

# **METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EQUIVALENTE EN SUELOS NO SATURADOS HETEROGÉNEOS.**

**Erik Daniel Zimmermann**

Dr. Ing., Investigador Asistente CONICET.  
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales - Facultad de  
Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR.  
Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. E-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

**Resumen** Se propone una metodología para ponderar arealmente las conductividades hidráulicas verticales de suelos heterogéneos no saturados. El valor ponderado representa la conductividad hidráulica equivalente que provoca un volumen infiltrado igual a la suma de los producidos en cada subdivisión homogénea. De este modo, se preserva el resultado buscado en modelos de transformación lluvia-escurrentía.

La metodología consiste en la utilización de la ecuación de Green y Ampt para estimar los volúmenes infiltrados, resultando la misma poco sensible tanto a las condiciones precedentes de humedad como a la duración del evento lluvioso utilizado para estimar la infiltración.

Se presenta una aplicación detallada en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña el cual fue subdividido en 47 celdas superficiales las que presentan unidades heterogéneas de asociaciones de suelos de diversas características texturales, contenidos salinos y pH, entre otros parámetros.

## **INTRODUCCIÓN**

El análisis de los volúmenes de escurrimiento en modelos de transformación lluvia-escurrentía, de las recargas de un acuífero freático, de las tasas de evapotranspiración provenientes de la zona radicular, de la distribución de humedades en el perfil del suelo junto a otros fenómenos que ocurren en el interior de la zona no saturada, no puede realizarse correctamente sin el conocimiento de uno de los parámetros dominantes de éstos procesos: la conductividad hidráulica vertical del medio permeable.

Las expresiones analíticas utilizadas para la modelación parten de las ecuaciones de continuidad y conservación del momentum en el medio poroso, homogéneo y no saturado. Una combinación de ambas expresiones da lugar a la conocida ecuación de Richards (1931).

El pasaje del planteo teórico al plano real en modelos de redistribución de humedad, en terrenos donde las características de los suelos son heterogéneas, resulta complicado a la hora de definir cual es el parámetro medio areal representativo de una celda de modelación.

Frecuentemente, para concentrar parámetros en un área dada se le asignan funciones de peso  $w_i$  del tipo:

$$X_{med} = \sum w_i X_i \quad 1$$

siendo  $X_i$  valores de parámetros.

El problema que aquí se plantea esta formulado en los siguientes términos: conocidos los parámetros de infiltración (conductividad hidráulica vertical  $K_i$ ) de áreas homogéneas  $A_i$ , ¿cual es el valor medio ( $K_m$ ) que se adoptará para la totalidad del área  $A$  ?.

### SUELO HETEROGÉNEO Y SATURADO.

Frecuentemente se acepta una ponderación de los parámetros en función de la relación entre áreas de valores homogéneos, es decir,  $w_i = A_i / A$ , donde  $A_i$  es el área de características homogéneas y  $A$  el área total.

Aquí se propone como valor medio ponderado, el valor de  $K_m$  que produzca el mismo **volumen de escurrimiento** (o infiltración) que la suma de los escurrimientos (o infiltraciones) que se generan en cada una de las partes componentes.

Para una lluvia de intensidad constante  $i$ , un suelo cuya capacidad de infiltración es  $f$ , donde  $i > f$ , un área de drenaje  $A$ , el volumen infiltrado  $F$ , vendrá dado por:

$$F = f.T \quad 2$$

donde  $T$  es la duración del evento de lluvia.

Dado que por hipótesis el suelo se encuentra saturado, las conductividades hidráulicas  $K_i$  son las saturadas  $K_{si}$ , por ende la capacidad de infiltración  $f$  es equivalente a la conductividad hidráulica.

Considerando un volumen de precipitación  $P = iT$ , los volúmenes de escurrimiento  $V_i$  serán (Figura 1):

$$V_1 = (P - K_1 T) A_1$$

$$V_2 = (P - K_2 T) A_2$$

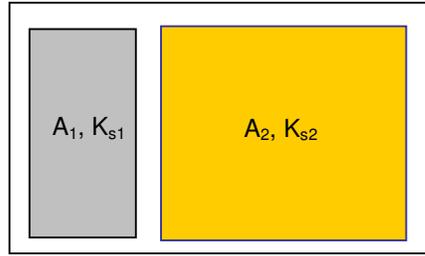
$$V = V_1 + V_2 = PA_1 + PA_2 - K_1 TA_1 - K_2 TA_2 = (P - K_m T) A$$

$$PA - \sum K_i A_i T = PA - K_m AT$$

Por lo que se deduce que:

$$K_m = 1/A \sum K_i A_i$$

3



Si  $A = A_1 + A_2$ ; ¿  $K_m$  ?

**Figura 1**

Es decir que, para la situación donde el suelo se encuentra saturado, proponer una ponderación con factores de peso por áreas de influencia es equivalente a conservar los volúmenes infiltrados en cada parte homogénea.

### SUELO HETEROGÉNEO Y NO SATURADO.

Las condiciones cambian cuando el suelo no se encuentra saturado. Esta situación es la más frecuente cuando se está evaluando la porción de la lluvia que tiene por destino el escurrimiento superficial.

Bajo la premisa de proponer un valor medio ponderado  $K_m$  que produzca el mismo volumen de escurrimiento que la suma de los que se generan en cada una de las partes componentes, se propone para el caso no saturado, una estimación del volumen infiltrado mediante el modelo de frente húmedo ó ecuación de Green y Ampt (1911):

$$F - \Psi \Delta \theta \ln\left(1 + \frac{F}{\Psi \Delta \theta}\right) = KT \quad 4$$

donde  $F$  es el total infiltrado al tiempo  $T$ ,  $\psi$  el potencial de succión del frente húmedo,  $\Delta \theta = \theta_s - \theta_i$  la diferencia entre la humedad de saturación y la humedad inicial y  $K$  la conductividad hidráulica del suelo. Si la precipitación caída en el sistema es  $P$ , el volumen escurrido en cada una de las porciones homogéneas de suelo será:

$$V_1 = (P - F_1) A_1$$

$$V_2 = (P - F_2) A_2$$

$$V = V_1 + V_2 = P A_1 + P A_2 - F_1 A_1 - F_2 A_2 = (P - F) A$$

$$F = (F_1 A_1 + F_2 A_2) / A \quad 5$$

A los fines de estimar una conductividad hidráulica equivalente, que proporcione un volumen de infiltración igual a la suma de los volúmenes infiltrados en cada área homogénea, la metodología a seguir es la siguiente:

- Conociendo las propiedades y condiciones iniciales de cada sector homogéneo,  $K_i, \Psi_i, \Delta\theta_i$ , pueden estimarse los volúmenes de infiltración  $F_i$  mediante aplicación de la ecuación 4, resolviéndola por iteraciones sucesivas.
- Puede determinarse el total de lluvia infiltrada al final del evento lluvioso,  $F$ , aplicando la ecuación 5.
- El valor de conductividad hidráulica  $K$  que permite derivar un valor de infiltración igual a  $F$ , puede obtenerse resolviendo la ecuación 4 en términos de  $K_m$ :

$$K_m = \frac{\frac{1}{A} \sum F_i A_i - \Psi \Delta\theta \ln\left(1 + \frac{\frac{1}{A} \sum F_i A_i}{\Psi \Delta\theta}\right)}{t} \quad 6$$

La aplicación de ec. 4 conlleva a definir otros parámetros adicionales a la conductividad saturada, como el potencial del frente húmedo de cada suelo y la condición inicial precedente.

Para aplicar la ecuación 6, debe estimarse un valor medio del potencial  $\Psi$  y de la condición precedente  $\Delta\theta$ , lo cual plantea un nuevo problema de ponderación.

Con respecto a la intensidad de lluvia, si bien se sostiene su invarianza temporal, debe proponerse una duración de la misma para determinar el volumen de agua precipitada. En este sentido, existe incertidumbre sobre la dependencia de la duración del evento respecto a los resultados alcanzados para  $K_m$ .

#### **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

La metodología propuesta fue aplicada a un conjunto de *celdas* que representan áreas de aporte superficial en el sistema del arroyo Ludueña, provincia de Santa Fe, Argentina. Para cada celda fue necesario definir la conductividad hidráulica vertical para estimar su capacidad de infiltración ante eventos lluviosos.

En cada celda existen diferentes asociaciones de series de suelo representativas de la región, cada una de características heterogéneas en cuanto a composición textural, contenido salino, pH, etc.

Para aplicar la metodología propuesta, se aceptó arbitrariamente que la duración de lluvia es de 12 hs y que la condición precedente de humedad representa una situación media desde un punto de vista estadístico. Por lo tanto, el déficit de saturación  $\Delta\theta$  será la diferencia entre la humedad de saturación y la humedad media del perfil.

Queda por comprobar, según se verá más adelante, que la sensibilidad de los resultados de la ponderación es baja respecto a éstas variables.

Se contó con fotografías aéreas de la cuenca sobre las cuales se superpuso los mapas de los suelos presentes en la misma. Se trabajó con el apoyo de las cartas de suelo del INTA.

Las series de suelos presentes en la cuenca son **Roldán, Peyrano, Monte Flores, Gelly y Zavalla**. De las cartas de suelos del INTA se extractó la información textural de las series (contenidos de arcilla y arena) en correspondencia con su estrato más impermeable (horizonte B), así como contenido salino (contenido de sodio en miliequivalentes cada 100 grs.) y pH (tabla 1).

La conductividad hidráulica ( $K_s$ ), el potencial de frente húmedo ( $\Psi$ ) y la humedad de saturación ( $\theta_s$ ) dependen de la composición textural del suelo. Al respecto se consultaron los ábacos de Rauls y Brankensiek, citados por Tucci (1989) y los resultados se volcaron a la tabla 1.

Dado que el potencial de frente húmedo  $\Psi$  presentó escasa variación para los distintos tipos de suelos encontrados en la región, se propuso una ponderación en función del área de ocupación.

Se tuvo en cuenta el pH del suelo para definir las conductividades hidráulicas. Las experiencias de laboratorio sugieren una relación logarítmica inversa entre la permeabilidad y el pH del suelo. Por ejemplo, cuando un suelo es regado con aguas sodificadas, pasa de tenor ácido a básico empeora su estructura y su permeabilidad en órdenes de magnitud. Aquí, siguiendo las experiencias realizadas en el USDA, se propuso la siguiente relación entre pH y permeabilidad:

$$\text{Log } r = 3.714 - 0.571 * \text{pH}, \quad 6.5 < \text{pH} < 10 \quad 7$$

Donde  $r = K_s/K_{s,0}$  es la relación entre la permeabilidad del suelo en condiciones normales (pH = 6,5) y en condiciones salinas.

**Tabla 1. Características asociadas a cada serie.**

Serie	Contenido de arcilla %	Contenido de arena %	Contenido de Sodio Me/100 g	PH	$K_s$ mm/h	$\Psi$ mm	$\theta_s$
Monte Flores (MF)	54.6	2.6	0.9	6.6	0.07	1500	0.52
Gelly (Ge)	41.3	4.6	8.0	8.2	0.03	1000	0.52
Zavalla (Za)	55.6	2.0	7.8	8.1	0.01	1500	0.52
Peyrano (Py)	49.6	4.3	0.5	6.0	0.30	1000	0.52
Roldán (Rd)	50.7	2.2	0.2	6.7	0.08	1200	0.52

Las series o perfiles tipo se combinan entre sí en diferentes proporciones dando lugar a asociaciones de suelos. Entre los que se encuentran en la cuenca figuran las siguientes: **Py**,

Py2x, Py8, Py15, Py20, Za2, Za3, Rd8, Rd10, Rd11, Rd12, Rd15. La tabla 2, presenta las proporciones de cada serie en las asociaciones (INTA 1981).

**Tabla 2. Proporciones en tanto por uno de cada serie en las asociaciones.**

Series	Asocs. Py2x, Py8, Py15, Py20, Py	Asocs. Za2, Za3	Asoc. Rd8	Asoc. Rd10	Asoc. Rd11	Asoc. Rd12	Asoc. Rd15
MF	-	0.3	-	0.2	0.4	0.2	0.2
Ge	-	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2
Za	-	0.5	-	0.3	-	-	0.1
Py	1.0	-	-	-	-	-	-
Rd	-	-	0.7	0.3	0.4	0.7	0.5

Basándose en la metodología propuesta en este trabajo se obtuvieron los siguientes valores de conductividades hidráulicas para cada asociación (tabla 3).

**Tabla 3. Conductividades hidráulicas y potenciales de las asociaciones.**

Series	Asocs. Py2x, Py8, Py15, Py20, Py	Asocs. Za2, Za3	Asoc. Rd8	Asoc. Rd10	Asoc. Rd11	Asoc. Rd12	Asoc. Rd15
$K_s \times 10^8$ (m/s)	8.33	1.64	2.99	2.07	2.65	2.75	2.53
$\Psi$ (mm)	1000	1400	1140	1310	1280	1240	1250

Los mapas de suelos volcados a fotografías aéreas ,en escala 1:50000, fueron empleados como base cartográfica sobre los que se dibujaron las celdas esquematizadas en la Figura 2. Paso siguiente se planimetraron las áreas que ocupan cada asociación en cada una de las celdas. Los resultados de este procesamiento se muestran en la tabla 4. Conocidas las características físicas de cada asociación (Tabla 3) se aplicó nuevamente el procedimiento de ponderación y se obtuvieron los parámetros representativos por celdas (Tabla 4).

La Figura 3 muestra las curvas de isovalores de conductividades hidráulicas en la cuenca del arroyo Ludueña (Zimmermann 1998).

**Tabla 4. Asociaciones de series por celdas**

Celdas	Py	Za2, Za3	Rd8	Rd10	Rd11	Rd12	Rd15	K	Ψ
501	1.00							8.37E-08	1.000
502	1.00							8.37E-08	1.000
503	1.00							8.37E-08	1.000
504	1.00							8.37E-08	1.000
505	1.00							8.37E-08	1.000
506	1.00							8.37E-08	1.000
507	1.00							8.37E-08	1.000
508	1.00							8.37E-08	1.000
509	0.90		0.10					7.71E-08	1.010
510	0.60	0.10	0.20		0.10			5.53E-08	1.090
511	0.80		0.20					7.07E-08	1.020
512		0.10	0.70	0.20				2.67E-08	1.170
513	0.50		0.25	0.25				4.94E-08	1.100
514	1.00							8.37E-08	1.000
515	1.00							8.37E-08	1.000
516	1.00							8.37E-08	1.000
517	1.00							8.37E-08	1.000
518	0.70			0.15	0.15			6.05E-08	1.090
519	0.50				0.50			4.99E-08	1.150
520	0.80						0.20	6.88E-08	1.040
521	0.60						0.35	5.87E-08	1.070
522	1.00							8.37E-08	1.000
523	0.90					0.10		7.64E-08	1.020
524	0.20	0.40	0.40					3.12E-08	1.200
525		0.20	0.30	0.50				2.26E-08	1.260
526	0.20	0.30		0.20	0.10		0.20	2.95E-08	1.250
527		0.30		0.20		0.20	0.30	2.23E-08	1.280
528	0.10					0.90		3.2E-08	1.180
529		0.30				0.60	0.10	2.4E-08	1.260
530		0.40		0.20	0.20	0.20		2.16E-08	1.320
531		0.30		0.30		0.40		2.22E-08	1.290
532		0.30				0.70		2.42E-08	1.260
533						0.50	0.50	2.69E-08	1.200
534		0.50		0.10		0.20	0.20	2.09E-08	1.310
601		0.30		0.40		0.30		2.16E-08	1.300
602			0.65	0.35				2.68E-08	1.170
603		0.20		0.40		0.35		2.22E-08	1.290
604			1.00					3.04E-08	1.100
605			0.70	0.30				2.73E-08	1.160
606		0.30				0.70		2.42E-08	1.260
607				0.30		0.70		2.58E-08	1.230
608		0.50				0.30	0.20	2.15E-08	1.300
609			0.10	0.10		0.40	0.40	2.66E-08	1.200
610			1.00					3.04E-08	1.100
611			1.00					3.04E-08	1.100
612		0.50					0.50	2.09E-08	1.300
613		0.50					0.50	2.09E-08	1.300

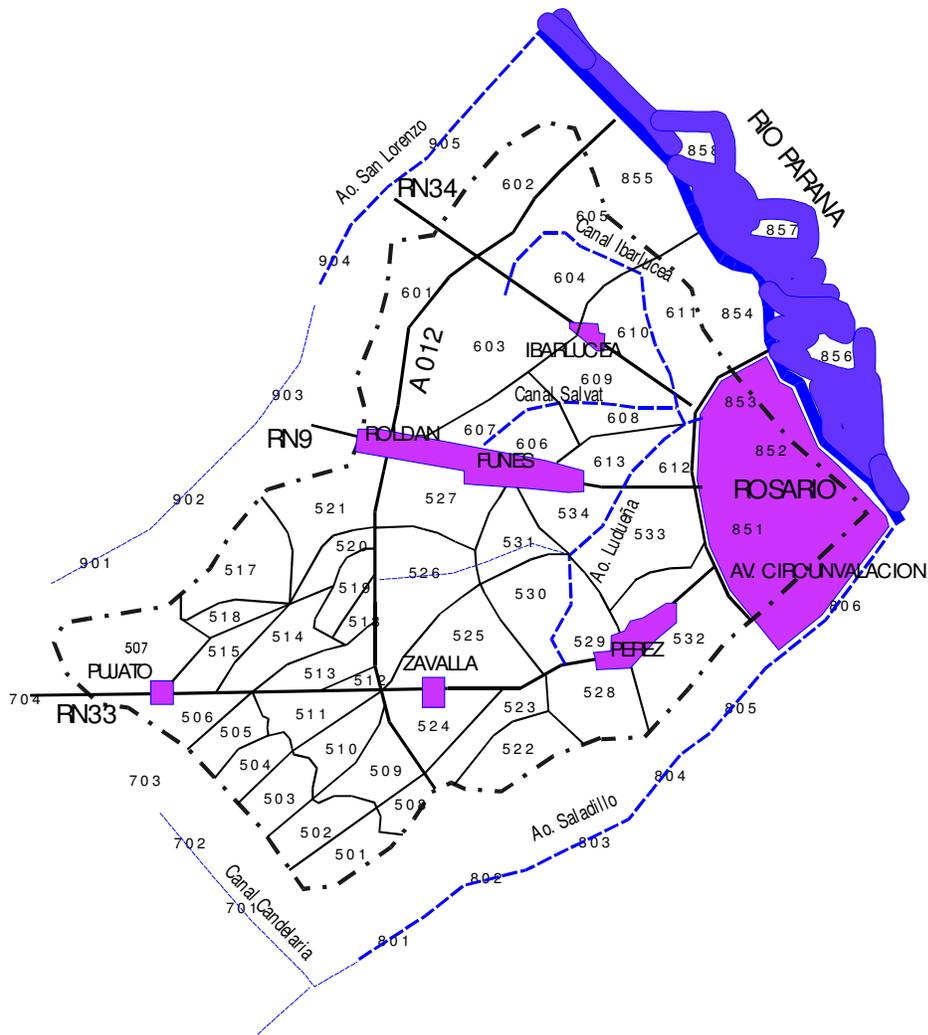
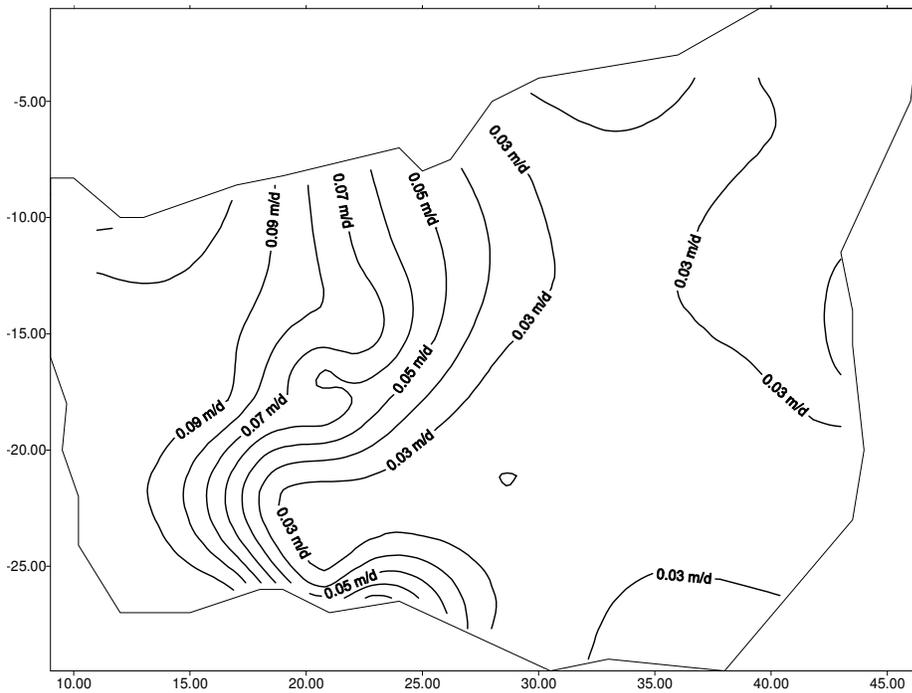


Figura 2. Esquematzación de la subdivisión del sistema Ludueña en celdas.



**Figura 3. Curvas de isovalores de conductividades hidráulicas**

**SENSIBILIDAD DE LA PONDERACIÓN A LA DURACIÓN DE LLUVIA Y A LAS CONDICIONES ANTECEDENTES DE HUMEDAD.**

La aplicación precedente fue analizada para diferentes duraciones de lluvia. Se propuso un análisis para un rango de duraciones amplio (3 a 48 hs) comparándose las conductividades hidráulicas medias obtenidas. Los resultados se grafican en la Figura 4. Como puede observarse, la sensibilidad de los resultados a las diferentes duraciones resultó casi nula, en consecuencia, puede adoptarse un valor medio de la duración de lluvia arbitrario.

En segundo lugar se investigó la sensibilidad del procedimiento frente a las condiciones antecedentes de humedad  $\Delta\theta$ . La Figura 5 muestra que para condiciones húmedas ( $\theta_i = 0,27$  ó  $\Delta\theta = 0,23$ ) o para condiciones secas ( $\theta_i = 0,15$  ó  $\Delta\theta = 0,37$ ), como se aprecia en la figura los resultados son prácticamente indistinguibles.

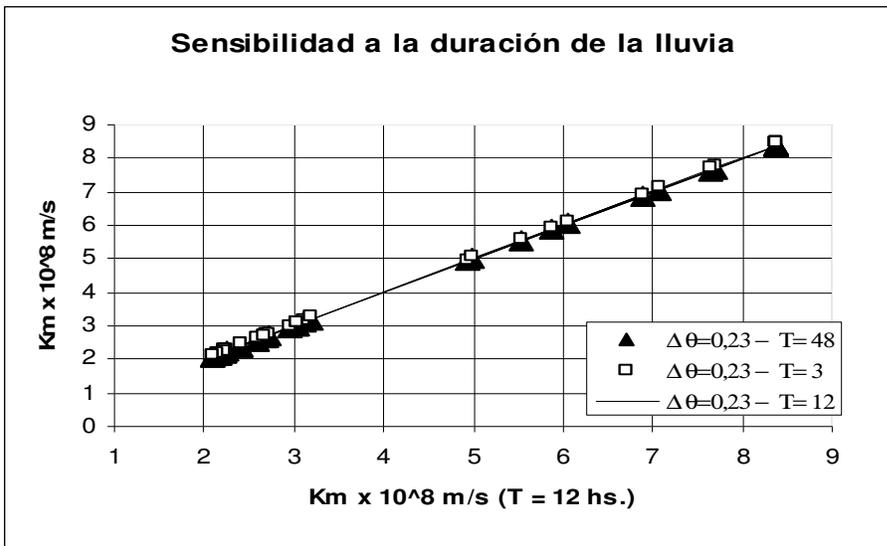


Figura 4

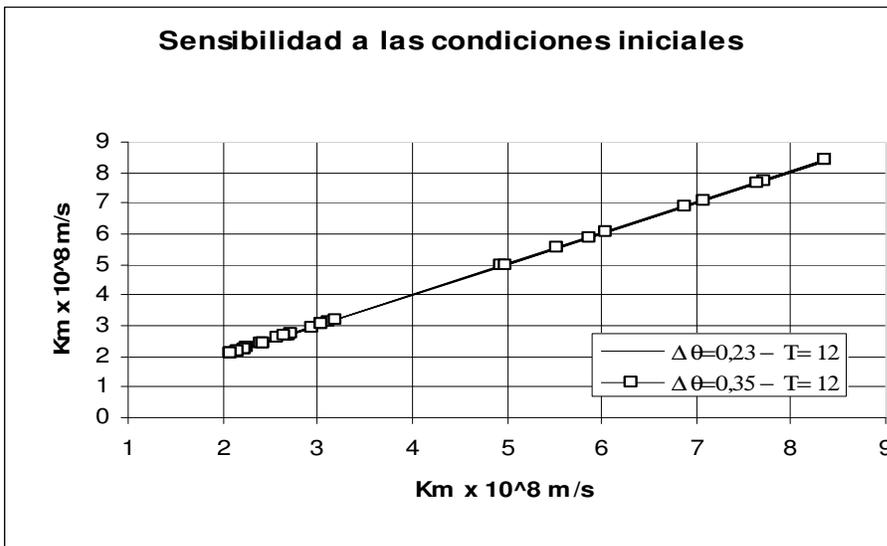


Figura 5

## CONCLUSIONES

Se propone una metodología para ponderar arealmente las conductividades hidráulicas verticales de suelos heterogéneos no saturados. El valor ponderado representa la conductividad hidráulica equivalente que provoca un volumen infiltrado igual a la suma de los producidos en cada subdivisión homogénea. De este modo, se preserva el resultado buscado en modelos de transformación lluvia-escurrentía.

La metodología consiste en la aplicación de la ecuación de Green y Ampt para estimar los volúmenes infiltrados y resultó poco sensible tanto a las condiciones precedentes de humedad como a la duración del evento lluvioso utilizado para estimar la infiltración.

## REFERENCIAS

Green W, Ampt G. (1911) *Studies on soil physics, part 1, the flow of air and water through soils*. J. Agric. Sci. Vol 4 Nro. 1, 1-24.

INTA (1981) Mapas de Suelos. Cartas Roldán y Zavalla.

Richards L. (1931) *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Physics. Vol 1, 318-333

Tucci C (1989) *Hidrología Aplicada*; Colección ABRH de recursos hídricos. Instituto de Pesquisas Hidráulicas; UFRGS. Porto Alegre. Brasil.

Zimmermann E (1998) Informe Anual de la Carrera de Investigador del CONICET. CURIHAM. FCEI. UNR. Rosario. Inédito.