

UNA COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DEL DOBLE ANILLO Y DEL SIMULADOR DE LLUVIA EN LA MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN

Juan Francisco Weber

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.
jweber@civil.frc.utn.edu.ar

Resumen

Se presenta una comparación entre las mediciones de la capacidad de infiltración en suelos de la ciudad de Córdoba, realizadas con un simulador de lluvia y un infiltrómetro de doble anillo. El primer equipo, diseñado y construido en el Laboratorio de Hidráulica, UTN-Facultad Córdoba, 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; el exceso de precipitación se mide a través de dos vasos totalizadores graduados, en forma manual. El segundo, consta de dos anillos metálicos de diámetros 20 y 40 cm, que se hincan concéntricamente en el suelo bajo ensayo. 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. 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. En 23 de estos ensayos fue posible medir simultáneamente la capacidad de infiltración con ambos instrumentos. Se presentan relaciones entre las infiltraciones registradas por ambos equipos, y su dispersión. Se observó que en la mayoría de los casos, la capacidad de infiltración registrada por el infiltrómetro superó a la observada con el simulador de lluvia, con excepción de los sitios de alta compactación superficial (calles de tierra y fondo de laguna de detención) donde el registro con el simulador superó al del infiltrómetro. Se compararon los residuos relativos al ajuste del modelo de Horton para ambos juegos de datos, debido a que (según estudios previos) este modelo es el de mejor desempeño en la zona. De esta comparación resultó una mayor dispersión de las observaciones para el simulador de lluvia; sin embargo, el coeficiente de determinación del ajuste de este modelo resultó mayor para los datos obtenidos con este último equipo, particularmente para los datos obtenidos en zonas de alta compactación superficial; se considera que esto es debido a una mejor representación del proceso físico en análisis, por parte del simulador.

Palabras Clave. infiltración, simulador de lluvia, doble anillo

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. En cuanto a las segundas, se han impuesto en la práctica un conjunto de modelos de uso generalizado a la hora de cuantificar la fracción de la precipitación de escurrimiento directo, y por tanto, la fracción infiltrada; estos modelos, de carácter conceptual (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.

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 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. Sin embargo, durante los ensayos realizados se implementaron ambos métodos simultáneamente en puntos del terreno lo suficientemente cercanos como para poder llevar a cabo las comparaciones que se describen en este trabajo. Si bien existen comparaciones de este tipo en la literatura (e.g., Julander y Jackson, 1983; Touma y Albergel, 1992; Liu et al, 2011) resulta de interés realizar este análisis para los suelos locales.

EL INFILTRÓMETRO DE DOBLE ANILLO

Uno de los equipos experimentales más simples para la medición de la capacidad de infiltración de suelos es el denominado *infiltrómetro de doble anillo*. Este procedimiento de ensayo, también conocido como *método de Müntz* (Custodio y Llamas, 1976) permite obtener mediciones directas de infiltración en áreas reducidas (puntuales). El equipo consiste en dos anillos concéntricos de chapa, de diámetros en relación de 2 (por ej. 50 cm y 25 cm, ó 40 cm y 20 cm) cuya altura ronda entre 40 y 50 cm, y que en su parte inferior se hallan biselados para permitir su hincado en el suelo (Figura 1). Este hincado debe estar comprendido entre los 10 y 15 cm aproximadamente.

El agua se agrega en ambos anillos (interior y exterior) y las mediciones se efectúan en este último. De todos modos se mantiene el nivel del líquido exterior con el fin de preservar la verticalidad de las líneas de corriente provenientes de la infiltración del líquido del anillo menor.



Figura 1. Infiltrómetro de doble anillo.

La medición del volumen de agua incorporada se realiza a través de probetas graduadas (de 100 y 1000 ml) y el nivel constante se controla por medio de un clavo testigo. Cabe destacar que la norma ASTM –D3385 establece los lineamientos para el desarrollo de este ensayo, que fueron respetados en las tareas de campaña desarrolladas. El equipamiento se completa con maza para la hinca, perfil metálico para la distribución de los golpes de hinca, cronómetro, planilla para recolección de datos, depósito de agua., etc.

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, 2010).

Introducción

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).

Antecedentes

Uno de los antecedentes de mayor peso en el diseño del simulador de lluvia fue el precedente local de un instrumento diseñado por Iurtia 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.

Formadores de gotas

El formador utilizado se compone de una aguja hipodérmica introducida en 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. 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 cm² 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.

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.



Figura 2. Simulador de lluvia en campaña

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 esta 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.

Tareas de calibración

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, 20cm, 22,5cm y 25cm.

Se verificó la normalidad de la distribución de las observaciones, estandarizando cada serie. Con los valores medios de intensidad obtenidos para cada carga, se ajustó una ecuación de regresión, que con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,997$ fue la (1).

$$i = 15,15h^{0,63} \quad (1)$$

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 (Weber et al, 2011).

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 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 se ve, 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.

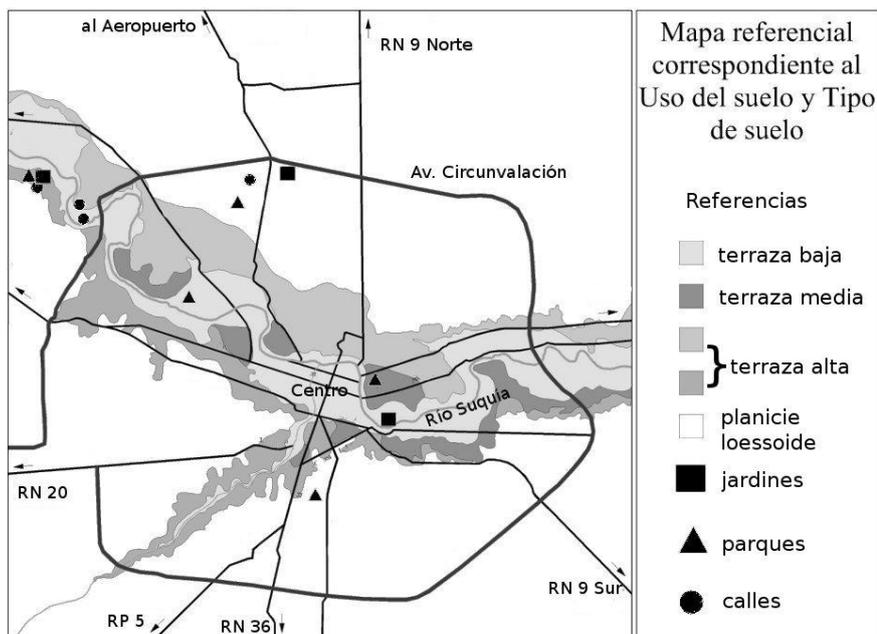


Figura 3. Ubicación de sitios de ensayo

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

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. En la Figura 4 puede verse un ensayo típico donde simultáneamente se ven en operación el infiltrómetro de doble anillo y el simulador de lluvia.

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 las 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 registro, el cual varió desde 50 hasta 500 cm³.



Figura 4. Infiltrómetro y simulador en campaña

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 la figura 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.

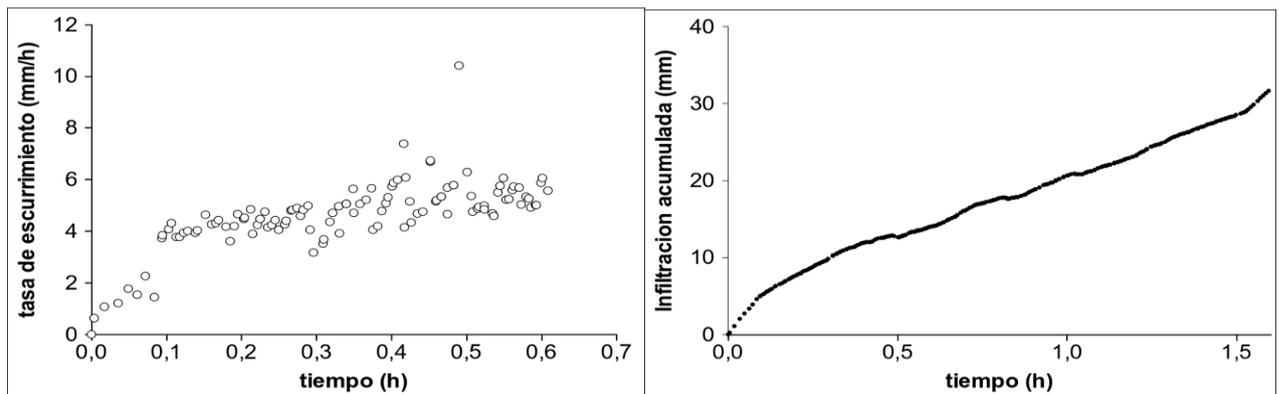


Figura 5. Tasa de escurrimiento superficial (izquierda) e infiltración acumulada (derecha) – 2º medición - Marqués de Sobremonte

METODOLOGÍA

Para realizar la comparación entre los métodos de medición mencionados, se consideraron aquellos ensayos en los que efectivamente fue posible medir simultáneamente con ambos equipos; ya que debido a diversas condiciones locales halladas in situ, no siempre fue posible implementar el método del doble anillo. De los 34 ensayos con resultados válidos realizados con el simulador de

lluvia, 23 fueron simultáneamente medidos con el infiltrómetro, y sobre ellos se realizó la comparación que se describe a continuación. La variable de comparación fue la infiltración acumulada en el tiempo $F(t)$, la cual es una variable de medición directa en el caso del infiltrómetro y de medición indirecta en el caso del simulador de lluvia.

A su vez hay que considerar que por regla general, los ensayos de infiltración realizados con el simulador de lluvia fueron de menor duración (1,5 horas) a los llevados a cabo con el infiltrómetro de doble anillo (2 horas o más). Esto es debido a que, por un lado, dada la menor densidad temporal de registros del infiltrómetro, es necesario prolongar el ensayo si se pretende utilizar esa información para, por ejemplo, el ajuste de parámetros de modelos de infiltración; y por otro lado, el infiltrómetro se hincaba y comenzaba a operar apenas llegaba el equipo de trabajo al sitio de ensayo, mientras se instalaba el simulador de lluvia y se lo ponía en régimen.

Debido a esto, y dado que los registros obtenidos con ambos equipos rara vez coinciden en el tiempo, fue necesario realizar una interpolación de los tiempos de registro de la infiltración acumulada $F(t)$ medida con el infiltrómetro de doble anillo (de menor densidad temporal de registros) sobre la función $F(t)$ registrada con el simulador de lluvia (de mayor densidad temporal de registros) en el periodo temporal de superposición. De este modo se construyeron pares de valores $(F_a ; F_s)$ que corresponden a la infiltración acumulada dada por el infiltrómetro de doble anillo y por el simulador de lluvia, respectivamente, para los mismos tiempos.

Sobre estos pares de valores $(F_a ; F_s)$ se realizó una regresión lineal forzada a pasar por el origen (dado que por definición $F_a = F_s = 0$ para $t = 0$), de modo que el único parámetro libre del ajuste resultó la pendiente de la recta de ajuste a , dada por:

$$a = \frac{\sum F_{a_i} \cdot F_{c_i}}{\sum F_{a_i}^2} \quad (2)$$

Con esta información se confeccionaron 23 gráficos de dispersión (uno por cada ensayo) de F_c en función de F_a , junto con la recta de ajuste forzada a 0 y la recta identidad. En la Figura 6 pueden apreciarse un par de ejemplos para dos ensayos particulares.

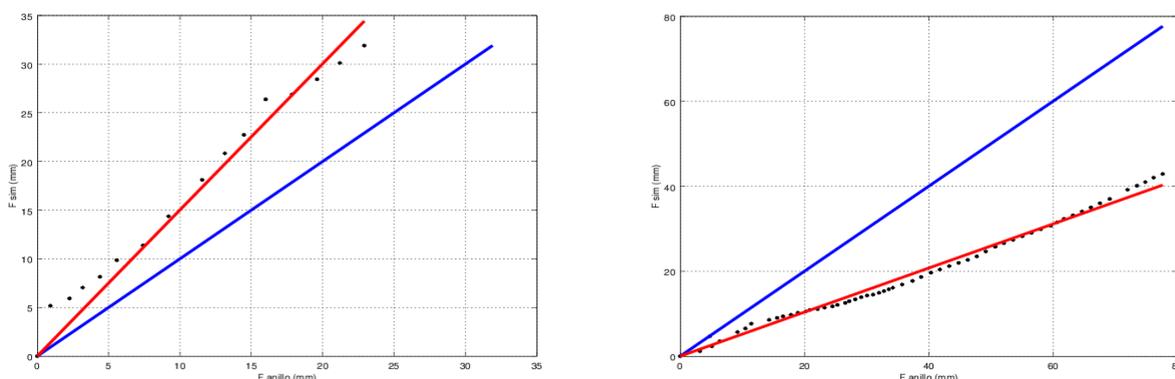


Figura 6. Infiltraciones acumuladas (en mm) medidas con el simulador de lluvia en función de las medidas con el infiltrómetro de doble anillo, para el primer ensayo en el jardín del ITS Villada (izquierda) y en el segundo ensayo en el parque General Paz (derecha) – los puntos corresponden a las mediciones; la línea roja a la regresión lineal forzada a 0; la línea azul a la recta identidad

El parámetro a (ecuación 2) se utilizó como indicador de relación entre las mediciones realizadas por ambos dispositivos. Para ello se asumió que una diferencia menor al 10% en relación

a la pendiente de ajuste perfecto (esto es, un valor de a comprendido entre 0,9 y 1,1) puede indicar que las mediciones de la capacidad de infiltración llevadas a cabo por ambos métodos son equivalentes; mientras que si $a > 1,1$, el infiltrómetro subestima la capacidad de infiltración en relación a la medida con el simulador, y si $a < 0,9$, el infiltrómetro sobrestima la capacidad de infiltración en relación a la medida con el simulador (supuesto éste el instrumento de referencia).

Además se ajustaron a las mediciones por ambos métodos los parámetros del modelo de infiltración de Horton, dado que es el que ha presentado el mejor desempeño en el área de estudio (Weber, 2015). El procedimiento seguido en el ajuste es el mismo que el descrito por Weber (2014).

Horton en 1940 propuso, en base a numerosas observaciones experimentales, las siguientes expresiones para estimar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada:

$$f(t) = f_b + (f_0 - f_b)e^{-kt} \quad (3)$$

$$F(t) = f_b t + \frac{f_0 - f_b}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

que corresponde a un modelo de tres parámetros: f_b , f_0 y k , donde f_b es la tasa base de infiltración (capacidad mínima de infiltración), f_0 es la tasa inicial de infiltración y k un parámetro de forma.

RESULTADOS

La Figura 7 muestra los resultados de la comparación (en forma relativa) entre las capacidades de infiltración medidas por el infiltrómetro y el simulador de lluvia, en términos frecuenciales. En la mayoría de los casos (61 %) los registros del infiltrómetro de doble anillo superan a los obtenidos con el simulador de lluvia; en un 35 % de los casos ocurre la situación inversa; y en sólo un caso (4 %) los registros son equiparables.

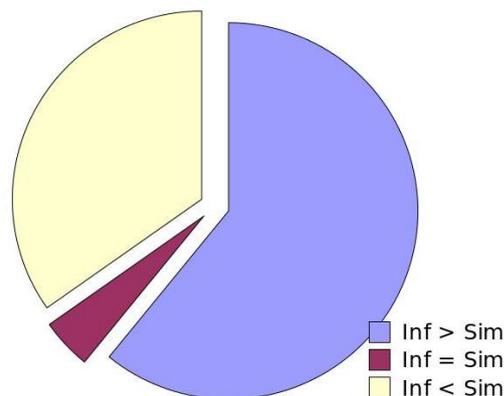


Figura 7. Distribución relativa de ensayos donde el infiltrómetro sobrestimó el registro de infiltración del simulador (Inf > Sim), donde lo subestimó (Inf < Sim) y donde son comparables (Inf = Sim)

Si se analiza esa misma distribución pero de acuerdo al uso del suelo (nivel de intensidad de tránsito) puede verse que para las zonas de mayor compactación superficial del suelo la situación se invierte y en la gran mayoría (83%) de los casos los registros del simulador de lluvia superan a los obtenidos con el infiltrómetro de doble anillo; mientras que para las zonas de baja o moderada

compactación de la capa superior del suelo se mantiene la preponderancia del infiltrómetro (76 %).

En relación al ajuste de los parámetros f_b , f_0 y k del modelo de Horton, tanto para las infiltraciones acumuladas medidas con el simulador de lluvia como con el infiltrómetro de doble anillo, se realizaron comparaciones entre los parámetros ajustados para ambas series, para cada uno de los 23 ensayos. Lamentablemente no fue posible identificar una correlación entre esos ajustes, como puede apreciarse en la Figura 8, donde se muestran a título de ejemplo los valores de f_b y f_0 ajustados para el simulador y para el infiltrómetro, junto con la recta identidad (ajuste perfecto). Puede verse la ausencia de correlación entre parámetros. Esto también se repite para el parámetro k .

Para los ajustes descritos anteriormente, se calculó el coeficiente de determinación R^2 por la expresión:

$$R^2 = \frac{\sigma(F_i, F_i^c)}{\sigma(F_i) \cdot \sigma(F_i^c)} \quad (5)$$

donde F_i representan los valores de infiltración observados (ya sea con el simulador o con el doble anillo) y F_i^c representan los valores calculados de infiltración por el método de Horton con los parámetros ajustados anteriormente; $\sigma(F_i, F_i^c)$ es la covarianza entre las infiltraciones medidas y calculadas, y $\sigma(x)$ es el desvío estándar de la variable x .

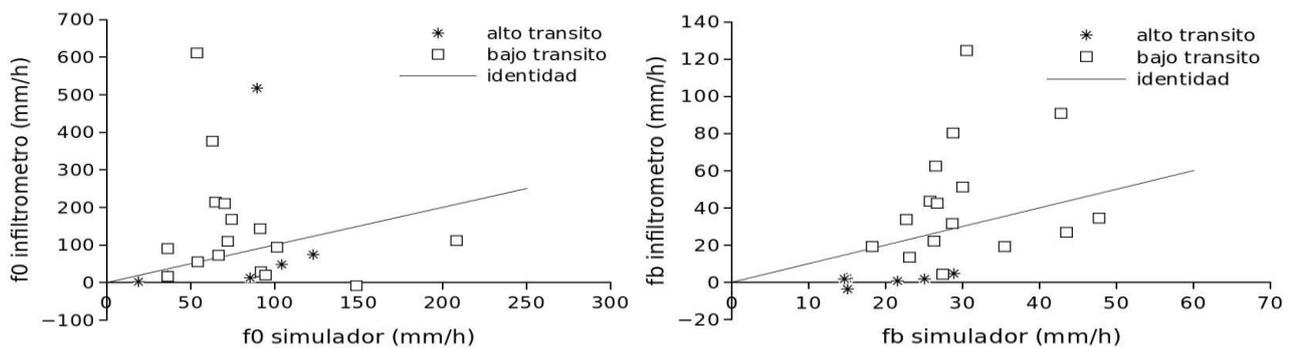


Figura 8. Parámetros f_0 (izquierda) y f_b (derecha) obtenidos de la calibración del modelo de Horton para los datos del infiltrómetro en función de los del simulador. La línea continua representa el ajuste perfecto

En la Figura 9 puede apreciarse un gráfico de dispersión de los valores de R^2 obtenidos a partir del simulador y del infiltrómetro para el ajuste del modelo de Horton. Si bien en general los valores de R^2 son muy buenos, se ve que en la mayoría de los casos el coeficiente de determinación del simulador es superior al del infiltrómetro, siendo particularmente notable en el caso de las superficies de alto tránsito. Sin embargo, si se analiza la distribución de los residuos entre las series medidas y simuladas, se observa una mayor dispersión en los resultados del simulador de lluvia.

En la Figura 10 se presentan las curvas de frecuencia relativa de los residuos definidos como $\varepsilon_i = (F_i - F_i^c)/F_i$ tanto para el ajuste del modelo de Horton sobre los datos del simulador como del infiltrómetro. Puede en efecto observarse una mucha mayor dispersión sobre el eje horizontal en el primer caso.

CONCLUSIONES

A partir de la información recopilada in situ durante la campaña realizada en diversos sitios de la ciudad de Córdoba, ha sido posible realizar una comparación entre las mediciones de la

capacidad de infiltración dadas por el infiltrómetro de doble anillo y un simulador de lluvia. Se observa que en la mayoría de los casos la técnica del infiltrómetro de doble anillo arroja valores mayores de la capacidad de infiltración en relación al simulador de lluvia. Sin embargo, para superficies de alta compactación (alto tránsito) la situación se invierte y en ese caso la técnica del simulador de lluvia arroja capacidades de infiltración superiores a las del infiltrómetro de doble anillo.

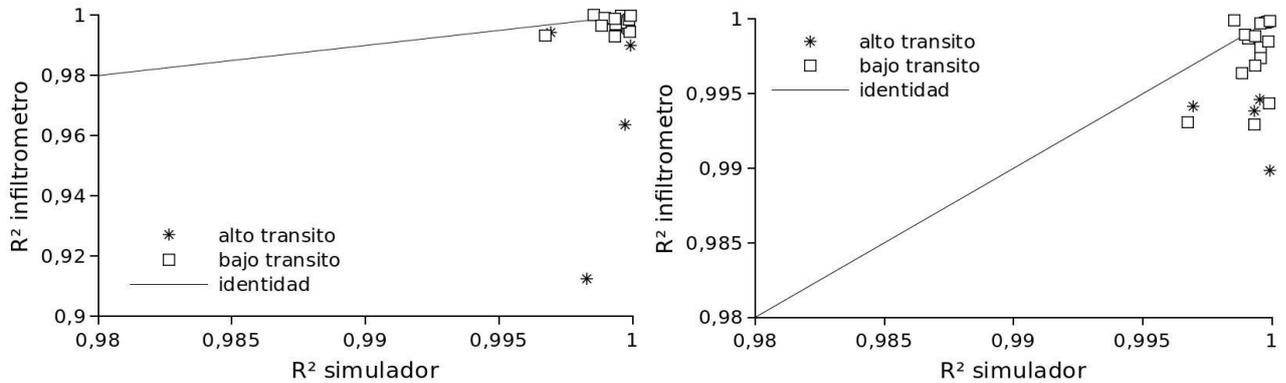


Figura 9. Valores de R^2 obtenidos en el ajuste del modelo de Horton para la infiltración medida con el infiltrómetro en función de los obtenidos para el simulador. A la derecha un detalle. La línea continua es la función identidad

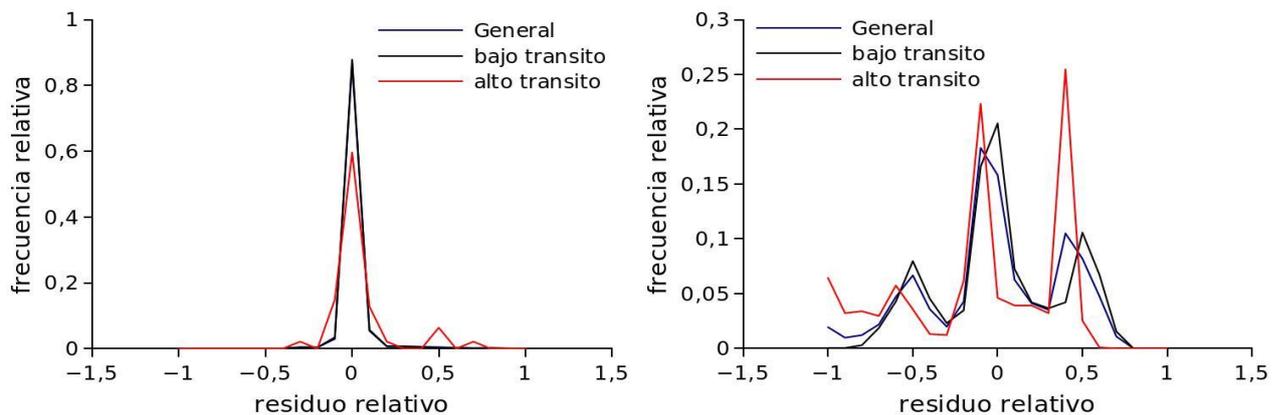


Figura 10. Distribución de frecuencias relativas para los residuos relativos del ajuste del modelo de Horton a las mediciones con el infiltrómetro (izquierda) y el simulador (derecha)

El ajuste del modelo de Horton a los registros, tanto para el simulador como para el infiltrómetro, arrojó resultados adecuados. No fue posible encontrar una correlación entre los correspondientes parámetros del ajuste para los registros de ambas técnicas experimentales. Es posible que esto sea debido a la existencia de múltiples ternas (f_b, f_0, k) que minimizan (al menos localmente) la función objetivo propuesta: es necesario un nivel de análisis mayor para dilucidar este aspecto, que incluya una caracterización de la función objetivo $F.O.(f_b, f_0, k)$.

Los valores del coeficiente de determinación R^2 entre las series observadas y las simuladas por Horton arrojan valores muy satisfactorios, siendo en la mayoría de los casos (87%) superiores los R^2 obtenidos a partir de los datos del simulador de lluvia que los del infiltrómetro. Se considera que esto podría indicar una mejor representación del proceso físico por parte del simulador de lluvia. Sin embargo, al analizar la dispersión de los residuos entre las observaciones y el modelo de Horton, se observa una distribución más amplia en el caso del simulador de lluvia. Esto puede deberse al hecho de que la variable de medición directa en ese instrumento (el escurrimiento superficial) puede presentar irregularidades en su evolución (como por ejemplo obstrucciones

temporarias de las ventanas de descarga en el marco inferior) que impactan directamente en los valores de F medidos.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología (UTN) por el apoyo recibido a través del subsidio al Proyecto de Investigación código 25/E157. Al Laboratorio de Geotecnia – UTN-FRC. A la Dirección de Parques y Paseos, Municipalidad de Córdoba. A los becarios y colaboradores L. Apestegui, E. Baldazar, M. Bupo, E. Rondan, F. Cosiansi, E. Cobelas, O. Gribosqui, A. Guerrero, D. Apestegui, J. Apestegui, D. Ferrero, I. Paoli, F. Obregón, y al Instituto Técnico Salesiano Villada.

BIBLIOGRAFÍA

- Achutegui A., Abreu X., Páez M.L. (1996)** "Diseño y Evaluación de un Simulador de Lluvias Tipo Gotero 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 .
- 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., Mon R. (1994)** "Microsimulador de Lluvia para Determinar Infiltración a Campo". Publicación N° 176. Instituto de Suelos, Castelar, Buenos Aires, República Argentina. Pp. 18 .
- Julander, R.P. and Jackson, W., (1983)** "Drop former and double ring infiltrometers. A comparison". *Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration; ASAE, New York*, pp. 249-253.
- Kamphorst, A. (1987)** "A Small Rainfall Simulator for the Determination of Soil Erodibility". *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35, 407 – 415 .
- Liu, H. , Lei, T.W. , Zhao, J., Yuan, C.P., Fan, Y.T., Qu, L.Q. (2011)** "Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method". *Journal of Hydrology* 396, 24–32.
- 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., 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 .
- Soil Conservation Service (1972)** *National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology*. U.S. Dept. of Agriculture, Washington.
- Touma, J. y Alberge1. J. (1992)** "Determining soil hydrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments: a comparison". *Journal of Hydrology*, 135, 73-86. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Weber, J. F., Apestegui, L., Baldazar, E. (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., 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. (2014)** "Parámetros del modelo de infiltración de Horton obtenidos mediante el uso de un simulador de lluvia – Córdoba, Argentina". *Revista Ambiente & Agua*, V. 9 No. 1, pp. 161-172, enero-marzo de 2014. DOI: 10.4136/1980-993X, ISSN: 1980-993X. Brasil,
- Weber, J. F. (2015)**. "Parámetros de modelos de infiltración en suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina". *II Taller sobre Estudios Hidrológicos en Regiones Áridas y Semiáridas de la República Argentina (EHRAS 2015)*. 9 y 10 de abril de 2015 – Córdoba.