

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE INFILTRACIÓN DE PHILIP PARA ÁREAS PERMEABLES DEL EJIDO URBANO DE LA CIUDAD DE CÓRDOBA, ARGENTINA

PARAMETER ESTIMATION FOR PHILIP'S INFILTRATION MODEL IN PERVIOUS AREAS OF CORDOBA CITY, ARGENTINA

Weber, Juan Francisco¹

Resumen

Se presentan parámetros para el modelo de infiltración de Philip calibrados a partir de los resultados obtenidos en una campaña de medición in situ en la ciudad de Córdoba (Argentina). Como instrumento se utilizó un microsimulador de lluvia portátil diseñado y construido por este grupo de trabajo. Este equipo, que es completamente desarmable y define una parcela de ensayo de 1 m², permite generar lluvias de intensidades comprendidas entre los 65 y 120 mm/h. La selección de los sitios de ensayo respondió al tipo y el uso del suelo. A su vez, se consideraron distintas condiciones de humedad inicial. La campaña de medición se extendió durante 7 meses, 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 S y K del modelo mencionado, a través de un procedimiento recursivo especialmente desarrollado que resultó altamente eficiente. El grado de ajuste alcanzado fue muy satisfactorio, con valores de R² medios de 0,999. Se considera que estos parámetros representan un aporte original al conocimiento de la hidrología urbana en la ciudad de Córdoba (Argentina).

Palabras clave: Infiltración, simulador de lluvia, modelo de Philip

Abstract

Parameters are presented for Philip's infiltration model, calibrated from the results of a field measurement campaign in the city of Córdoba (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 m², 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 comparison, 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, parameters S and K were adjusted for Philip's model, through a specially developed recursive procedure that was highly efficient. The degree of fit achieved was very satisfactory, with average values of R² near 0.999. These parameters are considered to represent an original contribution to knowledge of urban hydrology in the city of Córdoba (Argentina).

Key words: Infiltration, rainfall simulator, Philip's model

INTRODUCCIÓN

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, es posible utilizar diversas formulaciones a la hora de cuantificar la fracción de la precipitación de escurrimiento directo, y por tanto, la fracción infiltrada, entre ellas 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 (USACE, 1981) y más modernamente HEC-HMS (USACE, 2001), el método de Horton (1939), difundido en el ámbito de la hidrología computacional a través de (entre otros) el conocido modelo SWMM (USEPA, 1977). Estos, como muchos otros modelos conceptuales del proceso de infiltración (Ravi & 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.

¹ Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba, Argentina. jweber@civil.frc.utn.edu.ar

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. Este procedimiento de ensayo, también conocido como método de Müntz (Custodio & Llamas, 1976) permite obtener mediciones directas de infiltración en áreas reducidas (puntuales). 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.

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.

El objetivo del presente trabajo es estimar los parámetros del modelo de infiltración de Philip (un modelo hidrológico de base física) para distintos sitios permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, en base a información experimental recabada in situ mediante el uso de un microsimulador de lluvia portátil, en una campaña de medición diseñada y desarrollada a tal fin. El modelo de infiltración de Philip ha sido seleccionado para este trabajo, teniendo en cuenta que se trata de uno de los pocos modelos de infiltración hidrológicos de base física, y el de menor número de parámetros entre ellos; lo que redundará a favor de su parsimonia.

METODOLOGÍA

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).

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.

El formador de gotas utilizado se compone de una aguja hipodérmica de 2 pulgadas de longitud y 0.8 mm de diámetro interno, introducida en tubo rígido, el cual se obtiene de cortar su propio estuche, al ras de dicha aguja. 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 cm² sobre la base de una batea de 96 cm x 96 cm de lado.

El equipo (Figura 1) 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 está 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 es hincado en el suelo, constituyendo así las paredes límites de la parcela de medición. El peso total del equipo armado es de 110.6 kg; el peso del fluido puede llegar hasta los 100 kg.

Para la calibración se utilizaron cinco probetas graduadas de 1 000 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, 20cm, 22,5cm y 25cm.

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.



Figura 1. Simulador de lluvia en campaña

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 2. En esta figura, las curvas que rodean a la regresión potencial corresponden a bandas de 99% y 90% de certidumbre, respectivamente.

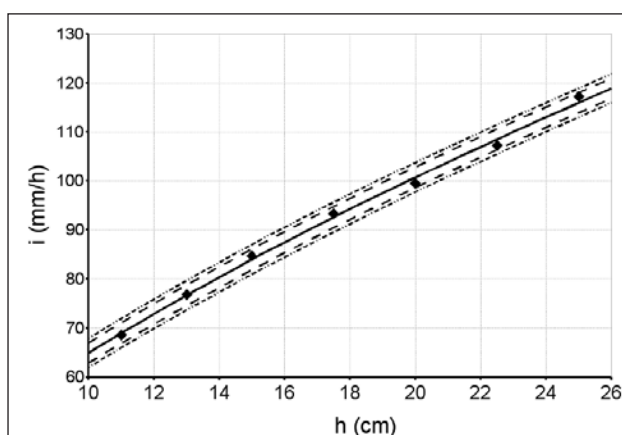


Figura 2. Curva de calibración del simulador de lluvia

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

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 loessóide (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 del 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 3 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., 2011). 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 Suquia, 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.

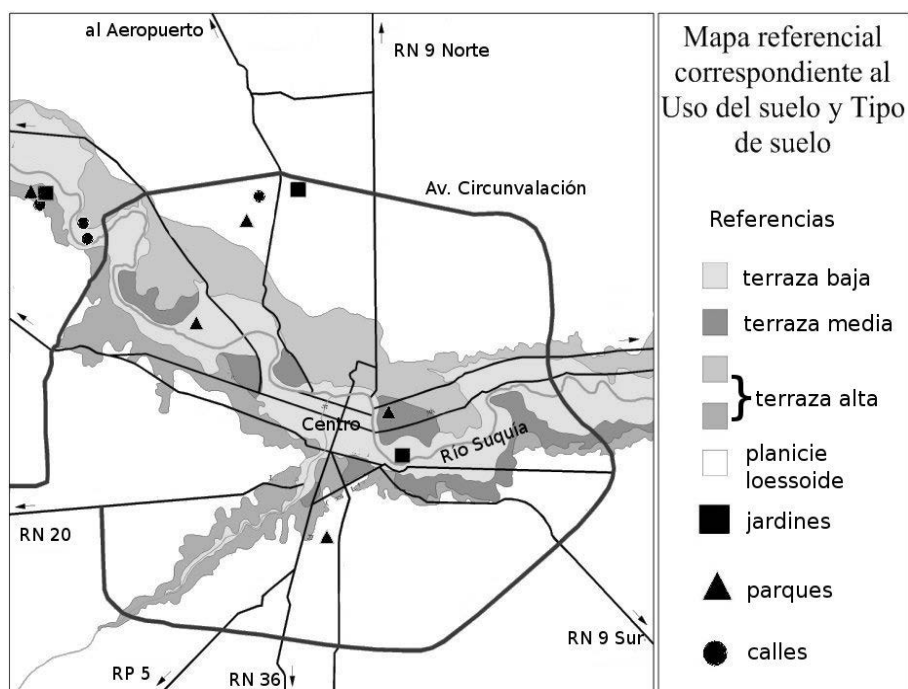


Figura 3. Ubicación de sitios de ensayo

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.

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 loessoide	L. Suárez de Figuroa – B° M. de Sobremonte	- parque UTN - Laguna de detención	Hugo Miatello 4600 – B° Poeta Lugones

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. El número y frecuencia de las observaciones también fue dependiente de la condiciones locales encontradas,

observándose una menor frecuencia de medición en el simulador (y por tanto, una mayor frecuencia en el infiltrómetro) en los suelos de mayor capacidad de infiltración. Para facilitar la tarea de medición, se seleccionó en cada caso el volumen de medición, el cual varió desde 50 hasta 500 cm³.

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 ω 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 ω (de uso principal en Geotecnia) con la humedad volumétrica θ (más frecuentemente usada en Hidrología Subterránea) se utilizó la expresión (3) (Tucci, 1993):

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

En esta expresión d_a es la densidad del agua (asumida 1 g/cm³) y d_s es la densidad (peso unitario) 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).

Los datos así obtenidos fueron digitalizados y procesados. En las figuras 4 y 5 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.

El modelo de Philip

Philip, en 1957 (Chow et al, 1994) partió de la ecuación de flujo en medios porosos no saturados, o ecuación de Richards, para obtener, mediante la transformación de Boltzmann una ecuación diferencial ordinaria, de cuya solución en series conservó los dos primeros términos, obteniendo su ecuación para la infiltración acumulada $F(t)$:

$$F(t) = St^{1/2} + Kt \quad (4)$$

donde K es la conductividad hidráulica y S un parámetro denominado sortividad relacionado con carga de succión capilar o tensión mátrica del suelo. Por diferenciación se obtiene la expresión de la tasa de infiltración:

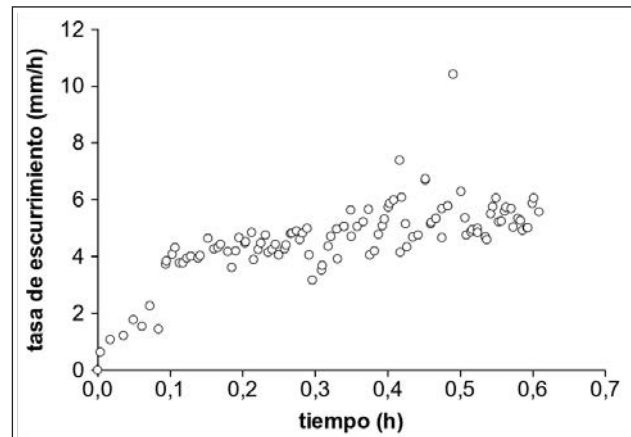


Figura 4. Tasa de escurrimiento superficial – Marqués de Sobremonte

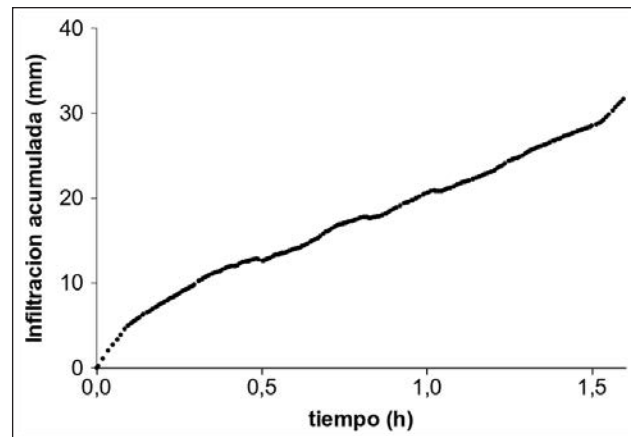


Figura 5. Infiltración acumulada – Marqués de Sobremonte

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K \quad (5)$$

Puede verse entonces que el modelo de Philip es biparamétrico. El parámetro K es el valor de la tasa base de infiltración, ya que si $t \rightarrow \infty$, $f \rightarrow K$, como puede observarse en la Figura 6, donde se representa el valor de $f(t)$ para distintos parámetros del modelo de Philip. Como puede verse, a igualdad de valor de K , para distintos valores de S , el valor al que tiende la tasa de infiltración a medida que aumenta el tiempo es el mismo; además se aprecia la indeterminación asociada al valor $t = 0$, lo que se traduce en la inexistencia de una tasa inicial de infiltración (como en el modelo de Horton, por ejemplo) y presumiblemente una mayor incertidumbre en las estimaciones de la tasa de infiltración en estadios tempranos del proceso. Si bien en teoría K es la conductividad hidráulica del suelo, en la práctica resulta un valor menor, ya que en condiciones habituales es casi imposible el desplazamiento total de la fracción gaseosa en la matriz de suelo y por tanto no se alcanzan los valores máximos correspondientes a la permeabilidad vertical saturada. Otro aspecto a destacar es que a igualdad de valor de K , mayores valores de S dan

lugar a mayores valores de infiltración inicial y un decaimiento más lento de la capacidad de infiltración, como también puede observarse en la Figura 6.

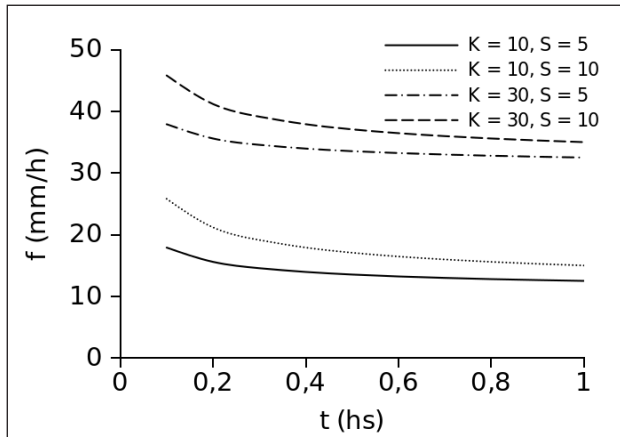


Figura 6. Tasa de infiltración dada por el modelo de Philip para distintos valores de sus parámetros

Ajuste de parámetros

Para el ajuste de los parámetros del modelo de Philip a los datos experimentales recabados, se desarrolló un algoritmo recursivo que permitió realizar en forma eficiente este ajuste. Este ajuste se realizó sobre los datos de infiltración acumulada en lugar de los valores de tasa de infiltración, dado que al ser una variable integral los errores experimentales se reducen y por tanto la incertidumbre asociada a los parámetros estimados. Para ello, se definieron dos variables auxiliares $F^K(t)$ y $F^S(t)$ definidas como:

$$F^K(t) = F(t) - St^{1/2} = Kt \quad (6)$$

$$F^S(t) = F(t) - Kt = St^{1/2} \quad (7)$$

La aplicación del método de mínimos cuadrados permite obtener unas expresiones explícitas para los parámetros S y K:

$$K = \frac{\sum F_i^K t_i}{\sum t_i^2} \quad (8)$$

$$S = \frac{\sum F_i^S t_i^{1/2}}{\sum t_i} \quad (9)$$

De este modo, dándole un valor inicial razonable a uno cualquiera de los parámetros (en este caso, $S = 10 \text{ mm/h}^{0.5}$) se desarrolla el siguiente algoritmo:

1. se calcula el vector F^K a partir de la expresión (6).
2. se calcula un nuevo valor de K a partir de la expresión (8).
3. se calcula el vector F^S a partir de la expresión (7).
4. se calcula un nuevo valor de S a partir de la expresión (9).
5. se evalúan los errores aproximados absolutos en la estimación de K y S, si ambos están por debajo de una tolerancia prefijada (10^{-4}) el proceso finaliza, caso contrario se vuelve al punto 1.

Este procedimiento recursivo, del tipo iteración de punto fijo, permitió hallar los 34 juegos de parámetros S y K para los datos experimentales descriptos, de una forma altamente eficiente, salvando el inconveniente que originalmente surgió al plantear una regresión lineal múltiple sobre los pares (t_i, F_i) lo cual dió lugar en todos los casos a una matriz de coeficientes muy mal acondicionada, con números de condición del orden de 10^{16} .

RESULTADOS

Aplicando el procedimiento indicado anteriormente a la información experimental recabada, se obtuvieron 34 juegos de parámetros para este modelo (ya que hubo dos mediciones que se consideraron no válidas), junto con el propio valor de la función objetivo F.O., el cual es una medida del grado de ajuste alcanzado. En la tabla 2 se presentan los valores ajustados de estos parámetros para cada sitio de ensayo, y para cada medición, para el modelo de Philip. Como puede verse, los valores de R^2 son altos, comprendidos entre 0.9934 y 0.9999, con una media de 0.9986. En la Figura 7 se presentan, a título comparativo, los valores de R^2 obtenidos por el modelo de Philip versus los obtenidos por otros dos modelos biparamétricos de amplio uso en Hidrología, como son el modelo de Kostiakov (Weber y Apestegui, 2014) y el método del CN-SCS (Weber, 2014a). Puede observarse que en la mayoría de los casos, los valores de R^2 de Philip son superiores a los correspondientes de Kostiakov, mientras que en la totalidad de los casos los valores de R^2 de Philip son superiores a los correspondientes del método CN-SCS. Esto muestra que el modelo de Philip resulta ser el que mejor describe el proceso entre los modelos de infiltración usuales de dos parámetros.

En la Figura 8, a título de ejemplo, se presenta la infiltración acumulada resultado de tres mediciones: una en una zona de alto tránsito (primera medición calle Gauss), otra en una de tránsito medio (primera medición parque ITS Villada) y otra en una zona de bajo tránsito (primera medición jardín ITS Villada); junto con el ajuste obtenido por el modelo de Philip;

en los tres casos puede apreciarse un buen ajuste, lo que se manifiesta también en los restantes casos. En la Tabla 3 se presentan los valores medios (junto con su rango de variación) de los parámetros del modelo de Philip en función del uso del suelo.

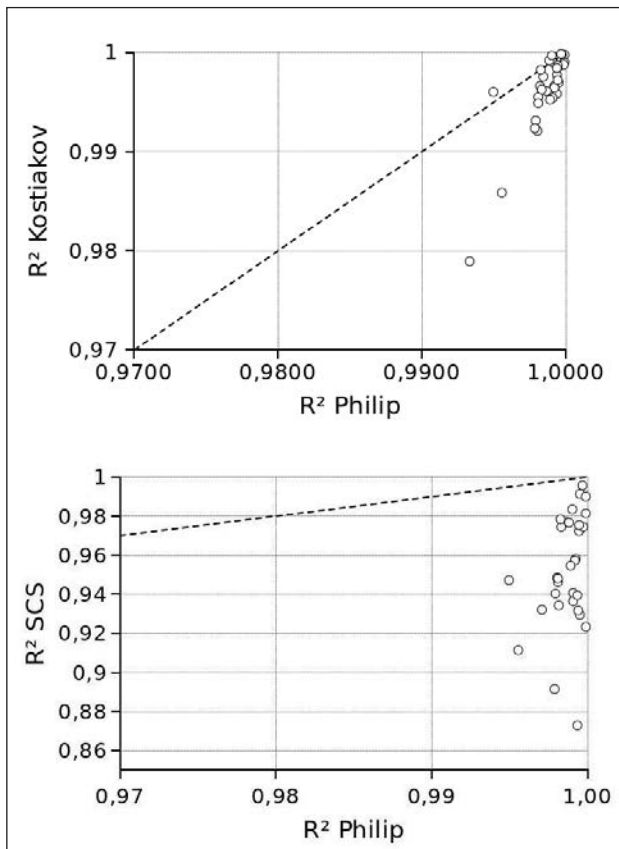


Figura 7. Coeficiente de determinación R^2 obtenido con el ajuste del modelo de Philip versus el R^2 obtenido con el ajuste del modelo de Kostiakov (izquierda) y del método CN-SCS (derecha). La línea de trazos representa la función identidad

Tabla 3. Parámetros medios del modelo de Philip según el uso del suelo.

Entre paréntesis el rango de variación

Uso	K (mm/h)	S (mm/h ^{0.5})
calles	17,42 (2,33-33,02)	9,48 (0,17-18,52)
parques	25,44 (10,73-43,02)	9,40 (2,24-16,11)
viviendas	17,23 (2,86-29,32)	13,15 (7,56-21,31)

En la Figura 9 se representa la relación entre los parámetros S y K del modelo, clasificados según el uso del suelo. A pesar de no existir una correlación entre estos parámetros, puede observarse cierta tendencia al agrupamiento en el plano S-K. Esto se destaca graficando superpuestas, las envolventes convexas de cada uno de los tres conjuntos, como se muestra en esta figura.

Weber (2014b) presentó los parámetros del modelo de infiltración de Horton para este conjunto de datos experimentales. Siendo que el parámetro f_b del modelo de Horton tiene un significado físico cercano al del parámetro K del modelo de Philip, resulta de interés su comparación. En la Figura 10 se presenta la relación entre estos parámetros, en conjunto con la recta de regresión hallada, que corresponde a la ecuación:

$$K = 1,063f_b - 6,983 \quad [mm/h] \quad (10)$$

con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9241. Puede verse que en casi todos los casos los valores de K son inferiores a los correspondientes valores de f_b .

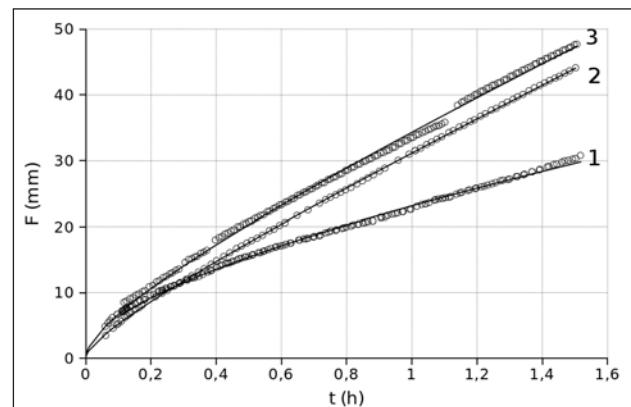


Figura 8. Infiltración acumulada medida (círculos) y obtenida por el modelo de Philip (línea continua) – primera medición calle Gauss (1) ; primera medición parque ITS Villada (2); segunda medición jardín ITS Villada (3)

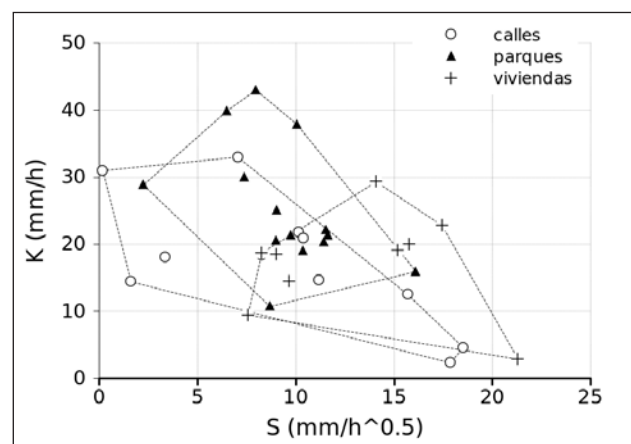


Figura 9. Relación entre los parámetros K y S del modelo de Philip, clasificados según el uso del suelo. Las líneas de trazo representan las envolventes convexas de cada conjunto

Tabla 2. Parámetros del modelo de Philip

Uso	Sitio	1º medición		2º medición		3º medición	
calles de tierra	Gauss 4619	K =	4,594	K =	12,487	K =	14,401
		S =	18,524	S =	15,693	S =	1,610
		R ² =	0,9981	R ² =	0,9979	R ² =	0,9985
	Miatello 4600	K =	21,793	K =	18,377	K =	18,072
		S =	10,135	S =	8,271	S =	3,365
		R ² =	0,9992	R ² =	0,9995	R ² =	0,9994
	Liebig 5940	K =	33,016	K =	30,994	K =	14,627
		S =	7,038	S =	0,173	S =	11,173
		R ² =	0,9997	R ² =	0,9991	R ² =	0,9999
	ITS Villada	K =	2,325	-----		K =	20,878
		S =	17,855			S =	10,399
		R ² =	0,9971			R ² =	0,9992
parques	Parque Gral. Paz	K =	43,024	K =	20,497	K =	39,898
		S =	7,964	S =	8,982	S =	6,489
		R ² =	0,9995	R ² =	0,9956	R ² =	0,9987
	parque ITS Villada	K =	21,390	K =	28,855	K =	20,369
		S =	9,741	S =	2,240	S =	11,424
		R ² =	0,9999	R ² =	0,9994	R ² =	0,9995
	Laguna de retencion	K =	10,725	K =	19,073	K =	22,134
		S =	8,674	S =	10,377	S =	11,515
		R ² =	0,9982	R ² =	0,9991	R ² =	0,9989
	Parque de las Naciones	K =	37,884	-----		K =	25,064
		S =	10,050			S =	9,031
		R ² =	0,9999			R ² =	0,9981
	UTN	K =	21,337	K =	15,926	K =	30,005
		S =	11,649	S =	16,113	S =	7,373
		R ² =	0,9997	R ² =	0,9988	R ² =	0,9983
residencias	casa Marques de Sobremonte	K =	29,319	K =	18,459	K =	19,946
		S =	14,085	S =	9,020	S =	15,779
		R ² =	0,9997	R ² =	0,9994	R ² =	0,9995
	jardín ITS Villada	K =	18,728	K =	19,120	K =	22,787
		S =	8,268	S =	15,174	S =	17,440
		R ² =	0,9950	R ² =	0,9981	R ² =	0,9990
	Torres de Junior	K =	2,857	K =	9,457	K =	14,412
		S =	21,308	S =	7,556	S =	9,675
		R ² =	0,9983	R ² =	0,9934	R ² =	0,9979

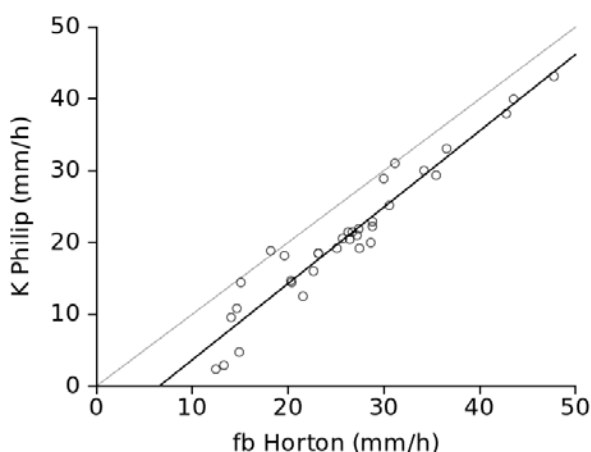


Figura 10. Relación entre los parámetros K del modelo de Philip y f_b del modelo de Horton. La línea de trazos corresponde a la función identidad, mientras que la línea continua corresponde a la regresión lineal

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 Philip en 34 ensayos distribuidos en 12 sitios de la ciudad. El desempeño del modelo ha resultado satisfactorio, con valores de R^2 altos, y superiores incluso a los de otros modelos biparamétricos en la misma área de estudio.

Al analizar la relación entre los parámetros del modelo y el uso del suelo (nivel de tránsito), si bien se presentan en un amplio rango, se observa cierta tendencia de valores de K y S relativamente bajos en las calles de tierra (lo que se traduce en una menor capacidad de infiltración); valores de K relativamente altos y de S relativamente bajos en parques y paseos públicos (lo que se traduce en una capacidad mínima de infiltración relativamente alta); y valores de K relativamente bajos y de S relativamente altos en áreas verdes privadas, lo que se traduce en una decaimiento relativamente rápido de su capacidad de infiltración.

Es de destacar que en el ajuste de estos parámetros influyen tres fuentes principales de error: los errores experimentales debido a la generación de la lluvia simulada, a la medición del proceso de infiltración, y el error asociado a la estructura matemática del modelo, que surge del truncamiento de la solución en series de la ecuación de Richards. En cualquier caso se considera que, atendiendo a los márgenes de error típicos y aceptados en la práctica de la Hidrología Urbana, los parámetros ajustados permiten representar en forma aceptable el proceso de infiltración en el área de estudio.

Al comparar el parámetro K ajustado para el modelo de Philip, con el parámetro f_b ajustado para el modelo

de Horton en trabajos previos, se observa una correlación significativa, si bien en la grna mayoría de los casos se verifica que $K < f_b$.

En cualquier caso, 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., X. Abreu & M. L. Páez. 1996. Diseño y Evaluación de un Simulador de Lluvias Tipo Gotero con Efecto Vibratorio. *Venesuelos* 4: 24-28.
- Chow, V. T., D. R. Maidment & L. W. Mays. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Custodio, E. & M. R. Llamas (Eds.). 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega.
- Horton, R. E. 1939. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions American Geophysical Union*, Washington. 693-711.
- 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.
- Pla Sentis, I. 1981. Simuladores de Lluvia Para el Estudio de Relaciones Suelo Agua Bajo Agricultura de Secano en los Trópicos. *Rev. Fac. Agron.* 12 (1-2): 81-93. Maracay, Venezuela.
- Quintana Salvat, F. & O. Barbeito. 1994. Base geológica - geomorfológica para la planificación territorial de la ciudad de Córdoba y su entorno - Ejido Municipal. *Fotointerpretación* 1(II): 209-256. Córdoba, República Argentina.
- Ravi, V. & J. R. Williams. 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. & D. Garayzar. 1995. Diseño de un Simulador de Lluvia para Estudios de Infiltración y Erosión de Suelos. *Ciencia del Suelo*, 13: 41 – 43 .
- Tucci, C. E. M. 2001. Urban drainage in humid tropics. Volume I *in* Maksimovic, C. 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, Brasil.
- U.S. Army Corps Of Engineers. 1981. HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual. Davis, CA.
- U.S. Army Corps Of Engineers. 2001. HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual. Davis, CA.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1977. SWMM: Stormwater Management Model. Washington, D.C.
- Weber, J. F., L. Apestegui & E. Baldazar. 2011. 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., H. Paoli & L. Apestegui. 2009. Diseño, construcción y puesta a punto de un microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Argentina.
- Weber, J. F., H. I. Paoli & L. Apestegui. 2010. Microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. *Tecnología y Ciencia*, 9(18): 47-53. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina. ISSN 1666-6917.
- Weber, J. F., J. M. Urbano, E. E. Stuyck, D. Azelart & N. B. Martínez. 2005. Caracterización de los parámetros del modelo de Infiltración de Horton en suelos de la ciudad de Córdoba. Cuadernos del Curiham. 11(1): 29-38. UNR Editora, Rosario. ISSN 1514-2906.
- Weber, J. F. 2014a. Parámetros del modelo de pérdidas CN-SCS para áreas permeables de la ciudad de Córdoba, Argentina. V Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua - 12 al 14 de noviembre de 2014 – Córdoba, Argentina.
- Weber, J. F. 2014b. Parámetros del modelo de infiltración de Horton obtenidos mediante el uso de un simulador de lluvia – Córdoba, Argentina. *Revista Ambiente & Água*, 9(1): 161-172. DOI: 10.4136/1980-993X, ISSN: 1980-993X. Brasil.
- Weber, J. F., Apestegui, L. 2014. Parámetros de los modelos de Kostikov y Lewis-Kostikov para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba . 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina, del 23 al 26 de setiembre de 2014 .