

# Microsimulador de Lluvia Portátil para Estudios Hidrológicos

Juan Francisco Weber, Héctor Ignacio Paoli, 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. Correo electrónico: jweber@civil.frc.utn.edu.ar

**Resumen** - En este trabajo se presenta un microsimulador de lluvia portátil íntegramente diseñado, construido y calibrado en el Laboratorio de Hidráulica (UTN Facultad Regional Córdoba). Este equipo ha sido diseñado especialmente para la adquisición in situ de información experimental que permita la estimación de parámetros hidrológicos tales como: capacidad de infiltración, intercepción vegetal, erosión superficial, etc. La formación de gotas es realizada a través de una batea con 289 formadores que trabajan bajo presiones entre 0,98 y 2,45 kPa, produciendo intensidades comprendidas entre 65 y 120 mm/h. La calibración fue realizada a través de 350 observaciones experimentales, y dieron como resultado una curva potencial de regresión entre la carga y la intensidad de lluvia, con un error estimado de 3 mm/h. Los primeros ensayos de campo realizados muestran resultados satisfactorios, en comparación con la técnica del infiltrómetro de doble anillo utilizada hasta el presente en este Laboratorio.

**Palabras clave:** Hidrología, Infiltración, mediciones hidrológicas, simulador de lluvia

## Portable rainfall micro-simulator for hydrological studies

**Abstract** - This work presents a portable rainfall micro-simulator entirely designed, constructed and calibrated in the Hydraulics Laboratory (UTN Facultad Regional Córdoba). This equipment has been specially designed for the acquisition of in-situ experimental information for the estimation of hydrological parameters, i.e.: infiltration capacity, plant interception, soil erosion, etc. Drop formation is done through a tray with 289 drop formers, which works under pressures between 0,98 and 2,45 kPa, producing rainfall intensities from 65 to 120 mm/h. Calibration was made over 350 experimental observations, and resulted in a head-intensity potential regression curve, with an estimated error of 3 mm/h. First in-situ experimental observations were successful, compared with double-ring infiltrometer technique widely used in this Laboratory.

**Keywords:** Hydrology, Infiltration, hydrological measurements, rainfall simulator

## INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos hidrológicos de importancia en la modelación de eventos es la infiltración. La determinación in situ de los parámetros de un modelo de infiltración, se puede realizar a través de dos tipos de mediciones: las globales, que plantean un balance a nivel de cuenca, lo cual exige disponer de Instrumental espacialmente distribuido en la misma; y los puntuales, en los cuales se estiman parámetros en sitios específicos. Entre estas últimas se cuentan los ensayos del infiltrómetro de doble anillo y los microsimuladores de lluvia.

En el ámbito del Laboratorio de Hidráulica, UTN-FRC, se han llevado a cabo numerosas mediciones a través del dispositivo conocido como infiltrómetro de doble anillo (Weber et al. 2005). Este ensayo tiene la ventaja de ser de fácil implementación, pero presenta tres limitaciones importantes, a saber: 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; el ensayo está limitado a la condición de encharcamiento superficial permanente, lo cual acota la aplicabilidad de los parámetros a calibrar; y 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.

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

Se describen a continuación el proceso seguido en el diseño y construcción del equipo bajo análisis. Para mayor detalle, se puede consultar la referencia (Weber et al, 2009).

### Antecedentes locales

Uno de los antecedentes que más se consideró a la hora de diseñar el simulador de lluvia fue el precedente local de un instrumento diseñado por Iruetia y Mon (1994); a partir de un modelo de Kamphorst (1987). Este microsimitador 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 microsimitador es un prisma cuadrado de 1,5m 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 tubo rígido, el cual se obtiene de cortar su propio estuche, al ras de dicha aguja (Figura 1). 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.

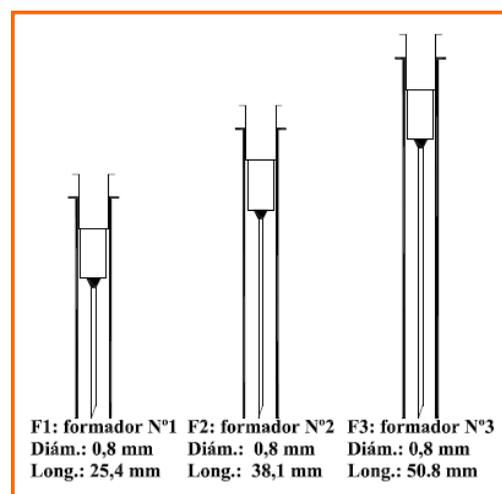


Fig. 1 - Formadores de gotas analizados

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 (figura 2).

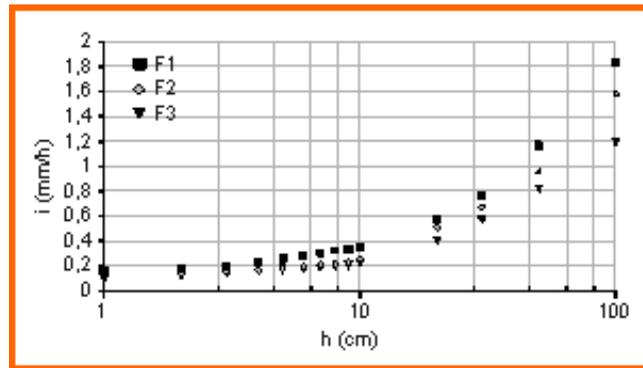


Fig. 2 - Intensidad de lluvia por formador – Resultados experimentales

### El simulador de lluvia

El equipo (figuras 3 y 4) 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 gota, 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 clavado en el suelo, constituyendo así las paredes límites de la parcela de medición (Figura 4). El peso total del equipo armado es de 110,60 kg; el peso del fluido puede llegar hasta los 100 Kg.

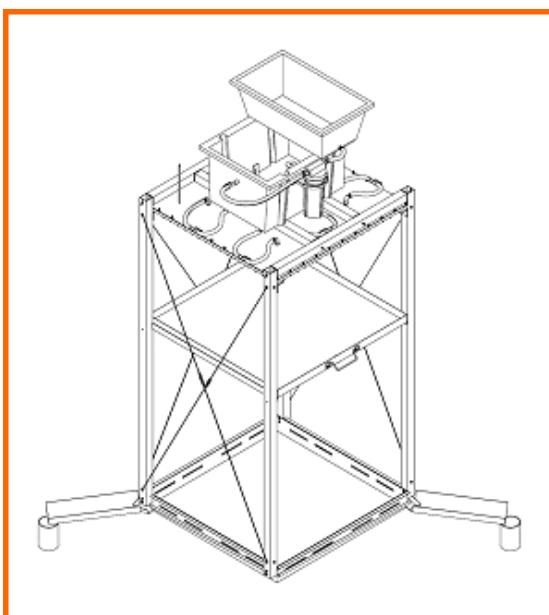


Fig. 3 - Simulador de lluvia – Vista axonométrica

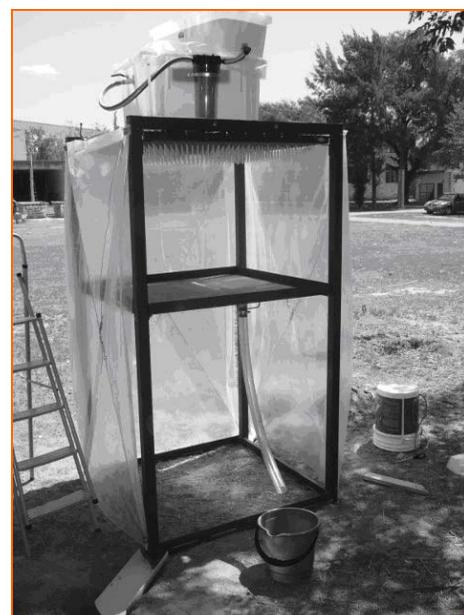


Fig. 4 - Simulador de lluvia en campaña

Las partes componentes del microsimulador 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 (figura 5).
- la Parcela de Medición y Sistema de Recolección del Esguerrimiento Superficial: la parcela de medición queda definida por el marco de hierro hincado (figura 6), que posee salidas laterales por donde fluye el esguerrimiento superficial, que es capturado por canales y conducido finalmente a los vasos de medición.



*Fig. 5 - Puesta en régimen del simulador de lluvia*



*Fig. 6 - Parcela de medición instalada en campaña*

### **Montaje y desmontaje del equipo**

Una vez finalizada la construcción del simulador, se realizó una experiencia de campo (denominada Ensayo 0) con el objeto de poner a punto el armado, operación y desarmado del equipo. En este Ensayo 0 se detectaron algunas deficiencias en el equipo que fueron subsanadas, y además se midieron los tiempos de armado, puesta en régimen y desarmado, como así también el consumo de agua, valores de fundamental importancia para la planificación de futuras mediciones en campaña.

Se indican a continuación en forma sucinta los pasos necesarios para el montaje y desmontaje del simulador de lluvia:

#### **Montaje:**

- Preparación del Terreno
- Instalación de la Parcela de Medición (figura 6).
- Sellado de los Bordes de la Parcela de Medición
- Colocación de Columnas
- Instalación de Batea con Formadores de Gota (figura 7).
- Colocación de Vigas Tipo N°1 y Tipo N°2
- Ajuste de Bulones y Fijación de la Estructura
- Colocación de Angulos Guías y de Bandeja intermedia.
- Instalación de Tanques Alimentadores N°1 y N°2
- Conexión de Mangueras y Accesorios
- Conexión del Filtro de Agua (figura 8).
- Colocación de los Canales de Transporte de Agua
- Colocación de los Puntos de Medición
- Colocación de Mamparas Rompevientos y Tensores (figura 4).



*Fig. 7 - Estructura armada, con batea y bandeja instaladas*



*Fig. 8 - Tanques de alimentación y filtro de agua*

### **Desmontaje:**

- Desconexión de Mangueras y Sacado del Filtro
- Remoción de Tensores, Mamparas Rompevientos, y Angulos Guías
- Desajuste Parcial de los Bulones de la Estructura
- Retiro de Vigas Tipo 1 y Tipo 2
- Retiro de la Batea con Formadores de Gotas
- Retiro de Columnas
- Extracción de la Parcela de Medición

### **Tareas de calibración**

Las tareas de calibración realizadas sobre el simulador de lluvia tuvieron los siguientes objetivos:

- Verificar que la intensidad de lluvia sea homogénea en toda el área precipitada.
- Estudiar el comportamiento general del equipo y el funcionamiento conjunto de los formadores de gota.
- Determinar una relación empírica entre la carga hidráulica sobre los formadores de gotas y la intensidad de lluvia generada.
- Determinar la incertidumbre asociada a la relación anterior.
- Comparar las intensidades de lluvia obtenidas con el simulador de lluvia, con las estimadas a partir de las mediciones de laboratorio (Paoli y Rojas, 2006).

Para la calibración se utilizaron 5 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 (figura 9).

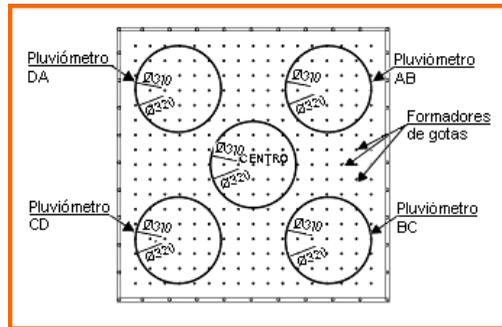


*Fig. 9 - Tareas de calibración*

Los cinco pluviómetros se ubicaron como lo indica la Figura 10, uno en cada esquina y el último en el centro, para lograr cubrir la mayor parte del área precipitada.

Se midió el tiempo que tardó en llenarse un volumen fijo de 850 ml en cada pluviómetro para las diferentes cargas sobre formadores estu-diadas. Estas fueron 11 cm, 13 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20cm, 22,5cm y 25cm.

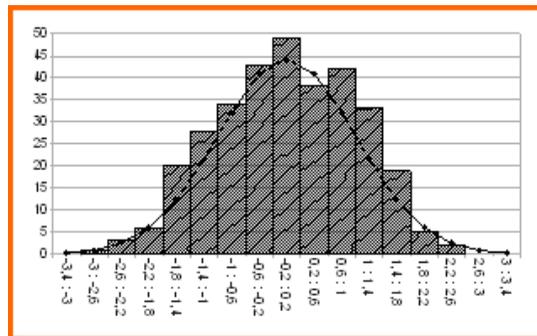
Cada uno de los puntos fue medido simultáneamente durante un funcionamiento continuo del simulador de lluvia de aproximadamente 2 hs por ensayo, obteniéndose de esta manera diez datos por pluviómetro, y una muestra total de cincuenta datos para cada carga analizada. Esto representa un total de 350 datos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



*Fig. 10 - Posicionamiento de pluviómetros*

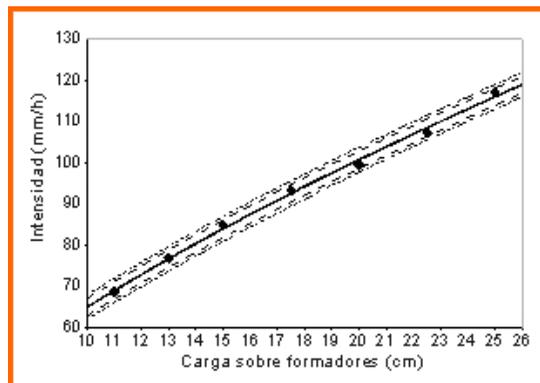
Los resultados de estas mediciones debieron ser corregidos por el error sistemático introducido en el posicionamiento de los pluviómetros, que produjo que el número de formadores capturados variara entre 23 y 25.

Se verificó la normalidad de la distribución de las observaciones, estandarizando cada serie, obteniéndose el histograma de la figura 11.



*Fig. 11 - Histograma de observaciones estandarizadas*

Con los valores medios de intensidad obtenidos para cada carga, se trazó la curva de ajuste indicada en la figura 12. En esta figura, las curvas que rodean a la regresión potencial corresponden a bandas de 99% y 90% de certidumbre, respectivamente.



*Fig. 12 - Curva de calibración del simulador de lluvia*

La ecuación de regresión obtenida, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,997$  es

$$i = 15,15h^{0,63} \tag{1}$$

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.

Además, se determinó una relación experimental entre las intensidades teóricas calculadas a partir del análisis de laboratorio de los formadores (figura 2), y las observadas en las tareas de calibración, resultando la relación  $(i \text{ experimental}) / (i \text{ teórica}) = 0,86$  (figura 13).

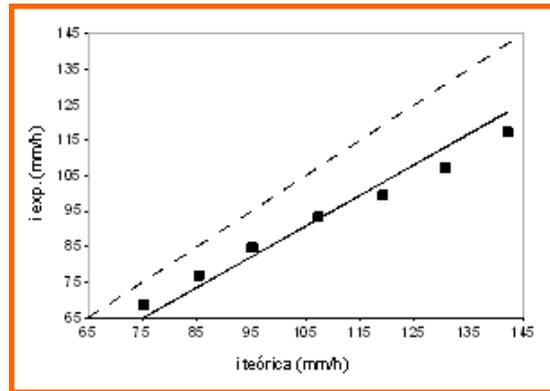


Fig. 13 - Intensidad teórica versus intensidad observada

### MEDICIONES EN CAMPAÑA

El equipo fue utilizado en dos ensayos in situ, de carácter preliminar, realizados en la zona de Ciudad Universitaria, Córdoba. En estos ensayos se fijó como objetivo la medición (indirecta) de la capacidad de infiltración del suelo, a través de la cuantificación del escurrimiento superficial. El registro de los volúmenes erogados fue manual, a través de la cuantificación del escurrimiento superficial. El registro de los volúmenes erogados fue manual, a través de dos operadores.

Los ensayos se realizaron bajo dos intensidades  $i$  extremas: 69 mm/h y 117 mm/h. La curva de escurrimiento superficial se obtuvo por superposición de las obtenidas en cada punto de des-carga. A partir de éstas, y por diferencia con las intensidades generadas, se obtiene la curva de infiltración, y finalmente, por diferenciación de esta última, la tasa de infiltración en función del tiempo. Las curvas obtenidas corresponden a las figuras 14 ( $i = 69$  mm/h) y 15 ( $i = 117$  mm/h).

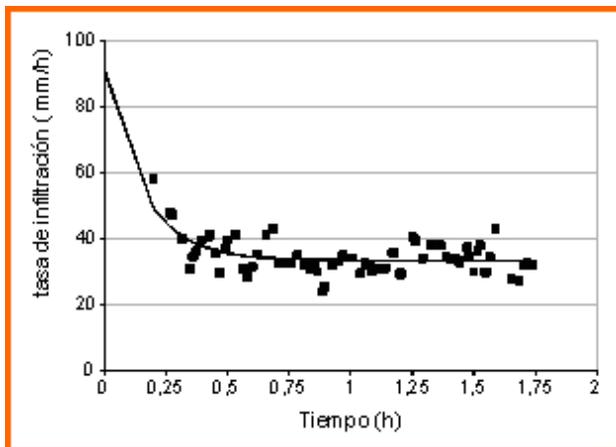


Fig. 14 - Tasa de infiltración – Intensidad 69 mm/h

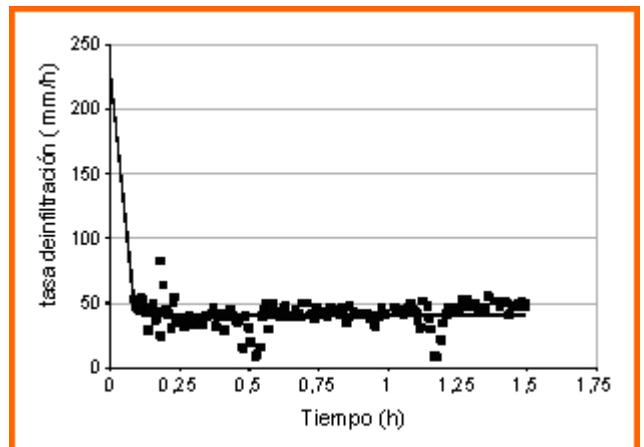


Fig. 15 - Tasa de infiltración – Intensidad 117 mm/h

A partir de esta información, se ajustaron los parámetros del modelo de infiltración de Horton:

$$f(t) = f_b + (f_0 - f_b)e^{-kt} \tag{2}$$

en la cual  $f(t)$  es la tasa de infiltración variable en el tiempo,  $f_b$  es la tasa de infiltración base,  $f_0$  la tasa de infiltración inicial (estas tres medidas en mm/h) y  $k$  es un factor de forma (en  $h^{-1}$ ). En la Tabla 1 se muestran los valores calibrados de los parámetros del modelo de Horton (ecuación 2) ajustados por un procedimiento de optimización no lineal. En las figuras 14 y 15 pueden verse superpuestas a los puntos experimentales las curvas del modelo de Horton (ecuación 2) para los parámetros calibrados de la Tabla 1. Estos valores coinciden, en líneas generales, con los obtenidos previamente en la zona con el infiltrómetro de doble anillo (Weber et al, 2005).

parámetro	i = 69 mm/h	i = 117 mm/h
$f_0$ (mm/h)	90,8	225,5
$f_b$ (mm/h)	33,3	40,1
k (1/h)	6,5	47,3

*Tabla 1 - Parámetros calibrados del modelo de Horton*

### CONCLUSIONES

Se ha podido construir, en el ámbito del Laboratorio de Hidráulica, Facultad Regional Córdoba un microsimulador de lluvia portátil que cubre el rango de lluvias intensas, adecuado para el estudio in situ de procesos hidrológicos de escala puntual.

Se logró desarrollar un aparato totalmente desmontable, con un área de estudio de 1 m<sup>2</sup> y una altura de 2 m, que permite ser trasladado con relativa facilidad y no requiere mayor complejidad para su transporte.

Se trata de un equipo de simple fabricación, lo que permite su futura reproducción dentro del grupo de investigación, pudiendo contar de esa forma con varios equipos similares.

La parcela de medición permite la salida del agua escurrida por sus cuatro bordes lo que posibilita una menor alteración de las características físicas del terreno a estudiar, evitando así realizar una pendiente en el sitio de ensayo, orientada hacia un sólo punto de salida.

El sistema de puesta en régimen, una característica distintiva de este simulador de lluvia, posibilita calibrar la intensidad elegida en los primeros instantes del ensayo, sin alterar las condiciones antecedentes del terreno.

Se determinó una relación potencial entre la carga sobre los formadores y la intensidad real de lluvia simulada, que cuenta además con un intervalo de confianza determinado a partir de consideraciones estadísticas, permitiendo obtener no sólo el valor medio de la intensidad de lluvia generada, sino también su incertidumbre asociada.

Las pruebas preliminares realizadas en campaña han permitido por un lado, ajustar la metodología de montaje y desmontaje del equipo, y por otro, generaron información experimental a la cual fue ajustada el modelo de Horton, obteniéndose valores razonables para sus parámetros.

Futuras mejoras del equipo actualmente en marcha (adquisición electrónica de mediciones, aleatoriedad en la posición de impacto de las gotas) contribuirán a aumentar la calidad de las observaciones a realizar.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo quieren manifestar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional.

### REFERENCIAS

Achutegui A., Abreu X., Páez M.L. "Diseño y Evaluación de un Simulador de Lluvias Tipo Gotero con Efecto Vibratorio". *Venesuelos* 4:24-28 (1996).

Aoki A.M. y Sereno R. "Modificaciones de un Microsimulador de Lluvia". *Investigación Agrícola*, vol 19 N° 1 y 2, 47-51 (1999).

Irurtia C.B., Mon R. "Microsimulador de Lluvia para Determinar Infiltración a Campo". *Publicación N° 176*. Instituto de Suelos, Castelar, Buenos Aires, República Argentina. Pp. 18 (1994).



Kamphorst, A. "A Small Rainfall Simulator for the Determination of Soil Erodibility". *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35, 407 – 415 (1987).

Marelli H. J. "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 (1989).

Paoli, H. I., Rojas, J. A. "Estudio Hidráulico, Teórico y Experimental, sobre Formadores de Gotas". JEI 2006 (2006).

Pla Sentis, I. "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 (1981).

Rostagno, C.M., Garayzar, D. "Diseño de un Simulador de Lluvia para Estudios de Infiltración y Erosión de Suelos". *Ciencia del Suelo*, 13, 41 – 43 (1995).

Weber, J. F., Paoli, H., Apestegui, L. "Diseño, construcción y puesta a punto de un microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos". XXII Congreso Nacional del Agua (2009).

Weber, J. F., Urbano, J. M., Stuyck, E. E., Azelart, D., Martínez, N. B. "Caracterización de los parámetros del modelo de Infiltración de Horton en suelos de la ciudad de Córdoba". *Cuadernos del Curiham*. ISSN 1514-2906. UNR Editora, Rosario. Vol. 11, No. 1, 29-38. (2005).