

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE SUELOS
UTILIZANDO COMPOSICIÓN TEXTURAL, CARACTERÍSTICAS
FÍSICAS Y ESTRATIGRÁFICAS**

Erik D. Zimmermann⁽¹⁾⁽³⁾, Carlos Scuderi⁽⁴⁾, Gerardo A. Riccardi⁽¹⁾⁽²⁾, Hernan R. Stenta⁽⁴⁾, Pedro A. Basile⁽¹⁾⁽³⁾, Marina Garcia⁽⁴⁾ y Juan Rentería⁽⁵⁾

(1) Profesor Adjunto, (2) Investigador CIC-CIUNR, (3) Investigador CONICET, (4) Becario Doctoral CONICET, (5) Docente Investigador. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, Argentina. e_mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: Se presenta una metodología sencilla de ponderación areal y por horizontes de suelo para estimar parámetros hidráulicos de suelos limosos del sur santafecino (pampa de Argentina). Se emplean las funciones de pedotransferencia incluidas en el software SoilPar 2.0 para la estimación de parámetros por horizonte utilizando información textural, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y pH disponibles en la cartas de suelo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Para analizar la bondad de la propuesta de ponderación se compararon los resultados aplicados en los suelos presentes en la cuenca del arroyo Ludueña, ubicada en las cercanías de la ciudad de Rosario (provincia de Santa Fe, Argentina). La misma es una cuenca piloto sobre la cual se aplicó y calibró un modelo matemático hidrológico de alto nivel de detalle denominado SHALL3 (Zimmermann y Riccardi, 2000). El pronóstico de los parámetros que regulan la curva de retención de humedad (modelo de van Genuchten) es aceptable, aunque no sucede lo mismo con la conductividad hidráulica, motivo por el cual deberá indagarse acerca de otras funciones de pedotransferencia para estimarla. Los resultados alcanzados al presente son promisorios y validan esta metodología de ponderación sencilla para ser aplicadas en otras cuencas de la región.

PALABRAS CLAVES: parámetros hidráulicos, suelos limosos, pampa Argentina

ABSTRACT: A simple weighting methodology for estimating soil hydraulic parameters of silt soils placed in flatland areas of Argentina is presented. Areal and horizons soil properties are considered in this methodology. For estimating parameters purposes, pedotransfer functions included in SoilPar 2.0 software is taking account, using information of textural horizons, organic matter content, cation exchange capacity and pH available on the National Institute of Agricultural Technology (INTA) soil maps. To analyze the goodness of the proposed methodology, was compared the results reached with the same one achieved by the mathematical hydrological model SHALL3 (Zimmermann and Riccardi, 2000) that was calibrated in the watershed of the Ludueña's stream (Santa Fe province, Argentina). The prediction of the parameters that govern the retention curve (van Genuchten model) is acceptable, but not the same thing happens with the hydraulic conductivity, why should inquire about other pedotransfer functions to estimate. The results achieved at present are promising and validate this simple weighting methodology to be applied in other basins in the region.

KEYWORDS: hydraulic parameters, silt soils, argentinean flatlans.

INTRODUCCIÓN

Para predecir el movimiento de agua y solutos en la zona no saturada (ZNS) se emplean habitualmente modelos numéricos. Los resultados de sus aplicaciones sólo pueden ser confiables si las propiedades del medio poroso son conocidas. Esto representa la principal limitación a la tecnología actual de modelos sofisticados que se encuentra en un estado avanzado con respecto al conocimiento de los parámetros que engloban esos modelos.

En trabajos de calibración de modelos hidrológicos continuos; se ha demostrado la alta sensibilidad que presentan los procesos subterráneos, observables en el sistema mediante los niveles freáticos, y los procesos hidrológicos superficiales, observables a través de volúmenes de escurrimiento, frente a los parámetros hidráulicos que caracterizan la zona no saturada (Zimmermann, 2003).

Se han diseñado un gran número de ensayos de laboratorio y métodos de campo para medir las funciones hidráulicas del suelo, pero la mayoría de los métodos son relativamente costosos y difíciles de llevar a cabo.

Existen métodos indirectos para generar las propiedades hidráulicas de suelos, que varían en términos de metodología y complejidad, pudiendo distinguirse tres grupos principales: los métodos basados en la distribución del tamaño de poros, los métodos inversos y las funciones de pedotransferencia.

Las funciones de pedotransferencia (FPT) ofrecen un método para estimar propiedades hidráulicas usando el hecho que las mismas se relacionan con la composición textural del suelo entre otra información taxonómica disponible. (ej., la distribución de tamaño de partículas, densidad aparente, contenido de materia orgánica, etc.). Para la implementación práctica de las FPT se han desarrollado varios códigos de cálculo entre los que pueden mencionarse el programa SoilPar.

SOILPAR 2.0 (Acutis y Donatelli, 2003) es un programa para estimar parámetros hidráulicos del suelo desarrollado por el Departamento de Ingeniería Agrícola y Agronomía Territorial (Nápoles, Italia) y el Instituto de Investigación para Cultivos Industriales (Bologna, Italia).

Ante la necesidad de obtener parámetros hidráulicos del suelo para la modelización hidrológica de cuencas ubicadas en la llanura pampeana argentina se empleó este procedimiento. En este trabajo también se presenta la metodología de ponderación empleada para la estimación de dichos parámetros, partiendo de la información volcada en mapas cartográficos de suelos elaborados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

MATERIALES Y MÉTODOS.

Algunos modelos analíticos para las funciones hidráulicas de los suelos

Aunque se han propuesto muchas funciones empíricas para la curva de retención son pocas las que tienen una base fenomenológica. Una de las más conocidas y populares es la de Brooks y Corey (1964), según la cual:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\psi_c}{\psi} \right)^\lambda & \text{si } \rightarrow |\psi| \geq |\psi_c| \\ I & \text{si } \rightarrow |\psi| < |\psi_c| \end{cases} \quad [1]$$

donde θ_s es el contenido de humedad para medio saturado, θ_r es la humedad correspondiente a saturación irreductible, λ es un parámetro que depende de la distribución de los tamaños de poros, ψ_c es la succión crítica (presión de entrada de aire) y S_e es la saturación efectiva.

Para soslayar las limitaciones de la curva de Brooks y Corey, específicamente la discontinuidad en la zona de saturación, se han propuesto curvas con forma sigmoidal. Entre ellas se destaca la de van Genuchten (1980), cuya expresión es la siguiente:

$$S_e = \left[1 + (\alpha \psi)^n \right]^{-m} \quad [2]$$

donde α , m y n son parámetros empíricos. Este modelo de curva de retención tiene más flexibilidad para adaptarse a las curvas reales ya que depende de cinco parámetros independientes (α , m , n , θ_s , θ_r). En la práctica resulta conveniente restringir los valores de m y n de forma que $m = 1 - 1/n$. Con ello se obtienen expresiones sencillas de la curva de conductividad que se deriva de ella. La curva de van Genuchten incluye la de Brooks y Corey como un caso particular cuando n tiende a infinito, siendo el producto $n \cdot m$ constante. En este caso λ es igual a $n \cdot m$ y $\alpha = 1/\psi_c$.

Para la dependencia de la conductividad hidráulica relativa, $K_r = K(\theta)/K_s$, siendo K_s la conductividad hidráulica saturada, con el contenido de humedad suelen utilizarse fórmulas empíricas del tipo (Irmay, 1954):

$$K_r = S_e^3 \quad [3]$$

Este tipo de curva suele conducir a buenos ajustes en suelos de granulometría uniforme. Para rocas consolidadas es mejor un modelo en el que la conductividad relativa es proporcional a S_e^4 .

Otros autores como Mualem (1976a, 1976b) proponen expresiones de K_r obtenidas a partir de la curva de retención. Utilizando la curva de retención de van Genuchten se obtiene una expresión para K_r en el caso particular en el que $m = 1 - 1/n$, K_r se reduce a:

$$K_r = S_e^p \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad [4]$$

donde el parámetro p asume el valor de 0,5.

Programa SOILPAR

SOILPAR 2.0 es un programa para estimar parámetros hidráulicos del suelo desarrollado por Marco Acutis (Departamento de Ingeniería Agrícola y Agronomía Territorial, Nápoles, Italia) y Marcello Donatelli (Instituto de Investigación para Cultivos Industriales, Bologna, Italia).

El programa permite guardar información de suelos en un banco de datos georeferenciado, estimar parámetros hidráulicos de suelos usando varios procedimientos incorporados al programa, comparar las estimaciones contra datos medidos en forma gráfica y/o tabulada, y crear mapas que usan el formato ESRI.

Once métodos estiman uno o más de las características siguientes: contenido de humedad para diferentes tensiones matriciales, conductibilidad hidráulica saturada, y densidad aparente. Tres métodos estiman los parámetros de curvas de retención (Brooks-Corey, Hutson-Cass, Van Genuchten), y un método para estimaciones de conductibilidad hidráulica no saturada y

parámetros de curvas de retención (Campbell). El software corre bajo Windows 98/NT/2000/XP y es de acceso libre vía internet.

Los procedimientos de pedotransferencia se clasifican en: a) Estimación puntual de algunos valores específicos de interés de la curva de retención de humedad, conductibilidad hidráulica no saturada y densidad aparente; b) Estimación de parámetros de curvas de retención (Tabla 1).

El programa permite el ajuste de parámetros para las curvas de retención, en caso de contar con datos medidos de contenido de humedad y potencial matricial mediante un procedimiento de calibración no lineal. El mismo está basado en el método simplex con restricciones, para evitar inconsistencias físicas en los valores ajustados.

SOILPAR es un software disponible gratuito con propósitos no-comerciales. El paquete de la instalación puede obtenerse de: <http://www.isci.it/tools>.

Tabla 1. Métodos empleados en el software SoilPar para estimación de parámetros hidráulicos.

Estimación puntual de valores específicos			
Método	Variables requeridas	Parameters estimados	Fuentes
Baumer	DTP, CO	DA, CC, PMP	EPIC/ASW
Brakensiek/Rawls	DTP, CO DA	CH	Hutson and Wagenet, 1992
British Soil Survey subsoil	DTP, CO, DA	CH	Hutson and Wagenet, 1992
British Soil Survey topsoil	DTP, CO, DA	CH	Hutson and Wagenet, 1992
EPIC	DTP, DA	CC, PMP	EPIC/ASW
Hutson	DTP	DA, CH	Hutson and Wagenet, 1992
Manrique	DTP, DA	CC, PMP	EPIC/ASW
Rawls	DTP	DA, CC, PMP	EPIC/ASW
Jabro	DTP, DA	Ks	Jabro (1992)
Jaynes-Tyler	DTP, DA	Ks	Jaynes and Tyler (1984)
Puckett	DTP	Ks	Puckett et al. (1985)
Campbell	DTP, DA	Ks	Campbell (1985)
Estimación de parámetros de las curvas de retención de humedad			
Método	Variables requeridas	Parametros estimados	Fuentes
Rawls y Brakensiek	DTP, DA	parámetros de Brooks y Corey	Rawls y Brakensiek (1989)
Vereecken	DTP, DA	Parámetros de van Genuchten	Vereecken et al. (1989)

Referencias

Todos los métodos pueden aplicarse conociendo de la distribución de tamaño de partículas (DTP), al menos la clasificación textural en arenas, limos y arcilla. El método de Campbell es el único que necesita el conocimiento de siete clases de DTP. CO, carbono orgánico. DA, densidad aparente. CC, capacidad de campo. PMP, punto de marchitez permanente. CH, contenido de humedad para diferentes tensiones matriciales. Ks, Conductividad hidráulica saturada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicación a los suelos típicos en la región sur de la provincia de Santa Fe (pampa húmeda argentina).

La llanura chaco-pampeana de Argentina, de clima templado húmedo, está caracterizada por un relieve de moderada pendiente topográfica.

El área meridional de la provincia de Santa Fe, motivo de interés en este estudio (Figura 1), presenta un módulo pluviométrico del orden de los 1000 mm y la temperatura media anual del orden de los 17 °C. La unidad estratigráfica superior del paquete sedimentario, que constituye el sustrato geológico de los sistemas hidrológicos, está compuesta por el loess de la formación pampeana, integrada por limos y arcillas de colores castaños. El espesor en el sector de análisis varía entre 30 y 150 metros.

Los mapas de suelos disponibles en la provincia de Santa Fe, elaborados por el INTA, clasifican, desde un punto de vista textural, a los suelos de la región entre las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcilla limosa.

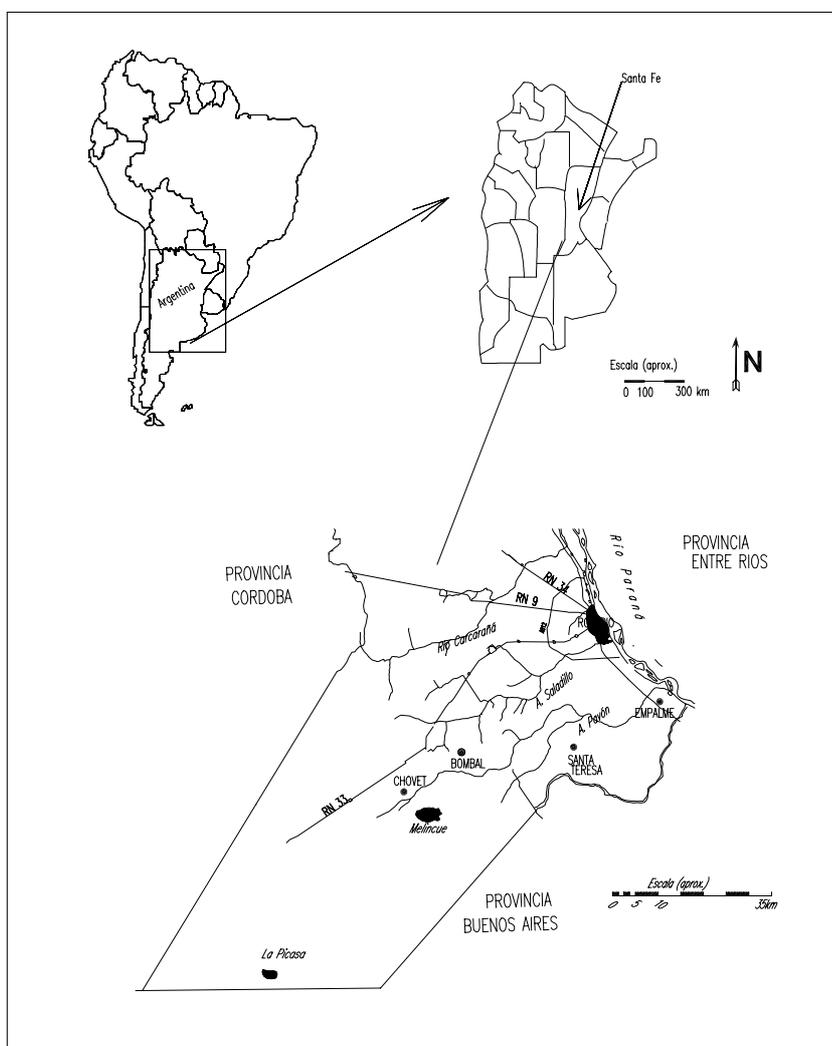


Figura 1. Área de estudio: sector meridional de Santa Fe

A los fines de aplicar el procedimiento SoilPar se contó con información elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), que caracteriza los perfiles de suelos presentes en el área de estudio.

De las cartas de suelos disponibles se extractó la información de 68 perfiles de series tipo de suelos. En cada perfil de las series, en función de su profundidad y su estratigrafía, se detallan entre 3 y 8 horizontes de los cuales se ha publicado la composición textural, junto a otros parámetros bio-físicos tales como contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, etc. (cartas de suelo de INTA). El conjunto de horizontes para todas las series estudiadas totalizan 434 muestras de suelo, considerando que, en promedio, cada serie de suelos esta discretizada entre 6 y 7 horizontes.

Estimación de parámetros por serie de suelos.

Con la información de cada horizonte, se confeccionaron planillas de cálculo y se aplicaron las FPT incluidas en el programa mencionado previamente, obteniendo así propiedades hidráulicas de suelos. A manera de ejemplo se presenta en la Tabla 2, los datos y estimaciones realizadas con el software SoilPar para la serie Casilda.

El mismo trabajo se realizó para cada uno de los estratos de las series restantes, obteniéndose densidades aparentes, humedades para capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y otras tensiones matriciales, conductividad hidráulica saturada y parámetros de van Genuchten para la curva de retención de humedad, utilizando las funciones de pedotransferencia intrínsecas del programa SoilPar.

Se propuso una metodología de ponderación para obtener parámetros por serie de suelos, partiendo de los parámetros calculados para cada horizonte. Los criterios fueron los siguientes: (a) para la conductividad hidráulica vertical se calculó la media armónica de las conductividades de cada estrato [ec. 5] y (b) para el resto de los parámetros el promedio ponderado por el espesor de cada estrato [ec. 6]:

$$K_m = \frac{L}{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{K_i}} \quad [5]$$

$$X_m = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N x_i e_i \quad [6]$$

donde X_m es el valor medio de un parámetro cualquiera, x_i el valor del parámetro para el espesor e_i , N el total de horizontes de la serie, K_m la conductividad hidráulica media, K_i la conductividad del horizonte y L el espesor total de la serie: $L = \sum_{i=1}^N e_i$

Tabla 2. Propiedades granulométricas, físicas e hidráulicas estimadas para la serie Casilda

	Unidades	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
Profundidad	(m)	0.18	0.27	0.48	0.76	1.04	1.28	1.80	2.10
Densidad seca (Rawls)	(t/m ³)	1.46	1.44	1.42	1.38	1.39	1.42	1.45	1.44
PMP (Brakensiek & Rawls)	(m/m)	0.19	0.22	0.22	0.28	0.23	0.19	0.14	0.16
CC (Brakensiek & Rawls)	(m/m)	0.39	0.42	0.40	0.46	0.40	0.35	0.31	0.32
Contenido de arena muy gruesa	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Contenido de arena gruesa	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Contenido de arena media	(%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Arena fina	(%)	2.00	1.50	1.00	1.00	1.50	1.00	1.80	1.30
Arena muy fina	(%)	8.20	5.50	4.20	2.50	4.60	6.90	9.80	6.90
Contenido de limo	(%)	69.90	64.40	61.70	49.60	55.80	62.80	67.80	68.20
Contenido de arcilla	(%)	19.87	28.57	33.07	46.87	38.07	29.27	20.57	23.57
coarse fragment content	(%)								
Materia orgánica	(%)	2.55	2.29	1.22	0.99	0.49	0.27	0.15	0.10
Capac. Intercambio Catiónico	(cmol/kg)	16.70	19.30	21.40	30.60	29.80	24.70	18.80	20.60
pH - en agua		6.20	6.40	6.60	7.00	7.10	6.80	7.50	8.20
Humedad a 10 (-J/kg)	(m/m)								
Humedad a 20 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	0.43	0.46	0.44	0.49	0.44	0.39	0.35	0.36
Humedad a 30 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	0.39	0.42	0.41	0.46	0.40	0.35	0.31	0.32
Humedad a 50 (-J/kg) (Brakensiek & Rav)	(m/m)	0.34	0.38	0.37	0.42	0.36	0.32	0.27	0.28
Humedad a 100 (-J/kg) (Brakensiek & R _z)	(m/m)	0.31	0.34	0.33	0.39	0.33	0.29	0.24	0.26
Humedad a 500 (-J/kg) (Brakensiek & R _z)	(m/m)								
Humedad a 1500 (-J/kg) (Brakensiek & F)	(m/m)	0.19	0.22	0.23	0.28	0.23	0.19	0.15	0.16
Conductividad Hidráulica saturada (Puck)	(mm/h)	31.01	5.56	2.29	0.15	0.85	4.84	27.00	14.93
vanGenuchten α	(1/cm)	0.0014	0.0010	0.0017	0.0010	0.0019	0.0036	0.0051	0.0053
vanGenuchten m	(adim)	0.53	0.19	0.17	0.14	0.41	0.35	0.37	0.33
vanGenuchten n	(adim)	2.14	1.24	1.21	1.16	1.68	1.54	1.58	1.48
vanGenuchten θ_r	(adim)	0.18	0.01	0.03	0.02	0.20	0.16	0.13	0.13

Referencias: Los valores en *italica* son estimados aplicando el programa SoilPar.

Para analizar la bondad de la propuesta de ponderación se compararon los resultados aplicados en las series presentes en la cuenca del arroyo Ludueña, ubicada en las cercanías de la ciudad de Rosario (provincia de Santa Fe, Argentina). La misma es una cuenca piloto sobre la cual se aplicó y calibró un modelo matemático hidrológico de alto nivel de detalle denominado SHALL3 (Zimmermann y Riccardi, 2000).

Se promediaron los parámetros estimados para las cuatro series principales presentes en la cuenca (de 700 km²) y se los compararon los resultados con los calibrados en la cuenca (Zimmermann, 2003) alcanzándose valores muy semejantes (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación entre parámetros obtenidos para las series de suelos mediante ponderación y calibración en cuenca Ludueña.

Series	Parámetros equivalentes de la serie						
	δ_a (g/cm ³)	θ_{PMP} (-)	θ_{CC} (-)	K_v (cm/h)	α (1/cm)	n (-)	θ_r (-)
Zavalla	1.41	0.20	0.37	0.0142	0.0036	1.41	0.10
Roldan	1.41	0.20	0.38	0.0334	0.0030	1.47	0.09
Peyrano	1.42	0.20	0.37	0.0556	0.0031	1.53	0.12
Gelly	1.44	0.16	0.33	0.3009	0.0042	1.54	0.10
Promedios ponderados suelos Ludueña				0.10	0.0035	1.49	
Calibrados SHALL3				0.13	0.0040	1.56	

Estimación de parámetros por asociaciones de series de suelos.

Las series puras de suelos mencionadas precedentemente se combinan entre si, en diferentes proporciones, dando lugar a 204 asociaciones de series de suelos. Las últimas están presentes en la totalidad de cuencas del sur santafecino, ocupando un territorio de unos 10.000 km².

En definitiva las asociaciones son las que determinan los suelos que deberán considerarse en la modelación, dado que las series no se encuentran en estado puro.

Para estimar los parámetros de las asociaciones se adoptó una metodología de ponderación basada en el porcentaje de ocupación areal de cada serie dentro de cada asociación y las propiedades correspondientes a cada serie:

$$X_{as} = \frac{I}{A} \sum_{j=1}^M x_j A_j \quad [7]$$

donde X_{as} es el valor medio de un parámetro cualquiera para la asociación, x_j el valor del parámetro para la serie de suelos j , M el total de series que componen la asociación, A el área de ocupación total de la asociación y A_j el área de ocupación de la serie j en la asociación en cuestión.

Los parámetros considerados fueron la conductividad hidráulica K_v , y los parámetros de la curva de van Genuchten α y n . Entre las opciones consideradas en el programa SoilPar se obtuvo el primero de ellos considerando la formulación de Puckett *et al.* (1985), mientras que los parámetros de van Genuchten se estimaron usando la formulación de Vereecken *et al.* (1989).

Nuevamente se obtuvieron valores medios para la cuenca del arroyo Ludueña ponderando arealmente los parámetros de las asociaciones según se detalla en la Tabla 4 (Figura 2).

Tabla 4. Comparación entre parámetros de las asociaciones de suelos obtenidos mediante ponderación y calibración en cuenca Ludueña.

Asociaciones	Area de influencia (%)	Parámetros equivalentes de las asociaciones		
		K_v (cm/h)	α (1/cm)	n (-)
Py	24.7	0.0554	0.00309	1.53
Py15	0.2	0.0554	0.00309	1.53
Py20	1.0	0.0554	0.00309	1.53
Py2x	1.7	0.0554	0.00309	1.53
Py8	3.0	0.0554	0.00309	1.53
Rd	9.3	0.0333	0.00300	1.47
Rd10	15.3	0.0333	0.00300	1.47
Rd11	1.8	0.0333	0.00300	1.47
Rd12	15.9	0.0333	0.00300	1.47
Rd15	9.2	0.0808	0.00333	1.50
Rd8	3.3	0.0808	0.00333	1.50
Za2	2.2	0.0713	0.00358	1.49
Za3	8.3	0.0713	0.00358	1.49
Promedios ponderados asociaciones de suelos Ludueña		0.049	0.00301	1.43
Calibrados SHALL3		0.130	0.0040	1.56

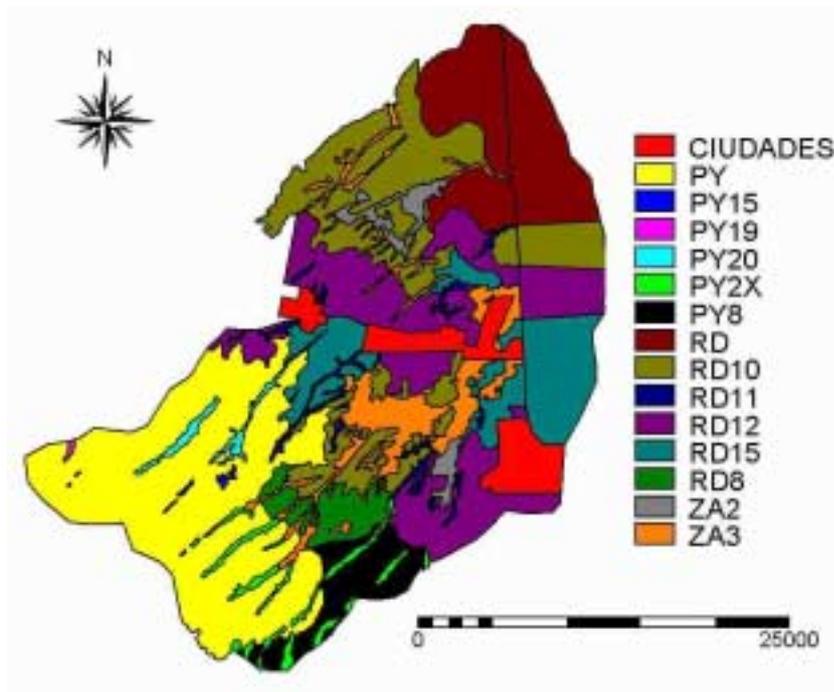


Figura 2. Distribución de las asociaciones de suelos en la cuenca del Arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina)

Como se observa en Tabla 3 los resultados de promediar los valores de las series se aproximan en mejor medida a los calibrados que los valores ponderados para las asociaciones (Tabla 4). No obstante la alternativa mas adecuada es ésta última, ya que pondera los porcentajes de ocupación reales de cada serie de suelos.

El parámetro que presenta mayor sensibilidad al proceso de infiltración en el modelo hidrológico es el K_v , mientras que el los parámetros que regulan la curva de retención de humedad tienen un rol secundario debido a que la variación de humedades durante las simulaciones no es muy grande.

Consecuentemente el pronóstico de α y n puede considerarse aceptable, no sucede lo mismo con la conductividad hidráulica. Se intentó utilizar las formulaciones de Jabro (1992) y Jaynes y Tyler (1984) pero los resultados no fueron convincentes.

Los resultados alcanzados al presente son promisorios y validan esta metodología de ponderación sencilla para ser aplicadas en otras cuencas de la región.

No obstante deberá indagarse acerca de otras funciones de pedotransferencia para estimar la conductividad hidráulica K_v .

CONCLUSIONES

Se presenta una metodología sencilla de ponderación areal y por horizontes de suelo para estimar parámetros hidráulicos de suelos limosos del sur santafecino (pampa de Argentina).

Se emplean las funciones de pedotransferencia incluidas en el software SoilPar 2.0 para la estimación de parámetros por horizonte utilizando información textural, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y pH disponibles en la cartas de suelo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Se considera que el pronóstico de los parámetros que regulan la curva de retención de humedad (modelo de van Genuchten) es aceptable, no sucede lo mismo con la conductividad hidráulica.

Los resultados alcanzados al presente son promisorios y validan esta metodología de ponderación sencilla para ser aplicadas en otras cuencas de la región. No obstante deberá indagarse acerca de otras funciones de pedotransferencia para estimar la conductividad hidráulica K_v .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acutis, M. and Donatelli, M.** (2003) "SOILPAR 2.00: Software to estimate soil hydrological parameters and functions." *Europ. J. Agronomy* **18**:p373-377.
- Jabro, J.D.** (1992). "Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data". *Trans. ASAE* **35** (2), p557-560.
- Jaynes, D.B., Tyler, E.J.** (1984). "Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity". *Soil Sci.* **138**, p298-305.
- Irmay S.** (1954) "On the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Trans. Am. Geophys.* **35**. 463-468.
- Mualem, Y.** (1976a). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media". *Water Resour. Res.* **12**:513-522.
- Mualem, Y.** (1976b). "A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils". *Research Project Report No. 442*, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa.
- Puckett, W.E., Dane, J.H., Hajek, B.F.** (1985). "Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties". *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 831-836.
- Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius.** (1989). "Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content". *Soil Sci.* **148**:389-403.
- Zimmermann E, Riccardi G** (2000). "Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para Areas de Llanura" *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. IAHR. Vol II. Pp. 169-178. Córdoba. Argentina. ISBN 950-33-0267-6
- Zimmermann E.** (2003). "Modelo Hidrológico Superficial y Subterráneo desarrollado para la Simulación de Sistemas de Llanura. 2. Estrategias para la Calibración". *Journal of Earth Sciences. Boletín Geológico y Minero de España*. ISSN 0366-0176. Vol 114. No 2: 159-169. Madrid. España.