

## PARÁMETROS DEL MODELO DE INFILTRACIÓN DE GREEN Y AMPT EN SUELOS DE LA CIUDAD DE CÓRDOBA, ARGENTINA

Juan F. Weber y Laureana Apestegui

Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria - CP (X5016ZAA) - Córdoba – Argentina.  
e\_mail: jweber@civil.frc.utn.edu.ar

### RESUMEN

Se presenta una metodología para la obtención de los parámetros del modelo de infiltración de Green y Ampt a partir de los resultados obtenidos en una campaña de medición in situ de la capacidad de infiltración en distintos sitios de la ciudad de Córdoba. Como instrumento se utilizó un microsimulador de lluvia portátil diseñado y construido en el Laboratorio de Hidráulica, UTN-Facultad Córdoba. Este equipo, que es completamente desarmable y define una parcela de ensayo de 1 m<sup>2</sup>, permite generar lluvias de intensidades comprendidas entre los 65 y 120 mm/h; el exceso de precipitación se mide a través de dos vasos totalizadores graduados, en forma manual. La selección de los sitios de ensayo respondió a dos condiciones: el tipo y el uso del suelo. A su vez, se consideraron distintas condiciones de humedad inicial. Como control, también se realizaron mediciones simultáneas con el infiltrómetro de doble anillo. La campaña de medición se extendió durante 7 meses e implicó el trabajo de tres personas en forma simultánea, realizando entre 2 y 3 ensayos por semana. Los valores medidos fueron digitalizados y procesados, construyéndose las curvas de infiltración acumulada y tasa de infiltración en función del tiempo. A partir de estos valores, se ajustaron los parámetros del modelo de infiltración de Green & Ampt, los que se compararon con los disponibles en la bibliografía. No pudo hallarse una correlación clara entre estos parámetros y el contenido de humedad inicial del suelo. Los parámetros así obtenidos, que superan en calidad a los determinados en campañas anteriores utilizando la técnica del infiltrómetro de doble anillo, serán de utilidad en tareas de diseño hidrológico urbano, y representan un aporte original al conocimiento de la respuesta hidrológica de los suelos urbanos de Córdoba.

**Palabras clave:** simulador de lluvia, mediciones hidrológicas, hidrología urbana.

### ABSTRACT

We present a methodology to obtain Green & Ampt's infiltration model parameters from the results of a field measurement campaign of infiltration capacity at several sites of Córdoba city (Argentina). A portable rainfall micro-simulator designed and built at the Hydraulics Laboratory (UTN- Facultad Cordoba) was used. This equipment, which can be completely disassembled and defines a test plot of 1 m<sup>2</sup>, can generate rainfall intensities between 65 and 120 mm / h; runoff is collected and manually measured through two graduate cylinders. Site selection was related to two conditions: soil type (indirectly through geomorphology) and soil use (through traffic intensity level). Additionally, different initial moisture conditions were considered. For contrast, we also performed simultaneous measurements with the double-ring infiltrometer technique. The measurement campaign lasted seven months and involved the work of three people simultaneously, performing between two and three tests per week. The measured values were digitized and processed; curves of cumulative infiltration and infiltration rate versus time were constructed. From these values, we adjusted the parameters of Green & Ampt infiltration model. These parameters were compared with available in bibliography. However, we failed to appreciate a clear dependence between model parameters and antecedent moisture content. These parameters exceed in quality to those determined in previous campaigns using the double-ring infiltrometer technique. These parameters will be useful in urban hydrology design, and represent an original contribution to knowledge of the hydrological response of urban soils at Córdoba city.

**Keywords:** Rainfall simulator, hydrologic measures, urban hydrology.

## INTRODUCCION

En trabajos ingenieriles vinculados al diseño y cálculo de obras de desagüe pluvial urbano, el proyectista se ve en la obligación, a la hora de cuantificar los caudales de aporte, a considerar dos tipos de superficies en las cuencas: las impermeables y las permeables. Las primeras, sin duda provocan un alto impacto en el volumen de crecidas y una disminución del tiempo de respuesta de la cuenca (Tucci, 2001). En cuanto a las segundas, se han impuesto en la práctica una serie de modelos de uso generalizado a la hora de cuantificar la fracción de la precipitación de escurrimiento directo, y por tanto, la fracción infiltrada: el denominado Método Racional (Chow et al., 1994), el conocido método del CN-SCS (SCS, 1972) muy difundido en su aplicación a través de los populares programas de computadora HEC-1 y más modernamente HEC-HMS, y finalmente el Método de Horton (1939), difundido en el ámbito de la hidrología computacional a través de (entre otros) el conocido modelo SWMM. Estos, como muchos otros modelos conceptuales del proceso de infiltración (Ravi y Williams, 1998), intentan simplificar el abordaje riguroso del problema, representado por la ecuación de Richards (Chow et al., 1994), y por tanto son los utilizados más ampliamente en la práctica hidrológica.

Una de las principales dificultades que encuentra el modelador a la hora de aplicar estos modelos de infiltración es la de estimar los parámetros de los mismos, tratando de lograr una adecuada representación de la realidad. Lamentablemente, existen grandes dificultades a la hora de disponer de datos medidos de infiltración en áreas permeables urbanas en la República Argentina. En la ciudad de Córdoba, por ejemplo, recién se encara una tarea sistemática de producción de información experimental al respecto a partir del trabajo de Weber et al (2005), desde el Laboratorio de Hidráulica (LH-UTN), dependiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional a través una campaña de obtención de datos experimentales de infiltración en suelos de la ciudad de Córdoba, a través de la técnica del infiltrómetro de doble anillo (Figura 1). Este procedimiento de ensayo, también conocido como método de Müntz (Custodio & Llamas, 1976) permite obtener mediciones directas de infiltración en áreas reducidas (puntuales). Este ensayo tiene la ventaja de ser de fácil implementación, pero

presenta tres limitaciones importantes, a saber: 1°, el ensayo es de carácter puntual, esto es, el área involucrada es muy pequeña y por lo tanto los errores en la extrapolación a superficies del orden de magnitud de una cuenca son muy importantes; 2°, el ensayo está limitado a la condición de encharcamiento superficial permanente, lo cual limita la aplicabilidad de los parámetros a calibrar; y 3°, el dispositivo no representa fielmente la entrada hidrológica del sistema, esto es, la precipitación, dado que lo que se hace es mantener una lámina de agua constante en la superficie del suelo. Son conocidas las severas limitaciones que presentan las mediciones así determinadas, fundamentalmente en relación a la falta de representatividad del proceso lluvioso en la técnica de ensayo, por un lado, y a la fuerte alteración de la superficie del terreno debido al hincado de los anillos; estas limitaciones conllevan a errores experimentales difíciles de cuantificar.



Figura 1. Infiltrómetro de doble anillo.

Con el objetivo de obtener una caracterización experimental más verosímil del proceso hidrológico de la infiltración, se propuso utilizar como instrumento de ensayo un simulador de lluvia portátil desarrollado en el LH-UTN; se visualizan como beneficios inmediatos: la mejor simulación del proceso lluvia – infiltración, y la menor alteración de la parcela de ensayo, es decir, se intenta subsanar las limitaciones del procedimiento del infiltrómetro de doble anillo anteriormente utilizado.

## OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es caracterizar el proceso de infiltración de suelos de la ciudad de Córdoba, de acuerdo al uso y tipo de los mismos; y ajustar los parámetros del modelo de infiltración de

Green & Ampt, al conjunto de datos experimentales recopilados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### El simulador de lluvia

Se describen a continuación las características generales del equipo utilizado en el desarrollo de la presente campaña de medición (Weber et al, 2009; 2010; 2011b).

### Introducción

El micro simulador de lluvia tiene la ventaja de reproducir con más fidelidad el fenómeno de la precipitación. Numerosos autores (Marelli, 1989) muestran la importancia del impacto de las gotas en la microcapa superior del suelo en el balance hídrico, además del efecto evidente sobre la erosión superficial. Por otra parte, en este tipo de dispositivos es posible simular una precipitación de intensidad variable en el tiempo, incluso una precipitación discontinua. La necesidad de reproducir bajo condiciones controladas los efectos de la precipitación, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión, condujeron desde hace años al desarrollo de diferentes mecanismos e instrumentos que tratan de simular la lluvia natural (Pla Sentis, 1981; Rostagno y Garayzar, 1995). El mayor de estos problemas recae sobre la reproducción de gotas que se asemejen a las de una lluvia natural.

Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para aplicar agua de forma similar a los episodios tormentosos naturales. Son útiles para obtener datos de erosión, infiltración, escorrentía superficial y transporte de sedimentos. No obstante, las características de la lluvia natural deben ser simuladas de forma adecuada, los datos obtenidos deben ser analizados cuidadosamente y se debe efectuar una buena interpretación de los resultados para obtener información fiable en las condiciones para las que ha sido aplicable la lluvia (Benito et al., 2001).

### Desarrollo

Uno de los antecedentes de mayor peso en el diseño del simulador de lluvia fue el precedente local de un instrumento diseñado por Irurtia y Mon (1994); a

partir de un modelo de Kamphorst (1987). Este microsimulador de lluvia fue luego modificado por Aoki y Sereno (1999), y se encuentra actualmente en uso en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Córdoba. En su forma básica el microsimulador es un prisma cuadrado de 1.5 m de altura y de 0.25 m de base. La estructura es de hierro en ángulo, que sostiene las paredes de acrílico transparente que actúan como rompeviento. El peso total del aparato es de 8 kg. En la parte superior se apoya sobre una caja porta gotero de acrílico, en cuya base se encuentran 49 tubos plásticos formadores de gotas. Esta caja tiene una alimentación de agua, proveniente de un reservorio colocado en una de las aristas de la estructura. El reservorio está graduado en mm de lámina de agua aplicados en la microparcela, para simplificar la lectura durante la medición.

### Formadores de gotas

El formador utilizado se compone de una aguja hipodérmica introducida en un tubo rígido, el cual se obtiene de cortar su propio estuche, al ras de dicha aguja. Los formadores ensayados correspondieron a un mismo diámetro de la aguja, 0.8 mm, y tres longitudes diferentes, 25.4 mm, 38.1 mm, 50.8 mm, las que corresponden a 1, 1 ½ y 2 pulgadas respectivamente.

Se realizó una serie de mediciones de laboratorio para determinar el comportamiento hidráulico de estos formadores (Paoli y Rojas, 2006). En base a esta información se decidió colocar un total de 289 formadores, distribuidos en 17 filas por 17 columnas, y separados a una distancia de 5.30 cm entre ejes, cubriendo de esta manera cada formador, un área aproximada de 28.10 cm<sup>2</sup> sobre la base de una batea de 96 cm x 96 cm de lado. El tipo de formador seleccionado fue el N° 3, correspondiente a la aguja de 2 pulgadas, ya que fue el que presentó las menores intensidades.

Esta elección se basó en que las intensidades logradas con los formadores más cortos y con un número de 289 formadores alcanzaron, para el formador N° 1  $i = 167$  mm/h y para el formador N° 2,  $i = 149$  mm/h, valores que se consideraron excesivos en relación a los objetivos para los cuales fue diseñado el simulador.

### El simulador de lluvia

El equipo (Figura 2) consta básicamente de una estructura metálica, de caño de acero de sección

cuadrada, formando un prisma cuadrado de 2 m de altura y 1 m de lado. Este prisma se forma a través de cuatro columnas y cerrado por medio de cortinas rompevientos. Las columnas sostienen el sistema de alimentación de agua que esta compuesto por dos tanques; uno de alimentación, solamente y el otro de alimentación y regulación de intensidad.

La regulación de la intensidad se produce a través de un flotante (Achutegui et al., 1996). Debajo del sistema de alimentación de agua se encuentra la batea con los 289 formadores de gotas, que producen la lluvia simulada. La base de este prisma está constituida por un marco cuadrado de hierro, de 1 m de lado y 0.10 m de altura, con vertederos en sus cuatro lados y canales para el transporte del agua escurrida. Este marco de hierro, en su posición de trabajo es hincado en el suelo, constituyendo así las paredes límites de la parcela de medición. El peso total del equipo armado es de 110.60 kg; el peso del fluido puede llegar hasta los 100 kg.



Figura 2. Simulador de lluvia en campaña.

Las partes componentes del microsimitador de lluvia son:

- la estructura metálica: constituida por columnas, vigas tipo 1 (rigidización estructural) y tipo 2 (soporte para los tanques de alimentación), conjunto tensor y mamparas rompeviento. Las partes metálicas se hallan unidas entre sí por bulones y tuercas permitiendo así el rápido montaje y desmontaje de la estructura.
- el sistema de alimentación: conformado por los tanques alimentador 1 (reserva) y alimentador 2 (generación de carga), filtro de agua y conjunto flotante.
- el sistema de Lluvia Simulada: consta de la batea con los 289 formadores de gota, los cuales pueden ser reemplazados inmediatamente ante cualquier desperfecto en campaña.
- el sistema de Puesta en Régimen: conformado por una bandeja intermedia, cuya finalidad es evitar que durante el periodo de puesta en régimen del sistema (del orden de 15 minutos) se altere el contenido de humedad inicial del suelo.
- la Parcela de Medición y Sistema de Recolección del Escurrimiento Superficial: la parcela de medición queda definida por el marco de hierro hincado, que posee salidas laterales por donde fluye el escurrimiento superficial, que es capturado por canales y conducido finalmente a los vasos de medición.

#### Tareas de calibración

La calibración del simulador de lluvia tuvo los siguientes objetivos principales (Paoli, 2009):

- Verificar que la intensidad de lluvia sea homogénea en toda el área precipitada.
- Estudiar el comportamiento general del equipo.
- Determinar una curva de intensidad de lluvia para cada altura de carga sobre los formadores de gotas, junto a un intervalo de incerteza y su probabilidad de ocurrencia.
- Determinar la escala de apreciación del instrumento.
- Comparar las intensidades de lluvia reales obtenidas con el simulador de lluvia, con las estimadas para los 289 goteros que componen el equipo.

Para la calibración se utilizaron cinco probetas graduadas de 1000 ml, con divisiones de 10 ml cada una. En su parte superior se les colocó un embudo de 32 cm de diámetro exterior y 31 cm de diámetro interior, funcionando el conjunto como un pluviómetro.

Se midió el tiempo que tardó en llenarse un volumen fijo de 850 ml en cada pluviómetro para las diferentes cargas sobre formadores estudiadas. Estas fueron 11 cm, 13 cm, 15 cm, 17.5 cm, 20 cm, 22.5 cm y 25 cm.

Cada uno de los puntos fue medido simultáneamente durante un funcionamiento continuo del simulador de lluvia de aproximadamente 2 h por ensayo, obteniéndose de esta manera 10 datos por pluviómetro, y una muestra total de 50 datos para cada carga analizada. Esto representa un total de 350 datos obtenidos.

Los resultados de estas mediciones debieron ser corregidos por el error sistemático introducido en el posicionamiento de los pluviómetros, que produjo que el número de formadores capturados variara entre 23 y 25.

Se verificó la normalidad de la distribución de las observaciones, estandarizando cada serie. Con los valores medios de intensidad obtenidos para cada carga, se trazó la curva de ajuste indicada en la Figura 3. En esta Figura, las curvas que rodean a la regresión potencial corresponden a bandas de 99% y 90% de certidumbre, respectivamente.

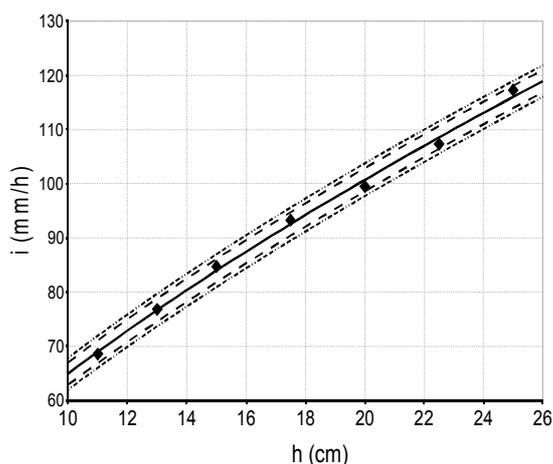


Figura 3. Relación carga – intensidad obtenida.

La ecuación de regresión obtenida, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.997$  fue:

$$i = 15.15h^{0.63} \quad (1)$$

En esta ecuación,  $i$  es la intensidad de lluvia producida (en mm/h) y  $h$  es la carga (en cm) sobre los formadores.

Del análisis estadístico de los datos, se pudo concluir que los valores de intensidad obtenidos a partir de la ecuación (1) tienen una incertidumbre asociada de 3 mm/h, lo cual representa un error de entre el 3 y el 5% de la intensidad producida.

## Trabajos experimentales

Se detallan a continuación las tareas de campaña y de laboratorio llevadas a cabo en el marco de la presente investigación. En primer lugar, se detallarán los criterios de planificación de tareas y selección de sitios de ensayo; posteriormente, se describirán las mediciones hidrológicas efectuadas, para finalmente describir los ensayos de suelos realizados.

## Sitios de ensayo

Al igual que en tareas previas (Weber et al., 2005), para la definición de los sitios de ensayo se consideró que las dos variables a priori más influyentes sobre los resultados a obtener eran el tipo de suelo y el uso del suelo. Con respecto al tipo, más que a una clasificación geotécnica se asumió que una clasificación de características regionales resultaría con mayor representatividad hidrológica. Para ello, se fijó como criterio la clasificación de ambientes geomorfológicos desarrollada por Quintana Salvat y Barbeito (1994). Este trabajo detectó básicamente dos ambientes diferenciados en el ejido de la ciudad de Córdoba: la planicie loessoide (correspondiente a un suelo del tipo limo arenoso, de gran cohesión en condiciones de baja humedad) y la terraza de inundación del antiguo cauce del río Suquía (Primero), la cual fue a su vez clasificada por los autores citados en tres subambientes: terraza baja, media y alta, según su cercanía al actual cauce del río que atraviesa la ciudad.

En cuanto al uso del suelo, se distinguió básicamente en tres tipos fundamentales: los patios y jardines de viviendas residenciales (espacios verdes con bajo tránsito), las plazas, parques y paseos públicos (espacios verdes con medio tránsito), y finalmente las calles no pavimentadas (calles de tierra). El principal criterio de selección se basó en la intensidad del tránsito, tanto peatonal como vehicular, debido a su impacto directo en la capacidad de infiltración del suelo. Además, se agregó como punto de interés especial el lecho de una laguna de detención en la zona norte de la ciudad.

En la Figura 4 se muestra el Plano Geomorfológico de la ciudad de Córdoba, con la indicación de los sitios seleccionados (clasificados según el uso de suelo) y los diversos ambientes geomorfológicos descriptos (Weber et al., 2011a). Puede observarse la amplitud geográfica de la región involucrada. La Tabla 1 muestra los sitios de ensayo seleccionados clasificados según el uso del suelo y el ambiente

geomorfológico. Como puede verse, no fue posible conseguir terreno disponible para realizar el ensayo correspondiente a espacios verdes de bajo tránsito en la terraza media del río Suquía, debido a que este ambiente cubre un área relativamente pequeña y fuertemente urbanizada de la ciudad. En total se ensayaron 12 sitios a lo largo del ejido urbano de la ciudad.

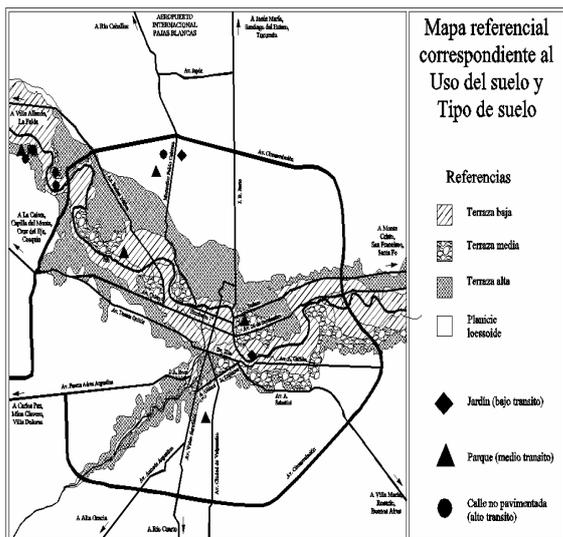


Figura 4. Ubicación de sitios de ensayo.

### Ensayos efectuados

En cada uno de los sitios seleccionados se realizaron tres ensayos con el simulador de lluvia, bajo intensidades relativamente constantes (del orden de los 70 mm/h) con diferentes condiciones iniciales de humedad, las cuales fueron obtenidas o bien por las condiciones climáticas imperantes o bien los terrenos fueron humedecidos (regados) previamente a partir de condiciones secas. Además, en la mayoría de los sitios se realizó simultáneamente el ensayo clásico de infiltración mediante el infiltrómetro de doble anillo, como control y contraste de las mediciones efectuadas. La campaña de medición se extendió durante siete meses e implicó el trabajo de tres personas en forma simultánea, realizando entre dos y tres ensayos por semana (Figura 5).

La duración de los ensayos fue variable, comprendida en general entre 1.5 y 2 h, dependiendo del comportamiento observado in situ del proceso de infiltración, en cuanto a la velocidad con que se alcanzó la condición de régimen.

Tabla 1. Sitios de ensayo.

Tipo de suelo (ambiente geomorfológico)	Uso del suelo		
	Espacios verdes (bajo tránsito)	Espacios verdes (medio tránsito)	Calles no pavimentadas (alto tránsito)
Terraza alta	ITS Villada	ITS Villada	ITS Villada
Terraza media	-----	Parque General Paz	Justo Liebig 5940 – B° Villa Belgrano
Terraza baja	Torres de B° Junior	Parque de las Naciones	Carlos Gauss 4619 – B° Villa Belgrano
Planicie loessóide	L. Suárez de Figueroa – B° M. de Sobremonte	- parque UTN - Laguna de detención	Hugo Miatello 4600 – B° Poeta Lugones



Figura 5. Arreglo típico del ensayo en campaña – medición en Parque de Las Naciones.

### Mediciones en suelos

Antes del inicio de cada ensayo, se extrajeron muestras de suelo para la determinación del contenido de humedad antecedente. El contenido de humedad fue determinado gravimétricamente, a través de la extracción de muestras de suelo a 10 cm de profundidad, secándolas en estufa a 110°C y pesando la muestra seca. La humedad gravimétrica  $\omega$  se determina a través de la expresión (2):

$$\omega = \frac{m_a}{m_s} \quad (2)$$

donde  $m_a$  es la masa de agua en la muestra de suelo, que resulta de la diferencia entre la masa de la muestra húmeda menos la masa de la muestra seca; y  $m_s$  es la masa de la muestra seca. Para relacionar la humedad gravimétrica  $\omega$  (de uso principal en Geotecnia) con la humedad volumétrica  $\theta$  (más frecuentemente usada en Hidrología Subterránea) se utilizó la expresión (3) (Tucci, 1993):

$$\theta = \omega \frac{d_s}{d_a} \quad (3)$$

En esta expresión  $d_a$  es la densidad del agua (asumida 1 g/cm<sup>3</sup>) y  $d_s$  es la densidad (peso unitario aparente) del suelo. Este valor fue estimado a partir de las observaciones in situ realizadas en tareas anteriores en cada uno de los ambientes geomorfológicos descriptos (Weber et al., 2005).

### Procesamiento de la información

Los datos así obtenidos fueron procesados utilizando la planilla de cálculo Microsoft Excel, que permitió no sólo la representación gráfica de la información recopilada, sino también las tareas de ajuste de parámetros que se describirán posteriormente.

En las Figuras 6 y 7 se presentan, a modo de ejemplo, la tasa de escurrimiento superficial y la infiltración acumulada obtenidas para un ensayo en uno de los sitios en particular (L. Suárez de Figueroa – B° M. de Sobremonte) bajo una intensidad de lluvia de 66.6 mm/h.

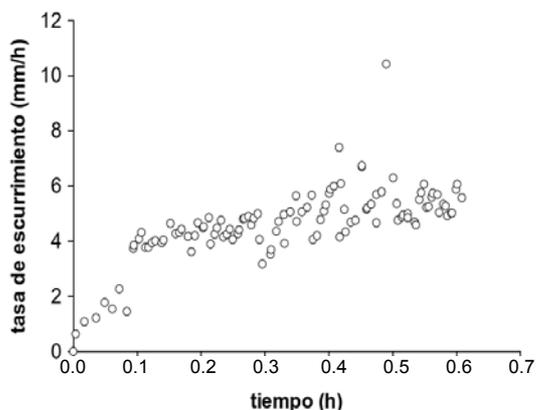


Figura 6. Tasa de escurrimiento superficial – Marqués de Sobremonte.

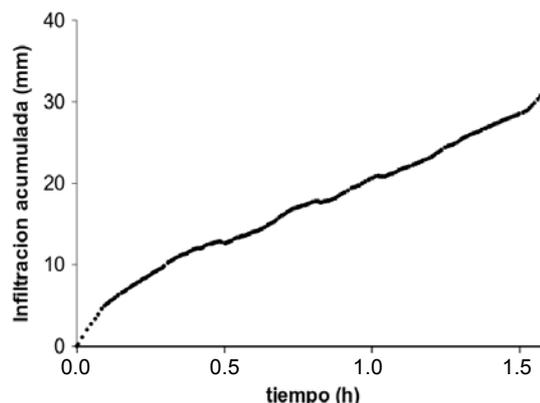


Figura 7. Infiltración acumulada – Marqués de Sobremonte.

En la Figura 8 pueden observarse superpuestas tres curvas de infiltración acumulada  $F(t)$  obtenidas en tres sitios con distintos usos de suelo: una calle de tierra, un espacio verde público y un espacio verde privado (vivienda residencial), observándose una clara diferencia en la respuesta hidrológica.

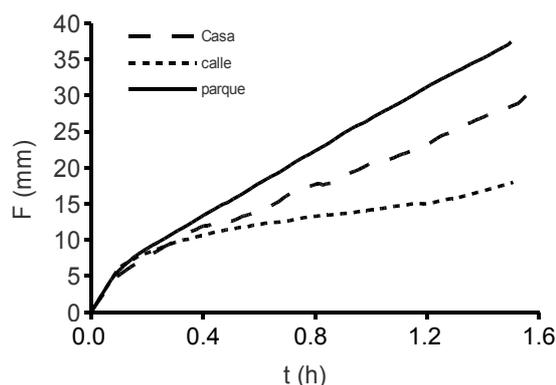


Figura 8. Comparación de la infiltración acumulada en tres usos del suelo.

### El modelo de Green & Ampt

Green y Ampt, en 1911, propusieron un modelo simplificado para explicar la infiltración, factible de presentar una solución analítica, basado en la suposición de la existencia de un frente abrupto (frente húmedo) entre la columna saturada y la no saturada del suelo (Ravi y Williams, 1998). Las hipótesis fundamentales del modelo son las siguientes (Tucci, 1993):

- El suelo está totalmente saturado desde la superficie hasta el frente húmedo; por debajo, el suelo continúa en las condiciones previas a la precipitación. A medida que el frente húmedo

avanza en profundidad, estas condiciones permanecen válidas

- En la superficie del frente húmedo (que separa el suelo saturado del no saturado) la tensión capilar es siempre la misma, independiente de la posición y del tiempo.

Aplicando las leyes de conservación de masa y de cantidad de movimiento, y combinándolas, se llega a la expresión para la infiltración acumulada:

$$F(t) - \psi \Delta \theta \ln \left[ 1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right] = Kt \quad (4)$$

donde  $k$  es la conductividad hidráulica (permeabilidad vertical) del suelo,  $\psi$  es la altura o potencial de succión mátrica o capilar del suelo,  $\Delta \theta$  es la variación máxima en el contenido de humedad del suelo (diferencia entre la porosidad y el contenido de humedad inicial). Por diferenciación, se obtiene la expresión para la tasa de infiltración:

$$f(t) = K \left[ \frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (5)$$

Tanto la expresión (4) como la (5) representan formulaciones implícitas para las incógnitas  $F$  y  $f$ , por lo que deben ser resueltas iterativamente.

El modelo de Green & Ampt ha sido ampliamente implementado en diversos modelos hidrológicos computacionales, tanto agregados -entre ellos HEC-HMS, EPA-SWMM- como distribuidos, entre ellos T-REX (Velleux et al., 2008). Es uno de los pocos modelos de infiltración cuyos parámetros tienen una correspondencia directa con las propiedades físicas del suelo y, en teoría, podrían ser determinados directamente en laboratorio. Sin embargo, es habitual que los parámetros se ajusten también sobre mediciones de campo de infiltración tanto puntuales (como la que se describen en este trabajo) como a nivel de cuenca (obteniéndose en este caso valores medios areales de dichos parámetros).

En la Tabla 2 se presentan valores de referencia de los parámetros del modelo de Green & Ampt (adaptada de Chow et al., 1994) para algunos tipos de suelo, en donde los valores entre paréntesis corresponden al intervalo centrado en la media (valor indicado) y con radio igual a un desvío estándar.

## RESULTADOS

En base a la información recopilada en campaña, se realizó el ajuste de los tres parámetros del modelo de Green & Ampt, buscando la minimización de la función objetivo  $F.O.$  representada por la suma de las desviaciones cuadráticas entre los  $n$  valores de infiltración acumulada observados ( $F_i$ ) y los calculados ( $F_i^c$ ) a partir de la expresión (4), para cada sitio de ensayo y cada condición inicial de humedad (ecuación 6).

$$F.O. = \sum_{i=1}^n (F_i - F_i^c)^2 \quad (6)$$

Tabla 2. Parámetros del modelo de Green & Ampt (adaptada de Chow et al., 1994).

Tipo de suelo	Porosidad $\eta$	Conductividad hidráulica $k$ (cm/h)	Altura de succión capilar $\psi$ (cm)
Arena	0.437 (0.374-0.500)	11.78	4.95 (0.97-25.36)
Marga	0.463 (0.375-0.551)	0.34	8.89 (1.33-59.38)
Arcilla limosa	0.479 (0.425-0.533)	0.05	29.22 (6.13-139.4)
Arcilla	0.475 (0.427-0.523)	0.03	31.63 (6.39-156.5)

Cabe destacar que si bien el modelo de Green y Ampt es de tres parámetros, el ajuste se realizó sobre  $k$  y  $\Psi \Delta \theta$  ya que matemáticamente no es posible discernir, en el ajuste, entre estos dos últimos.

El proceso se automatizó mediante el desarrollo de un código ad-hoc en GNU Octave que emplea el algoritmo de optimización de fuerza bruta con una resolución de 0.01 para cada parámetro. Luego, a partir de la humedad inicial medida al inicio del ensayo, y los valores de porosidad determinados para los suelos en estudio, se determinó el valor de  $\Delta \theta$  y a partir de éste el valor de  $\Psi$ .

De este modo se obtuvieron 34 juegos de parámetros para este modelo, junto con el propio valor de la función objetivo  $F.O.$ , el cual es una medida de la bondad del ajuste realizado.

En la Tabla 3 se presentan los valores medios de los parámetros del modelo de Green & Ampt, según el tipo y el uso del suelo caracterizados de la forma anteriormente indicada.

Además, para el caso de interés particular de la laguna de detención existente en la zona norte de la ciudad, sobre Av. Cardeñosa, se ajustaron los siguientes parámetros medios:  $k = 20.2$  mm/h,  $\psi = 8.04$  mm,  $\Delta\theta = 0.42$ .

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los parámetros obtenidos, como valores medios según el uso del suelo, junto con su rango de variación (entre paréntesis).

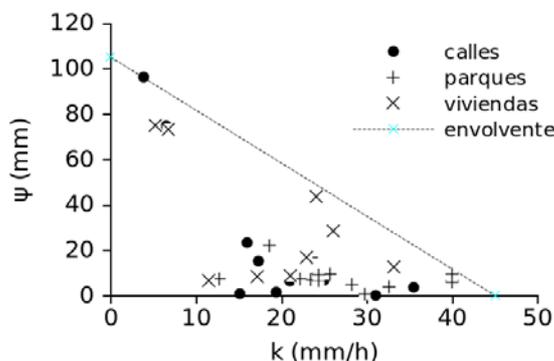
**Tabla 3. Parámetros medios del modelo de Green & Ampt según el uso y tipo de suelo.**

Tipo de suelo (ambiente geomorfológico)	Uso del suelo		
	Espacios verdes (bajo tránsito)	Espacios verdes (medio tránsito)	Calles no pavimentadas (alto tránsito)
Terraza alta	$k = 18.6$ mm/h $\psi = 39.5$ mm $\Delta\theta = 0.39$	$k = 25.9$ mm/h $\psi = 8.0$ mm $\Delta\theta = 0.34$	$k = 13.9$ mm/h $\psi = 52.2$ mm $\Delta\theta = 0.39$
Terraza media	-----	$k = 34.5$ mm/h $\psi = 7.7$ mm $\Delta\theta = 0.35$	$k = 27.9$ mm/h $\psi = 6.2$ mm $\Delta\theta = 0.34$
Terraza baja	$k = 11.3$ mm/h $\psi = 29.9$ mm $\Delta\theta = 0.45$	$k = 34.1$ mm/h $\psi = 5.3$ mm $\Delta\theta = 0.44$	$k = 12.5$ mm/h $\psi = 32.9$ mm $\Delta\theta = 0.33$
Planicie loessoide	$k = 26.1$ mm/h $\psi = 21.7$ mm $\Delta\theta = 0.26$	$k = 22.7$ mm/h $\psi = 9.8$ mm $\Delta\theta = 0.41$	$k = 21.8$ mm/h $\psi = 4.9$ mm $\Delta\theta = 0.36$

**Tabla 4. Parámetros medios del modelo de Green & Ampt según el uso de suelo.**

	Residencias	Parques	Calles
$k$ (mm/h)	18.6 (5.2 - 33.1)	27.5 (12.7 - 40.0)	19.5 (3.8 - 35.5)
$\psi$ (mm)	30.4 (6.6 - 74.9)	8.3 (0.7 - 22.1)	21.5 (0.1 - 96.3)
$\Delta\theta$	0.37 (0.14 - 0.55)	0.39 (0.22 - 0.49)	0.35 (0.29 - 0.42)

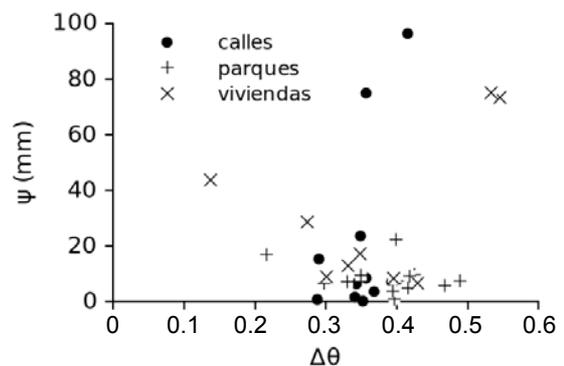
En la Figura 9 se muestra la relación entre los parámetros  $k$  y  $\psi$  del modelo, discriminados según el uso del suelo. Si bien no es posible inferir una relación biunívoca entre estos parámetros, pueden observarse en esta gráfica dos propiedades interesantes:



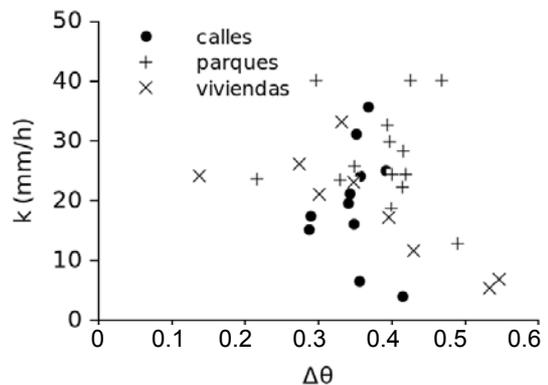
**Figura 9. Relación entre parámetros  $k$  y  $\psi$ .**

- Como es de esperar, se evidencia una relación inversa entre  $k$  y  $\psi$ : a mayor permeabilidad menor succión capilar, y viceversa;
- Puede reconocerse una envolvente superior empírica en, aproximadamente,  $\psi$  (mm) =  $105 - 2.33 k$  (mm/h) lo cual permite una mejor elección de los parámetros ante la ausencia de información experimental en la zona de estudio.

Lamentablemente no fue posible encontrar ninguna relación entre los parámetros  $k$  y  $\psi$  y el déficit de humedad inicial  $\Delta\theta$  del suelo, como se indica en las Figuras 10 y 11. Incluso la clasificación según el uso del suelo tampoco brinda una relación clara entre estos parámetros.



**Figura 10. Relación entre parámetros  $\psi$  y  $\Delta\theta$ .**



**Figura 11. Relación entre parámetros  $k$  y  $\Delta\theta$ .**

Un análisis similar es posible plantear en función del tipo del suelo (caracterizado indirectamente de acuerdo al ambiente geomorfológico) presentado resultados medios de parámetros según lo indicado en la Tabla 5. En este caso se observa un grado de dependencia menor que el observado en función del uso del suelo, por lo que es posible inferir que los parámetros del modelo están más condicionados por ésta variable que por el tipo.

En las Figuras 12 a 17 se representan la tasa de infiltración e infiltración acumulada medidas en conjunto con los valores ajustados por el modelo de Green & Ampt, para tres mediciones en tres sitios que corresponden a distintos usos del suelo: el espacio verde de una vivienda (Marqués de Sobremonte), un espacio verde público (Parque Gral. Paz) y una calle de tierra (calle Justo Liebig). Puede observarse, en general, un buen desempeño del modelo de Green & Ampt.

Tabla 5. Parámetros medios del modelo de Green & Ampt según el tipo de suelo (ambiente geomorfológico).

	Terraza alta	Terraza media	Terraza baja	Planicie loessoide
$k(\text{mm/h})$	20.1 (3.8 - 29.8)	31.2 (17.3 - 40.0)	17.5 (5.2 - 40.0)	23.3 (12.7 - 33.1)
$\psi(\text{mm})$	30.9 (0.7 - 96.3)	6.9 (0.1 - 15.1)	24.9 (0.7 - 74.9)	11.6 (1.6 - 43.5)
$\Delta\theta$	0.37 (0.22 - 0.55)	0.34 (0.29 - 0.43)	0.40 (0.29 - 0.53)	0.36 (0.14 - 0.49)

Finalmente, en la Figura 18 se ejemplifica la relación entre infiltración acumulada medida y ajustada con el modelo de Green y Ampt, como se observa los puntos se acercan adecuadamente a la recta identidad, mostrando un buen ajuste.

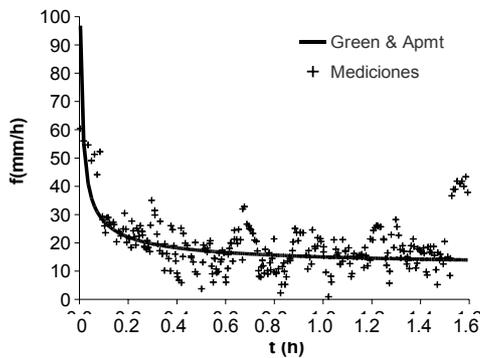


Figura 12. Tasa de infiltración medida y ajustada por Green & Ampt – Marqués de Sobremonte.

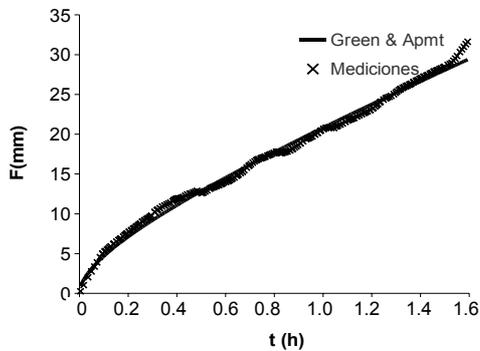


Figura 13. Infiltración acumulada medida y ajustada por Green & Ampt – Marqués de Sobremonte.

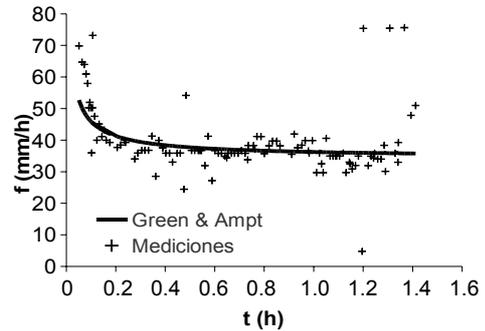


Figura 14. Tasa de infiltración medida y ajustada por Green & Ampt – Parque Gral. Paz.

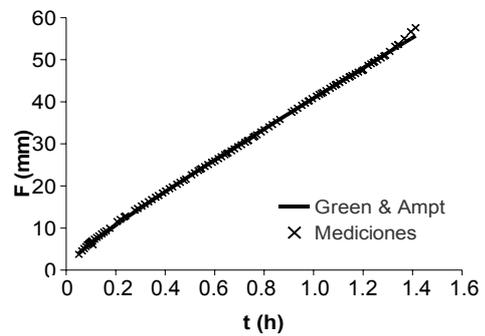


Figura 15. Infiltración acumulada medida y ajustada por Green & Ampt – Parque Gral. Paz.

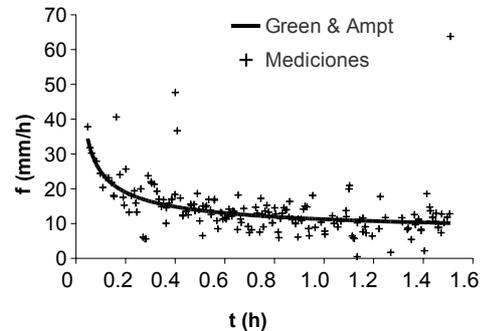


Figura 16. Tasa de infiltración medida y ajustada por Green & Ampt – Calle Justo Liebig.

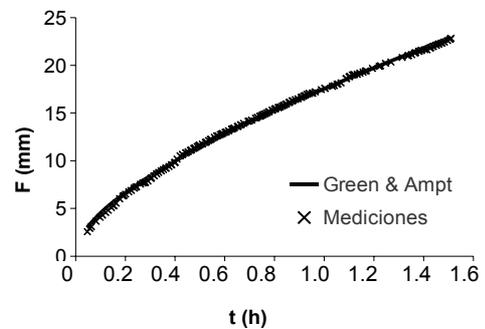


Figura 17. Infiltración acumulada medida y ajustada por Green & Ampt – Calle Justo Liebig.

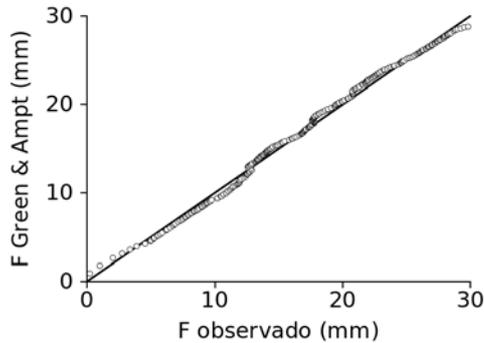


Figura 18. Infiltración acumulada medida versus ajustada por Green & Ampt – Marqués de Sobremonte.

**Calidad del ajuste**

Se realizó un análisis de la calidad del ajuste comparando la infiltración acumulada medida  $F$  y la calculada por el modelo de Green y Ampt  $F^C$ . Para ello se consideraron los 6056 pares ordenados que surgen de cada una de las observaciones realizadas en campaña. En la Figura 19 se muestra la comparación entre valores observados y calculados de  $F$ , equivalente a la Figura 18, pero para las 34 mediciones en los 12 sitios.

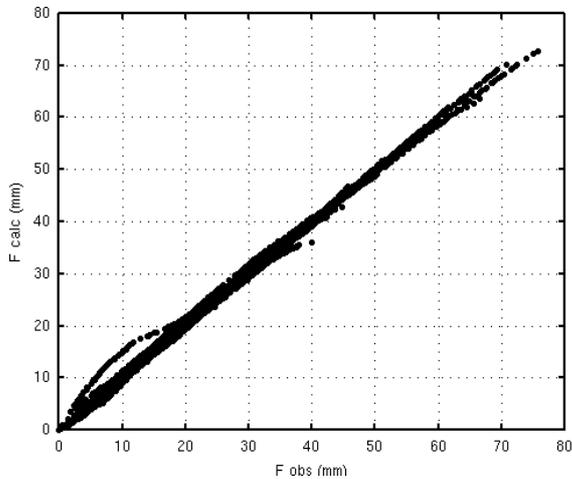


Figura 19. Infiltración acumulada medida versus ajustada por Green & Ampt.

Como puede verse, el ajuste es muy bueno, acercándose la nube de puntos a la recta identidad. El coeficiente de determinación  $R^2$  para este conjunto es de 0.99890, mientras que el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970) alcanzó el valor  $N = 0.99777$ . Los coeficientes  $R^2$  y  $N$  se evalúan respectivamente, como:

$$R^2 = \frac{CoV(F, F^C)}{\sigma(F)\sigma(F^C)} \tag{7}$$

$$N = 1 - \frac{\sum (F_i - F_i^C)^2}{\sum (F_i - \bar{F})^2} \tag{8}$$

donde  $CoV(F, F^C)$  es la covarianza entre las infiltraciones observadas y calculadas por Green y Ampt,  $\sigma$  es el desvío estándar, y  $F$  es la media de las infiltraciones observadas. Valores tan cercanos a 1 de ambos estadísticos muestran la calidad de la representación del proceso por el modelo de Green y Ampt.

En la Tabla 6 se muestran los valores de estos estadísticos clasificados según el uso del suelo. Como puede verse, los valores son altos en todas las categorías, alcanzándose lo mayores en el caso de los calles no pavimentadas y los menores en el caso de los jardines de residencias particulares (tránsito bajo).

Tabla 6. Parámetros medios del modelo de Green & Ampt según el tipo de suelo (ambiente geomorfológico).

	Residencias (jardines)	Parques (públicos)	Calles	Total
$R^2$	0.99779	0.99918	0.99966	0.99890
$N$	0.99542	0.99827	0.99931	0.99777

A partir de los valores de  $F$  y  $F^C$ , se determinó el residuo relativo  $\epsilon$  como:

$$\epsilon = \frac{F - F^C}{F} \tag{9}$$

exceptuando el instante inicial, en el cual  $F = F^C = 0$ . En la Tabla 7 se muestran los estadísticos obtenidos sobre la serie de valores de  $\epsilon$ . Allí puede verse que los errores relativos están comprendidos entre el -125.02% y el +31.16%, con una media del -0.42%. Ahora bien, la media de los residuos tomados en valor absoluto es del 2.76%, lo que mostraría el error promedio en la estimación de la infiltración a partir del modelo de Green y Ampt. Además, se observa un valor importante del coeficiente de asimetría, que corresponde a una asimetría negativa.

Tabla 7. Estadísticos de la serie de residuos  $\epsilon$ .

mínimo	-1.2502
Primer cuartil	$-1.0986 \cdot 10^{-2}$
mediana	$-3.0412 \cdot 10^{-4}$
Tercer cuartil	$9.0729 \cdot 10^{-3}$
máximo	$3.1160 \cdot 10^{-1}$
media	$-4.2245 \cdot 10^{-3}$
Desvío estándar	$7.7595 \cdot 10^{-2}$
asimetría	-6.8655
Curtosis	72.73

A partir de los residuos  $\epsilon$  se define el residuo estandarizado  $z$  como:

$$z = \frac{\epsilon - \bar{\epsilon}}{\sigma(\epsilon)} \quad (10)$$

donde  $\bar{\epsilon}$  es la media de los residuos  $\epsilon$ . En la Figura 20 se representa el histograma de frecuencias relativas de  $z$ .

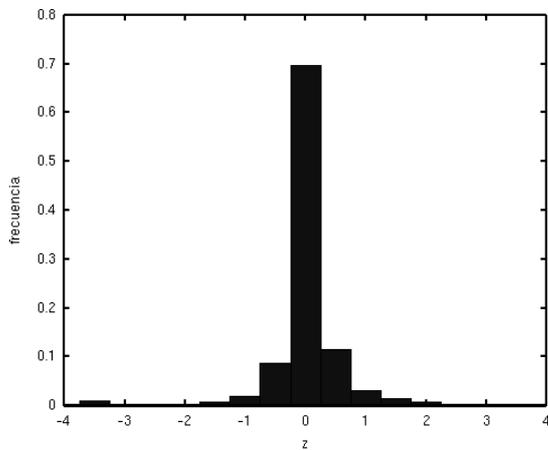


Figura 20. Histograma de frecuencias relativas de  $z$ .

En la Figura 21 se representan las frecuencias relativas acumuladas de  $z$  junto con la función de distribución de la probabilidad normal (0.1).

A pesar de lo que podrían sugerir las Figuras 20 y 21, la aplicación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Canavos, 1988) para verificar la normalidad de la distribución arrojó un p-valor de 0.21762, mucho mayor que el valor de referencia para un nivel de confianza de 0.05 (0.0175), esto debido principalmente al tamaño de la muestra ( $n =$

6056). Por tanto, es posible rechazar la hipótesis de normalidad de los residuos.

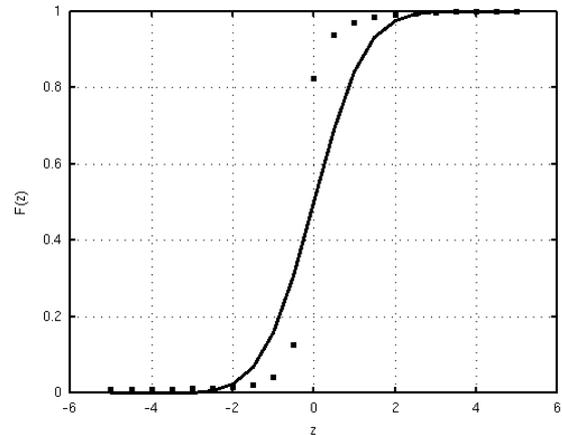


Figura 21. Frecuencias relativas acumuladas de  $z$  (puntos) y función de distribución normal (línea continua).

Por otra parte, en la Figura 22 se presenta el valor absoluto del residuo  $\epsilon$  en función de la infiltración acumulada medida  $F$ . Puede observarse que los mayores errores relativos (incluso del orden del 125%) se producen para valores de infiltración menores, es decir, para instantes iniciales del proceso de medición. Esto puede deberse a dos causas:

- la infiltración acumulada, al comienzo del proceso, responde a una relación fuertemente no lineal, que tiende a linealizarse (y por tanto, a predecirse mejor) a medida que avanza el tiempo.
- El proceso de medición tiene sus mayores errores durante la etapa inicial, debido a que el sistema conformado por la parcela, los canales recolectores, y las medias cañas que conducen el escurrimiento a los vasos totalizadores requiere un cierto tiempo para alcanzar un inevitable almacenamiento inicial para entrar en régimen.

En cualquier caso, resulta imposible discernir con qué ponderación participan cada una de estas causas en la incertidumbre final.

Si se consideran los residuos  $E = F - F^C$  (en lugar de los relativos  $\epsilon$ ), el histograma que se obtiene es el de la Figura 23.

Allí se puede apreciar que más del 95% de esos residuos pertenecen al intervalo (-1.0; 1.0) mm. Esto indica que errores iguales o menores a 1 mm en la estimación de la infiltración acumulada por el modelo de Green Ampt son los que ocurren más frecuentemente.

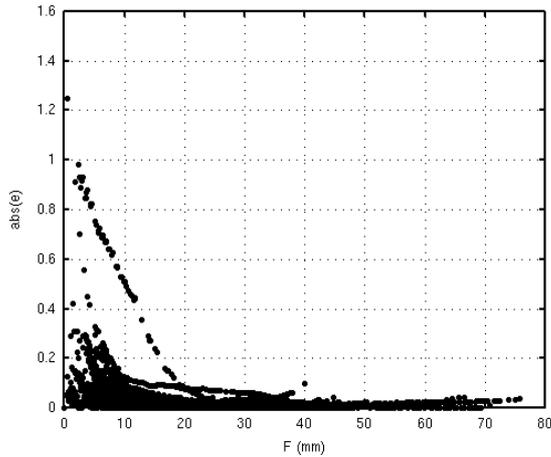


Figura 22. valor absoluto del residuo  $\varepsilon$  en función de la infiltración acumulada medida  $F$ .

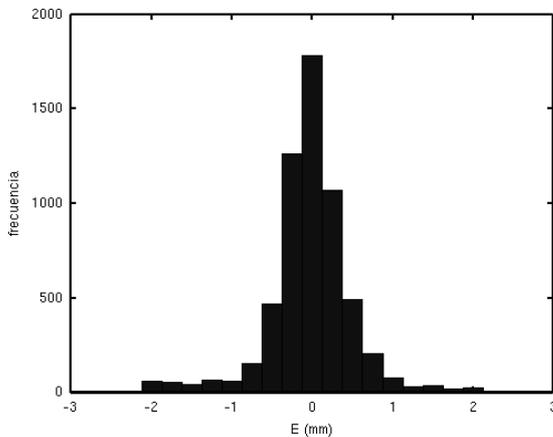


Figura 23. histograma de residuos absolutos  $E$ .

Por otro lado, teniendo presente que la intensidad generada por el simulador de lluvia tiene una incertidumbre de  $\pm 3$  mm/h, y que la duración típica de los ensayos estuvo alrededor de 1.5 h, la lámina total infiltrada al final del ensayo podría tener una incertidumbre adicional debido a esta causa del orden de  $\pm 4.5$  mm, distribuida linealmente a lo largo del ensayo (debido a que la intensidad de lluvia se mantiene constante), con lo que finalmente la predicción del valor de infiltración por Green Ampt podría acumular una incertidumbre total de  $\pm 5.5$  mm, en condiciones extremas. En realidad, ocurre que el máximo error debido a la incertidumbre en la generación de la lluvia no coincide en el tiempo con el máximo error en la predicción: el primero se acumula, y por tanto alcanza su máximo al final del intervalo, mientras que el segundo, como se indicó en la Figura 22, presenta su máximo durante los instantes iniciales (Figura 24).

Esta Figura muestra que es mucho mayor la incertidumbre en la estimación de la capacidad de infiltración originada en el proceso de la simulación de la lluvia que a las incertezas propias de la predicción del modelo de Green y Ampt. La suma de ambas incertezas indicaría una cota superior en la incertidumbre total, con un 95% de probabilidades. Este valor es menor a 5 mm, para la infiltración total.

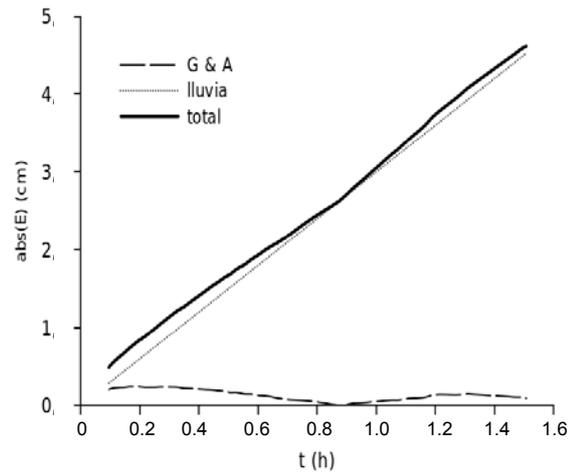


Figura 24. Incertidumbre debida a: la predicción del modelo de Green y Ampt (G & A); la generación de la lluvia (lluvia); suma de ambas (total). Primer ensayo calle Carlos Gauss.

### Propagación inversa de incertidumbres

Resulta de interés determinar qué variación en los parámetros del modelo de Green y Ampt (ecuación (4)) podría generar las incertezas totales descritas en el párrafo anterior. Nótese que el análisis de propagación de incertidumbres responde al problema inverso, esto es, conocidas las incertidumbres en los parámetros, determinar la incertidumbre en la función incógnita ( $F$  en este caso). Sumando a esto el hecho que la relación (4) es no lineal e implícita en  $F$ , este análisis se realizará bajo las siguientes hipótesis:

- se realizará un análisis univariado, esto es, supuestos dos de los parámetros sin error, se averiguará la incerteza asociada al tercero para generar las incertidumbres descritas en el párrafo anterior. Esto supone una cota superior en la incertidumbre del parámetro, por cuanto en la realidad los tres parámetros no están libres de error.
- Se considerará  $t = 1.5$  h, lo que genera la infiltración total medida.

- Los parámetros fijos toman los valores promedio obtenidos para cada parámetro:  $\Delta\theta = 0.37$ ;  $\psi = 18.4$  mm; y  $k = 22.6$  mm/h.

El análisis mostró que la propagación inversa de incertidumbres afecta (relativamente) en mayor medida a los valores de  $\Delta\theta$  y  $\psi$  y en menor medida al valor de  $k$ . Los valores asignados a las variables fijas en el análisis mostraron un impacto de segundo orden en la incertidumbre en el parámetro libre. La Figura 25 muestra este resultado. En esta Figura,  $p_0$  representa el valor de alguno de los parámetros mencionados y  $p/p_0$  la variación relativa máxima que produce una incertidumbre de  $\pm 5$  mm en la infiltración total.

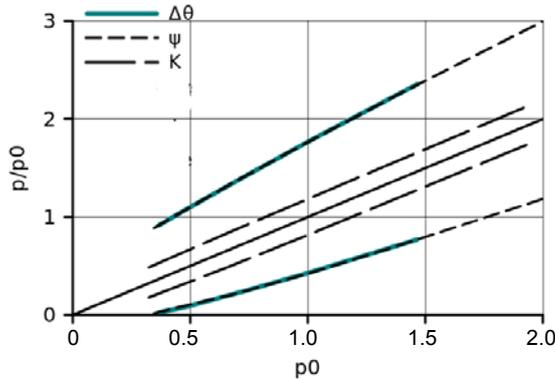


Figura 25. Variación relativa de cada parámetro del modelo de Green y Ampt que produce una incertidumbre de  $\pm 5$  mm en la infiltración acumulada total.

En esta Figura se observa que la relación  $p/p_0$  crítica es la misma para los parámetros  $\Delta\theta$  y  $\psi$ ; esto puede explicarse debido a que estos parámetros ocupan el mismo lugar en la estructura matemática de la expresión (4). Además, se aprecia una franja mucho más reducida para el parámetro  $k$ , lo que indica que la precisión del modelo es mucho más sensible a las incertidumbres en este último parámetro.

Esto se traduce en incertidumbres para los parámetros  $\Delta\theta$  y  $\psi$  variables entre el (-93%; 150%) a (-48%; 61%) para valores de  $\Delta\theta$  y  $\psi$  desde 0.15 y 5 mm a 0.6 y 30 mm respectivamente; e incertidumbres para  $K$  de  $\pm 50\%$  a  $\pm 10\%$  para valores de  $k$  entre 5 y 30 mm/h.

Finalmente, se realizó un análisis bivariado, aprovechando la similitud del comportamiento de los parámetros  $\Delta\theta$  y  $\psi$ ; en la Figura 26 se presenta la diferencia, en valor absoluto, entre la infiltración calculada con un par de valores ( $k$ ;  $\Delta\theta \cdot \psi$ ) y la calculada con los valores de referencia. Se puede

apreciar, como ya se había observado en el análisis univariado, un comportamiento más sensible en la dirección  $k$ . Esto también se comprueba en la Figuras 27 y 28, que representan cortes según las direcciones  $\Delta\theta \cdot \psi$  y  $k$ , respectivamente, a la superficie de la Figura 26. En cualquier caso, las incertidumbres porcentuales resultan similares a las observadas en el análisis univariado. En estas tres Figuras,  $F_0$  representa el valor de infiltración calculado por Green y Ampt con los valores medios de los parámetros.

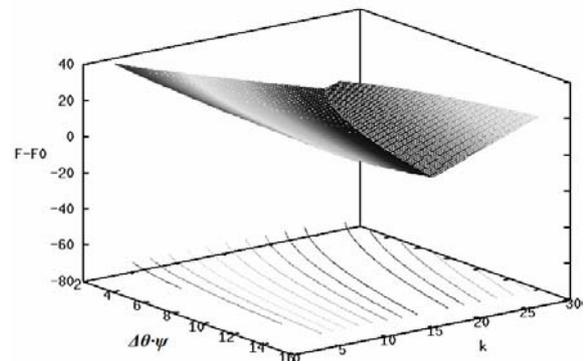


Figura 26. Desvío  $F-F_0$  en función de  $\Delta\theta \cdot \psi$  y  $k$ .

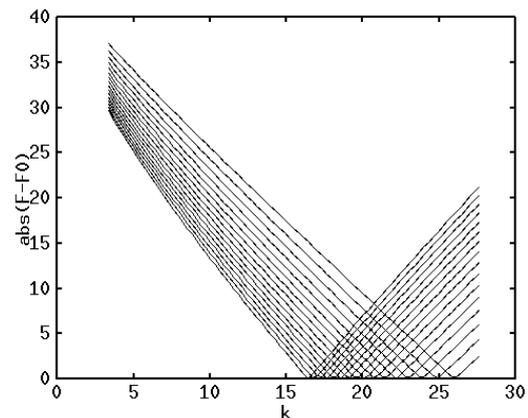


Figura 27. Desvío  $F-F_0$  en función de  $k$ , para valores constantes de  $\Delta\theta \cdot \psi$ .

En el dominio de parámetros de búsqueda de la función  $F-F_0$  (Figura 26) se seleccionaron aquellos pares ( $k$ ;  $\Delta\theta \cdot \psi$ ) que produjeron incertidumbres alrededor de  $\pm 5$  mm, en un entorno de  $\pm 10\%$ , es decir, en el intervalo (4.5 ; 5.5) mm, y se graficó la dependencia de sus desvíos relativos  $\varepsilon(k)$  y  $\varepsilon(\Delta\theta \cdot \psi)$  alrededor de los valores medios  $k_0 = 22.6$  mm/h y  $\Delta\theta \cdot \psi_0 = 7.2$  mm, obteniéndose la Figura 29. Pueden verse dos curvas bien diferenciadas, correspondientes a valores positivos y negativos del error.

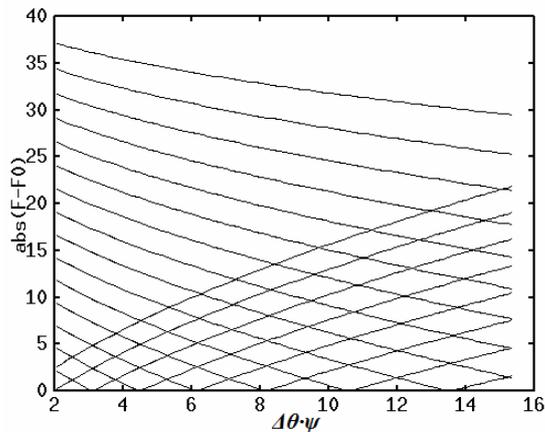


Figura 28. Desvío  $F-F_0$  en función de  $\Delta\theta\cdot\psi$ , para valores constantes de  $k$ .

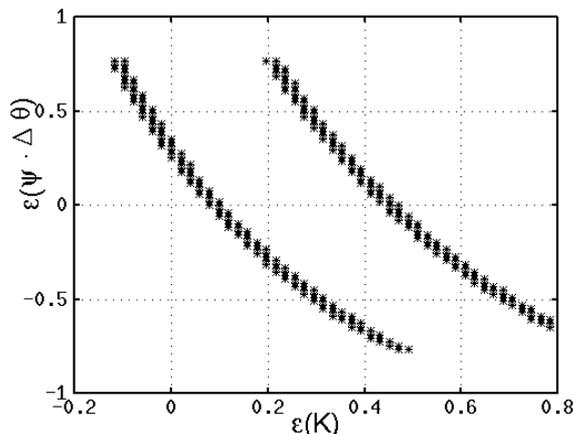


Figura 29. Desvíos relativos  $\varepsilon(\Delta\theta\cdot\psi)$  en función de  $\varepsilon(k)$ , que producen incertidumbres en  $F$  de (4.5 ; 5.5) mm.

## CONCLUSIONES

A partir de la información recopilada in situ durante la campaña realizada en diversos sitios de la ciudad de Córdoba, ha sido posible ajustar los parámetros del modelo de infiltración de Green & Ampt. Sus parámetros resultaron más sensibles al uso del suelo (caracterizado por el nivel de tránsito) que al tipo del suelo (inferido a partir de los distintos ambientes geomorfológicos presentes en el ejido de la ciudad). El ajuste es muy bueno para los datos de infiltración acumulada, con valores de los coeficientes de determinación y de eficiencia elevados, y aceptable para los datos de la tasa de infiltración, esto último debido a la variabilidad temporal que presenta esta variable al ser la derivada de aquélla. Los parámetros así ajustados se corresponden con los hallados en la bibliografía.

No ha sido posible evidenciar (como era de esperar) la dependencia de los parámetros del modelo con el déficit de humedad inicial; sin embargo se infiere una relación entre la conductividad hidráulica  $k$  y la altura de succión capilar  $\psi$ , con una envolvente superior que puede utilizarse como límite en la elección de un juego de parámetros específicos para diseño hidrológico. Los pares ordenados  $k$ - $\psi$  muestran una ligera tendencia al agrupamiento de acuerdo al uso del suelo.

El ajuste de la infiltración acumulada por el modelo de Green y Ampt aumenta en calidad a medida que aumenta el tiempo; por tanto, sus resultados son más confiables en su aplicación a simulaciones de larga duración.

Los parámetros del modelo de Green y Ampt ajustan más del 95% de las observaciones de infiltración con errores menores a  $\pm 1.0$  mm; pero debido a que la propia lluvia generada tiene incertidumbres en su intensidad de  $\pm 3$  mm/h, y con las duraciones típicas de los ensayos realizados, la incertidumbre introducida por la lluvia simulada triplicaría a la del propio modelo de Green Ampt, produciendo errores de  $\pm 5$  mm en la infiltración acumulada.

A partir de una propagación inversa de la incertidumbre en la infiltración acumulada, alrededor de los valores medios de los parámetros, se observa que el modelo de Green y Ampt es mucho más sensible a las incertezas en el valor de  $k$  que a las de  $\Delta\theta$  y  $\psi$ ; teniendo a su vez estos dos últimos un comportamiento similar.

Las incertezas relativas de  $k$  y  $\Delta\theta\cdot\psi$  que provocan incertidumbres de  $\pm 5$  mm en la infiltración acumulada se relacionan a través de dos curvas empíricas dentro del rango  $\pm 78\%$  para  $\Delta\theta$  y  $\psi$  y (-15% ; +80%) para  $k$ , aproximadamente, alrededor de los valores medios de los parámetros ajustados.

Se considera que el conjunto de parámetros así ajustados resultará de interés para los proyectistas vinculados al manejo del escurrimiento pluvial urbano en la ciudad.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología (UTN) por el apoyo recibido a través del subsidio al Proyecto de Investigación consolidado "Caracterización

experimental y modelación numérica de los procesos de infiltración, interceptación vegetal e impacto por incendios en cuencas de Córdoba”, Código 25/E157. Al Laboratorio de Geotecnia – Facultad Regional Córdoba – Universidad Tecnológica Nacional. A la Dirección de Parques y Paseos, Municipalidad de la ciudad de Córdoba. A los becarios y colaboradores Eliana Baldazar, Matías Bupo, Edwin Rondan, Franco Cosiansi, Emiliano Cobelas. Oscar Gribosqui, Ana Maria Guerrero, Diego Apestegui, Jorge Apestegui, Dario Ferrero, Ignacio Paoli, Francisco Obregón, y al Instituto Técnico Salesiano Villada.

## REFERENCIAS

- Achutegui A., Abreu X., Páez M.L. 1996. Diseño y Evaluación de un Simulador de Lluvias Tipo Gote-ro con Efecto Vibratorio. *Venesuelos* 4:24-28 .
- Aoki A.M. y Sereno R. 1999. Modificaciones de un Microsimulador de Lluvia. *Investigación Agrícola*, vol 19 N° 1 y 2, 47-51 .
- Benito, E., de Blas, E., Santiago, J. L. y Varela, M. E. 2001. Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión de suelo. *Cuadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe* n° 26.
- Canavos, G. C. 1988. *Probabilidad y estadística: aplicaciones y métodos*. McGraw-Hill Interamericana, México.
- Chow, V. T.; D. R. Maidment y L. W. Mays 1994. *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Custodio, E. , Llamas, M. R. (Eds.). 1976. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega
- Horton, R. E. 1939. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Washington, p 693-711.
- Irurtia C.B. y Mon R. 1994. Microsimulador de Lluvia para Determinar Infiltración a Campo. Publicación N° 176. Instituto de Suelos, Castelar, Buenos Aires, República Argentina. Pp. 18 .
- Kamphorst, A. 1987. A Small Rainfall Simulator for the Determination of Soil Erodibility. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35, 407 – 415 .
- Marelli H. J. 1989. La Erosión Hídrica. Proyecto: Alternativas Mejoradas Conservacionistas de Producción Agrícola Ganadera en el Sur de Córdoba. Publicación técnica N°1. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Marco Juárez, Córdoba, Argentina .
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 10, p. 282 – 290.
- Paoli, H. I. 2009. Diseño, construcción y puesta a punto de un simulador de lluvia portátil para la determinación in situ de parámetros hidrológicos. Trabajo final de Ingeniería Civil – U.T.N. – F.R.C.
- Paoli, H. I., Rojas, J. A. 2006. Estudio Hidráulico, Teórico y Experimental, sobre Formadores de Gotas. *JEI* 2006.
- Pla Sentis, I. 1981. Simuladores de Lluvia Para el Estudio de Relaciones Suelo Agua Bajo Agricultura de Secano en los Trópicos. Maracay, Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* 12 (1-2): 81-93 .
- Quintana Salvat, F. y Barbeito, O. 1994. Base geológica - geomorfológica para la planificación territorial de la ciudad de Córdoba y su entorno - Ejido Municipal. *Fotointerpretación* N° 1, Vol. II, págs. 209-256. Córdoba, República Argentina.
- Ravi, V. y Williams, J. R. 1998. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models . Volume I. Technical Report No. EPA/600/R-97/128a . United States Environmental Protection Agency , National Risk Management Research Laboratory , Ada, OK 74820
- Rostagno, C.M., Garayzar, D. 1995. Diseño de un Simulador de Lluvia para Estudios de Infiltración y Erosión de Suelos. *Ciencia del Suelo*, 13, 41 – 43 .
- Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology. U.S. Dept. of Agriculture, Washington.
- Tucci, C. E. M. 2001. Urban drainage in humid tropics. Volume I in Maksimovic, C. (2001). *Urban drainage in specific climates*. IHP-V – Technical Documents in Hydrology No. 40, Vol. 1. UNESCO, Paris.
- Tucci, C. E. M. (Ed.). 1993. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre.
- Velleux M., England J., y Julien P. 2008. Trex: Spatially distributed model to assess watershed contaminant transport and fate. *Science of the Total Environment*, 404(1):113–128,
- Weber, J. F., Apestegui, L., Baldazar, E. 2011a. Medición de la capacidad de infiltración in situ de suelos de la ciudad de Córdoba mediante un microsimulador de lluvia portátil. XXIII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2011, Resistencia.
- Weber, J. F., Paoli, H., Apestegui, L. 2009. Diseño, construcción y puesta a punto de un microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. XXII Congreso Nacional del Agua , Trelew.
- Weber, J. F., Paoli, H. I., Apestegui, L. 2010. Microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. *Tecnología y Ciencia*, Año 9, N° 18, pp. 47-53. ISSN 1666-6917. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.

Weber, J. F., Paoli, H. I., Apestegui, L. 2011b. Desempeño de un microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. *Cuadernos del Curiham*, Vol. 16 No. 1, pp. 59-71. UNR Editora, Rosario.

Weber, J. F., Urbano, J. M., Stuyck, E. E., Azelart, D., Martínez, N. B. 2005. Caracterización de los parámetros del modelo de Infiltración de Horton en sue-

los de la ciudad de Córdoba. *Cuadernos del Curiham*. UNR Editora, Rosario. Vol. 11, No. 1, 29-38. .

*Artículo recibido el 09/2013 y aprobado para su publicación el 12/2013*