

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD EN EL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO SUPERFICIAL A DIFERENTES ESCALAS ESPACIALES

MARIO GUILLERMO CASTIGLIONI^{1*}

Recibido: 17/4/2018
Recibido con revisiones: 23/3/2019
Aceptado: 23/3/2019

RESUMEN

La humedad edáfica condiciona varios procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Esta propiedad es variable en el tiempo y en el espacio, siendo distintos los factores que regulan su heterogeneidad. El objetivo del presente trabajo fue estudiar la variabilidad, el grado y rango de estructura espacial presentado por la humedad edáfica, a distintas escalas de observación y a dos profundidades, en suelos con aptitud agrícola correspondientes a una cuenca del sur de Santa Fe, analizando también la incidencia de distintas propiedades edáficas sobre la heterogeneidad del contenido hídrico. Se trabajó con resultados de humedad gravimétrica obtenidos a dos profundidades (0-5 cm y 5-10 cm) a escala de parcela, unidad de paisaje y cuenca, en tierras con aptitud agrícola pertenecientes a la cuenca del Arroyo Ludueña (Pcia. de Santa Fe). Se hicieron análisis estadísticos clásicos y geoestadísticos. Se estudió el efecto de distintas propiedades edáficas (densidad aparente, materia orgánica y diferentes tamaños de poro) sobre la heterogeneidad y estructura espacial de la variable bajo estudio. Dentro del intervalo de humedad media determinada en los distintos sitios (24% al 37%), se comprobó que su coeficiente de variación aumentó con la escala de muestreo (parcelas: 6,2%; unidad de paisaje: 11,5%; cuenca: 18,1%). En algunos sitios, los coeficientes de correlación entre la densidad aparente, materia orgánica y de ciertos tamaños de poro con la humedad gravimétrica fueron significativos, con valores que oscilaron entre 0.24 y 0.68. A escala de cuenca, se comprobó un mejor grado (32%) y mayor rango (23000-29000 m) de correlación espacial en la propiedad estudiada, respecto a la unidad de paisaje (75% y 3300 m, respectivamente) y a las parcelas (73-83% y 15-25 m, respectivamente), sin encontrar efectos significativos del valor medio de humedad, de las otras propiedades del suelo y de la profundidad de muestreo sobre dicho comportamiento.

Palabras clave: Estructura espacial, propiedades edáficas, suelos agrícolas

VARIABILITY ANALYSIS OF SURFACE SOIL WATER CONTENT AT DIFFERENT SPATIAL SCALES

ABSTRACT

Several physical, chemical and biological processes that occur in the soil are affected by soil water content. This property is variable both in time and space, with different factors regulating its heterogeneity. The aim of this work was to study the variability, degree and range of spatial structure presented by soil moisture, at different spatial scales and at two depths, in agricultural soils within a basin in the south of Santa Fe, analyzing also the effect of different soil properties on this behavior. Results of soil water content obtained at two depths (0-5 and 5-10 cm) at the plot, landscape unit and basin scale were analyzed in agricultural soils of the Arroyo Ludueña basin (Santa Fe province). Classic statistics and geostatistical analysis was done. It was studied the effect of different soil properties (bulk density, organic matter and different size pores) on the variability and spatial structure of the analyzed variable. Within the range of the average soil water content determined in the different sites (25% to 37%), it was found that the coefficient of variation increased with the sampling scale (plot: 6,2%; landscape unit: 11,5%; basin: 18,1%). In some sites, the correlation coefficients between bulk density, organic matter and some size pores with the gravimetric water content were significant, with values that ranged between 0.24 and 0.68. At the basin scale, a better degree (32%) and a greater range (23000-29000 m) of spatial correlation were found in the studied property, with respect to the landscape unit (75% and 3300 m, respectively) and to the plots (73-83% and 15-25 m, respectively), without finding significant effects of the mean moisture value, the other soil properties and the sampling depth on this behavior.

Key words: Spatial structure, soil properties, agricultural soils

¹ Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos (FAUBA), Av San Martín 4453 (1417) CABA

* Autor de contacto: castigli@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo influye en una variedad de procesos, modulando los intercambios de energía y de materia entre la atmósfera y la superficie del suelo (Yang, 2010), controlando los procesos de partición de la energía solar en calor latente y sensible (Western *et al.*, 2003) e incidiendo en la transformación de la precipitación en escurrimiento, infiltración y evapotranspiración (Krajewski *et al.*, 2006). También provee el agua disponible para el crecimiento de la vegetación, condicionando por lo tanto la producción primaria, interviniendo a su vez en una serie de procesos químicos edáficos (Yang, 2010). Por lo mencionado, para la caracterización y modelado de estos procesos, es necesario hacer estimaciones precisas y confiables de este parámetro edáfico.

El contenido de humedad del suelo es variable tanto en el espacio como en el tiempo (Cantón *et al.*, 2004; Hébrard *et al.*, 2006; Brocca *et al.*, 2009), habiéndose comprobado que su distinta organización espacial, puede generar escurrimientos sensiblemente diferentes ante la ocurrencia de tormentas con similares características (McNamara *et al.*, 2005; Takagi & Lin, 2012). A su vez, los mecanismos que controlan la heterogeneidad en el contenido de agua del suelo, pueden ser distintos de acuerdo a la escala analizada (Western *et al.*, 2002). Por lo tanto, para la comprensión de los procesos hidrológicos, agronómicos y ecológicos, es de especial importancia el estudio de la variabilidad espacial del contenido de agua edáfica superficial a diferentes escalas (Hu *et al.*, 2011).

Distintos trabajos muestran que los patrones de distribución espacial de esta propiedad, están influenciados por un considerable número de factores como la fisiografía del terreno, las propiedades del suelo y de la vegetación, la profundidad de la capa freática y las condiciones meteorológicas (Gomez-Plaza *et al.*, 2001). Se ha observado también, que existe cierta vinculación entre la variabilidad del contenido hídrico y el valor medio que presenta esta propiedad (Baroni *et al.*, 2013). Sin embargo, esta relación no ha mostrado un comportamiento uniforme (Hupet & Vanclooster, 2002; De Lannoy *et al.*, 2006; Zhu & Shao, 2008). A su vez, los mecanismos

que controlan la heterogeneidad del contenido de agua del suelo, pueden variar de acuerdo a la escala analizada (Western *et al.*, 2002) y según su grado de saturación (Teuling & Troch, 2005; Robinson *et al.*, 2008)

La estructura de correlación espacial de esta propiedad ha sido caracterizada a partir del análisis geoestadístico (Meyles *et al.*, 2003; Petrone *et al.*, 2004; Western *et al.*, 2004; Brocca *et al.*, 2007). En este sentido, el variograma expresa modificaciones en el valor de la varianza, ante cambios en la distancia entre los distintos puntos de medición. Por su parte, el rango define la distancia a partir de la cual las observaciones son independientes entre sí, existiendo por debajo de dicho valor una continuidad espacial en la variable estudiada (Western *et al.*, 2004). Mediciones de humedad realizadas a campo, han mostrado para este parámetro valores que van desde 0,7 a 650 m, dependiendo de la escala de trabajo y de la densidad de muestreo (Western & Bloschl, 1999). Algunos investigadores han observado, que este parámetro tiende a ser mayor con una alta humedad del suelo (Fitzjohn *et al.*, 1998; De Lannoy *et al.*, 2006), aunque se ha encontrado también una tendencia opuesta (Western *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2001). Este distinto comportamiento puede adjudicarse a diferencias en los suelos, vegetación, climáticas y de las características del área analizada (Hu *et al.*, 2011).

Todavía es poco comprendida la importancia relativa de los factores que controlan la distribución espacial del contenido de agua (Wilson *et al.*, 2004). Algunos investigadores han verificado la dificultad en identificar una sola variable como reguladora, indicando que existe una interacción compleja de los factores incidentes (Zhao *et al.*, 2010; Zhu & Lin, 2011). Como consecuencia, los resultados en general son propios de cada sitio analizado, siendo difícil llegar a conclusiones generales (Baroni *et al.*, 2013).

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la variabilidad, el grado y rango de estructura espacial presentado por la humedad edáfica, a distintas escalas de observación y a dos profundidades, en suelos con aptitud agrícola correspondientes a una cuenca del sur de Santa Fe, analizando a su

vez la incidencia de distintas propiedades edáficas sobre la heterogeneidad del contenido hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se analizaron los resultados de humedad gravimétrica, obtenidos a distintas escalas espaciales en distintos sitios bajo actividad agrícola, dentro la cuenca del Arroyo Ludueña. Dicha cuenca se encuentra al sur de la provincia de Santa Fé, entre los paralelos 32° 45' y 33° 06' S, y los meridianos 61° 06' y 60° 42' O, siendo su superficie de 740 km². Este sistema hidrológico presenta las características propias de un área de llanura, siendo su pendiente media del orden de 1,5 m km⁻¹.

Clima, suelos y uso de la tierra

El clima regional es templado subtropical sin estación seca, clasificado según Köppen como Cfa, siendo la temperatura media anual de 17,5 °C (Scuderi *et al.*, 2014). La precipitación media anual es aproximadamente de 1014,4 mm, ocurriendo el 70% en el período primavera-verano (octubre a marzo) (Scuderi *et al.*, 2014). En la **Figura 1** se detalla la distribución mensual promedio de las precipitaciones (período 1973-2013) y la registrada para los años 2010 y 2011, juntamente con los valores de evapotranspiración potencial promedio (período 1973-2013) (informa-

ción provista por la Cátedra de Climatología de la Universidad Nacional de Rosario). De acuerdo con la información edáfica disponible (INTA, 1975), en la cuenca predominan suelos con aptitud agrícola (Series Peyrano y Roldán) (Zimmermann *et al.*, 2008). La agricultura bajo siembra directa constituye el principal uso del suelo, destacándose fundamentalmente la producción de soja y en menor medida la de maíz y trigo (Scuderi & Stenta, 2006). Montico & Di Leo (2007) mencionan que en 2005, la actividad agrícola ocupaba un 89,8% de la superficie total de la cuenca.

Muestreo

En la **Tabla 1** se detallan las fechas en que se realizó la toma de muestras en los distintos sitios, sus coordenadas geográficas, la escala de muestreo, la distancia mínima promedio y el máximo espaciado entre puntos de observación, la superficie abarcada y el número de repeticiones. La toma de muestras se hizo en otoño-invierno con barreno, a una profundidad de 0 a 5 cm y 5 a 10 cm. A escala de parcela la misma se realizó en forma de grilla, mientras que en la unidad de paisaje se efectuó sobre una transecta de aproximadamente 10 km que une las localidades de Zavalla y Roldán, a ambos lados de la ruta A012. Por su parte, a escala de cuenca el muestreo fue hecho en forma aleatoria, buscando abarcar la totalidad de su superficie.

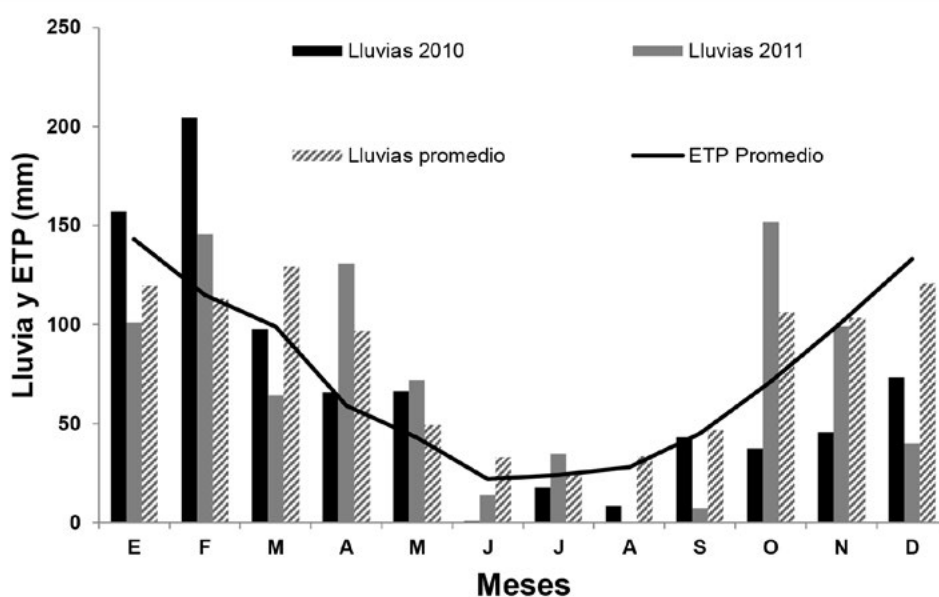


Figura 1. Precipitaciones y evapotranspiración potencial mensual promedio y lluvias ocurridas en los años 2010 y 2011.

Figure 1. Average monthly rainfall and potential evapotranspiration with rainfall occurred in 2010 and 2011.

Tabla 1. Características del muestreo realizado en los distintos sitios**Table 1.** Sampling characteristics in the different sites

Sitio	Coordenadas geográficas		Fecha	Escala	Dm (m)	MD (m)	Sup (ha)	N
Za	33°02'15" S	60°54'04" O	8/2010	P	4	80	0,096	80
I	32°51'33" S	60°45'29" O	5/2011	P	4	45	0,096	80
RZ	32°56'01" S	60°54'04" O	5/2011	UP	64	8000	235	71
	33°00'23" S	60°54'18" O						
C	32°17'45" S	61°06'28" O	5/2011	C	340	39000	74000	97
	33°06'55" S	60°42'09" O						

Escala: P: parcela; UP: unidad de paisaje; C: cuenca. Dm: distancia mínima promedio entre observaciones. MD: distancia máxima entre observaciones. Sup: superficie considerada. N: número de observaciones. Sitios: Za: Zavalla; I: Ibarlucea; RZ: Transecta Roldán-Zavalla; C: tierras con aptitud agrícola de la cuenca.

Scale: P: plot; UP: landscape unit; C: basin. Dm: average minimum distance between observations; MD: maximum distance between observations; Sup: Considered area. N: number of observations. Sites: Za: Zavalla; I: Ibarlucea; RZ: Roldan-Zavalla transect; C: basin agricultural soils.

Análisis estadístico

Para cada sitio se determinó el valor medio de humedad (Hu) y su coeficiente de variación (CV), evaluando la normalidad en la distribución de resultados a partir de la prueba de Shapiro-Wilks, modificada (**Tabla 2**).

Se analizó si la variabilidad de la humedad edáfica de cada sitio, estaba condicionada por su

valor medio y/o por los resultados promedio de otras propiedades edáficas. Se hizo un análisis de correlación entre el contenido hídrico y el valor de dichas variables, correspondientes a las repeticiones del muestreo hecho en cada sitio. Estas propiedades, determinadas en un trabajo previo (Castiglioni, 2017), fueron las siguientes: densidad aparente (Dap) (Blake & Hartge, 1986); materia orgánica (Mo) (método de Walkley y Black;

Tabla 2. Contenido hídrico medio de los distintos sitios, algunos parámetros estadísticos y valores medios de otras propiedades edáficas.**Table 2.** Mean water content of the different sites, some statistical parameters and mean values of other edaphic properties.

Parámetros/Sitios	Zas	Zap	Is	Ip	RZs	RZp	Cs	Cp
Hu (%)	25,82	24,14	33,32	29,19	37,30	30,67	35,10	29,64
CV (%)	6,8	4,86	6,89	6,43	14,11	8,87	17,44	18,76
Normalidad	0,15	0,99	0,68	0,72	0,86	0,96	0,20	0,12
Textura	FAL	FAL	FL	FL	FAL	FAL	FAL	FAL
Dap (gr cm ⁻³)	1,13	1,22	1,23	1,34	1,1	1,26	1,12	1,25
Mo (%)	3,08	2,67	2,25	1,63	3,46	2,6	2,83	2,4
50-10 (cm ³ cm ⁻³)	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07	0,04	0,07	0,06
10-0,2 (cm ³ cm ⁻³)	0,2	0,19	0,21	0,17	0,18	0,06	0,22	0,19
<0,2 (cm ³ cm ⁻³)	0,15	0,17	0,14	0,16	0,16	0,15	0,12	0,14

Hu: humedad gravimétrica promedio; CV: coeficiente de variación; Normalidad: test de normalidad (Shapiro Wilks modificado); Dap: densidad aparente; Mo: materia orgánica; 50-10: volumen ocupado por poros entre 50 y 10 μ m; 10-0,2: volumen ocupado por poros entre 10 y 0,2 μ m; <0,2: volumen ocupado por poros menores a 0,2 μ m; FAL: textura franco arcillo limosa; FL: textura franco limosa. Sitios: Zas (Zavalla, 0-5 cm); Zap (Zavalla, 5 a 10 cm); Is (Ibarlucea, 0 a 5 cm); Ip (Ibarlucea, 5 a 10 cm); RZs (Transecta Roldán-Zavalla, 0 a 5 cm); RZp (Transecta Roldán-Zavalla, 5 a 10 cm); Cs (Tierras con aptitud agrícola de la cuenca, 0 a 5 cm); Cp (Tierras con aptitud agrícola de la cuenca, 5 a 10 cm).

Hu: average gravimetric soil moisture; CV: coefficient of variation; Normalidad: normality test (modified Shapiro Wilks); Dap: bulk density; Mo: organic matter; 50-10: volume occupied by pores between 50 and 10 μ m; 10-0,2: volume occupied by pores between 10 and 0,2 μ m; <0,2: volume occupied by pores less than 0,2 μ m; FAL: silty clay loam texture; FL: silty loam texture. Sites: Zas (Zavalla, 0-5 cm); Zap (Zavalla, 5 to 10 cm); Is (Ibarlucea, 0 to 5 cm); Ip (Ibarlucea, 5 to 10 cm); RZs (Roldán-Zavalla transect, 0 to 5 cm); RZp (Roldán-Zavalla transect, 5 to 10 cm); Cs (basin agricultural soils, 0 to 5 cm); Cp (basin agricultural soils, 5 to 10 cm).

Page *et al.*, 1982) y volumen ocupado por distintos tamaños de poros (Klute, 1986): entre 50 y 10 micrones (50-10); entre 10 y 0,2 micrones (10-0,2); menores a 0,2 micrones (<0,2). Para algunas de las repeticiones de humedad edáfica realizadas a escala de cuenca (n=38), se contó con la información de distribución de partículas (Castiglioni, 2017), habiéndose evaluado también su efecto sobre la variabilidad del contenido hídrico a escala de cuenca. Estos estudios se realizaron utilizando el software InfoStat versión 2015 (Di Rienzo *et al.*, 2015).

Para el análisis geoestadístico se utilizó el programa Variowin versión 2.21 (Pannatier, 1996). Este software permite realizar el estudio estructural de datos espaciales y es de dominio público. Información adicional sobre su funcionamiento puede obtenerse de los trabajos de Santamaría & Malla (2006, 2008). En cada sitio de muestreo se consideró una distancia máxima para la gráfica del semivariograma, similar a la mitad de la mayor distancia registrada entre observaciones. Una vez determinados los semivariogramas experimentales, se buscó para cada situación el modelo que mejor representó la relación entre la semivarianza y la distancia entre pares de observaciones, seleccionando aquel que generara el mejor ajuste entre el comportamiento observado y estimado. Respecto a esto último, el programa Variowin versión 2.2.1 presenta un indicador de bondad de ajuste (IGF), que está representado por la siguiente expresión matemática:

$$IGF = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=0}^{n(k)} \frac{P(i)}{\sum_{j=0}^{n(k)} P(j)} \times \frac{D(k)}{d(i)} \times \left[\frac{Y(i) - Y^*(i)}{\sigma^2} \right]^2 \quad (1)$$

Donde:

IGF: Indicador de bondad de ajuste

N: número de variogramas direccionales

n(k): número de pasos ("lags") relativos al variograma k

D (k): distancia máxima relativa al variograma k

P (i): número de pares para el paso i del variograma k

d (i): distancia media de los pares para el paso i del variograma k

Y (i): medida experimental de continuidad espacial para el paso i

Y*(i): medida modelada de continuidad espacial para d (i)

σ^2 : varianza de los datos para el variograma (cruzado)

Posteriormente se obtuvieron los distintos parámetros de los semivariogramas teóricos generados (rango, silla y efecto pepita). Con los mismos se determinó el grado de dependencia espacial (RD) (Cambardella *et al.*, 1994), que surge de aplicar la siguiente ecuación.

$$RD = \frac{C_0}{(C_0 + C_1)} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

RD: grado de dependencia espacial (%)

C1: varianza estructural que corresponde al valor de la meseta menos el efecto pepita

C0: efecto pepita que representa la varianza local y que ocurre a escalas de muestreo menores a las del intervalo de muestreo efectuado

C0 + C1: varianza total o meseta.

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.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El volumen de lluvia registrado con anterioridad a los muestreos, fue distinto al histórico según la fecha considerada (**Figura 1, Tabla 1**). En Za, las precipitaciones previas (mayo 2010 a agosto 2010) fueron menores al promedio (93 mm y 141 mm, respectivamente), bajo una condición de baja demanda de humedad atmosférica. El resto de las determinaciones se realizaron bajo una lluvia antecedente de los cuatro meses previos (febrero 2011 a mayo 2011), similar al promedio (412 mm y 388 mm, respectivamente). De esta manera, el contenido hídrico edáfico medio en Za, resultó menor al del resto de las observaciones (**Tabla 2**).

Pese a que el valor medio de esta variable osciló entre el 24 y 37% (**Tabla 2**), no se comprobó que el contenido promedio de humedad edáfica incidiera sobre su heterogeneidad (**Tabla 3**). Baroni *et al.* (2013) mencionaron que a partir de un suelo húmedo, su variabilidad aumenta en la

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre el valor medio de distintas variables de cada sitio con el coeficiente de variación del contenido hídrico del suelo

Table 3. Correlation coefficients between the mean value of different variables of each site with the soil water content coefficient of variation

	Dap	Mo	Hu	MD	Dm	50-10	10-0,2	<0,2
CV	-0,37ns	0,29ns	0,58ns	0,93**	0,91*	-0,09ns	0,20ns	-0,64ns

CV: coeficiente de variación de la humedad edáfica; Dap: densidad aparente; Mo: materia orgánica; Hu: humedad gravimétrica; MD: máxima distancia entre observaciones; Dm: distancia mínima promedio entre observaciones; 50-10: volumen ocupado por poros entre 50 y 10 μm ; 10-0,2: volumen ocupado por poros entre 10 y 0,2 μm ; <0,2: volumen ocupado por poros menores a 0,2 μm . ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo

CV: soil moisture coefficient of variation; Dap: bulk density; Mo: organic matter; Hu: gravimetric soil moisture; MD: maximum distance between observations; Dm: average minimum distance between observations; 50-10: volume occupied by pores between 50 and 10 μm ; 10-0.2: volume occupied by pores between 10 and 0.2 μm ; <0.2: volume occupied by pores less than 0.2 μm . ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; ns: not significant.

medida que este se seca hasta llegar a un valor de máxima heterogeneidad, a partir del cual la misma desciende. Por su parte, los resultados medios registrados por las restantes propiedades (**Tabla 3**), como la profundidad de muestreo (**Figura 2**) tampoco condicionaron la variabilidad de Hu. No obstante, sería necesario convalidar estos resultados para cada una de las escalas analizadas, abarcando un mayor número de situaciones con distintos contenidos hídricos y para diferentes valores de las propiedades del suelo utilizadas.

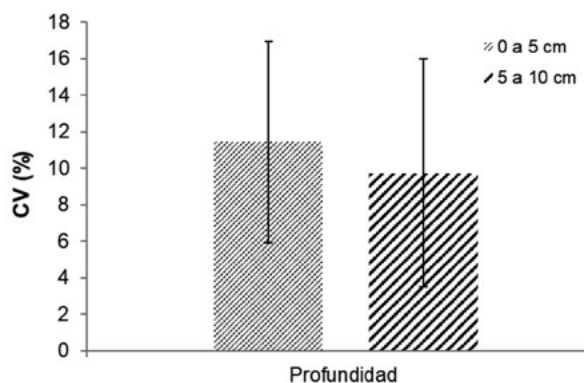


Figura 2. Coeficiente de variación medio de la humedad edáfica y su desvío estándar de acuerdo a las dos profundidades de muestreo.

Figure 2. Soil moisture average coefficient of variation and its standard deviation according to the two sampling depths.

Dentro del intervalo de valores de humedad determinados en el presente trabajo, los coeficientes de variación fueron en promedio del 6,2% para las parcelas; 11,5% para la unidad de paisaje y del 18,1% a escala de cuenca, haciendo evidente por lo tanto un aumento de la variabilidad de esta propiedad con el incremento de escala. Este comportamiento también quedó demostrado al ob-

servar los coeficientes de correlación positivos y significativos, obtenidos entre la distancia mínima promedio y el máximo espaciamiento entre puntos de observación (Dm y MD, respectivamente) con el CV experimentado por Hu en cada uno de los sitios evaluados (**Tabla 3**). Reynolds (1974) trabajando en áreas con una extensión de 1 a 30 m, no encontró efectos de la escala sobre la variabilidad de este parámetro, mientras que lo contrario ocurrió al superar dicha distancia. Vereecken *et al.* (2014) citan otros estudios (Oldack *et al.*, 2002; Famiglietti *et al.*, 2008; Brocca *et al.*, 2012), a partir de los cuales se pudo comprobar un incremento en la variabilidad del contenido hídrico del suelo con el aumento del área evaluada.

La distribución estadística de los resultados de humedad edáfica fue normal en todos los sitios (**Tabla 2**), independientemente de la profundidad, escala y contenido hídrico medio del suelo. Vereecken *et al.* (2014) mencionan conclusiones similares para una amplia cantidad de estudios, realizados a distintas profundidades y escalas de resolución. Por su parte, Brocca *et al.* (2007) encontraron que este comportamiento se generaba sobre todo en terrenos con pendientes inferiores al 7%. Choi & Jacobs (2007) y Penna *et al.* (2009), determinaron que el tipo de distribución estadística del contenido de agua edáfica dependía del estado de humedad del suelo. Según los primeros autores mencionados, esta se ajustaría a una distribución normal luego de ocurrida una lluvia, mientras que para los segundos el mismo comportamiento se manifestaría para un contenido medio de humedad.

Los resultados del presente trabajo coincidieron con lo propuesto por Brocca *et al.* (2007), como consecuencia de que las pendientes presentes en el área estudiada son de bajo gradiente. También se asemejan a lo mencionado por Penna *et al.* (2009), ya que el contenido hídrico del suelo se ubicó en un valor intermedio, siendo necesario investigar la distribución estadística de los resultados para una humedad edáfica mayor y menor a la observada.

Dentro de cada uno de los sitios evaluados, se comprobó la existencia de coeficientes de correlación significativos entre la variación en la humedad del suelo con la de determinadas propiedades edáficas (Tabla 4). En este sentido, en la mayoría de ellos el aumento en la densidad aparente provocó una disminución del contenido hídrico del suelo, mientras que lo contrario sucedió con el contenido de materia orgánica. En un menor número de situaciones, se corroboró también que distintos tamaños de poro (10-0.2 y <0.2) afectaron la heterogeneidad de la propiedad estudiada, aumentando la humedad edáfica ante incrementos en el volumen ocupado por mesoporos y disminuyendo la misma con un mayor volumen de microporos. Por su parte, la variabilidad en el porcentaje de arena y de arcilla a escala de cuenca, con coeficientes de variación del 25% y

10%, respectivamente, no influyó sobre la heterogeneidad del contenido hídrico edáfico (Tabla 4).

Diferentes trabajos han mostrado la incidencia de distintas propiedades sobre el comportamiento de la variabilidad de la humedad edáfica. Reynolds (1970), Henninger *et al.* (1976) y Crave & Gascuel-Odoux (1997) encontraron efectos de la textura sobre la variación de esta propiedad. A su vez, Hawley *et al.* (1983) notaron que los mismos eran más pronunciados cuando el suelo estaba húmedo. Niemann & Edgell (1993) determinaron que la macroporosidad ejercía cierto control sobre la variabilidad del contenido hídrico. Por su parte, Famiglietti *et al.* (1998) observaron que la porosidad y la conductividad hidráulica eran responsables de la heterogeneidad de esta propiedad bajo suelo húmedo, mientras que al estar seco se encontraba más regulada por parámetros relacionados con la topografía y con el contenido de arcilla. Baroni *et al.* (2013) mencionaron que las propiedades edáficas se relacionan mejor con la variabilidad del contenido hídrico durante los períodos húmedos, mientras que en los secos pasa a ser más importante la influencia de la vegetación. Hebrard *et al.* (2006) vieron que la textura tenía un rol secundario sobre la variabilidad de la humedad edáfica de la cuenca por estos autores analizada, siendo más importantes aquellas pro-

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre el valor de la humedad edáfica con el de otras propiedades, correspondientes a cada repetición realizada en cada sitio.

Table 4. Correlation coefficients between soil water content with other soil properties, corresponding to each repetition performed in each site.

	Zas	Zap	Is	Ip	RZs	RZp	Cs	Cp
Dap	-0,36**	ns	-0,45**	-0,37**	-0,43**	-0,44**	-0,36**	-0,50**
Mo	0,43**	0,24*	ns	ns	0,45**	ns	0,32**	0,22**
10-0,2	ns	ns	ns	0,31**	0,40**	ns	0,68**	ns
<0,2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,58**	ns
Arena							ns	ns
Arcilla							ns	ns

Dap: densidad aparente; Mo: materia orgánica; 10-0,2: volumen ocupado por poros entre entre 10 y 0,2 μm ; <0,2: volumen ocupado por poros menores a 0,2 μm . Sitios: Zas (Zavalla, 0-5 cm); Zap (Zavalla, 5 a 10 cm); Is (Ibarlucea, 0 a 5 cm); Ip (Ibarlucea, 5 a 10 cm); RZs (Transecta Roldán-Zavalla, 0 a 5 cm); RZp (Transecta Roldán-Zavalla, 5 a 10 cm); Cs (Tierras con aptitud agrícola de la cuenca, 0 a 5 cm); Cp (Tierras con aptitud agrícola de la cuenca, 5 a 10 cm). ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns= no significativo.

Dap: bulk density; Mo: organic matter; 10-0,2: volume occupied by pores between 10 and 0,2 μm ; <0,2: volume occupied by pores less than 0,2 μm . Sites: Zas (Zavalla, 0-5 cm); Zap (Zavalla, 5 to 10 cm); Is (Ibarlucea, 0 to 5 cm); Ip (Ibarlucea, 5 to 10 cm); RZs (Roldán-Zavalla transect, 0 to 5 cm); RZp (Roldán-Zavalla transect, 5 to 10 cm); Cas (basin agricultural soils, 0 to 5 cm); Cap (basin agricultural soils, 5 to 10 cm). ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; ns= not significant

propiedades del suelo que eran modificadas por el uso de la tierra.

De los resultados del presente trabajo, surge que dentro de un mismo sitio de muestreo se vieron aumentos en el contenido hídrico en aquellas situaciones con menor densificación del suelo y menor volumen de microporos, probablemente a partir de un incremento en la capacidad de infiltración. Por otro lado, el mayor contenido de materia orgánica y como resultado de ello el desarrollo de propiedades físicas favorables para el proceso de infiltración, como también la presencia de un volumen superior de poros de almacenamiento de agua, implicó un mayor contenido hídrico del suelo.

A partir del análisis geoestadístico se pudo comprobar en todos los casos que existió correlación espacial, que no hubo una tendencia en la dirección de los resultados respecto a alguna de las coordenadas geográficas, por lo que se descartó la posibilidad de anisotropía en su disposición espacial. Esto estaría manifestando que no existió

un factor natural o antrópico, que incidiera sobre el direccionamiento de la variabilidad de esta propiedad en un sentido particular del espacio.

No todos los sitios bajo estudio presentaron estructura espacial en la humedad efáica de ambos estratos estudiados (**Tabla 5**), mientras que entre aquellos casos en que se pudo observar cierta organización espacial, las parcelas y la unidad de paisaje obtuvieron un grado de correlación peor ($RD > 70$), respecto a lo observado en la cuenca ($RD < 30$). En RZs el contenido hídrico medio del suelo y su heterogeneidad fueron similares a lo observado en Cs (**Tabla 2**). Sin embargo el grado de estructura espacial en RZs estuvo dentro del intervalo de valores de RD determinados a escala de parcela, por lo que se deduce que su comportamiento espacial estaría más influido por la escala. A su vez, del análisis de la **Tabla 5** no se evidencia un efecto de la profundidad de muestreo sobre el grado de organización espacial del contenido hídrico del suelo. Por su parte y según se detalla en la **Tabla 6**, el contenido medio de

Tabla 5. Parámetros surgidos del análisis geoestadístico.

Table 5. Parameters of the geostatistical analysis.

	Zap	Ip	RZs	Cs	Cp
Modelo de semivarianza ajustado	G	G	G	G	G
Rango de correlación espacial (m)	15	25	3311	29000	23000
Silla	0,00004	0,00006	0,00056	0,004	0,00201
Efecto pepita	0,0001	0,00028	0,0017	0,00192	0,00096
Grado de ajuste (IGF)	0,0053	0,0064	0,0024	0,074	0,0366
RD (%)	73	83	75	32	32

Zap: Zavalla, 5 a 10 cm; Ip: Ibarlucea, 5 a 10 cm; RZs: transecta Roldán-Zavalla, 0 a 5 cm; Cs: tierras agrícolas de la cuenca, 0 a 5 cm; Cp: tierras agrícolas de la cuenca, 5 a 10 cm; G: modelo de semivarianza gaussiano. RD: grado de estructura espacial.

Zap: Zavalla, 5 to 10 cm; Ip: Ibarlucea, 5 to 10 cm; RZs: Roldán-Zavalla transect, 0 to 5 cm; Cs: basin agricultural soils, 0 to 5 cm; Cp: basin agricultural soils, 5 to 10 cm. G: Gaussian semivariance model. RD: degree of spatial structure.

Tabla 6. Coeficientes de correlación entre el grado de correlación espacial del contenido hídrico con distintas propiedades edáficas.

Table 6. Correlation coefficients between the spatial correlation degree of water content with different soil properties.

	Dap	Mo	Hu	MD	Dm	50-10	10-0,2	<0,2
RD	0,29ns	-0,14ns	-0,21ns	-0,98**	-0,99**	0,20ns	-0,78ns	0,88ns

RD: grado de correlación espacial del contenido de agua; Dap: densidad aparente; Mo: materia orgánica; Hu: humedad gravimétrica; MD: máxima distancia entre observaciones; Dm: distancia mínima promedio entre observaciones; 50-10: volumen ocupado por poros entre 50 y 10 μm ; 10-0,2: volumen ocupado por poros entre 10 y 0,2 μm ; <0,2: volumen ocupado por poros menores a 0,2 μm . ** $p < 0,01$; ns= no significativo.

RD: spatial correlation degree of water content; Dap: bulk density; Mo: organic matter; Hu: gravimetric soil water content; MD: maximum distance between observations; Dm: average minimum distance between observations; 50-10: volume occupied by pores between 50 and 10 μm ; 10-0,2: volume occupied by pores between 10 and 0,2 μm ; <0,2: volume occupied by pores less than 0,2 μm . ** $p < 0,01$; ns: not significant

humedad edáfica y el valor promedio registrado por las otras variables, tampoco habrían condicionado los resultados de RD.

Rosenbaum *et al.* (2012) a partir del monitoreo de la humedad edáfica en una pequeña cuenca de Alemania, determinaron que las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación, la capa freática, el contenido medio de agua y la intensidad de las lluvias, eran factores que en distintos momentos del año incidían sobre los patrones espaciales de esta propiedad.

En el presente trabajo, el cambio de escala de parcela y unidad de paisaje a cuenca, expresado a partir de las modificaciones en la distancia mínima promedio y el máximo espaciamiento entre puntos de observación (Dm y MD, respectivamente), fue el único parámetro entre los analizados que condicionó en forma significativa el grado de correlación espacial (**Tabla 6**). Grayson & Blöschl (2000) mencionan que cuando es grande la distancia entre muestras, no se puede capturar la variabilidad que ocurre a pequeña escala, mientras que si la extensión del área de muestreo es reducida, no se registra la variabilidad que sucede a escalas mayores. Por lo tanto y para las condiciones del presente estudio, solo se pudo observar para esta propiedad un grado de correlación espacial entre moderado y alto, cuando se aumentó considerablemente el área de análisis. Dado el bajo gradiente en el relieve de la superficie evaluada, la escasa variación en la textura de los suelos y que no hubo vegetación en estado de desarrollo durante el período analizado, probablemente las diferencias en la lámina de lluvia caída dentro de la cuenca, sea un factor que forzó este comportamiento.

El rango de correlación espacial para esta propiedad aumentó con el incremento de escala, siendo el coeficiente de correlación entre este parámetro y la distancia máxima entre muestras (MD) igual a 0,99 ($p < 0,01$). Western *et al.* (2004) mencionan que hay una tendencia a un incremento en el rango de correlación espacial en la medida que aumenta la longitud del área evaluada y a partir del incremento en el espaciamiento entre muestras (Western & Blöschl, 1999). Sin embargo, los cambios en los procesos que controlan la dinámica del contenido hídrico

con la escala, también pueden afectar el valor de dicho parámetro. En este sentido, las características del suelo y de la vegetación pueden tener un rol significativo (Western *et al.*, 2004). Korres *et al.* (2015) determinaron en una cuenca de Alemania, que el rango de correlación espacial podía estar afectado por las características topográficas del sitio analizado, la heterogeneidad en el uso de la tierra o por la variabilidad de los suelos. Por su parte, Western *et al.* (1998) y Hu *et al.* (2011) encontraron un menor valor del rango bajo suelo húmedo respecto al seco.

CONCLUSIONES

La cuenca del Arroyo Ludueña es un sistema hidrológico típico de áreas de llanura, con relieve poco pronunciado. En la misma, las unidades cartográficas de suelo con aptitud agrícola cubren la mayor superficie, predominando en el estrato superficial de todos los suelos presentes el contenido de limo. La toma de muestras durante el presente trabajo fue realizada en un período de reposo vegetativo, sin existir efecto de la vegetación sobre el contenido hídrico edáfico, ubicándose el mismo en un rango de humedad intermedio. Estas características determinaron que el principal factor que incidió sobre los resultados de heterogeneidad, grado y rango de estructura espacial de la humedad edáfica fue la escala. Por su parte, la distribución estadística de los resultados no estuvo asociada a la escala, profundidad de muestreo ni a la humedad promedio del suelo. No se observaron efectos del diferente contenido hídrico como tampoco de las otras propiedades edáficas sobre la variabilidad y el comportamiento espacial de la variable bajo estudio. Sin embargo dentro de cada sitio evaluado, en la mayoría de los casos la densidad aparente y la materia orgánica, y en algunos de ellos determinados tamaños de poro, influyeron sobre la heterogeneidad de la humedad edáfica. No obstante, sería necesario profundizar estos resultados con estudios adicionales para cada una de las escalas estudiadas, realizando un mayor número de relevamientos con distintos contenidos hídricos medios y para diferentes valores de las propiedades del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por proyecto UBACyT 20020130100670BA. Se agradece a la Facultad de Agronomía de la UNR por facilitar el acceso a un lote para la realización del presente estudio y a la Cátedra de Climatología de dicha Facultad por el aporte de información meteorológica.

BIBLIOGRAFÍA

- Baroni, G; B Ortuani; A Facchi & 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
- Blake, G R & K H Hartge. 1986. Bulk density. In: *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods.* Agronomy Monograph. 9. A.Klute (ed), ASA, Madison, Wi. p.363-375.
- Brocca, L; R Morbidelli; F Melone & T Moramarco. 2007. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *J Hydrol.* 333: 356–373.
- Brocca, L; F Melone; T Moramarco & R Morbidelli. 2009. Soil moisture temporal stability over experimental areas of Central Italy. *Geoderma* 148 (3–4): 364–374.
- Brocca, L; T Tullio; F Melone; T Moramarco & R Morbidelli. 2012. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. *J Hydrol.* 422: 63-75.
- Cambardella, C A; T B Moorman; T B Parkin; D L Karlen; R F Turco & A E Konopka. 1994. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci Soc Am J.* 58: 1501–1511.
- Cantón, Y; A Sole´-Benet & F Domingo. 2004. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *J Hydrol.* 285: 199–214.
- Castiglioni, M G. 2017. Análisis de heterogeneidad en los patrones espaciales de las propiedades hidráulicas de suelos bajo distintas escalas de trabajo. Tesis de Doctorado Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.
- Choi, M & J M Jacobs. 2007. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints. *Adv W. Res.* 30(4): 883-896.
- Crave, A & C Gascuel-Oudou. 1997. The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content. *Hydrol Process.* 11: 203–210.
- De Lannoy, G J M; N E C Verhoest; P R Houser; T J Gish & M Van Meirvenne. 2006. Spatial and temporal characteristics of soil moisture in an intensively monitored agricultural field (OPE3). *J Hydrol.* 331 (3-4): 719-730.
- Di Rienzo, J A; F Casanoves; M G Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & C W Robledo. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Famiglietti, J S; J W Rudnicki & M Rodell. 1998. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: rattlesnake hill, Texas. *J Hydrol.* 210: 259–281.
- Famiglietti, J S; D Ryu; A A Berg; M Rodell & T J Jackson. 2008. Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resour Res.* 44(1):1-16.
- Fitzjohn, C; J L Ternan & A G Williams. 1998. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment, implications for runoff and erosion control. *Catena* 32 (1): 55–70.
- Gómez-Plaza, A; M Martínez-Mena; J Albaladejo & V M Castillo. 2001. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *J Hydrol.* 253:211-226.
- Grayson, R & G Blöschl. 2000. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling.* Cambridge University Press, New York, 404 pp.
- Hawley, M E; T J Jackson & R H McCuen. 1983. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. *J Hydrol.* 62:179–200.
- Hebrard, O; M Voltz; P Andrieux & R Moussa. 2006. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. *J Hydrol.* 329: 110– 121.
- Henninger, J L; G W Petersen & E T Engman. 1976. Surface soil moisture within a watershed-variations, factors influencing, and relationship to surface runoff. *Soil Sci Soc Am J.* 40:773–776.
- Hu, W; M Shao, F Han & K Reichardt. 2011. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub and grass-land. *Geoderma.* 162: 260-272.
- Hupet, F & M Vanclooster. 2002. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *J Hydrol.* 261: 86–101.
- INTA. 1975. Carta de suelos: Carcarañá, Andino, Cañada de Gomez-Rosario, Casilda, Arroyo Seco-San Nicolás de los Arroyos. Buenos Aires. Argentina.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. In: *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* Agronomy Monograph. 9. A.Klute (ed), ASA, Madison, Wi. p.635-662.
- Korres, W; T G Reichenau; P Fiener; C N Koyama; H R Bogen; T Cornelissen; R Baatz; M Herbst; B Diekkruger; H Vereecken & K Schneider. 2015. Spatio-temporal soil moisture patterns – A meta-analysis using plot to catchment scale data. *J Hydrol.* 520: 326-341.
- Krajewski, W F; M C Anderson; W E Einching; D Entekhabi; B K Hornbuckle; P R Houser; G G Katul; W P Kustas; J M

- Norman; C Peters-Lidard & E F Wood. 2006. A remote sensing observatory for hydrologic sciences: A genesis for scaling to continental hydrology. *Water Resour Res.* 42:1-13 W07301, doi:10.1029/2005WR004435.
- McNamara, J P; D Chandler; M Seyfried & S Achet. 2005. Soil moisture states, lateral flow, and streamflow generation in a semi-arid, snowmelt-driven catchment. *Hydrol Process.* 19: 4023-4038.
- Meyles, E; A Williams; L Ternan & J Dowd. 2003. Runoff generation in relation to soil moisture patterns in a small Dartmoor catchment, Southwest England. *Hydrol Process.* 17: 251-264.
- Montico, S. & N Di Leo. 2007. Cambio de la sostenibilidad biofísica en cuencas hidrográficas: tres décadas de reemplazo de pastizales naturales por agricultura. *Cuadernos del CURIHAM* 13 (1): 1-7.
- Niemann, K O & M C R Edgell. 1993. Preliminary analysis of spatial and temporal distribution of soil moisture on a deforested slope. *Phys Geogr.* 14 (5): 449-464.
- Oldak, A; Y Pachepsky; T J Jackson & W J Rawls. 2002. Statistical properties of soil moisture images revisited. *J. Hydrol* 255 (1-4): 12-24
- Page A L; R I Miller & D R Keeney (ed) 1982. *Methods of soil analysis. Part II. Chemical and Microbiological Properties.* Second edition. Agronomy Monograph N 9 ASA, SSSA. Madison, Wisconsin USA.
- Pannatier, Y. 1996. "VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D", Springer-Verlag, New York.
- Penna, D; M Borga; D Norbiato & G Dalla Fontana. 2009. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. *J Hydrol.* 364: 311-327.
- Petrone, R M; J S Price; S K Carey & J M Waddington. 2004. Statistical characterization of the spatial variability of the soil moisture in a cutover peatland. *Hydrol Process.* 18: 41-52.
- Reynolds, G S. 1970. The gravimetric method of soil moisture determination. Part III: an examination of factors influencing soil moisture variability. *J Hydrol.* 11: 288-300.
- Reynolds, G S. 1974. A note on the relationship between size of the area and soil moisture variability. *J Hydrol.* 22:71-76.
- Robinson, D A; C S Campbell; J W Hopmans; B K Hornbuckle; S B Jones; R Knight; F Ogden; J Selker & O Wendroth. 2008. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone J.* 7: 358-389.
- Rosenbaum, U; H R Bogaena; M Herbst; J A Huisman; T J Peterson; A Weuthen;
- A W Western & H Vereecken. 2012. Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale. *Water Resour. Res.* 48:1-22.
- Santamaría, M S & M S Malla. 2006. Notas sobre el manejo del software geoestadístico Variowin. Parte I: Cálculo del variograma. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* 9(18): 82-90.
- Santamaría, M S & M S Malla. 2008. Notas sobre el manejo del software geoestadístico Variowin. Parte II: modelado del variograma experimental. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* 11(22): 89-95.
- Scuderi, C M & H Stenta. 2006. Estimación del número de curva (CN) a partir de la interpretación de imágenes satelitales en la cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fé, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM* 12: 15-23.
- Scuderi, C M; G Riccaardi; E Zimmermann. 2014. Pronóstico de alturas en cursos de llanura mediante el uso de un modelo de caja negra. *Cuadernos del Curiham* (20): 33-57.
- Takagi, K & H S Lin. 2012. Changing controls of soil moisture spatial organization in the Shale Hills Catchment. *Geoderma* 173-174: 289-302.
- Teuling, A J & P A Troch. 2005. Improved understanding of soil moisture variability dynamics. *Geophys Res. Lett.* 32: 1-4.
- Vereecken, H; J A Huisman; Y Pachepsky; C Montzka; J van der Kruk; H Bogaena; L Weihermuller; M Herbst; G Martinez & J Vanderborgh. 2014. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *J Hydrol.* 516:76-96.
- Wang, J; B J Fu; Y Qiu; L D Chen & Z Wang. 2001. Geostatistical analysis of soil moisture variability on Da Nangou catchment of the loess plateau, China. *Environ Geol.* 41 (1-2):113-120.
- Western, A W & G Bloschl. 1999. On the spatial scaling of soil moisture. *J Hydrol.* 217: 203-224.
- Western, A W; G Blöschl & R B Grayson. 1998. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *J Hydrol.* 205 (1-2): 20-37.
- Western, A W; R B Grayson & G Bloschl. 2002. Scaling of soil moisture: A Hydrologic Perspective. *Annu Rev Earth Planet Sci.* 30:149-80
- Western A W; R B Grayson; G Blöschl & D J Wilson. 2003. Spatial variability of soil moisture and its implications for scaling. In: Pachepsky, Y., Selim, M., Radcliffe, A. (Eds.), *Scaling Methods in Soil Physics.* CRC Press, Boca Raton, pp. 119-142.
- Western, A W; S L Zhou; R B Grayson; T A McMahon; G Bloschl & 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.
- Wilson, D J; A W Western & R B Grayson. 2004. Identifying and quantifying sources of variability in temporal and

- spatial soil moisture observations. *Water Resour Res.* 40, W02507, doi:10.1029/2003WR002306.
- Yang, L. 2010. Spatio-temporal patterns of field-scale soil moisture and their implications for in situ soil moisture network design. Graduate Thesis and Dissertations. Graduate College. Iowa State University. Pp 114.
- Zhao, Y; S Peth; X Y Wang; H Lin & R Horn. 2010. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe. *Hydrol Process.* 24: 2507–2519.
- Zhu, Y J & M A Shao. 2008. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liudaogou catchment on the northern Loess Plateau of China. *Geoderma* 147: 185-191.
- Zhu, Q & H Lin. 2011. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales. *Geoderma* 163: 45–54.
- Zimmermann, E D; C Scuderi; G A Riccardi; H R Stenta; P A Basile; M García & J Rentería. 2008. Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando composición textural, características físicas y estratigráficas. XXIII Congreso Latinoamericano de hidráulica de Cartagena de Indias, Colombia.