

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA HUMEDAD EDÁFICA Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA SUPERFICIALES EN UN LOTE BAJO SIEMBRA DIRECTA

M. Castiglioni¹, M. Wilson^{2y4}, A. Paz Gonzalez³, A. Kemmerer^{2y4}, C. Sasal² y J. Oszust⁴.

¹Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos (FAUBA). Av. San Martín 4453.(1417). Bs.As. Argentina,. e-mail: castigli@agro.uba.ar

²Grupo Recursos Naturales y Factores abióticos-INTA-EEA Paraná. Ruta 11. Km 12.5. (3100). Oro Verde. Entre Ríos. Argentina. e-mail: mwilson@parana.inta.gov.ar

³Facultad de Ciencias UDC, Campus de A Zapateira s/n 15071 La Coruna, España, e-mail: tucho@udc.es

⁴Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER). Ruta 11. Km 10. (3100). Oro Verde. E. Ríos. Argentina. e-mail: josedanieloszust@hotmail.com.

RESUMEN. El objetivo del trabajo fue analizar, según dos esquemas de muestreo, la dependencia y estructura espacial de la conductividad hidráulica saturada (Kh) y la humedad edáfica (Hum) a dos profundidades (0-5 cm y 5-10 cm), en un lote agrícola con relieve ondulado bajo siembra directa. De acuerdo a lo observado en el presente trabajo no sería relevante tener un conocimiento detallado de la distribución de la Kh dentro del lote, dado que esta propiedad con alta variabilidad no presentó una estructura espacial definida, y a que sus valor medio y coeficiente de variación fue independiente del esquema de muestreo planteado. Hum presentó estructura espacial, la cual estuvo más definida en el estrato más profundo. Sin embargo, dado que el período en el que se realizó el presente estudio Hum estuvo determinada fundamentalmente por el proceso de evaporación, no se encontró una relación significativa entre la distribución de dicha propiedad y el relieve del lote.

ABSTRACT. The aim was to analyze dependence and spatial structure of the soil saturated hydraulic conductivity (Kh) and soil moisture (Hum) of to two sampling schemes - at two depths (0-5 cm and 5-10 cm)- in an undulating cropped field under no tillage. A detailed knowledge of the distribution of Kh within the field was not relevant, since this property with high variability showed no spatial structure, and their mean value and coefficient of variation did not change significantly between the sampling schemes proposed. The Hum presented spatial structure, which was more defined in the deeper soil. However, no significant relationship was found between the distribution of Hum and the field topography during the period in which this study was carried out due to evaporation process.

1.- Introducción

La complejidad en el abordaje de los problemas que afrontan las ciencias de la tierra está relacionada en cierta medida con la heterogeneidad espacial de la zona vadosa, la que sirve de conducto al flujo de agua y al transporte de solutos en profundidad. Esta interfase actúa como reserva de agua y de nutrientes para las plantas, como así también genera excesos hídricos que son transportados junto con sedimentos y solutos en forma superficial a lo largo del

paisaje, hasta llegar a reservorios de agua o vías de escurrimiento (Corwin et al. 2006).

Una importante cantidad de investigaciones sugieren que un alto porcentaje de la variación en el espacio de las propiedades de los suelos ocurre en unos pocos metros, siendo común observar que el 50% de la misma sucede en tan solo un metro de radio (Corwin et al. 2006). Pese a estas consideraciones, en general se minimiza la variabilidad espacial de las propiedades edáficas dentro de las unidades de mapeo por varias razones que incluyen: las limitaciones de la escala elegida, la falta de un apropiado diseño de muestreo y la inadecuada cantidad de datos (Lin et al. 2005).

Grayson y Blosch (2000) resaltan que la variabilidad de las propiedades físicas de un determinado suelo puede ser tan grande o mayor que la encontrada entre suelos distintos. Esto debe tenerse en cuenta cuando se estiman las propiedades hidráulicas requeridas por los diversos modelos hidrológicos distribuidos.

Western y Grayson (2000) utilizaron la información del tipo de suelo presente para determinar los valores de conductividad hidráulica requeridos por un modelo hidrológico, que estimó los contenidos de agua dentro de una cuenca de Australia. Al asumir que dentro de cada unidad de mapeo este parámetro era uniforme, estos investigadores encontraron diferencias entre los patrones de contenidos de agua estimados y medidos a campo. Vertessy et al. (2000), a partir de muchas mediciones de conductividad hidráulica saturada realizadas en La Cuenca (Perú), indicaron que es erróneo asumir uniformidad de este parámetro dentro de cada área correspondiente a igual tipo de suelo y posición topográfica.

Debido al efecto que tiene sobre los procesos hidrológicos, es necesario saber en qué situaciones es útil la incorporación de la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas en los modelos de predicción y cuál es el modo apropiado de incluirla. En este sentido, Merz y Plate (1997) al analizar diferentes eventos de escurrimiento en una cuenca de Alemania, determinaron que la organización de los patrones espaciales de las propiedades edáficas y de la humedad del suelo tiene un efecto dominante sobre el escurrimiento. Estos autores también observaron que el efecto de la variabilidad espacial de dichas propiedades sobre el escurrimiento no era siempre uniforme, ya que dependía en forma

significativa del volumen e intensidad de las tormentas ocurridas.

Los estudios de variabilidad deben ser complementados con el análisis de los patrones espaciales de heterogeneidad de las propiedades estudiadas. En este sentido Grayson y Bloschl (2000) mostraron la influencia de la organización espacial de algunos atributos edáficos sobre la escorrentía. En el trabajo de estos autores, dos patrones de déficit de humedad edáfica distintos (uno al azar y otro organizado), que poseían la misma media, varianza y rango de correlación, produjeron muy diferentes respuestas en el escurrimiento para una misma lluvia. Por lo mencionado es importante entender el arreglo espacial de las propiedades hidráulicas para el correcto diseño de estrategias de muestreo, para interpretar los resultados adecuadamente, para elaborar un modelo de la dinámica de una cuenca y para poder predecir su comportamiento hidrológico.

Burrough (1983 a,b) evaluó el grado de influencia de la escala de observación sobre la variabilidad de un número de propiedades del suelo, observando que esta era la que determinaba si la variación espacial era estructural o al azar. Estos dos componentes de la varianza son totalmente dependientes de la escala, ya que al cambiar la misma se puede encontrar variación estructural en lo que previamente se observaba un comportamiento al azar (Sobieraj et al. 2004)

Alesso et al. (2012), trabajando en un lote con una pendiente del 0.7 %, con Argiudoles bajo siembra directa, y con un espaciado entre muestras entre 25 y 50 m, no encontraron estructura espacial en la distribución de la densidad aparente (0-10 cm). Estos autores atribuyeron estos resultados a que el intervalo de muestreo utilizado fue demasiado grande como para captar la variación a pequeña escala de dicha propiedad.

El objetivo del trabajo fue analizar, de acuerdo a dos esquemas de muestreo, la dependencia y estructura espacial de la conductividad hidráulica saturada y humedad edáfica a dos profundidades (0-5 cm y 5-10 cm), en un lote agrícola con relieve ondulado bajo siembra directa

2.- Material y métodos

Este estudio se llevó a cabo en un lote de 16 ha correspondiente a una microcuenca ubicada dentro de la EEA INTA Paraná (Pcia. de Entre Ríos, Argentina). El suelo es un Argiudol ácuico (Serie Tezanos Pinto), la textura del horizonte superficial (17 cm) es franco limosa, con 334 y 579 g Kg⁻¹ de arcilla y limo, respectivamente, siendo su uso actual el agrícola bajo siembra directa, con una rotación Maíz-Trigo/Soja. El lote presenta dos laderas con pendientes del 4% (oeste) y 8% (este), que desaguan a un canal central conectado en la parte inferior con un embalse (tajamar) de aproximadamente 1 ha (Fig. 1). Asimismo, se observan en el lote diferentes fases por erosión, correspondientes a la misma serie de suelos.

Luego de la cosecha de maíz (15 de mayo de 2012) se tomaron muestras con cilindro para la determinación en laboratorio de la conductividad hidráulica saturada (Kh),

por el método de la carga variable (Klute y Dirksen 1986), y el contenido de humedad gravimétrica (Hum). En la misma fecha se realizaron dos muestreos de cuarenta muestras por profundidad (0-5 cm y 5-10 cm). Los diseños para la obtención de las mismas fueron los siguientes: uno abarcó todo el lote (grilla irregular), con un distanciamiento entre observaciones entre 40 y 60 m, mientras que el restante se realizó sobre la ladera oeste del lote (grilla regular), con un distanciamiento entre muestras de 4 m (Fig. 1).

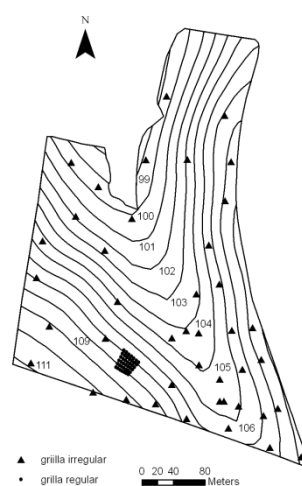


Fig. 1. Ubicación de los lugares de muestreo y detalle de las curvas de nivel en el lote

En la Fig. 2 se detalla el comportamiento de las precipitaciones y la evapotranspiración potencial (ETP) ocurrida los meses previos al muestreo, donde se puede comprobar que los 45 días anteriores a la toma de muestras fue un período de déficit de lluvias.

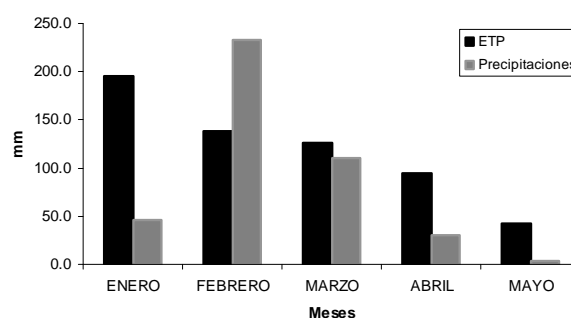


Fig. 2. Precipitaciones y evapotranspiración potencial (ETP) correspondientes a los meses previos al muestreo

A partir del análisis de varianza, se compararon entre profundidades y entre ambos muestreos los resultados de los parámetros analizados. El estudio de correlación espacial se hizo también por estratos, tomando en cuenta por un lado los resultados del muestreo con mayor

distanciamiento (grilla irregular) y por el otro el total de la información obtenida en ambos muestreos (grillas irregular y regular). A partir del análisis de los semivariogramas se determinó el grado de estructura espacial de las propiedades estudiadas. En este sentido se probaron distintos modelos y distanciamientos, seleccionando la combinación de estos que otorgaran un mejor ajuste (R^2) de los semivariogramas a los resultados obtenidos. A partir de estos resultados se determinaron los rangos y el grado de dependencia espacial (Cambardella et al. 1994). Este último parámetro surge a partir de aplicar la siguiente ecuación.

$$RD = \frac{C_0}{(C_0 + C_1)} \times 100 \quad (1)$$

Donde: RD es el grado de dependencia espacial (%); C_1 es la varianza estructural; C_0 es el efecto pepita que representa la varianza local y que ocurre a escalas de muestreo menores a las del intervalo de muestreo efectuado y $C_0 + C_1$ es la varianza total. De acuerdo a lo mencionado por Cambardella et al. (1994), $RD \leq 25\%$ indica que la variable tiene una fuerte dependencia espacial; $RD: 25 - 75\%$ la variable presenta una moderada dependencia espacial y $RD \geq 75\%$ la variable posee una débil estructura espacial.

En el caso de que se observara estructura espacial, se confeccionaron los mapas de distribución de cada variable, aplicando Kriging ordinario. El ajuste de los semivariogramas y la interpolación por kriging se realizaron empleando el programa GS+ v9.0 (Robertson 2008). El análisis de varianza se hizo a partir del programa Infostat (2004).

3.- Resultados y discusión

3.1.- Comparación de medias entre profundidades y sistemas de muestreo

En la siguiente Tabla se observan los resultados de Kh y Hum para las dos profundidades analizadas y de acuerdo a los dos esquemas de muestreo realizados.

Tabla 1. Comparación entre profundidades y grillas de muestreo de los resultados de Kh y Hum

Profundidad	Grilla regular		Grilla irregular	
	Kh (mm h ⁻¹)	Hum (g g ⁻¹)	Kh (mm h ⁻¹)	Hum (g g ⁻¹)
0-5 cm	147,95 a A	0,24 b B	121,41 a A	0,28 a A
C.V. (%)	95,84	12,37	119,57	22,16
5-10 cm	51,75 b A	0,25 a B	40,72 b A	0,28 a A
C.V. (%)	262,74	4,67	223,55	8,95

Letras minúsculas distintas diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre profundidades

Letras mayúsculas distintas, diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre grillas

Como se puede observar en la misma, en ambos sistemas de muestreo se pudo comprobar una menor ($p < 0,05$) Kh en profundidad respecto al estrato superficial. Estos resultados surgen como consecuencia del proceso de densificación del

suelo en profundidad, proceso que es común encontrar bajo este sistema de labranza, dada la falta de remoción del suelo y debido al tránsito de la maquinaria agrícola.

El contenido de agua edáfica de ambos estratos estuvo cercano al valor de capacidad de campo determinado para este suelo ($0,27 \text{ g g}^{-1}$), generado a partir del déficit de lluvias de los días previos al muestreo (Fig. 2) y por el efecto de la cobertura del suelo con rastrojos del cultivo anterior, lo cual disminuye la tasa de evaporación del agua edáfica. Respecto a este parámetro, solo se observó una ligera diferencia entre profundidades al considerar la grilla regular.

Al comparar los dos esquemas de muestreo, no se determinaron diferencias estadísticas en la Kh, aunque los valores medios fueron siempre mayores en la grilla regular. Por su parte, el contenido de humedad medio fue mayor ($P < 0,05$) al tomar en cuenta los resultados de todo el lote, independientemente de la profundidad considerada. Esto se debe a que en esta última situación se incluyeron los valores de este parámetro correspondientes a todos los ambientes del área analizada. Respecto a los coeficientes de variación (CV) determinados para Hum (Tabla 1), estos coinciden con los hallados en otros trabajos realizados bajo climas húmedos y con suelos limosos (Brocca et al. 2007), siendo los mismos muy inferiores a los detallados para Kh. A su vez, y por las mismas razones señaladas previamente, el CV de Hum de ambos estratos fue mayor al aumentar la superficie del área relevada y el espaciamiento entre muestras. Western et al. (2002) mencionan que al aumentar la extensión de la superficie evaluada aumenta la variabilidad, sin embargo dichos autores sostienen que no sucede lo mismo al incrementar el espaciamiento entre muestras. Solo se observó un comportamiento similar al recientemente detallado en el CV de la Kh superficial.

De acuerdo a estos resultados, para obtener un valor medio de Kh aceptable no sería necesario abarcar toda la superficie del lote, dado que tanto los valores medios como su variabilidad no fueron significativamente distintos entre esquemas de muestreo. Contrariamente, los diferentes ambientes presentes en el lote influyeron en el valor medio y en la variabilidad del contenido de humedad, siendo por lo tanto necesario considerar toda el área bajo estudio.

3.2.- Análisis geoestadístico

En la Tabla 2 se detallan los resultados del test de normalidad (Shapiro-Wilks) realizado sobre las variables analizadas, considerando los datos provenientes de la grilla irregular y los de ambas grillas en forma conjunta. En los casos que la variable Kh no presentó distribución normal se la transformó utilizando logaritmo natural más cuatro ($4 + \ln \text{Kh}$) y se testeó la normalidad de la variable transformada.

Como se desprende de su análisis, los resultados de Hum presentaron distribución normal solo en superficie, mientras que Kh en ninguna de las situaciones estudiadas presentó dicho comportamiento. Solamente en el estrato

de 5-10 cm y al tomar en cuenta únicamente la información proveniente de la grilla irregular, la transformación de los valores de Kh en $4 + \ln Kh$ se adecuó a una distribución normal.

Tabla 2. Valor P correspondiente al test de Shapiro-Wilks, realizado sobre Hum, Kh y $4 + \ln Kh$, considerando ambas profundidades de muestreo

	Profundidad: 0-5 cm		Profundidad: 5-10 cm	
	Grilla irregular	Ambas grillas	Grilla irregular	Ambas grillas
Kh	< 0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
$4 + \ln Kh$	0,0085	<0,0001	0,1590	0,0109
Hum	0,3360	0,0624	0,0294	0,0054

Brocca et al. (2007) mencionan que son contradictorios los resultados encontrados en la bibliografía respecto a la distribución estadística de la humedad superficial del suelo. Mientras algunos autores han determinado que esta es normal (Ancil et al. 2002; Buttafuoco et al. 2005), otros (Loague 1992; Famiglietti et al. 1999) mencionan que dicho comportamiento es dependiente del sistema de muestreo empleado (transecta o cuadrícula) o del contenido promedio de agua edáfica. En el presente trabajo, no hubo diferencias marcadas en el sistema de muestreo ni en el contenido hídrico medio entre profundidades, por lo que el distinto comportamiento en la distribución estadística de Hum obedecería a otras razones.

Al analizar los resultados de los dos muestreos en forma conjunta, se pudo comprobar que en el estrato de 0-5 cm los valores de Hum ajustaron ($R^2=0,48$) a un semivariograma gaussiano (Fig. 3)

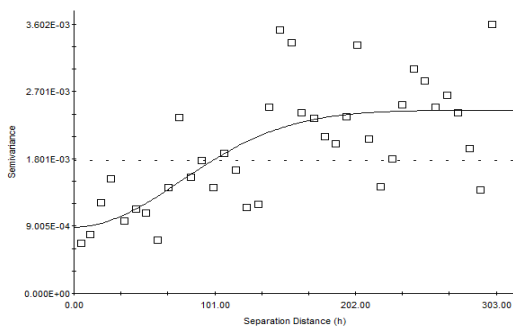


Fig. 3. Semivariograma correspondiente a Hum (0-5 cm), considerando ambos muestreos

La fórmula del semivariograma gaussiano utilizada por GS+ es la siguiente:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{(-h^2/A_0^2)} \right] \quad (2)$$

Donde $\gamma(h)$: semivarianza para el intervalo de clase h; h: intervalo lag; C_0 : efecto pepita; C: varianza estructural y A_0 : rango.

La interpolación de mayor ajuste (Fig. 4) se logró con 12 vecinos y 200 m de entorno.

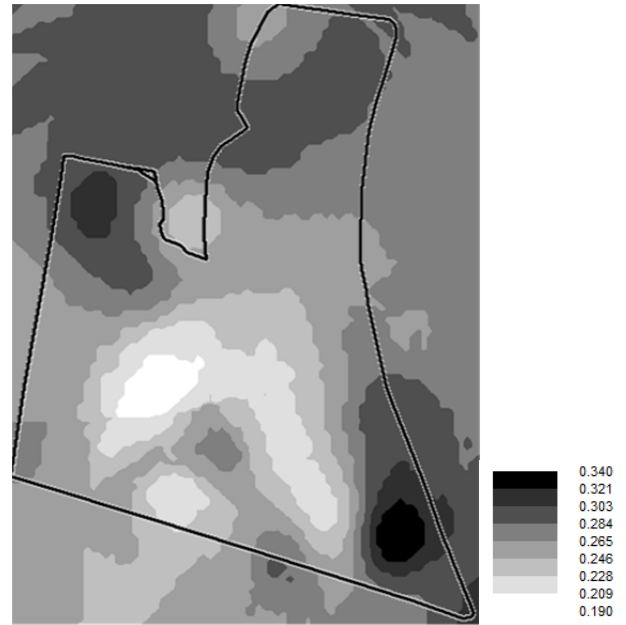


Fig. 4. Distribución espacial de Hum (0-5 cm) considerando ambos muestreos

En la Fig. 5 se detalla la relación Hum observada vs. Hum estimada que surge de la interpolación realizada para Hum (0-5 cm).

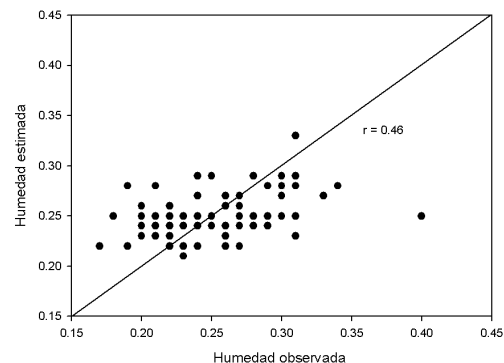


Fig. 5. Relación entre Hum observada y estimada (0-5 cm), considerando ambos muestreos

A mayor profundidad los valores de dicha propiedad ajustaron también ($R^2=0,53$) a un semivariograma gaussiano (Fig. 6).

La interpolación (Fig. 7) se determinó con 24 vecinos y 200 m de radio de entorno.

En la Fig. 8 se detalla la relación Hum observada vs. Hum estimada que surge de la interpolación realizada para Hum (5-10 cm).

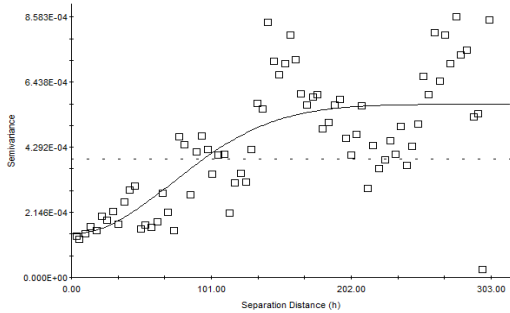


Fig. 6. Semivariograma correspondiente a Hum (5-10 cm), considerando ambos muestreos

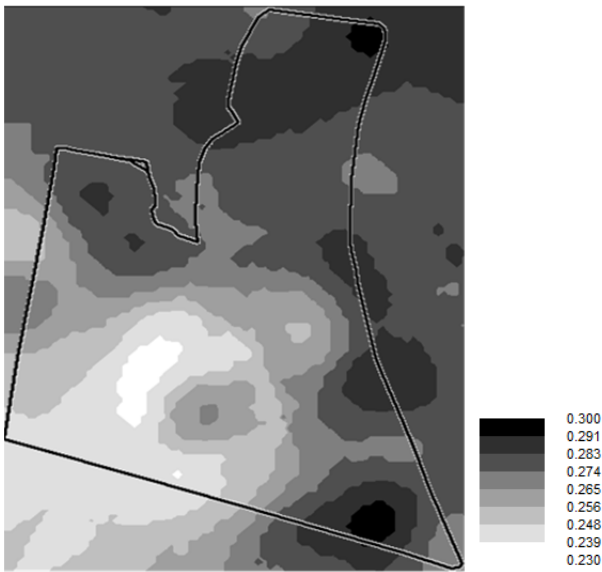


Fig. 7. Distribución espacial de Hum (5-10 cm) considerando ambos muestreos

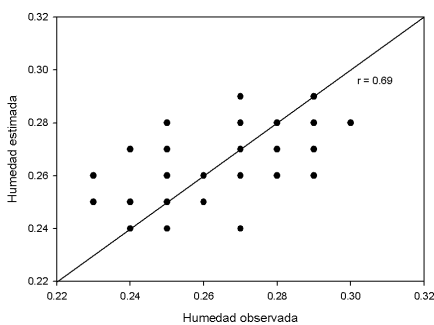


Fig. 8. Relación entre Hum observada y estimada (5-10 cm), considerando ambos muestreos

Al incluir en el análisis únicamente los resultados obtenidos de la grilla irregular, no considerando por lo tanto la variabilidad que ocurre a pequeña escala, se observó que de 0-5 cm Hum no presentó estructura espacial. Sin embargo, la interpolación realizada a partir de considerar la distancia inversa ponderada (Fig. 9), permitió lograr un

ajuste de la relación observados vs. estimados ($R^2 = 0.15$). En este caso se aplicó un exponente 2, con 12 vecinos y en un radio de entorno de 200 metros.

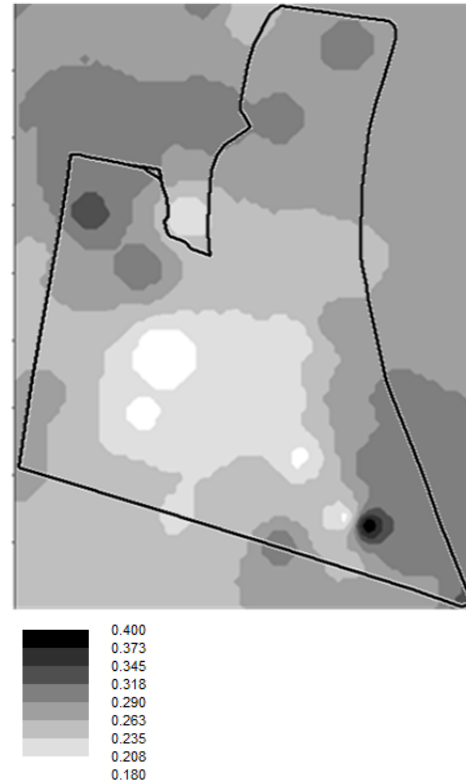


Fig. 9. Distribución espacial de Hum (0-5 cm) considerando únicamente la grilla irregular.

De 5 a 10 cm los valores de Hum correspondientes a la grilla irregular ajustaron ($R^2=0,8$) a un semivariograma exponencial (Fig. 10), cuya fórmula de cálculo es:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{(-h/A_0)} \right] \quad (3)$$

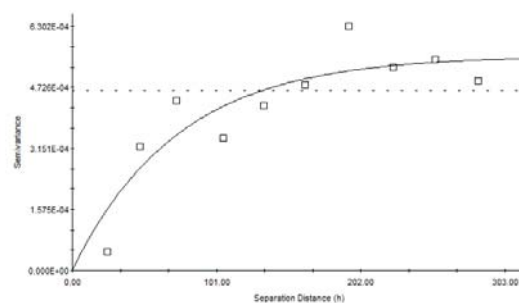


Fig. 10. Semivariograma correspondiente a Hum (5-10 cm), considerando únicamente los resultados de la grilla irregular

En este caso, la interpolación se optimizó con 12 vecinos

y 200 m de entorno (Fig. 11).

En la Fig. 12 se detalla la relación Hum observada vs. Hum estimada que surge de la interpolación realizada para Hum (5-10 cm), considerando únicamente la grilla irregular.

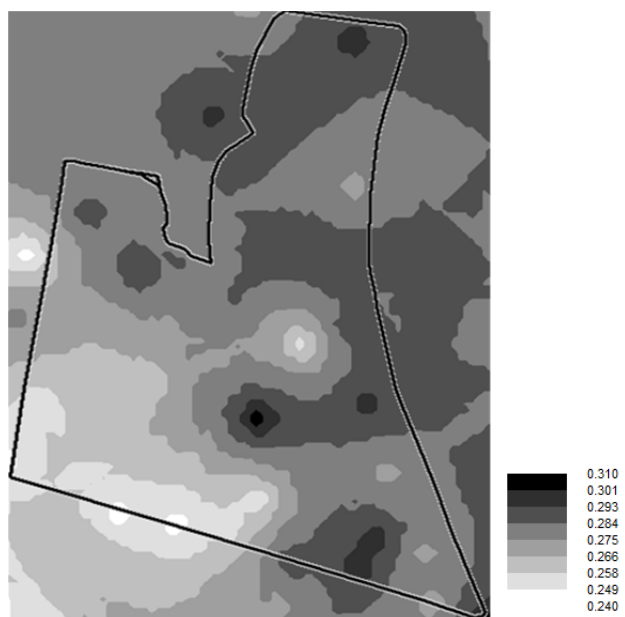


Fig. 11. Distribución espacial de Hum (5-10 cm) considerando únicamente la grilla irregular

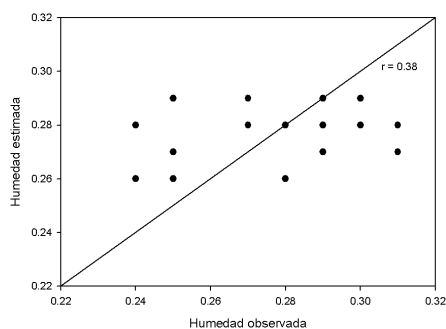


Fig. 12. Relación entre Hum observada y estimada (5-10 cm), considerando únicamente los resultados de la grilla irregular

En la Tabla 3 se detallan los parámetros de los semivariogramas estimados para Hum, a las dos profundidades de muestreo.

Tabla 3. Parámetros de los distintos semivariogramas estimados para Hum

	Profundidad (cm)	Modelo	Efecto pepita	Silla	Rango (m)
Ambas grillas	0-5	gaussiano	0,00089	0,0024	188
Grilla irregular	5-10	gaussiano	0,00014	0,00057	178
	5-10	exponencial	0,00001	0,00055	220

De acuerdo a estos resultados, y al relacionar el efecto pepita con la varianza total, la humedad gravimétrica del estrato más profundo presentó una fuerte estructura

espacial, mientras que en superficie esta fue moderada. A su vez, independientemente de la profundidad considerada y del esquema de muestreo analizado, el rango de continuidad espacial para Hum estuvo entre 180 y 220 m. De acuerdo a lo señalado por Brocca et al. (2007), citando a Western y Bloschl (1999), la continuidad espacial de los valores de humedad edáfica superficial puede variar entre 0,7 y 650 m, dependiendo de la escala de muestreo y de la densidad de las observaciones realizadas. Esto implica que la falta de correlación espacial puede deberse en algunos casos, a que el espaciamiento entre observaciones sea mayor al rango de dependencia espacial presente. A su vez, el alcance de esta correlación espacial puede estar influida o no, según las características del área estudiada, por el contenido medio de humedad edáfica (Western et al. 2004). Baroni et al. (2013), trabajando en una cuenca de 10 ha con 880 mm de lluvia anual, pudieron determinar un rango de continuidad espacial de 306 m en el contenido hídrico superficial durante un período seco, mientras que bajo condiciones de mayor humedad el rango fue de 152 m. En dicho trabajo, si bien la variabilidad total no cambió entre periodos (húmedo o seco), el efecto pepita se vio afectado por dichas oscilaciones. A escala de pequeñas cuencas y en relieves ondulados, el contenido de agua superficial edáfico puede variar espacialmente debido a la redistribución lateral del agua, al efecto diferencial de la radiación solar de acuerdo a la orientación de las laderas, a la heterogeneidad de los suelos presentes en la cuenca, o a características relacionadas con variaciones en la vegetación presente (Brocca et al. 2007). Algunos autores han tenido dificultad en identificar un solo factor condicionante, indicando que existe una interacción entre ellos (Baroni et al. (2013). A su vez, la importancia relativa de cada uno de los mismos puede cambiar de acuerdo al estado del sistema estudiado, como por ejemplo el contenido hídrico edáfico. En este sentido, Grayson et al. (1997) definen dos principales condiciones de humedad. Por un lado estarían aquellas situaciones en las cuales el volumen de las precipitaciones excede la evapotranspiración, siendo en estos casos la topografía el factor condicionante de la distribución espacial del contenido de agua en el suelo. El otro extremo sería cuando el proceso de evapotranspiración es el dominante, siendo en estos casos los factores locales (vegetación, suelo) los que regularían la variabilidad del contenido de agua en el suelo. En el primer caso los patrones de humedad se verían más organizados, mientras que en el segundo serían aleatorios (Grayson y Bloschl 2000).

Las mediciones realizadas en el presente trabajo corresponden a un período sin vegetación viva, con déficit de lluvias respecto a la evapotranspiración potencial, y por lo tanto con suelo en etapa secado, aunque a tasas bajas debido al efecto de la cobertura de rastrojos. Este proceso es más evidente en el estrato superficial, el cual presentó un mayor CV (Tabla 1) y más amplitud entre valores extremos de Hum (Fig. 4 y Fig. 9) respecto a la profundidad de 5 a 10 cm (Fig. 7 y Fig. 11). En este sentido, Baroni et al. (2013) señalan que en climas húmedos o subhúmedos, la variabilidad de la humedad del

suelo aumenta con su desecamiento. Por lo tanto, debido a las características climáticas que presentó la etapa previa al muestreo, el patrón de distribución espacial de Hum estuvo menos influenciado por la dirección y concentración de los escurrimientos, no siendo la posición dentro del paisaje un factor determinante en la disposición de este parámetro dentro del lote. Esto se visualiza claramente al contrastar las Figs. 4, 7, 9 y 11 con la Fig. 1, comprobando que independientemente del estrato y sistema de muestreo considerados, el patrón de distribución de humedad estuvo más vinculado con la orientación de las laderas que por la posición en el relieve. Pese a ello, a mayor profundidad Hum se mostró más estructurada que en superficie, dado que este proceso de desecamiento del suelo fue menos intenso en dicho estrato. Llama a su vez la atención que dados los rangos de dependencia espacial encontrados (Tabla 3), solo se encuentre estructura espacial en la Hum (0-5 cm) al incluir el muestreo con menor distanciamiento. Es probable que dicho resultado se deba fundamentalmente al aumento en el número de observaciones, respecto al considerado al trabajar únicamente con la información de la grilla irregular.

Respecto a la Kh, en ninguno de los casos (profundidad y esquema de muestreo) se observó estructura espacial en los resultados. No obstante esto, a la profundidad de 5-10 cm y considerando los dos muestreos en forma conjunta, se pudo determinar la distribución espacial de $4 + \ln Kh$ (Fig. 13) a partir de la distancia inversa ponderada. De esta manera, aplicando un exponente 2 y considerando 16 vecinos en un entorno de 200 m, se logró un ajuste de la relación observados vs. estimados con un $R^2 = 0,2$.

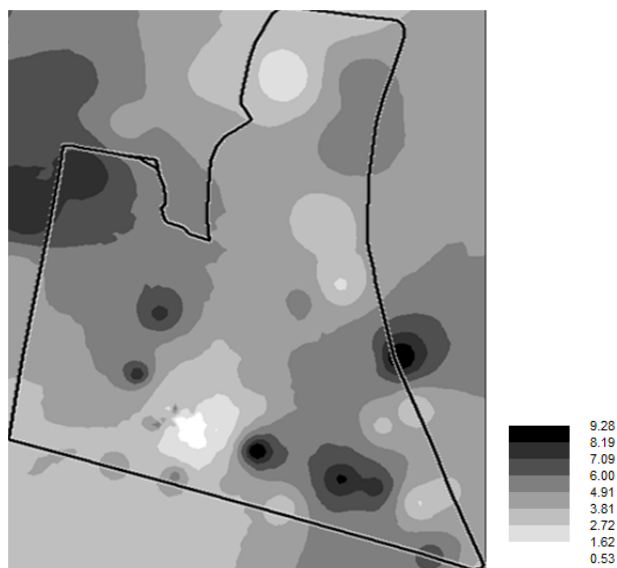


Fig. 13. Distribución espacial de "4 + ln Kh" (5-10 cm) considerando ambos muestreos

Siqueira et al. (2004) concluyeron que la distribución espacial de la Kh en un suelo bajo siembra directa no era al azar, estando la misma afectada por el relieve del terreno.

Por su parte, Sobieraj et al. (2002) no encontraron en una secuencia topográfica de suelos del Brasil dependencia de la Kh a la variación en las características de los suelos, debido al intenso proceso de bioturbación. Haws et al. (2004) no observaron correlación espacial al analizar la Kh a escala local y a cortas distancias en distintos suelos de Estados Unidos, debido al reducido volumen del soporte sobre el que se hicieron las determinaciones. Estos autores solo encontraron correlación espacial en dicha propiedad al considerar una extensión mayor del área evaluada (escala de paisaje) y tamaños de soporte de por lo menos 20 cm de diámetro. De acuerdo a lo visualizado en la Fig. 6, el patrón de distribución espacial de $4 + \ln Kh$ no se vinculó con el del contenido de agua a esa misma profundidad (Fig. 7 y Fig. 11), como tampoco con el de la distribución del relieve (Fig. 1).

4.- Conclusiones

La conductividad hidráulica y la humedad del suelo son dos factores importantes a tener en cuenta en la modelación del escurrimiento en cuencas hidrográficas. De acuerdo a lo observado en el presente trabajo y a escala de lote, no sería relevante tener un conocimiento detallado de la distribución de la Kh dentro del mismo, dado que esta propiedad con alta variabilidad no presentó una estructura espacial definida, y porque su valor medio y coeficiente de variación no cambiaron significativamente al comparar los resultados de todo el lote respecto a lo sucedido en una de sus laderas. Contrariamente, Hum presentó estructura espacial, la cual fue alta en el estrato más profundo. Sin embargo, debido a que el período en el que se realizó el presente estudio la humedad del suelo estuvo determinada fundamentalmente por el proceso de evaporación, no se encontró una relación significativa entre el patrón de distribución de la Hum y el relieve del lote.

Agradecimientos: Trabajo financiado por proyectos UBACyT 20020110200270 y PNNAT 1128041.

5.- Bibliografía

- Alesso, C. A., M.A. Pilatti, S. C. Imhoff, y M.Grilli, 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la Pampa llana Santafesina. *Ciencia del Suelo*. 30 (1), 85-93.
- Ancil, F., R. Mathieu, L.E. Parent, A.A. Viau, M. Sbih, y M. Hessami, 2002. Geostatistics of near-surface moisture in bare cultivated organic soils. *J. Hydrol.* 260, 20-37.
- Baroni, G., B. Ortuani, A. Facchi, y C. Gandolfi, 2013. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field. *J. Hydrol.* 489, 148-159.
- Brocca L., R. Morbidelli, F. Melone, y T. Moramarco, 2007. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *J. Hydrol.* 333, 356-373.
- Burrough, P. A., 1983a. Multiscale sources of spatial variation in soil: I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Sci.* 34, 577-597.
- Burrough, P. A., 1983b. Multiscale sources of spatial variation in soil: II. A non-Brownian fractal model and its application in soil survey. *J. Soil*

- Sci.* 34, 599-620.
- Buttafuoco, G., A. Castrignano, E. Busoni, y A.C. Dimase, 2005. Studying the spatial structure evolution of soil water content using multivariate geostatistics. *J. Hydrol.* 311, 202-218.
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco, y A.E. Konopka, 1994. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1501-1511.
- Corwin, D. L., J. Hopmans, y G. H. de Rooij, 2006. From field to landscape-scale vadose zone processes: scale issues, modeling and monitoring. *Vadose Zone J.* 5, 129-139.
- Famiglietti, J.S., J.A. Devereaux, C.A. Laymon, T. Tsegaye, P.R. Houser, T.J. Jackson, S.T. Graham, M. Rodell, y P.J. van Oevelen, 1999. Ground-based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment. *Water Resour. Res.* 35, 1839-1851.
- Grayson, R.B., A.W. Western, F.H.S. Chiew, y G. Blöschl, 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. *Water Resour. Res.* 33, 2897-2912.
- Grayson, R., y G. Blöschl, 2000. Spatial Processes, Organisation and Patterns, en *Spatial Patterns in Catchment Hydrology Observations and Modelling*, ed. Grayson R y G. Blöschl. Cambridge Univ. Press. Part 1. 3-16.
- Haws, N.W., B. Liu, C.W. Boast, P.S.C. Rao, E.J. Klavivko, y D.P. Franzmeier, 2004. Spatial Variability and Measurement Scale of Infiltration Rate on an Agricultural Landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1818-1826
- InfoStat, 2004. *InfoStat versión 2004*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
- Klute, A., y C. Dirksen, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods, en *Methods of soil analysis*. Part 1, 2 ed, ed. Klute. Agron. Monogra. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA. 687-734.
- Loague, K, 1992. Soil water content at R-5, 1, Spatial and temporal variability. *J. Hydrol.* 139, 233-251.
- Lin, H., J. Bouma, L. P. Wilding, J. L. Richardson, M. Kutilek, y D. R. Nielsen, 2005. Advances in Hydropedology, en *Advances in Agronomy*. Elsevier Inc. 85, 1-88.
- Merz, B., y E. J. Plate, 1997. An analysis of the effects of spatial variability of soil and soil moisture on runoff. *Water Resour. Res.* 33(12), 2909-2922.
- Robertson, G.P., 2008. *GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences*. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA.
- Siqueira, G. M., C.R. Grego, S.R. Vieira, y M.B. Ceddia, 2004. Variabilidad espacial y temporal de la permeabilidad del suelo en el cultivo de triticale en sistemas de siembra directa. *XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Sobieraj, J. A., H. Elsenbeer, R.M. Coelho, y B. Newton, 2002. Spatial variability of soil hydraulic conductivity along a tropical rainforest catena. *Geoderma.* 108, 79-90.
- Sobieraj, J. A., H. Elsenbeer, y G. Cameron, 2004. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *Catena.* 55, 49-77.
- Vertessy, R., H. Elsenbeer, Y. Bessard, y A. Lack, 2000. Storm runoff generation at La Cuenca, en *Spatial patterns in catchment hydrology: Observations and modeling*, ed. Grayson R B and G Blöschl. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 247-271.
- Western, A., y G. Blöschl, 1999. On the spatial scaling of soil moisture. *J. Hydrol.* 217, 203-224.
- Western, A. W., y R. B. Grayson, 2000. Soil moisture and runoff processes at Tarrawarra, en *Spatial patterns in catchment hydrology: Observations and modeling*, ed. Grayson R B and G Blöschl. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 209-246.
- Western, A.W., R.B. Grayson, y G. Blöschl, 2002. Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.* 30, 149-180.
- Western, A.W., S. Zhou, R.B. Grayson, T.A. McMahon, G. Blöschl, y D.J. Wilson, 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *J. Hydrol.* 286, 113-134.