suelos se clasifican como clase 3 (3std, limitación por suelo, textura y drenaje); y clase 1 (suelo sin ninguna limitación).

La unidad de suelos seleccionada de la serie Seana ocupa un área de 843 ha, son suelos someros (superficiales), con drenaje rápido, de textura media y con frecuente a muy frecuentes elementos gruesos de caliza. Estos suelos se han desarrollado a partir de sedimentos detríticos terrígenos con gravas de caliza. Se ubican en superficies planas de abanicos aluviales y en plataformas residuales de pendientes muy suaves (<2%). Estos suelos presentan acumulación generalizada de carbonatos de calcio a poca profundidad (40 cm) y esta cementado en los primeros decímetros formando un horizonte petrocálcico difícilmente penetrable para las raíces.

Para esta serie, según la evaluación de tierras para riego (USBR), se clasifican como clases 3s (limitación por suelo), y 6s (limitación por suelo). El CRAD para esta serie es bajo.

Diseño de muestreo y análisis geoestadístico. Para el muestreo de campo de las propiedades hidráulicas del suelo se usó el diseño anidado (*nested sampling*) (Figura 2). Este diseño es adecuado cuando el patrón de variabilidad de las medidas no es conocido (Oliver y Webster, 1986). Consiste de un muestreo multiestratificado jerárquico, donde cada jerarquía o nivel representa una distancia entre observaciones (Webster y Oliver, 2000). Según Ovalles y Collins, (1988) un número de niveles adecuado es de cuatro, dado que es la cifra mínima que puede detectar los cambios consistentes en la pendiente del variograma que se genere. El análisis estima como cambia la varianza con la distancia. Un cambio abrupto de la varianza de un nivel a otro indica que la distancia menor ha resuelto la estructura o patrón no detectado por la distancia mayor y obtenemos la distancia óptima de muestreo.

El número requerido de muestras para estimar la media de una población para un nivel de precisión puede ser calculado de acuerdo a la expresión de Anderson y Cassel, (1986),

$$n = s^2 t_{\alpha/2}^2 / d^2$$

donde n es el número de muestras, $t_{\alpha/2}$ es el valor de t tabulada para un nivel de confianza α y los grados de libertad del muestreo inicial, s es la desviación estándar del muestreo inicial y d es la mitad del intervalo de

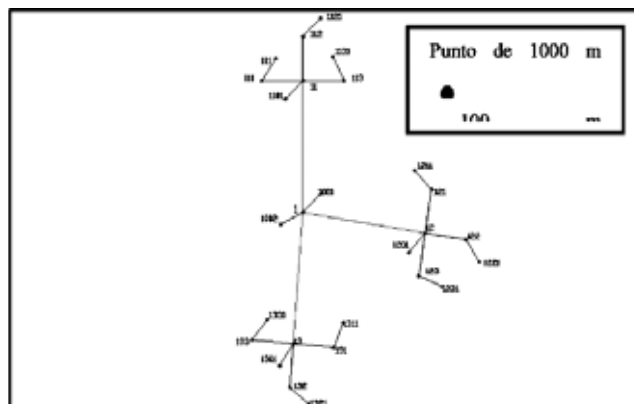


Figura 2. Esquema del muestreo anidado

confianza deseado. El nivel de confianza ($1-\alpha$), fue escogido 0.9. Este nivel de confianza se usó tanto para los datos enteros (asumiendo que tenían una distribución normal) así como para los transformados logarítmicamente (distribución log-normal).

Para el muestreo el área fue dividida en cuadrículas de 1000x1000 sobre un ortofotomapa escala 1:5000. Se eligieron un número de cuatro cuadrículas donde se ubicaron igual número de puntos (figura 2). Como se observa en la figura 2, a partir de un punto central (distancia de 1000 m), fueron ubicadas tres repeticiones en diferentes direcciones distanciados a 100 m, a partir de éstos fueron ubicados también 3 repeticiones a una distancia de 10 m y en el último nivel tres repeticiones distanciadas a un metro. Esto corresponde a cuatro niveles con un número de 54 muestras por transecto, para un número total de puntos de 108 por cada unidad en las dos series.

Los datos fueron procesados en GEO-EAS y SAS (v 8.1). Los semivariogramas experimentales fueron ajustados al semivariograma esférico, este modelo se ajusta bien a fenómenos continuos o a fenómenos con un número limitado de discontinuidades a diferentes escalas, tal como pasa con las propiedades del suelo.

Determinación de las propiedades hidráulicas del suelo.

En cada punto de muestreo fue determinada la conductividad hidráulica saturada en los primeros 20 cm de la superficie del suelo (horizonte A_p), con el permeámetro de Guelph a dos cargas hidráulicas (5 y 10 cm de columna de agua).

La conductividad hidráulica saturada y la sorptividad de la superficie del suelo fue medida con el infiltrómetro de disco usando el modelo de White y Sully, (1987). La medida de la infiltración en cada punto hasta alcanzar el flujo estacionario a dos tensiones, -100 mm y después en el mismo sitio a 0 mm de tensión. La sorptividad fue calculada de los primeros instantes de la infiltración a 0 mm de tensión usando la ecuación de Philip, (1969).

Los contenidos de humedad del suelo antes y después de los ensayos de infiltración fueron medidos con el uso de reflectometría de dominio temporal (Time Domain Reflectometry, TDR). Además para cada sitio de muestreo fueron anotadas las condiciones de la superficie del suelo, por ejemplo presencia de elementos gruesos, sellado, restos orgánicos y las labores agrícolas que se practican sobre la superficie.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características de los semivariogramas se muestran en la Tabla 1. Los semivariogramas teóricos fueron ajustados a los semivariogramas experimentales a través de la transformación logarítmica de las propiedades medidas, lo cual sugiere que este orden de magnitud es más apropiado que con los valores reales de las propiedades. Los rangos (distancias) son similares para todas las propiedades, dentro del tamaño modal de las fincas en el área de estudio. Esto recalca la importancia del manejo de los suelos, el cual es normalmente homogéneo dentro de un campo y en este caso dentro de una serie de suelos: la variabilidad espacial de las propiedades es dependiente del espacio dentro de los límites de la fuente de varia-

ción identificada en teste caso como es el manejo del suelo (Giménez, et al., 1999). Entre los campos (series de suelos), el patrón de variación espacial es demasiado complejo, hasta el punto de no encontrarse correlación espacial entre los puntos y las distancias muestreadas tal como fue reportado por Oliver y Webster (1986) de datos analizados provenientes de un muestreo anidado.

En la serie de suelos Comelles, las variables analizadas presentan una estructura espacial mas o menos definida, sus semivariogramas experimentales fueron ajustados al semivariograma esférico el cual ajusta mejor los datos a distancias relativamente cortas entre 200 y 400 metros aproximadamente (Figuras 3-5) y en la serie Seana las distancias de ajuste del

Tabla 1. Características de los variogramas de las propiedades hidráulicas del suelo para la serie Comelles y Seana.w

Serie de suelos	Variable	Meseta	Pepita	Rango (m)
Comelles	K _s (Ap*)	2.30	1.55	250
	K _s (superficie**)	0.17	0.125	400
	Sorptividad **	0.514	0.514	0.0
Seana	K _s (Ap*)	0.7	0.45	300
	K _s (superficie**)	26.06	16.06	300
	Sorptividad**	0.556	0.286	300

* permeámetro de Guelph; ** infiltrómetro de disco

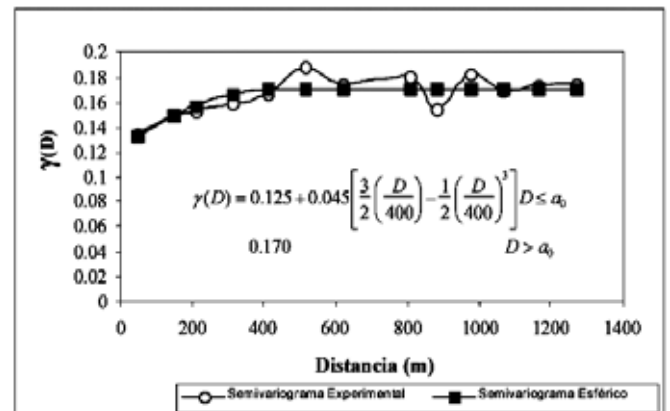
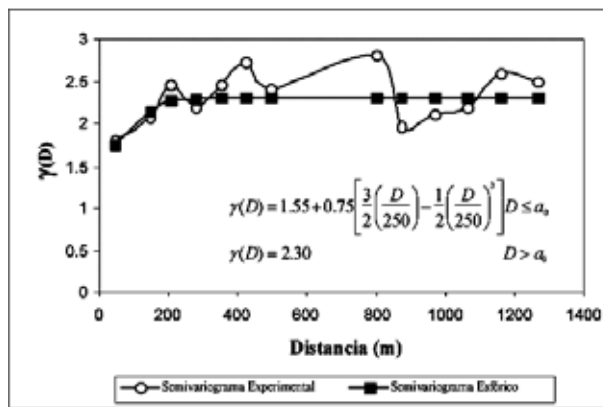


Figura 3 y 4. Semivariograma para LnK_s (horizonte Ap) en la serie de suelos Comelles y Semivariograma para LnK_s (superficie) con en la serie de suelos Comelles

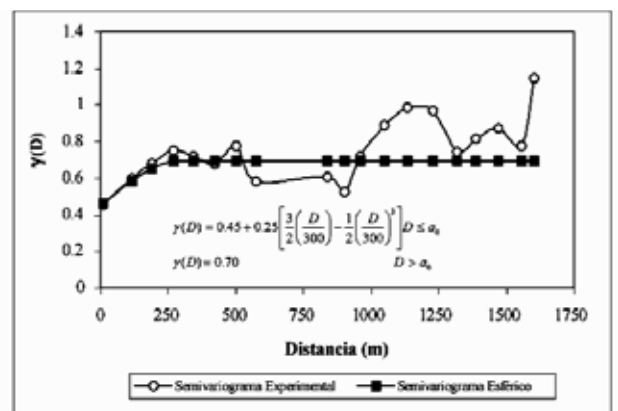
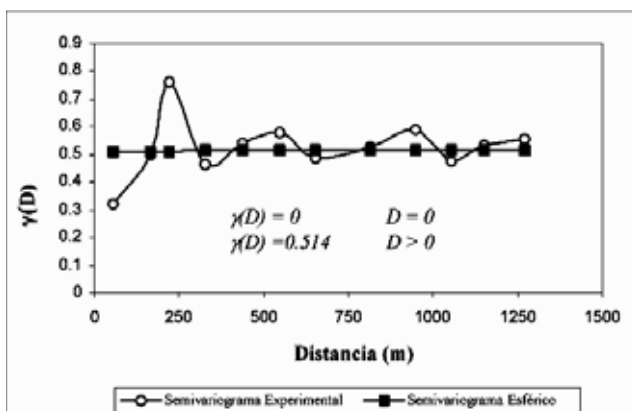


Figura 5 y 6. Semivariograma para Ln Sorptividad (superficie) con en la serie de suelos Comelles y Semivariograma para LnK_s (horizonte Ap) en la serie de suelos Seana

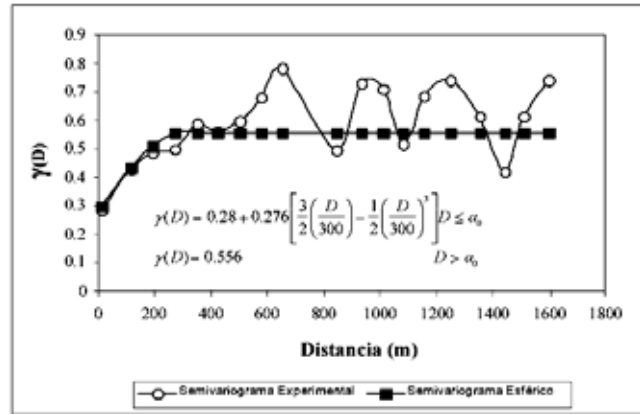
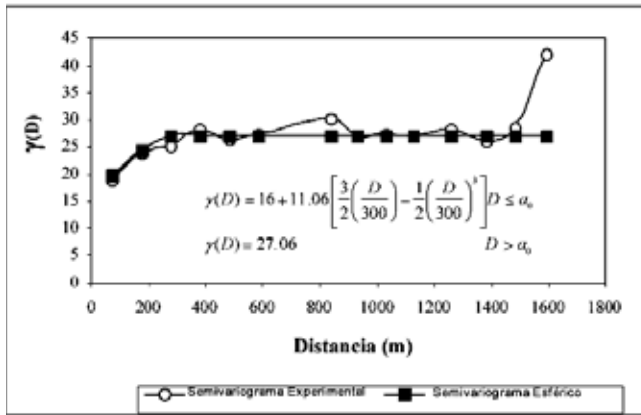


Figura 7 y 8. Semivariograma para K_s (superficie) en la serie de suelos Seana de datos del modelo de White y Sully y Semivariograma para la sorptividad (superficie) en la serie de suelos Seana

semivariograma esférico fue a distancias menores de 300 m (Figuras 6-8) los cuales corresponden con los rangos ajustados de los semivariogramas de la tabla 1. Aunque estas distancias son más cortas que la máxima distancia muestreada (1000 m) es posible que la variabilidad espacial a distancias cortas haya sido subestimada.

Los altos valores de pepita nos indican que una fracción de la varianza no ha sido detectada por el modelo, lo cual puede ser debido a errores de medida o la falta de medidas en las distancias más cortas de 1 metro. Lo cual es especialmente cierto para $\ln K_s$ del horizonte Ap medida con el permeámetro de Guelph.

En este caso estuvo influenciado de un buen desarrollo de la macroporosidad interpedal y de la presencia del pie de arado en la serie de suelos Comelles y la presencia del horizonte petrocálcico muy cerca superficie en la serie Seana,

quienes afectaron e hicieron más complejo y heterogéneo la penetración del bulbo de humedad e incrementaron la variabilidad espacial de las propiedades medidas a cortas distancias.

El análisis de los variogramas (figuras 9-14) permitió estimar las distancias óptimas de muestreo para las propiedades medidas tanto en el horizonte Ap como sobre la superficie del suelo (Ovalles y Collins, 1998), ver Tabla 2. Los variogramas muestran la relación entre la varianza del conjunto de medidas a cada distancia medida y la distancia de muestreo. El cambio de la varianza de una distancia (nivel de muestreo) a otra nos indica la distancia de muestreo más eficiente (distancia óptima de muestreo). En nuestro caso la distancia de 10 metros indica una alta variabilidad dentro de la serie de suelo, debido principalmente a las condiciones de la superficie del suelo en la serie de suelos Comelles y en la serie Seana fue de 100 metros exhibiendo menos variabilidad espacial.

Tabla 2. Requerimientos de muestreo para estimar la media de las variables hidráulicas del suelo en las series Comelles y Seana (al 10% de nivel de confianza).

Serie de Suelo	Variable	Media (mm h ⁻¹)	VC (%)	D O M (m)	No. de repeticiones ($\alpha=0.1$).	
					Datos sin transformar	Transformados a logaritmo
Comelles	K_s (Ap*)	56.5	129	10	112818	18
	K_s (superficie**)	14.7	30	10	293	2
	Sorptividad **	2.8	31	1000	9	1
Seana	K_s (Ap*)	105.6	54	100	48622	9
	K_s (superficie**)	23.3	18	100	217	1
	Sorptividad**	3.66	23	100	9	1

*permeámetro de Guelph; ** infiltrómetro de disco; VC coeficiente de variación; DOM distancia óptima de muestreo.

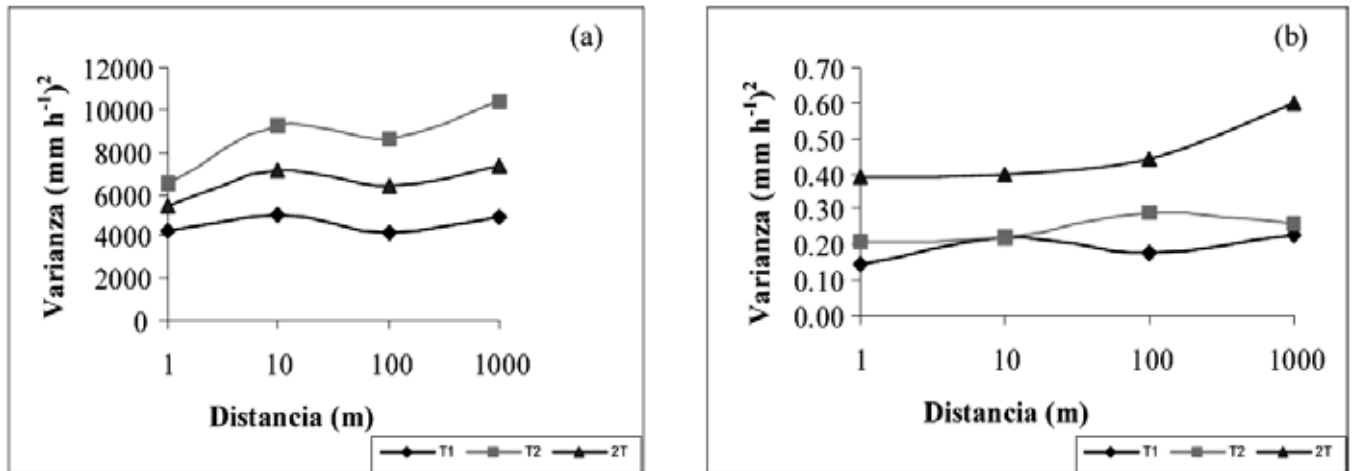


Figura 9. Variogramas de K_s en la serie Comelles con el permeámetro de Guelph, datos sin transformar al logaritmo natural (a) y transformados (b) (T1 y T2 transectos, 1 y 2; 2T todos los datos)

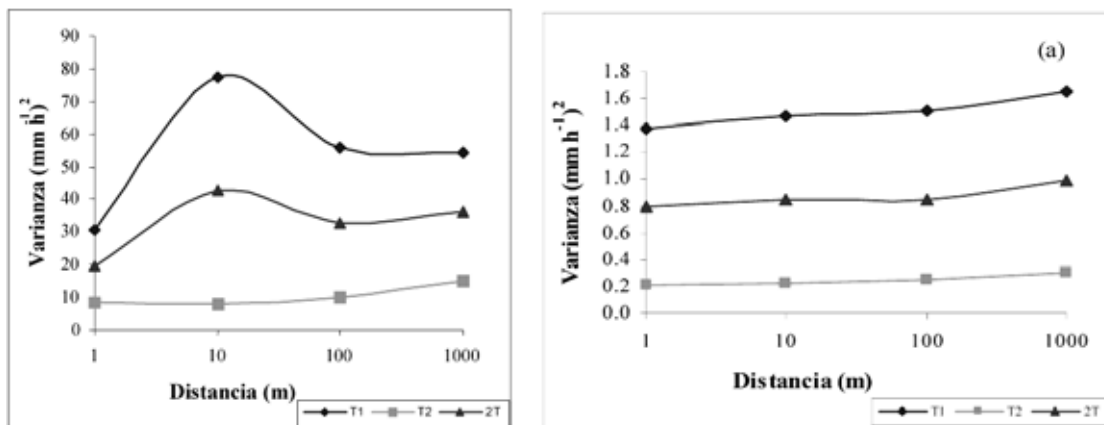


Figura 10 y 11. Variogramas para K_s en la superficie del suelo serie Comelles (T1 y T2 transectos, 1 y 2; 2T todos los datos) y Variogramas para la sorptividad en la superficie del suelo serie Comelles (T1 y T2 transectos, 1 y 2; 2T todos los datos).

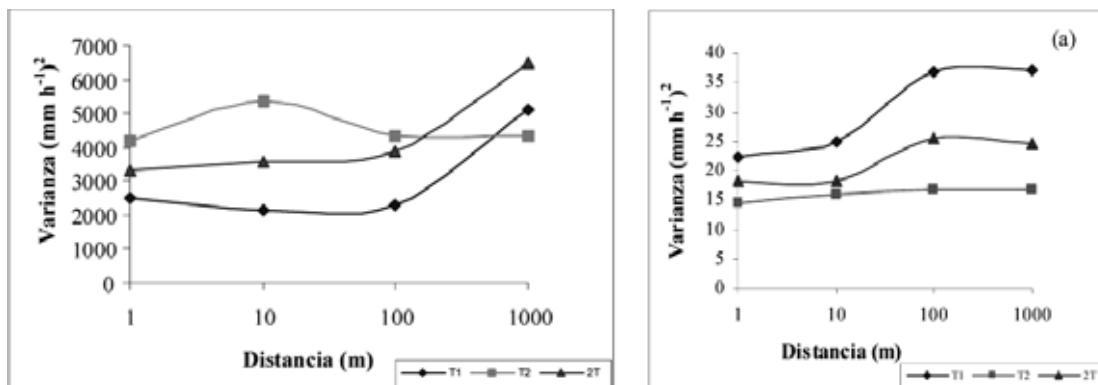


Figura 12 y 13. Variograma para K_s en el horizonte Ap en la serie Seana con datos del permeámetro de Guelph (T1 y T2, transectos 1 y 2; 2T todos los datos), y Variograma para K_s en la superficie del suelo en la serie Seana (T1 y T2, transectos 1 y 2; 2T todos los datos)

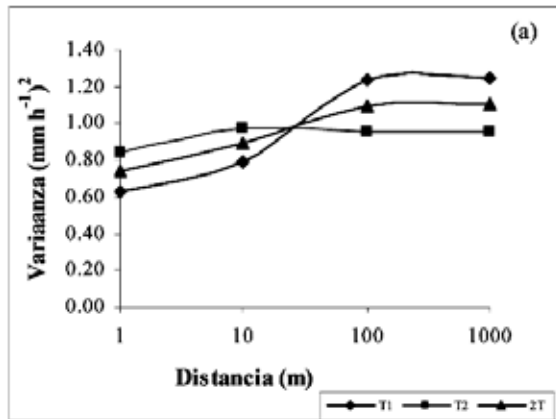


Figura 14. Variograma para la sorptividad en la superficie del suelo en la serie Seana (T1 y T2 transectos, 1 y 2; 2T todos los datos)

El número necesario de repeticiones fue calculado con los datos obtenidos y fue necesaria su transformación al logaritmo natural. De acuerdo a los resultados se puede obtener un número razonable de medidas para determinar la sorptividad del suelo. Esta propiedad depende más de la microporosidad determinada por la textura del suelo que más constante dentro

de la serie de suelos y no depende tanto como la K_s de las condiciones de la superficie del suelo y de la heterogeneidad debido a las labores agrícolas en la serie Comelles y de la presencia de elementos gruesos (pedregosidad superficial) en la serie Seana. Por el contrario la conductividad hidráulica y especialmente la K_s del horizonte Ap solamente puede ser estimado el número de muestras necesarias a través de la transformación logarítmica de los datos. Probablemente la macroporosidad debido las prácticas agrícolas, la presencia de piedras y el horizonte petrocálcico muy cerca de la superficie del suelo son los factores más determinantes para el flujo del agua en condiciones de suelos no saturados.

CONCLUSIONES

El patrón de variación de las propiedades hidráulicas del suelo depende fuertemente de la escala de campo y de la propiedad considerada, así como de la presencia de elementos gruesos, de capas impermeables y de las condiciones del manejo de la superficie del suelo. Las distancias de variación espacial encontrada para las propiedades medidas están acordes con el tamaño modal de las fincas del área. Algunas de las propiedades solo se pueden estimar los valores medios en el orden de magnitud del logaritmo para que sea aplicable en la planificación de tierras para riego.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANDERSON, S.H AND CASSEL, D.K.** 1986. Statistical and autoregressive analysis of soil properties of Portsmouth sandy loam. *Soil Science Society American Journal* 50: 1096-1104.
- COOK S.E AND COLES N.A.** 1997. A comparison of soil surveys methods in relation o catchment hydrology, *Australian Journal of Soil Research*, 35, 1379- 1395.
- DEPARTAMENT D'AGRICULTURA, RAMADERIA I PESCA (DARP)** 1997. Estudi detallat de sòls (1:25.000) de la zona a transformar en regadiu dominada pel canal Segarra-Garrigues. J. Boixadera & J.A. Rosell. Generalitat de Catalunya. España.
- GIMÉNEZ, D., RAWLS, W.J AND LAUREN, J.G.** 1999. Scaling properties of saturated hydraulic conductivity in soil, *Geoderma* 88, 205-220.
- GOOVAREST, P.** 1998. Geostatistical tools for characterising the spatial variability of microbiological and physic-chemical soil properties. *Biological Fertilizer Soils* 27, 315-334.
- HERRERO, C., VILLAR, J.M I BOIXADERA J.** 1993. Catàleg de sòls de Catalunya. Secció de sòls i fertilitzants. DARP. Generalitat de Catalunya.
- OLIVER, M.A AND WEBSTER, R.** 1986. Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables, *Geographic analysis* vol.18. No 3, 227-242.
- OVALLES, V.F AND COLLINS, M.E.** 1988. Evaluation of soil variability in Northwest Florida using geostatistics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1702-1708.
- PHILIP, J.R.** 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosc.*, 5:215-305.
- SOIL SURVEY STAFF.** 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA, Agriculture handbook, No. 436. USA. 6ª edición.
- WEBSTER, R Y OLIVER, M.** 2000. Geostatistics for environmental scientists. John Wiley & Son Ltd. England
- WHITE, I., SULLY, M.J.** 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resources Research* 23:1514-1522.