

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN SUELOS LIMOSOS MEDIANTE DIFERENTES FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA

• Erik D. Zimmermann • Pedro A. Basile •
Universidad Nacional de Rosario, Argentina

Resumen

En este trabajo se han utilizado diferentes procedimientos para estimar propiedades hidráulicas de suelos limosos representativos de un sector de la llanura argentina, partiendo de información granulométrica y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos de INTA. Se emplean funciones de pedotransferencia (FPT) incluidas en los códigos *SoilPar* (Acutis y Donatelli, 2003) y *Rosetta* (Schaap *et al.*, 1999), junto con ecuaciones de regresión entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos dadas por un conjunto de autores. Para el conjunto de las 136 muestras analizadas, la aplicación de los procedimientos reveló una importante dispersión de resultados. Esto da la pauta de que los predictores se deben emplear con precaución, analizando las compatibilidades entre las muestras de suelo de estudio y las que se utilizaron originalmente en la propuesta de las ecuaciones. Se estimaron los parámetros medios ponderados para la cuenca del A° Ludueña y los pronósticos se compararon con valores obtenidos mediante calibración de un modelo matemático hidrológico. A partir de los resultados obtenidos pudo concluirse que el código que mejor se aproximó a los parámetros hidráulicos calibrados fue el programa *Rosetta*, suministrándole la información completa (composición textural, densidad aparente y dos puntos de la curva de retención). Eventualmente pueden utilizarse las formulaciones de Saxton *et al.* (1986) y Wosten *et al.* (1999) para estimar la conductividad hidráulica saturada y el parámetro α de la ecuación de van Genuchten, respectivamente. Los resultados alcanzados al presente son promisorios y validan esta metodología de ponderación sencilla para ser aplicada en otras cuencas de la región.

Palabras clave: suelos limosos, parámetros hidráulicos, funciones de pedotransferencia, llanura argentina.

Introducción

El interés en la zona no saturada (ZNS) ha aumentado en los últimos años debido a la evidencia creciente de la afectación ambiental provocada por actividades agrícolas e industriales. En este ambiente, los modelos numéricos son rutinariamente usados en investigación y gestión para predecir el movimiento de agua y solutos en la ZNS. Los resultados de las 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). Esto resalta el rol protagónico que ejerce la zona

vadosa en la recarga freática y en la infiltración, que constituyen los procesos que interconectan la hidrología superficial y la subterránea. La zona no saturada debe ser analizada con detenimiento, ya que en ella se da lugar a importantes procesos de intercambio de flujo.

Para caracterizar el medio no saturado se requiere del conocimiento de las curvas de conductividad $k(\theta)$ y retención $\psi(\theta)$ o bien, difusividad $D(\theta)$, siendo θ el contenido volumétrico de humedad, $k(\theta)$ la conductividad hidráulica no saturada, $\psi(\theta)$ el potencial mátrico del suelo y $D(\theta)$ el coeficiente de difusividad.

En trabajos previos (Zimmermann 2006a, 2006b) se han estimado para los suelos típicos de la llanura pampeana santafecina valores de referencia de los parámetros que gobiernan sus funciones hidráulicas. Estos valores fueron obtenidos de distintas fuentes de información: calibraciones de modelos matemáticos hidrológicos, resultados de ensayos compilados de estaciones del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y las curvas de retención calibradas con la información de la base de datos pública recopilada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA, denominada UNSODA (Leij *et al.*, 1996). En el mismo trabajo se propusieron regresiones entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos (densidad húmeda, contenido orgánico, porosidad y pH), con el fin de pronosticar los primeros en función de los demás parámetros.

Utilizándose la misma base de datos UNSODA se han propuesto regresiones lineales y no lineales entre parámetros hidráulicos de la curva de retención, y parámetros físicos y granulométricos de las muestras de suelo (Zimmermann y Basile, 2006, 2007).

Existen otras funciones de pedotransferencia, entre las cuales pueden citarse las propuestas por Rawls *et al.* (1982), Rawls y Brakensiek (1985), Cosby *et al.* (1984), Saxton *et al.* (1986), Vereecken *et al.* (1989, 1990), Sharpley y Williams (1990), Hutson y Wagenet (1992), Wösten *et al.* (1999) y otros. También se han propuesto códigos informáticos tales como

el *SoilPar* (Acutis y Donatelli, 2003) y *Rosetta* (Schaap *et al.*, 1999), que incluyen relaciones similares que han sido ajustadas a otras bases de información edafológica.

En este trabajo, el conjunto de funciones de pedotransferencia mencionadas precedentemente se han aplicado a perfiles tipo de suelos de la provincia de Santa Fe (área pampeana, Argentina) y se han comparado, con el objetivo de analizar su semejanza en los resultados.

Modelos analíticos para curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica no saturada

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, según la cual:

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

donde θ_s es el contenido de humedad para medios saturado; θ_r la humedad correspondiente a saturación irreductible; λ , un parámetro que depende de la distribución de los tamaños de poros; ψ_c 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, cuya expresión es la siguiente:

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

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 $n.m$ constante. En este caso, λ es igual a $n.m$ y $\alpha = 1/\psi_c$.

Para la estimación 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 siguiente (Irmay, 1954):

$$K_r = S_e^3$$

Este tipo de curva suele conducir a buenos ajustes en suelos de granulometría uniforme. Otros autores, como Mualem (1976), 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:

$$K_r = S_e^p \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

donde el parámetro p asume el valor de 0.5.

Parámetros para las funciones hidráulicas de suelos no saturados

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

Los primeros se usan frecuentemente para estimar conductividad hidráulica no saturada y la curva de retención de humedad con las funciones de Brooks-Corey o Van Genuchten.

Se han propuesto métodos cuasi-físicos que usan el concepto de similitud de la forma

entre distribuciones del tamaño de poros y de la partícula (Arya y Paris, 1981; Haverkamp y Parlange, 1986).

Los métodos inversos están basados en la resolución numérica de la ecuación de Richards junto a un algoritmo de optimización y paralelamente mediciones de campo o laboratorio. Ajustando los resultados del modelo a los medidos se pueden obtener los parámetros hidráulicos del suelo en forma indirecta. Los métodos inversos son a menudo vulnerables por la no singularidad de los resultados, es decir, dos o más juegos de parámetros optimizados pueden ser aplicables al problema estudiado.

Las funciones de pedotransferencia (FPT) ofrecen un tercer método para estimar propiedades hidráulicas, usando el hecho de que las mismas se relacionan con la composición textural del suelo entre otra información taxonómica disponible (por ejemplo, la distribución de tamaño de partículas, densidad aparente, contenido de materia orgánica, etcétera). Sin embargo, la gran mayoría de FPTs son completamente empíricas y no usan ningún concepto físico. En este trabajo se ha empleado esta tercera vía para la estimación de los parámetros hidráulicos.

Funciones de pedotransferencia utilizadas

Existe un conjunto de ecuaciones que relacionan propiedades hidráulicas de suelos con parámetros físicos y granulométricos de las muestras. Un primer tipo de FPT se basa en clasificar los suelos por su composición textural y asignar iguales parámetros, asumiendo que suelos similares tienen parámetros hidráulicos similares (Carsel y Parrish, 1988; Rawls *et al.*, 1982).

Otro grupo de FPT se basa en ecuaciones de regresión, ofreciendo una solución con propiedades hidráulicas que varían en forma continua a través del triángulo de clasificación textural del USDA. Las predicciones pueden ser mejoradas usando propiedades físicas del suelo como información adicional, tales como

la densidad aparente, porosidad o contenido de materia orgánica. Otros autores mejoran la predicción incluyendo uno o más puntos de la curva de retención (Rawls *et al.*, 1992; Williams *et al.*, 1992). Se ha comprobado que este tipo de FPTs mejora la predicción de los parámetros hidráulicos de los suelos de la zona de estudio (Zimmermann y Basile, 2008). Tomando en cuenta esta concepción previa, se ha ampliado el grupo de FPTs a considerar, y en el cuadro 1 se muestran las ecuaciones de regresión que se han empleado para las comparaciones en este trabajo. En la misma se incluyen regresiones lineales múltiples entre los parámetros hidráulicos y otras características físicas y granulométricas para muestras de suelos limosos extractadas de la base UNSODA (Zimmermann y Basile, 2006, 2007).

Para la implementación práctica de algunas FPT se han desarrollado varios códigos de cálculo, entre los que pueden mencionarse los programas *Rosetta*® y *SoilPar*®. Ambos fueron utilizados en este trabajo y se describen sucintamente a continuación.

Programa Rosetta

Rosetta implementa funciones de pedotransferencia que predicen las curvas de retención y conductividad basadas en ajustes de composición textural, densidad aparente, y en uno o dos puntos de la curva de retención (punto de marchitez permanente y/o capacidad de campo). *Rosetta* fue desarrollado por Marcel G. Schaap en el United States Salinity Laboratory (USDA), Riverside, California, Estados Unidos, supervisado por Leij y van Genuchten. Este programa emplea para el ajuste de parámetros redes neuronales para mejorar las predicciones de las FPTs empíricas. Los parámetros hidráulicos óptimos, relacionados con datos de la entrada (tamaño de partícula, densidad aparente, etcétera) se obtienen mediante un procedimiento de calibración iterativo. El *software* es de distribución libre y gratuita

y puede obtenerse mayor información consultando la página web <http://www.usda.gov>.

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 georreferenciado, 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 y Corey, 1964; Hutson y Cass, 1987; van Genuchten, 1980), y un método para estimaciones de conductibilidad hidráulica no saturada y parámetros de curvas de retención (Campbell y Shiozawa, 1994). 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. 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

Cuadro 1. Funciones de pedotransferencia empleadas en este trabajo.

	Funciones de pedotransferencia	Fuentes
Parámetros de la curva de retención	$\theta_r = 0.1$ $\theta_s = 0.7919 + 0.001691.C - 0.29619.DA - 0,000001491.L^2 + 0,0000821.MO^2 + 0.02427.C^{-1}$ $+ 0.01113.L^{-1} + 0.01472.In(L) - 0,0000733.MO.C - 0.000619.DA.C - 0.001183.DA.MO$ $- 0.0001664.top.L$ $\alpha = e^{\left[\begin{array}{l} -14.96 + 0.03135.C + 0.0351.L + 0.646.MO + 15.29.DA - 0.192.top - 4.671.DA^2 \\ -0.000781.C^2 - 0.00687.MO^2 + 0.0449.MO^{-1} + 0.0663.In(L) + 0.1482.In(MO) \\ -0.04546.DA.L - 0.4852.DA.MO + 0.00673.top.C \end{array} \right]}$ $n = 1 + e^{\left[\begin{array}{l} -25.23 - 0.02195.C + 0.0074.L - 0.194.MO + 45.5.DA - 7.24.DA^2 + 0.0003658.C^2 \\ + 0.002885.MO^2 - 12.81.DA^{-1} - 0.1524.L^{-1} - 0.01958.MO^{-1} - 0.2876.In(L) \\ -0.0709.In(MO) - 44.6.In(DA) - 0.02264.DA.C + 0.0896.DA.MO + 0.00718.top.C \end{array} \right]}$	Wösten <i>et al.</i> , 1999
	$\theta_r = 0.015 + 0.005.C + 0.014.CO$ $\theta_s = 0.803 - 0.283.DA + 0.0013.C$ $In(\alpha) = -2.486 + 0.025.A - 0.351.C$ $In(n) = -0.035 - 0.009.A - 0.013.C + 0.015.A^2$	Vereecken <i>et al.</i> , 1989
	$\alpha = \frac{1}{e^{\left[\begin{array}{l} 5.3396738 + 0.1845038.C - 2.48394546.\theta_s - 0.00213853.C^2 - 0.04356349.A.\theta_s \\ -0.61745089.C.\theta_s + 0.00143598.A^2.\theta_s^2 - 0.00855375.C^2.\theta_s^2 - 0.00001282.A^2.C \\ + 0.00895359.C^2.\theta_s - 0.00072472.A^2.\theta_s + 0.0000054.C^2.A + 0.5002806.\theta_s^2.C \end{array} \right]}}$ $n = 1 + e^{\left[\begin{array}{l} -0.7842831 + 0.0177544.A - 1.062498.\theta_s - 0.00005304.A^2 - 0.00273493.C^2 \\ + 1.11134946.\theta_s^2 - 0.03088295.A.\theta_s + 0.00026587A^2.\theta_s^2 - 0.00610522.C^2.\theta_s^2 \\ -0.00000235.A^2.C + 0.00798746.C^2.\theta_s - 0.00674491.\theta_s^2.C \end{array} \right]}$	Rawl y Brakensiek, 1985
	<p style="text-align: center;">Textura arcilla limosa</p> $\theta_s = 0.8757 + 0.0847\eta - 0.3188\delta_h$ $\alpha = 0.1264 - 0.0777\delta_h - 0.00334CO + 0.1165\theta_r$ $n = 1.1466 + 1.3161\theta_r$	Zimmermann y Basile, 2007
	<p style="text-align: center;">Textura franco arcillo-limosa</p> $\theta_s = 0.1261 + 0.4006\eta - 1.273d_g$ $\alpha = 0.2117 - 0.1444\eta - 0.0535\delta_h + 0.001325pH - 0.021\beta_2$ $n = 0.7971 + 0.9498\eta$	
<p style="text-align: center;">Textura franco-limosa</p> $\theta_s = 0.5318 + 0.1578\eta - 0.1528\delta_h + 0.0003682CVg$ $\alpha = 0.1888 - 0.0863\delta_s + 0.003459CO + 0.117\theta_s$ $n = 1.56 - 0.1183\delta_h - 3.8565\alpha$		
	$\theta_s = (50.5 - 0.142.A - 0.037.C) / 100$	Cosby <i>et al.</i> , 1984
	$\theta_s = 0.332 - 0.0007251.A + 0.1276.log_{10}(C)$	Saxton <i>et al.</i> , 1986

Cuadro 1. Funciones de pedotransferencia empleadas en este trabajo.

	Funciones de pedotransferencia	Fuentes
Conductividad hidráulica saturada (cm/h)	$K_s = 10^{[9.6 - 0.81 \log(L) - 1.09 \log(C) - 4.64.DA]}$	Jabro, 1992
	$K_s = 2.94.10^{[-0.6 + 0.0126.A - 0.0064.C]}$	Cosby <i>et al.</i> , 1984
	$K_s = \frac{1}{24.10^{-(0.044.A - 0.61.DA)}}$	Jaynes y Tylor, 1984
	$K_s = 1\ 570\ e^{-0.1975.C}$	Puckett <i>et al.</i> , 1985
	$K_s = 0.54.e^{(-0.007.A - 0.167.C)}$	Campbell y Shizawa, 1994
	$K_s = e^{[12.012 - 0.0755.A + [-3.895 + 0.03671.A - 0.1103.C + 0.00087546.C^2]/\theta_s]}$	Saxton <i>et al.</i> , 1986
	$K_s = e^{\left[\begin{array}{l} -8.96847 + 19.52348.\theta_s - 0.028212.C + 0.00018107.A^2 - 0.0094125.C^2 \\ -8.395215.\theta_s^2 + 0.077718.A.\theta_s - 0.00298.A^2.\theta_s^2 - 0.019492.C^2.\theta_s^2 \\ + 0.0000173.A^2.C + 0.02733.C^2.\theta_s + 0.001434.A^2.\theta_s - 0.0000035.C^2.A \end{array} \right]}$	Rawls y Brakensiek, 1985
	$K_s = 8.29 - 0.0782.C + 0.085.L - 4.73.DA$	Gulser y Candemir, 2008
	$K_s = 0.04167.e^{[20.62 - 0.96 \ln(C) - 0.66 \ln(A) - 0.46 \ln(MO) - 8.43 DA]}$	Vereecken <i>et al.</i> , 1990
	$K_s = 0.04167.e^{\left[\begin{array}{l} 7.755 + 0.0352 L + 0.93\ top - 0.967 DA^2 - 0.000484 C^2 - 0.000322 L^2 + 0.001 L^{-1} \\ -0.0748 MO^{-1} - 0.643 \ln(L) - 0.01398 DA.C - 0.1673 DA.MO + 0.02986\ top.C \\ -0.03305\ top.L \end{array} \right]}$	Wosten <i>et al.</i> , 1999
$K_s = 0.04167.e^{-42.6 + 8.71 MO + 61.9 DA - 20.79 DA^2 - 0.2107 MO^2 - 0.01622 CMO - 5.382 DA MO]}$	Wosten <i>et al.</i> , 2001	
$K_s = 1\ 058.5(\theta_s - \theta_{-33})^{3.3545}$	Ahuja, 1989	

no comerciales. El paquete de la instalación puede obtenerse de <http://www.isci.it/tools>.

Aplicación a las series de suelos típicas 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 1 000 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 de la formación pampeana, 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, los suelos de la región entre las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcilla limosa.

A fin de aplicar los procedimientos descritos, se contó con información elaborada por INTA, que caracteriza los perfiles de suelos presentes en el área de estudio. De las cartas de suelos disponibles se extractó la información de los perfiles tipo siguientes: A. Juárez, Arequito, Casilda, Chabas, Faustina, Gelly, Hansen, Huemul, Juncal, Las Gamas, Lima, Los

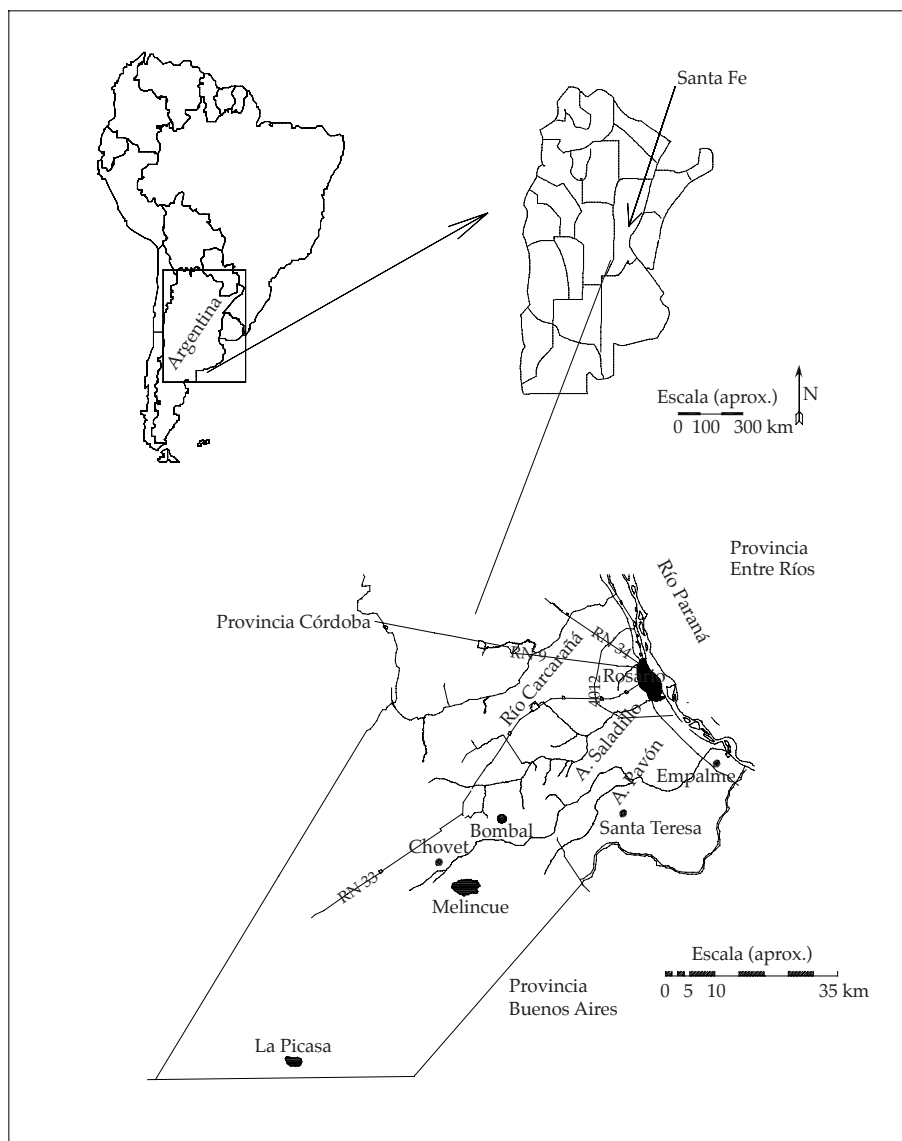


Figura 1. Área de estudio.

Nogales, Maizales, Monte Fiore, Pergamino, Peyrano, Roldán, Santa Lucía, Villada, Villa Eloisa y Zavalla.

En cada uno de los 21 perfiles, en función de su profundidad y su estratigrafía, se detallan entre tres y ocho subhorizontes, de los cuales las cartas de suelo publicó la granulometría, junto a otros parámetros biofísicos, como contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, etcétera. El conjunto de estratos

para todas las series estudiadas totalizan 136 muestras de suelo. A manera de ejemplo, en el cuadro 2 se presentan los datos y las estimaciones realizadas con el *software SoilPar* para la serie Casilda, con sus ocho estratos.

El mismo trabajo se realizó para cada uno de los horizontes de las series, obteniéndose densidades aparentes, humedades para capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y otras tensiones matri-

Cuadro 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 y Rawls)	(m/m)	0.19	0.22	0.22	0.28	0.23	0.19	0.14	0.16
CC (Brakensiek y 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 y Rawls)	(m/m)	0.43	0.46	0.44	0.49	0.44	0.39	0.35	0.36
Humedad a 30 (-J/kg) (Brakensiek y Rawls)	(m/m)	0.39	0.42	0.41	0.46	0.40	0.35	0.31	0.32
Humedad a 50 (-J/kg) (Brakensiek y Rawls)	(m/m)	0.34	0.38	0.37	0.42	0.36	0.32	0.27	0.28
Humedad a 100 (-J/kg) (Brakensiek y Rawls)	(m/m)	0.31	0.34	0.33	0.39	0.33	0.29	0.24	0.26
Humedad a 500 (-J/kg) (Brakensiek y Rawls)	(m/m)								
Humedad a 1 500 (-J/kg) (Brakensiek y Rawls)	(m/m)	0.19	0.22	0.23	0.28	0.23	0.19	0.15	0.16
Conductividad hidráulica saturada (Puckett)	(mm/h)	31.01	5.56	2.29	0.15	0.85	4.84	27.00	14.93
van Genuchten α	(1/cm)	0.0014	0.0010	0.0017	0.0010	0.0019	0.0036	0.0051	0.0053
van Genuchten m	(adim)	0.53	0.19	0.17	0.14	0.41	0.35	0.37	0.33
van Genuchten n	(adim)	2.14	1.24	1.21	1.16	1.68	1.54	1.58	1.48
van Genuchten θ_r	(adim)	0.18	0.01	0.03	0.02	0.20	0.16	0.13	0.13

Referencias: los valores en *itálica* son estimados aplicando el programa *SoilPar*.

ciales, conductividad hidráulica saturada y parámetros de van Genuchten, para la curva de retención de humedad.

También se aplicaron las ecuaciones de las regresiones multivariadas presentadas en el cuadro 1.

Se usó el *software Rosetta* bajo tres diferentes grados de información de entrada: (a) composición textural (arena, limo y arcilla, SSC), (b) composición textural y densidad aparente (SSCB) y (c) lo anterior, junto a humedades de CC y PMP estimadas. Para la clasificación textural de las muestras se consideraron los contenidos de arena, limo y arcilla disponibles como información en la base del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Resultados y discusión

Los resultados de la aplicación de estos criterios conjuntos se muestran en las figuras 2 a 6. Como se aprecia en las figuras, las diferentes metodologías empleadas arrojan resultados disímiles, especialmente en la estimación de la conductividad hidráulica saturada K_s . En trabajos previos (Zimmermann y Basile, 2008) se compararon los resultados de *SoilPar* y *Rosetta* para un conjunto de 321 muestras representativas de suelos en la región de estudio, los que fueron clasificadas por texturas. Se concluyó que los resultados obtenidos por *Rosetta* fueron los que mejor se acercaron a valores calibrados mediante modelación matemática

hidrológica realizada en la cuenca del arroyo Ludueña, ubicada en la región de estudio. Por ello, en las comparaciones realizadas en este trabajo, se han tomado como referencia los parámetros estimados con el programa *Rosetta*. Allí se atribuyeron las texturas franco limosas para caracterizar el horizonte "A" y las arcillo limosas para el horizonte "B".

La figura 2 muestra las estimaciones de la humedad residual. Allí se observa que cualquiera de las opciones de *Rosetta* pronostica θ_r dentro de un rango de variación aproximado al 20%. El programa *SoilPar* presenta patrones disímiles y evalúa tanto por defecto como por exceso. La formulación de Vereecken (1989) propone estimaciones por exceso e incluso valores bastante alejados de

los promedios recomendados por diferentes fuentes bibliográficas.

La figura 3 muestra las estimaciones para la humedad de saturación. En términos generales, hay mucho menos dispersión que para la humedad residual. Casi todos los pronósticos caen dentro del $\pm 20\%$. Se podría afirmar que es el parámetro que puede pronosticarse con menor variabilidad. Debido a que la información granulométrica disponible en las cartas de suelo no incluye una curva de distribución, no fue posible aplicar las ecuaciones propuestas por Zimmermann y Basile (2007).

En la figura 4 se observa que las tendencias en el pronóstico del parámetro α son muy diferentes entre las metodologías. *SoilPar*

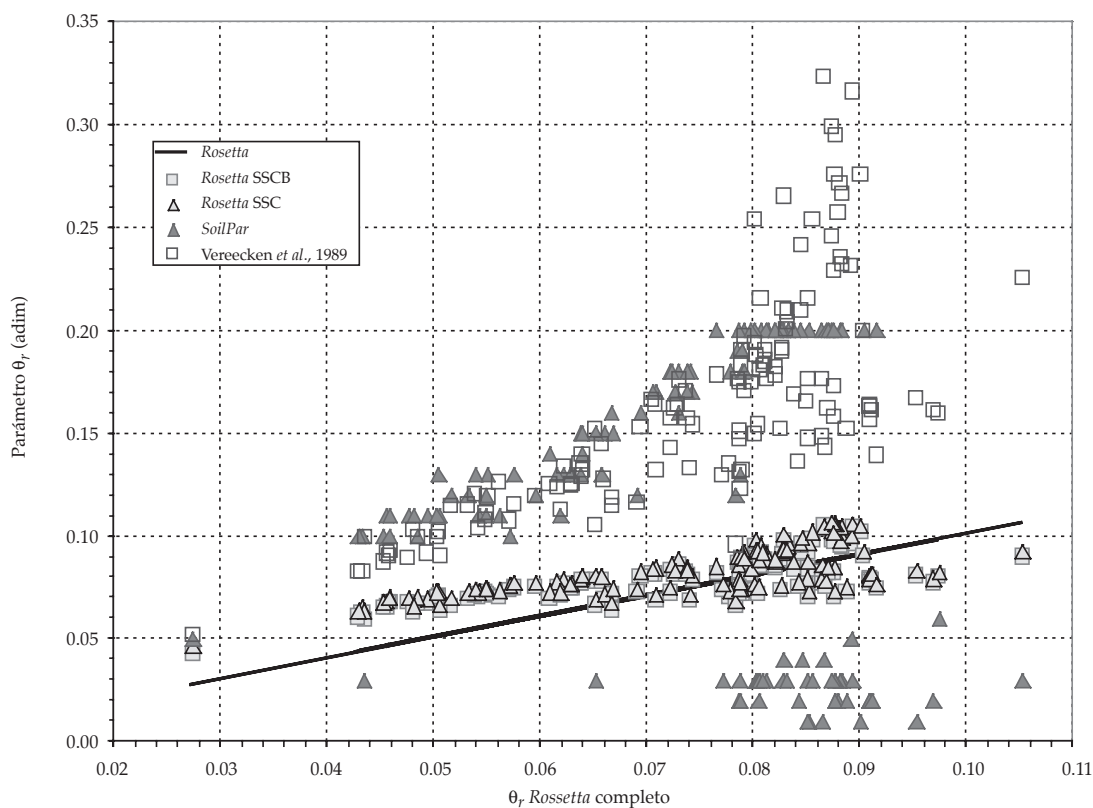


Figura 2. Comparación de la estimación de la humedad residual θ_r mediante *Rosetta* SSCB $\theta_{33}-\theta_{1500}$, *SoilPar* y ecuaciones del cuadro 1.

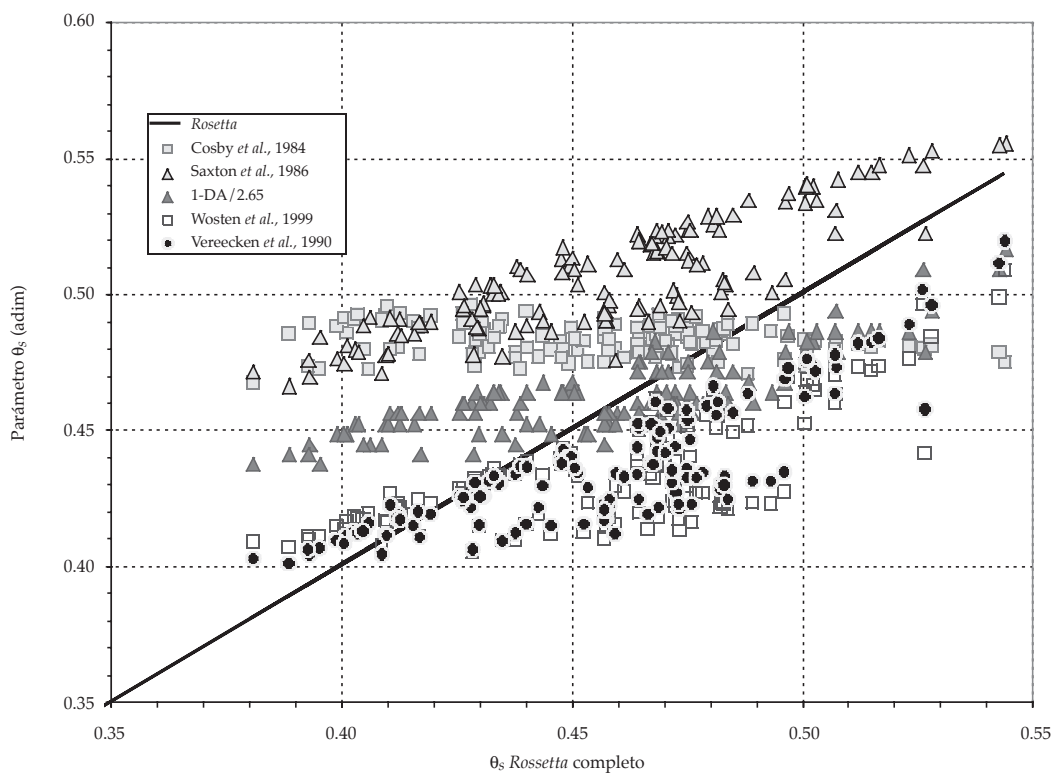


Figura 3. Comparación de la estimación de la humedad saturante θ_s mediante Rosetta SSCB $\theta_{33}-\theta_{1500}$ SoilPar y ecuaciones del cuadro 1.

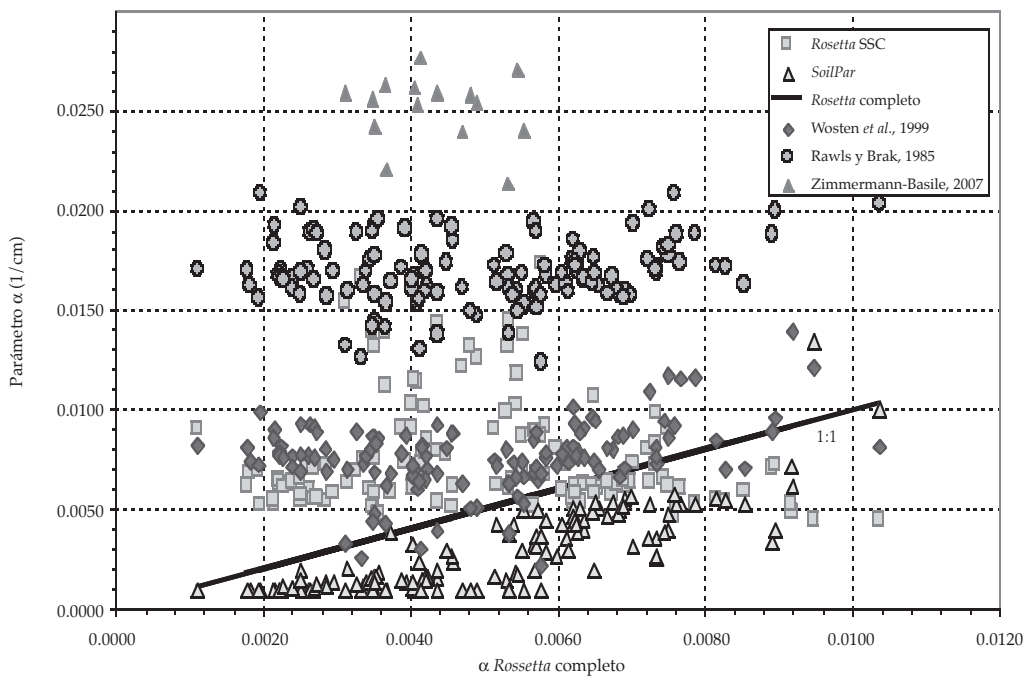


Figura 4. Comparación de la estimación del parámetro α mediante Rosetta SSCB $\theta_{33}-\theta_{1500}$ SoilPar y ecuaciones del cuadro 1.

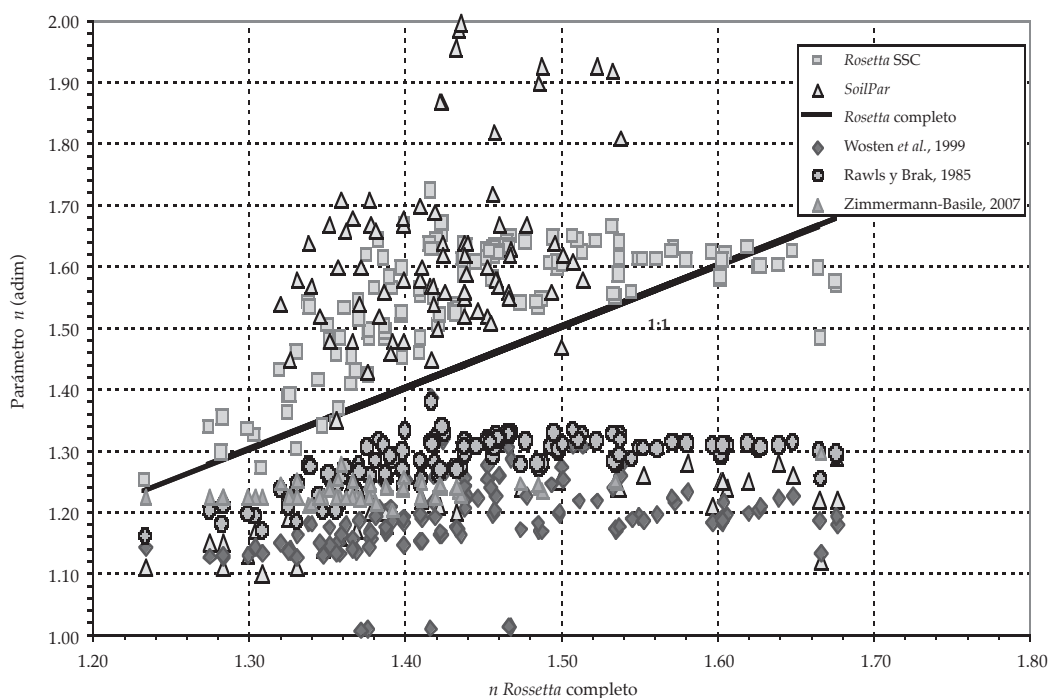


Figura 5. Comparación de la estimación del parámetro n mediante *Rosetta SSCB* $\theta_{33}-\theta_{1500}$, *SoilPar* y ecuaciones del cuadro 1.

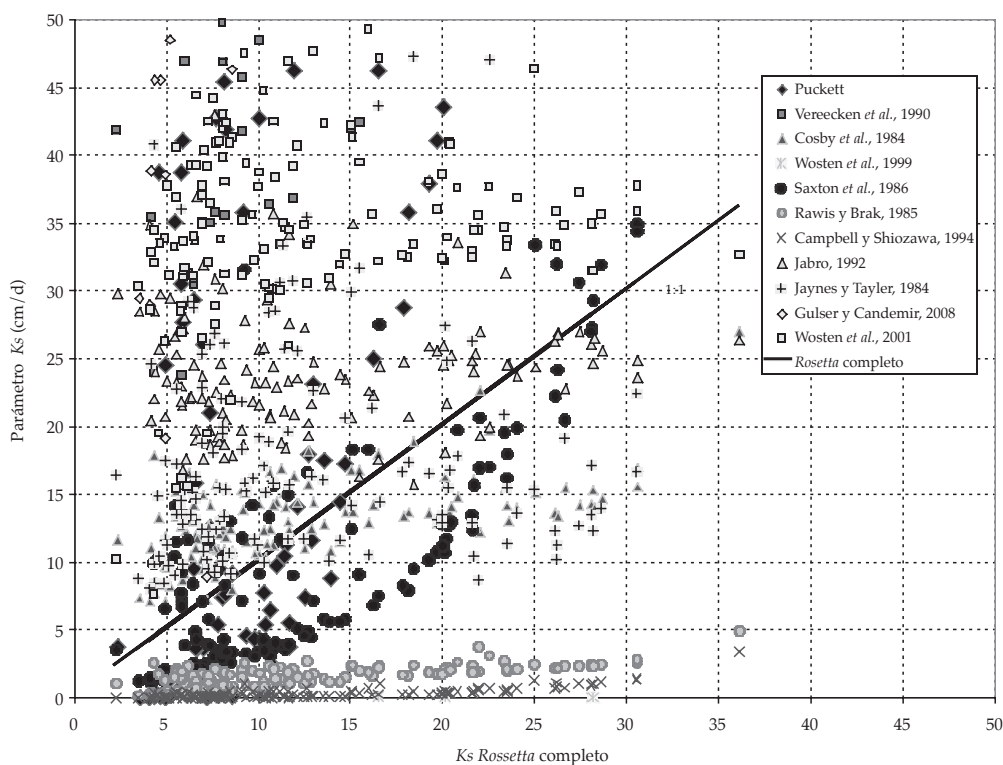


Figura 6. Comparación de la estimación del parámetro K_s mediante *Rosetta SSCB* $\theta_{33}-\theta_{1500}$, *SoilPar* y ecuaciones del cuadro 1.

tiende a valores menores que *Rosetta*, mientras que las ecuaciones de regresión (Zimmermann y Basile 2007) tienden a valores mayores en un orden de magnitud. Para aplicar estas últimas a las texturas arcilla limosa y franco limosa (cuadro 1), se asumió que la densidad aparente DA es igual a la densidad húmeda δ_h , que la porosidad η es igual a θ_s y que la densidad seca δ_s es igual a $\delta_h / 1.25$ (es decir, se consideró una humedad del 25% promedio en peso). Para la textura franco arcillo limosa no fue posible aplicar las ecuaciones debido a la insuficiente información granulométrica.

En la figura 5 se observa una tendencia inversa para la estimación del parámetro n , es decir, el *software SoilPar* tiende a valores mayores de n respecto a *Rosetta* y las demás estimaciones lo hacen por defecto. En este caso, las diferencias entre los distintos métodos son de menor magnitud que en el caso anterior.

Con respecto al pronóstico de la conductividad hidráulica saturada (figura 6), las tendencias son muy disímiles entre los métodos evaluados. Incluso entre las ecuaciones de Puckett y Jabro incluidas en el *software SoilPar*, llegan a valores de un orden de magnitud diferente para una misma muestra de suelos.

Esto da la pauta de que se debe considerar con precaución el empleo de estos programas, ya que las ecuaciones ajustadas internamente dan resultados muy distintos para una misma caracterización físico-química de un suelo.

Aplicación de FPTs en la cuenca del arroyo Ludueña

Ante esta diversidad de resultados, es necesario contar con elementos de juicio que permitan seleccionar las FPTs más convenientes. Los valores comparativos disponibles consistieron en parámetros calibrados con el modelo hidrológico-hidráulico *SHALL3* (Zimmermann y Riccardi, 2000). En el modelo se contemplan las interacciones entre los procesos de superficie en la zona no saturada (ZNS) y en la zona saturada. Los flujos en

la ZNS se simulan mediante la ecuación de Richards, contemplando el modelo de Brooks y Corey para la curva de retención. El modelo *SHALL3* fue puesto en operación en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina), y posteriormente fue calibrado utilizando información freaticométrica, pluviográfica y limnigráfica en el periodo 1994-1996 (Zimmermann, 2003). Dado que los parámetros se ajustaron en forma global para la cuenca, sólo constituyen valores de referencia generales.

Las FPTs analizadas se han aplicado a las series de suelos presentes en la cuenca del A° Ludueña, cuyas asociaciones se combinan arealmente de acuerdo con la distribución que se muestra gráficamente en la figura 7.

Los parámetros se han promediado por horizonte (A y B, según cartas de suelo de INTA) y ponderado arealmente de acuerdo con los porcentajes de asociaciones y series analizadas. La metodología de ponderación para obtener parámetros por serie de suelos, partiendo de los parámetros calculados para cada horizonte, se basó en los siguientes criterios: (a) para la conductividad hidráulica vertical se calculó la media armónica de las conductividades de cada estrato (ecuación (4)) y (b) para el resto de los parámetros, el promedio ponderado por el espesor de cada estrato (ecuación (5)):

$$K_m = \frac{L}{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{K_i}} \quad (4)$$

$$X_m = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N x_i e_i \quad (5)$$

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 , conductividad del horizonte, y L es el espesor total de la serie $L = \sum_{i=1}^N e_i$.

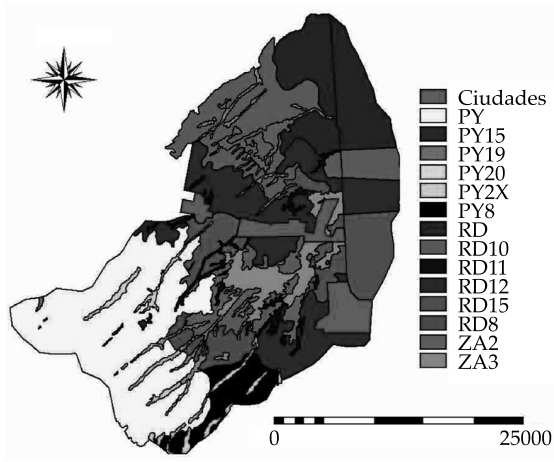


Figura 7. Distribución de las asociaciones de suelos en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina.

Las series puras de suelos mencionadas precedentemente se combinan entre sí, en diferentes proporciones, dando lugar a asociaciones de series de suelos. 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:

$$X_{as} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^M x_j A_j \quad (6)$$

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 es el área de ocupación de la serie j en la asociación en cuestión.

El cuadro 3 presenta los valores ponderados arealmente y promediados por horizontes de los parámetros analizados para las diferentes FPTs consideradas en los análisis. En el cuadro se han resaltado las formulaciones que aproximan en $\pm 10\%$ los valores calibrados.

Puede observarse que en cuanto a la conductividad hidráulica saturada, los valores propuestos por Saxton *et al.* (1986) y *Rosetta* con la información completa están dentro del entorno propuesto.

En cuanto al parámetro α , la formulación de Wosten *et al.* (1999) y *Rosetta* con la información completa también se encuentran dentro del entorno propuesto.

Para pronóstico del parámetro n , el programa *Rosetta*, en todas las versiones, da mejores resultados que el resto de las formulaciones.

El parámetro que presenta mayor sensibilidad al proceso de infiltración en el modelo hidrológico es el K_s , mientras que 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 en la zona de estudio considerada.

Los resultados alcanzados son promisorios y validan la aplicación conjunta de la metodología de ponderación propuesta y el software *Rosetta* para una buena estimación de parámetros hidráulicos. Eventualmente pueden utilizarse las formulaciones de Saxton *et al.* (1986) y Wosten *et al.* (1999) para estimar la conductividad hidráulica saturada y el parámetro α de la ecuación de van Genuchten, respectivamente.

Conclusiones

Se han utilizado diferentes procedimientos para estimar propiedades hidráulicas de suelos limosos, representativos de un sector de la llanura argentina, partiendo de información granulométrica y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos de INTA. Se emplean funciones de pedotransferencia (FPT) incluidas en los códigos *SoilPar* y *Rosetta*, junto con ecuaciones de regresión entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos dadas por un conjunto de autores.

Para el conjunto de las muestras analizadas, el análisis individual de cada una reveló

Cuadro 3. Valores comparativos de parámetros de van Genuchten y conductividades hidráulicas saturadas obtenidos para las texturas analizadas en la zona de estudio.

Autores	K_s (cm/h)		
	Horizonte "A"	Horizonte "B"	Promedio armónico
SoilPar (ec. Jabro)	0.836	1.141	0.965
SoilPar (ec. Puckett)	2.141	0.011	0.021
Rosetta SSCB $\theta_{33}-\theta_{1500}$ (cuenca Ludueña)	0.355	0.190	0.248
Rosetta SSCB (cuenca Ludueña)	0.474	0.376	0.420
Rosetta SSC (cuenca Ludueña)	0.498	0.714	0.586
Vereecken <i>et al.</i> , 1990	3.587	6.200	4.545
Cosby <i>et al.</i> , 1984	0.541	0.334	0.413
Wosten <i>et al.</i> , 1999	3.213	2.785	2.984
Saxton <i>et al.</i> , 1986	0.428	0.063	0.109
Rawls y Brak, 1985	0.066	0.011	0.019
Campbell y Shiozawa, 1994	0.013	0.000	-
Jabro, 1992	0.917	1.251	1.058
Jaynes y Tayler, 1984	0.616	0.388	0.476
Gulser y Candemir, 2008	5.668	1.876	2.819
Wosten <i>et al.</i> , 2001	1.535	1.367	1.446
Puckett, 1995	2.142	0.011	0.021
Parámetros calibrados en la cuenca del A° Ludueña (Zimmermann, 2003)	0.125 (0.225-0.030)		
Autores	α (1/cm)		
	Horizonte "A"	Horizonte "B"	Promedio
Carsel y Parrish, 1988	0.0200	0.0050	0.0125
SoilPar	0.0015	0.0010	0.0013
Rosetta SSCB $\theta_{33}-\theta_{1500}$ (cuenca Ludueña)	0.0030	0.0039	0.0035
Rosetta SSCB (cuenca Ludueña)	0.0063	0.0141	0.0102
Rosetta SSC (cuenca Ludueña)	0.0066	0.0142	0.0104
Wosten <i>et al.</i> , 1999	0.0076	0.0036	0.0056
Rawls y Brak, 1985	0.0167	0.0140	0.0154
Zimmermann, 2006b	0.1233	0.0293	0.0763
Parámetros calibrados en la cuenca del A° Ludueña (Zimmermann, 2003)	0.0040		
Autores	n (-)		
	Horizonte "A"	Horizonte "B"	Promedio
Carsel y Parrish, 1988	1.41	1.09	1.25
SoilPar	1.68	1.14	1.41
Rosetta SSCB $\theta_{33}-\theta_{1500}$ (cuenca Ludueña)	1.56	1.32	1.44
Rosetta SSCB (cuenca Ludueña)	1.60	1.34	1.47
Rosetta SSC (cuenca Ludueña)	1.59	1.34	1.47
Wosten <i>et al.</i> , 1999	1.20	1.09	1.15
Rawls y Brak, 1985	1.30	1.20	1.25
Zimmermann, 2006b	1.38	1.26	1.32
Parámetros calibrados en la cuenca del A° Ludueña (Zimmermann, 2003)	1.56		

una gran dispersión entre los diferentes procedimientos empleados. Esto da la pauta de que los predictores se deben emplear con

precaución, analizando las compatibilidades entre las muestras de suelo de estudio y las que se utilizaron originalmente en la propuesta

de las ecuaciones intrínsecas de cada FPT. Es decir, hasta el momento no pueden obtenerse ecuaciones aplicables "universalmente".

Se estimaron los parámetros medios ponderados para la cuenca del A° Ludueña y los pronósticos se compararon con valores obtenidos mediante calibración de un modelo matemático hidrológico (Zimmermann, 2003).

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo pudo concluirse que entre los códigos empleados, el que mejor se aproximó a los parámetros hidráulicos calibrados para la zona de estudio fue el programa *Rosetta*, suministrándole la información completa (composición textural, densidad aparente y dos puntos de la curva de retención: punto de marchitez permanente y capacidad de campo). Eventualmente pueden utilizarse las formulaciones de Saxton *et al.* (1986) y Wosten *et al.* (1999), para estimar la conductividad hidráulica saturada y el parámetro α de la ecuación de van Genuchten, respectivamente.

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

Glosario de variables

A (%)	contenido de arena.
C (%)	contenido de arcilla.
CIC (cmol (+) kg ⁻¹)	capacidad de intercambio catiónico.
CO (%)	contenido de carbono orgánico.
CV _g	coeficiente de variación geométrico.
d _g	diámetro geométrico.
DA (gcm ⁻³)	densidad aparente.
K _s (cm h ⁻¹)	conductividad hidráulica saturada.
L (%)	contenido de limo.
MO (%)	contenido de materia orgánica.
m (adimensional)	parámetro empírico del modelo de Van Genuchten.
n (adimensional)	parámetro empírico del modelo de Van Genuchten.
pH:	concentración de hidrogeniones.
top:	variable cualitativa binaria (0, 1), que indica si el estrato es superficial (1) o no (0).

α (cm ⁻¹):	parámetro empírico del modelo de Van Genuchten.
β_2 :	curtosis adimensional.
δ_h (g/cm ³):	densidad húmeda.
δ_s (g/cm ³):	densidad seca.
η (adimensional):	porosidad.
ψ_m (kPa):	succión correspondiente a un contenido de humedad determinado.
θ_{-20} (m ³ m ⁻³):	contenido de humedad a -20 kPa.
θ_{-33} (m ³ m ⁻³):	contenido de humedad a -33 kPa, capacidad de campo.
θ_{-40} (m ³ m ⁻³):	contenido de humedad a -40 kPa.
θ_{-200} (m ³ m ⁻³):	contenido de humedad a -200 kPa.
θ_{-1500} (m ³ m ⁻³):	contenido de humedad a -1500 kPa, punto de marchitez permanente.
θ_r (m ³ m ⁻³):	contenido de humedad residual.
θ_s (m ³ m ⁻³):	contenido de humedad para el suelo saturado.

Los parámetros granulométricos se obtienen de la siguiente forma:

Escala sedimentológica ϕ : $\phi = \log_2 d$, siendo d el diámetro de la partícula. Los parámetros estadísticos considerados para las distribuciones granulométricas son diámetro medio ϕ_m , desvío estándar σ , curtosis K , curtosis adimensional β_2 . Los mismos se calculan en la escala ϕ de la siguiente manera:

$$\phi_m = \sum_{i=1}^N \bar{\phi}_i f_i, \quad \sigma = \left[\sum_{i=1}^N (\bar{\phi}_i - \phi_m)^2 f_i \right]^{1/2},$$

$$K = \sum_{i=1}^N (\bar{\phi}_i - \phi_m)^4 f_i, \quad \beta_2 = \frac{K}{\sigma^4},$$

donde f_i es la fracción en peso asociada con el diámetro d_i . El diámetro medio geométrico d_g , el desvío estándar geométrico σ_g y el coeficiente de variación geométrico CV_g se obtienen a través de los respectivos valores definidos en la escala ϕ mediante las ecuaciones:

$$d_g = 2^{-\phi_m}, \quad \sigma_g = 2^\sigma, \quad CV_g = \frac{d_g}{\sigma_g}$$

Recibido: 06/08/09
Aprobado: 10/08/10

Referencias

- ACUTIS, M. and DONATELLI, M. *SoilPar 2.00*: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Europ. J. Agronomy*. Vol. 18, 2003, pp. 373-377.
- AHUJA, L.R., CASSEL, D.K., BRUCE, R.R. and BARNES, B.B. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Science*. Vol. 148, No. 6, 1989, pp. 404-411.
- ARYA, L.M. and PARIS, J.F. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 45, 1981, pp. 218-227.
- BROOKS, R.J. and COREY, A.T. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Pap. 3. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- CAMPBELL, G.S. and SHIOZAWA, S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. Van Genuchten, M.Th. *et al.* (editor). *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, 1994, pp. 317-328.
- CARSEL, R.F. and PARRISH, R.S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*. Vol. 24, 1988, pp. 755-769.
- COSBY, B.J., HORNBERGER, G.M., CLAPP, R.B. and GINN, T.R. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*. Vol. 20, 1984, pp. 682-690.
- GULSER, C. and CANDEMIR, F. *Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity Using Some Moisture Constant and Soil Physical Properties*. Ohrid, Republic of Macedonia: BALWOIS, 2008.
- HAVERKAMP, R. and PARLANGE, J.Y. Predicting the water-retention curve from particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Sci.* Vol. 142, 1986, pp. 325-339.
- HUTSON, J.L. and CASS, A. A retentivity function for use in soil water simulation models. *J. Soil Sci.* Vol. 38, 1987, pp. 105-113.
- HUTSON, J.L. and WAGENET, R.J. *LEACHM, Leaching Estimation and Chemistry Model*. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences Research series No. 92.3. New York: Cornell University, 1992, 121 pp.
- IRMAY, S. On the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Trans. Am. Geophys.* Vol. 35, 1954, pp. 463-468.
- JABRO, J.D. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Trans. ASAE*. Vol. 35, No. 2, 1992, pp. 557-560.
- JAYNES, D.B. and TYLER, E.J. Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. *Soil Sci.* Vol. 138, 1984, pp. 298-305.
- LEIJ, F.J., ALVES, W.J., VAN GENUCHTEN, M.TH. and WILLIAMS, J.R. *Unsaturated Soil Hydraulic Database, UNSODA 1.0 User's Manual*. Report EPA/600/R-96/095, U.S. Ada, USA: Environmental Protection Agency, 1996, 103 pp.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* Vol. 12, 1976, pp. 513-522.
- PUCKETT, W.E., DANE, J.H. and HAJEK, B.F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 49, 1985, pp. 831-836.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. and SAXTON, K.E. Estimating soil water properties. *Transactions ASAE*. Vol. 25, No. 5, 1982, pp. 1316-1320, 1328.
- RAWLS, W.J. and BRAKENSIEK, D.L. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In Jones, E.B. and T.J. Ward (editors) *Watershed management in the eighties. Proc. Irrig. Drain. Div. ASCE*. Denver, 1985, pp. 293-299.
- RAWLS, W.J., AHUJA, L.R. and BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil hydraulic properties from soils data. In Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Lund L.J. (editors). *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Proc. Int Worksh.* Riverside, October 11-13, 1989, University of California, Riverside, 1992, pp. 329-340.
- SAXTON, K.E., RAWLS, W.J., ROMBERGER, J.S. and PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of American Journal*. Vol. 50, 1986, pp. 1031-1036.
- SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J. and VAN GENUCHTEN, M.TH. A bootstrap neural-network approach to predict soil hydraulic parameters. In Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Wu, L. (editors). *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, University of California, Riverside, 1999, pp. 1237-1250.
- SHARPLEY, A.N. and WILLIAMS, J.R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. *Technical Bulletin No. 1768*. Washington, D.C.: USDA, Agricultural Research Service, 1990.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am.* Vol. 44, 1980, pp. 892-898.
- VERECKEN, H., MAES, J., FEYEN, J. and DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.* Vol. 148, 1989, pp. 389-403.
- VERECKEN, H., MAES, J. and FEYES, J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Sci.* Vol. 149, 1990, pp. 1-12.
- WILLIAMS, R.D., AHUJA, L.R. and NANEY, J.W. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from limited texture, bulk density, and limited data. *Soil Sci.* Vol. 153, 1992, pp. 172-184.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A. and LE BAS, C. Development and use of a database of hydraulic

- properties of European soils. *Geoderma*. Vol. 90, 1999, pp. 169-185.
- WÖSTEN, J.H.M., VEERMAN, G.H., DE GROOT, W.J. and STOLTE, J. Waterretentie-en doorlatendheids karakteristieken van boevn-en ondergronden in Nederland: De Staringreeks (Water retention and hydraulic conductivity characteristics on top- and subsoils of the Netherlands: The Starting series). (In dutch). *ALTERRA Report No. 153*. Wageningen, The Netherlands: ALTERRA, 2001.
- ZIMMERMANN, E. y RICCARDI, G. *Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para Áreas de Llanura*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Vol II. Córdoba, Argentina, Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, IAHR, 2000, pp. 169-178.
- ZIMMERMANN, E. 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*. Vol. 114, núm. 2, 2003, pp. 159-169.
- ZIMMERMANN, E. *Funciones hidráulicas de suelos limosos: valores de referencia*. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, 2006a.
- ZIMMERMANN, E. Estimación de funciones hidráulicas de suelos limosos. Valores de referencia y regresiones con parámetros físicos. *Cuadernos del CURIHAM*. UNR Editora. Rosario. Vol. 11, núm. 1, 2006b, pp. 49-66.
- ZIMMERMANN, E. y BASILE, P. *Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones con propiedades físicas y granulométricas*. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, 2006.
- ZIMMERMANN, E. y BASILE, P. *Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones no lineales con propiedades físicas y granulométricas*. XXI Congreso Nacional del Agua, Tucumán, Argentina, 2007.
- ZIMMERMANN, E. y BASILE, P. Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos (llanura argentina). *Journal of Earth Sciences. Boletín Geológico y Minero de España*. Vol. 119, núm. 1, 2008, pp. 71-80.

Abstract

ZIMMERMANN, E.D. & BASILE, P.A. Estimation of hydraulic parameters in silty soils using different pedotransfer functions. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. II, No. 1, January-March, 2011, pp. 99-116.

This paper presents different procedures that have been used to estimate hydraulic properties of silt soils, representative of a sector of the Argentinean flatlands. Grain size, and physicochemical information of soil maps printed by the National Agriculture Technology Institute (INTA) were used. Pedotransfer functions (PTF) included in the SOILPAR codes (Acutis and Donatelli, 2003) and Rosetta (Schaap et al., 1999) together with empirical relationships proposed by other authors were used. For the set of 136 analyzed samples of soils, the application of the procedures showed an important dispersion of results. Consequently, the PTF applied must be used with caution, and the compatibilities between the studied soil samples and those that were used originally in the proposed equations must be analyzed. The average parameters estimated in the Ludueña basin (Santa Fe, Argentina) were compared with values obtained by calibration of a hydrologic mathematical model. The results showed that the Rosetta code with complete information (textural composition, bulk density and two points of the retention curve) had better prediction of hydraulic parameters than the other methods. The formulations of Saxton et al. (1986) for saturated hydraulic conductivity and Wosten et al. (1999) for van Genuchten's parameter α can be alternatively used to the Rosetta model. The results reached to date are promissory, and validate the methodology for its application in other regional river basins.

Keywords: *silty soils, hydraulic parameter, pedotransfer functions, flatlands of Argentina.*

Dirección institucional de los autores

Dr. Erik D. Zimmermann

Dr. Pedro A. Basile

Centro Universitario Rosario de Investigaciones
Hidroambientales (CONICET)
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 245 bis
2000 Rosario, Santa Fe, Argentina
Teléfono y fax: +54 (341) 4808 541
erikz@fceia.unr.edu.ar
pbasile@fceia.unr.edu.ar