

# Montaje y calibración de un simulador de lluvia para estudios de drenaje urbano

Naves, J.<sup>a1</sup>, Puertas, J.<sup>a2</sup>, Anta, J.<sup>a3</sup>, Suárez, J.<sup>a4</sup> y Regueiro-Picallo M.<sup>a5</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n. E-mail: <sup>a1</sup>juan.naves@udc.es, <sup>a2</sup>jpuestas@udc.es, <sup>a3</sup>jose.anta@udc.es, <sup>a4</sup>jsuarez@udc.es, <sup>a5</sup>manuel.regueiro1@udc.es.

Línea temática C | Agua y ciudad

---

## RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado y calibrado un simulador de lluvia capaz de generar intensidades de 30, 50 y 80 mm/h. El simulador consiste en dos cuadrículas de goteros bajo las que se sitúa una malla con el objetivo de romper y distribuir las gotas generadas y conseguir una distribución de tamaños de gotas y una uniformidad adecuadas. Mediante un disdrómetro láser *Parsivel 2* y pluviómetros se analizan respectivamente los diámetros y velocidades de gota y la uniformidad de lluvia para diferentes tipologías y luces de malla. Tomando como criterio mediciones de lluvia real, se selecciona una malla con una luz de 3 mm situada 0.60 m bajo los goteros con la que se consiguen Coeficientes de Uniformidad por encima del 90%, un tamaño medio de gotas de 0.95 mm y una velocidad de impacto superior al 80% de la velocidad terminal para el diámetro medio de gotas.

**Palabras clave** | simulador de lluvia; distribución de tamaños de gota; drenaje urbano;

---

## INTRODUCCIÓN

Los simuladores de lluvia son una herramienta ampliamente utilizada para estudios de drenaje urbano y erosión de suelos en laboratorio y en campo. Su uso permite incrementar el control sobre las variables que caracterizan una precipitación, haciendo posible simular y replicar lluvias de diferentes intensidades y características. A pesar de estas ventajas, la dificultad para replicar de manera precisa las características de la lluvia real, hace que se hayan desarrollado numerosos diseños (Kathiravelu *et al.*, 2014) sin que ninguno de ellos se presente como una solución idónea.

Los simuladores de lluvia se pueden separar en dos grandes grupos de acuerdo en cómo se generan las gotas de lluvia: aquellos que utilizan difusores en presión y aquellos que las generan mediante goteros. Los difusores a presión son los más utilizados en la literatura (Grismer, 2011) debido a la sencillez en el montaje y su portabilidad. En cuanto a las características de la lluvia generada, las gotas alcanzan velocidades terminales de caída (correspondientes a la desarrolladas en las lluvias reales) con alturas relativamente pequeñas debido a que las gotas salen del difusor con una velocidad inicial no nula. La principal desventaja de este tipo de simuladores es que se requiere un orificio relativamente grande para obtener un tamaño de gota medio similar a la lluvia real, lo que resulta en intensidades muy altas y no representativas (Isidoro *et al.*, 2012). Algunos autores reducen esta intensidad con válvulas solenoides (Junior y Siqueira, 2011) o con difusores oscilantes de chorro plano (Herngren *et al.*, 2005; Aksoy *et al.*, 2012), pero estos métodos producen una lluvia intermitente que puede no ser representativa y afectar a los resultados (Armstrong y Quinton, 2009). Para superficies de estudio grandes en los que se requiere utilizar varios difusores pueden también presentarse problemas de uniformidad en la intensidad de lluvia.

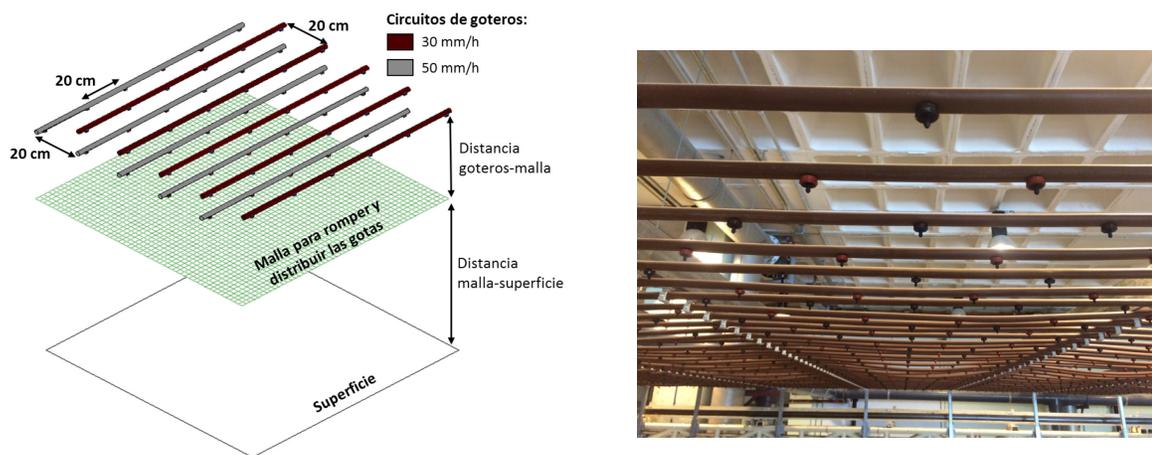
Por otro lado, los simuladores de lluvia mediante goteros tienen un montaje complejo y necesitan disponer de una altura considerable para que las gotas alcancen su velocidad terminal (una gota de 1.5 mm de diámetro necesita alrededor de 4 m para alcanzar completamente su velocidad terminal). Sin embargo, estos simuladores permiten un gran control sobre la uniformidad, la intensidad de lluvia y la distribución de tamaños y velocidades de gotas. El presente simulador se pretende utilizar para

analizar el lavado y transporte de sedimento en un modelo físico de una cuenca urbana en donde, como se ha visto en trabajos anteriores (Naves et al., 2016), la uniformidad y las características de la lluvia juegan un papel fundamental. Por este motivo la última tipología mostrada se posiciona como la más adecuada, presentándose en este trabajo el desarrollo de un nuevo simulador de lluvia basado en goteros, en el que se han calibrado la uniformidad de la intensidad de lluvia y la distribución de tamaños y velocidades de las gotas con el objetivo de simular una lluvia lo más real posible.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El simulador de lluvia que se presenta en esta comunicación ha sido instalado en el laboratorio de hidráulica del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) y está formado por dos circuitos de tuberías situados 2.6 m por encima de la superficie de un modelo físico de una cuenca urbana de 36 m<sup>2</sup>. En estos circuitos se insertan goteros PCJ-CNL Netafim® de 1.2 y 2 L/h respectivamente, separados entre sí 20 cm tanto longitudinal como verticalmente. Con esta separación se cuenta con una densidad de 25 goteros por m<sup>2</sup> para cada circuito, lo que resulta en unas intensidades de lluvia de 30, 50 y, en el caso de utilizar los dos circuitos al mismo tiempo, 80 mm/h. Los goteros se han elegido autocompensantes y antidrenantes para que el caudal se mantenga constante en el caso de alguna pequeña variación de la presión y se cierren cuando la presión descienda por debajo de un determinado valor.

En la Figura 1 se incluye un esquema del simulador y una imagen de los goteros insertados en los circuitos de tuberías. Las gotas generadas por estos goteros caen siempre en el mismo punto de la superficie del modelo y tienen un diámetro aproximado de 4 mm, que se considera muy elevado en comparación con una lluvia real. Debido a esto se sitúa una malla bajo los goteros con el objetivo de romper y distribuir de manera aleatoria estas gotas de gran tamaño, mejorando la uniformidad de la lluvia y obteniendo una distribución heterogénea de diámetros de gota.



**Figura 1** | Esquema del simulador de lluvia (a) y detalle de los goteros insertados en los circuitos (b).

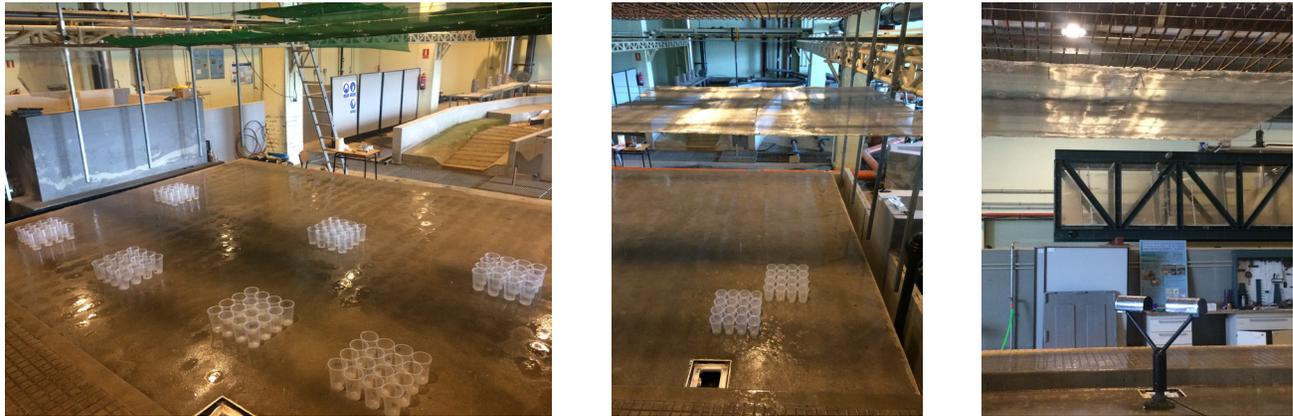
Mientras las intensidades de lluvia generadas vienen definidas a partir del caudal de los goteros y su separación, el tipo y la luz de la malla, la distancia entre la malla y los goteros y la altura total del simulador son los parámetros que determinan la uniformidad y la distribución de tamaños y velocidades de gota. El simulador se ha instalado a la mayor altura posible sobre la superficie del modelo que es de unos 2.6 m, con el objetivo de que gotas de mayor tamaño alcancen su correspondiente velocidad terminal. En cuanto a la elección de la malla y su distancia respecto a los goteros se ha llevado a cabo una calibración en que se ha analizado el funcionamiento de diferentes mallas de varios materiales y varias distancias respecto a los goteros. En esta calibración se ha utilizado como punto de partida la lluvia de menor intensidad, ya que se considera que es la más desfavorable en cuanto a uniformidad de la lluvia. Durante las pruebas se ha medido la uniformidad y la intensidad de la lluvia a partir de 16 recipientes de 0.1 m de diámetro, a modo de pluviómetros, dispuestos en una cuadrícula de 4×4 que cubre una superficie total de 0.16 m<sup>2</sup> (Figuras 2a y 2b). La intensidad de lluvia se calcula a partir de la masa de agua retenida por los

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

recipientes en una lluvia de 15 minutos y posteriormente se estima la uniformidad mediante el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (1942) de la siguiente manera:

$$C_u = 100 \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{n\bar{x}} \right) \quad (1)$$

siendo  $x_i$  los valores de intensidad de lluvia de cada recipiente,  $\bar{x}$  su promedio y  $n$  el número total de datos.



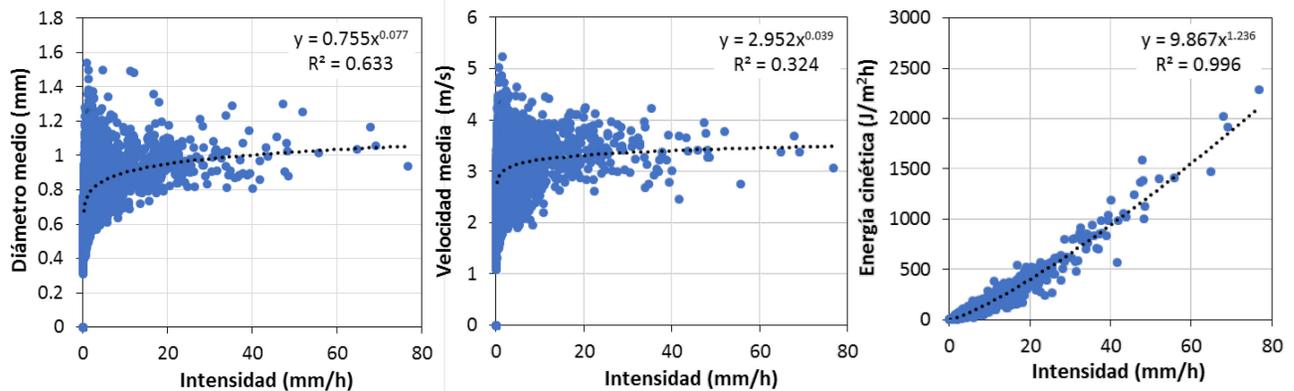
**Figura 2** | Recipientes dispuestos para el análisis de la uniformidad y de la intensidad de lluvia para diferentes tipos de malla y distancias entre la malla y los goteros (a y b). Disdrómetro óptico láser situado sobre el modelo durante una prueba de malla para registrar la distribución de los tamaños y las velocidades de gota ©.

Además de la uniformidad y de la intensidad de lluvia, en el proceso de lavado de contaminantes de superficies impermeables cobra una especial importancia el tamaño y la velocidad, o lo que es lo mismo, la energía cinética con la que las gotas de lluvia impactan en la superficie provocando la suspensión de las partículas. Por ello también se ha empleado durante la calibración un disdrómetro óptico por láser *Parsivel 2* (OTT, Kempen, Alemania), como se puede ver en la Figura 2c. Este equipo mide el diámetro y la velocidad de las partículas que atraviesan una superficie láser horizontal de unos 54 cm<sup>2</sup> que genera entre sus dos extremos superiores (Figura 2c). El tamaño de las partículas se estima a partir de la máxima atenuación de la señal en el momento que la superficie láser es atravesada por la gota de lluvia, siendo la duración de esta atenuación la que determina su velocidad. El disdrómetro proporciona como resultado el número de gotas que han atravesado el haz láser clasificándolas respectivamente en cada uno de los 32 rangos de diámetros y 32 rangos de velocidades establecidos. Estos rangos no son uniformes y son más pequeños cuanto más pequeño es el valor del tamaño y de la velocidad de la partícula, extendiéndose entre 0 y 25 mm en el caso de los diámetros (aunque por cuestiones de ruido en la señal el tamaño mínimo medible es 0.25 mm) y de 0 a 20 m/s en el caso de las velocidades (Tokay *et al.*, 2014).

El objetivo que se persigue con el simulador es intentar reproducir de la forma más precisa posible una lluvia real. Por lo que para determinar las características de la lluvia real se ha instalado el disdrómetro en la azotea del CITEEC y registrado en intervalos de 10 s las lluvias producidas durante febrero de 2017. De esta manera los datos obtenidos se toman como criterio para comparar los diferentes resultados de la calibración, y con ellos se busca también que los futuros resultados obtenidos con el simulador de lluvia sean representativos de la zona en la que se sitúa el laboratorio, que en este caso es la ciudad de A Coruña.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar se presentan en la Figura 4 las relaciones de los tamaños medios de gota, velocidades de impacto y energía cinética con respecto a la intensidad de lluvia que se han obtenido a partir de los registros de lluvia real realizados con el disdrómetro. Tanto el tamaño medio de gota como la velocidad de impacto presentan un valor prácticamente constantes de 1 mm y 3.4 m/s respectivamente, para intensidades de lluvia mayores a 20 mm/h. Por otro lado se obtuvo una relación potencial entre la intensidad de lluvia y la energía cinética calculada a partir de los diámetros y las velocidades de las gotas. Estas características de lluvia, además de una alta uniformidad, son los objetivos que se establecen de cara a la calibración del simulador de lluvia.



**Figura 4** | Relación del diámetro medio, la velocidad media de impacto y la energía cinética con respecto a la intensidad de lluvia obtenida a partir de registros de lluvia real realizados cada 10 s mediante un disdrómetro óptico láser.

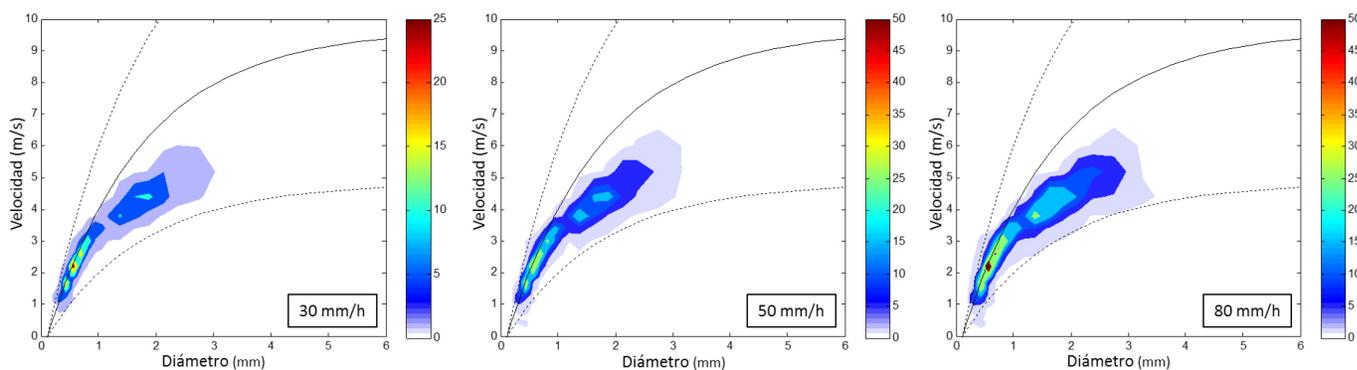
En la Tabla 1 se recogen para diferentes tipos, luces de malla y distancias a los goteros la intensidad media de lluvia, el coeficiente de uniformidad y el tamaño y velocidades de gota medios obtenidos a partir de los pluviómetros y de las medidas del disdrómetro. El primer punto a destacar es que las mallas de plástico (mallas 2 y 3), aunque generan una buena uniformidad, retienen parte del agua y reducen la intensidad medida debido al mayor grosor entre agujeros. En la malla con una luz mayor (malla 1) no se tiene este problema, pero la uniformidad se reduce significativamente ya que la luz de la malla es similar al tamaño de las gotas generadas por los goteros y éstas no se distribuyen lo suficiente. En cuanto a la distancia de la malla respecto a los goteros se puede comprobar cómo cuando ésta aumenta las gotas alcanzan la malla a una mayor velocidad distribuyéndose en un área mayor de la superficie y mejorando la uniformidad de la lluvia. Esto provoca también una ligera reducción del diámetro y velocidad medios registrados.

Las mallas metálicas, por su parte, no retienen agua debido a su estructura más fina entre agujeros pudiéndose utilizar luces de malla más pequeñas que distribuyen adecuadamente la lluvia en la superficie. Estas mallas presentan un buen comportamiento para una intensidad de lluvia de 30mm/h, por lo que se decidió analizar las mallas de luces 2 y 3 mm (mallas 4 y 5) con el resto de intensidades que el simulador de lluvia es capaz de generar, resultando que la malla de 3 mm de luz presenta un comportamiento ligeramente mejor respecto a la uniformidad y se obtiene una distribución de gotas más cercana a la real. Se descartaron mallas de mayor tamaño ya que, como se ha comprobado, la uniformidad se ve afectada con luces de malla por encima de 4 mm. A la vista de los resultados se ha escogido una malla metálica con una luz de malla de 3 cm situada a una distancia de 60 cm respecto a los goteros.

**Tabla 1** | Intensidad de lluvia, coeficiente de uniformidad y diámetro y velocidad media de las gotas de lluvia con distintos tipos de malla y distancias entre la malla y los goteros.

| Malla | Material | Luz de malla (mm) | Distancia a goteros (cm) | Im ensayada (mm/h) | Im medida (mm/h) | Cu (%) | Diámetro medio (mm) | Velocidad media (m/s) |
|-------|----------|-------------------|--------------------------|--------------------|------------------|--------|---------------------|-----------------------|
| 1     | Plástico | 4.5               | 45                       | 30                 | 29.9             | 62.9   | 0.89                | 2.71                  |
| 1     | Plástico | 4.5               | 70                       | 30                 | 28.6             | 67.3   | 0.79                | 2.5                   |
| 2     | Plástico | 2                 | 70                       | 30                 | 23.0             | 83.4   | 0.83                | 2.77                  |
| 3     | Plástico | 1                 | 45                       | 30                 | 24.0             | 83.4   | 0.83                | 2.77                  |
| 3     | Plástico | 1                 | 70                       | 30                 | 22.9             | 89.7   | 0.73                | 2.58                  |
| 4     | Metal    | 2                 | 45                       | 30                 | 32.0             | 71.8   | 0.95                | 2.77                  |
| 4     | Metal    | 2                 | 60                       | 30                 | 31.0             | 92.8   | 0.9                 | 2.88                  |
| 4     | Metal    | 2                 | 70                       | 30                 | 29.5             | 85.3   | 0.92                | 2.81                  |
| 5     | Metal    | 3                 | 70                       | 30                 | 31.4             | 87.3   | 0.94                | 2.77                  |
| 4     | Metal    | 2                 | 70                       | 50                 | 50.2             | 90.1   | 0.91                | 2.85                  |
| 5     | Metal    | 3                 | 70                       | 50                 | 53.38            | 94.0   | 0.95                | 2.77                  |
| 4     | Metal    | 2                 | 70                       | 80                 | 71.78            | 94.6   | 0.9                 | 2.88                  |
| 5     | Metal    | 3                 | 70                       | 80                 | 79.11            | 97.4   | 0.95                | 2.77                  |

En la Figura 5 se incluyen las distribuciones de diámetros de gotas y velocidades medidas mediante el disdrómetro para cada una de las intensidades que es posible simular y con la malla seleccionada en la calibración. Las velocidades desarrolladas por las gotas de mayor tamaño se sitúan ligeramente por debajo de la velocidad terminal que les correspondería. Ante la imposibilidad de elevar el simulador, y teniendo en cuenta que el disdrómetro mide a una distancia de 0.6 m sobre el modelo, se ha situado la zona de medida del disdrómetro a la altura de la superficie y se ha obtenido que, poniéndose en el peor de los casos, las velocidades de las gotas de mayor tamaño de alrededor de 3 mm se mantienen por encima del 70% de la velocidad terminal. Este dato es significativamente superior (mayor del 80%) para los tamaños de gota medios que se desarrollan. Por su parte, los tamaños de gotas medios obtenidos se sitúan por encima de 0.9 mm, muy próximos a las medidas realizadas de lluvia real (en torno a 1 mm), teniendo además una distribución heterogénea de tamaños hasta aproximadamente los 3 mm. Esto, unido a unos coeficientes de uniformidad del 87, 94 y 97%, presentan al simulador desarrollado en este trabajo como una muy buena alternativa para estudios de lavado en drenaje urbano y erosión de sedimentos.

**Figura 5** | Número de gotas, clasificadas según su diámetro y su velocidad, obtenidas mediante el disdrómetro en un intervalo de 10 s para cada una de las intensidades que es posible generar con el simulador de lluvia (30, 50 y 80 mm/h). La curva sólida negra muestra la relación experimental entre cada diámetro de gota y su velocidad terminal correspondiente obtenida por Gunn y Kinzer (1949).

---

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado y calibrado un simulador de lluvia mediante goteros para estudios de drenaje urbano con un gran control sobre las variables de la lluvia. El caudal de los goteros y su separación permiten generar un amplio rango de intensidades, y el tipo de malla y su distancia a los goteros permite ajustar tanto la uniformidad de la lluvia como la distribución de los diámetros de gotas. Es necesario situar el simulador a la mayor altura disponible para que gotas de mayor tamaño alcancen la velocidad terminal que les corresponde. En este caso el simulador se instaló a una altura de 2.6 m, lo que ha supuesto que las gotas de un diámetro de en torno a 1 mm alcancen una velocidad superior al 80% en el momento del impacto con la superficie. La malla, situada por debajo de los goteros para distribuir de manera aleatoria la lluvia y obtener una distribución heterogénea de diámetros de gota, se ha seleccionado mediante una calibración para representar lo mejor posible las características de las precipitaciones locales. Finalmente se ha instalado una malla metálica de 3 mm de luz de malla situada a una distancia de 60 cm de los goteros, con la que se obtiene un tamaño de gota medio aproximado de 0.95 mm, muy próximo a lo obtenido en lluvias reales, y unos coeficientes de uniformidad de 87, 94 y 97% para las 3 intensidades de lluvia que es posible simular (30, 50 y 80 mm/h).

Ante la dificultad del reto que supone simular lo más fielmente una lluvia real se considera que los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios. El nuevo simulador de lluvia desarrollado resulta óptimo para la campaña experimental que se pretende llevar a cabo en un modelo físico de una cuenca urbana y en la que se estudiará el proceso de lavado y transporte de sedimentos por la lluvia. Además el diseño presentado puede ser utilizado como base para otros estudios de erosión de suelo y drenaje urbano en los que se necesite un alto control sobre las variables que caracterizan la lluvia.

---

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiada parcialmente a través del proyecto “SEDUNIT: Análisis de los procesos de acumulación, erosión y transporte de sedimentos cohesivos en sistemas de saneamiento unitario” – Referencia CGL2015-69094-R (MINECO/FEDER, UE). El primer autor ha sido financiado por la beca de doctorado FPU14/01778.

---

## REFERENCIAS

- Aksoy, H., Unal, N. E., Cokgor, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K., Inci, S.B. Eris, E. 2012. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. *Catena*, 98, 63-72.
- Armstrong, A., Quinton, J. N. 2009. Pumped rainfall simulators: the impact of rain pulses on sediment concentration and size. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(9), 1310-1314.
- Christiansen, J. E. (1942). Irrigation by sprinkling (No. 04; USDA, FOLLETO 1532.).
- Grismer, M. E. 2011. Rainfall simulation studies—a review of designs, performance and erosion measurement variability. URL: <http://ucanr.org/sites/californiaagriculture/files/145682.pdf>.
- Gunn, R., Kinzer, G. D. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6(4), 243-248.
- Herngren, L., Goonetilleke, A., Sukpum, R., Silva, D. D. 2005. Rainfall simulation as a tool for urban water quality research. *Environmental Engineering Science*, 22(3), 378-383.
- Júnior, S. S., & Siqueira, E. Q. 2011. Development and calibration of a rainfall simulator for urban hydrology research. *In Proceedings of 12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre, Brazil (pp. 11-16).

Kathiravelu, G., LUCKE, T., Nichols, P. 2014. Designing the Perfect Rainfall Simulator for Urban Stormwater Studies: An Impossible Dream? *In Proceedings of the 13th International Conference on Urban Drainage* (pp. 1-9). International Water Association.

Naves J., Jikia Z., Anta J., Puertas J., Suárez J., Regueiro-Picallo M. 2016 Experimental study of pollutant washoff on a full-scale street section physical model. *8th International Conference on Sewer Processes and Networks*, August 31 –September 2, Rotterdam (The Netherlands).

Tokay, A., Wolff, D. B., Petersen, W. A. 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(6), 1276-1288.