

Improving a Rainfall Simulator considering the uniformity coefficient as a key parameter

Eli D. Beltran¹, Ada L. Arancibia, Dr.², y Miguel A. Zubiaur, Dr.³.

^{1,2,3}National University of Engineering, Peru, eli.beltran.c@uni.pe, aarancibias@uni.edu.pe, mzubiaur@uni.edu.pe

Abstract— Rainfall simulators are fundamental tools in storm analysis under the concept of physical modeling in a defined controlled space. This article addresses the improvement of a rainfall simulator according to the uniformity coefficient criterion. Based on this, improvements were proposed for the rain simulator at the National Hydraulics Laboratory (Peru) used for storm studies. Consequently, two testing phases were evaluated. First, the flow distribution by sprinkling from a nozzle over a 17.71 m² surface was assessed, considering three different heights above this area (2.5 m, 2 m, and 1.5 m). Then, the uniformity coefficient was analyzed for each test to estimate the nozzle spacing, which was determined to be 1.2 m. The second phase involved assembling a Fulljet 1/4HH-14WSQ nozzle grid with the calculated spacing and evaluating the uniformity of the spray flow generated for the three heights tested in the first phase. The results show an 8% increase in the uniformity coefficient compared to the rain simulator with 1.5 m spacing in the laboratory. The height range that produces a uniformity coefficient greater than 75% is between 2 m and 2.5 m above the study surface.

Keywords—Rainfall simulator, uniformity coefficient, Design, Elevation indicator, Spatial indicator.

Mejorando un simulador de lluvia considerando el coeficiente de uniformidad como parámetro clave

Eli D. Beltran¹, Ada L. Arancibia, Dra. ², y Miguel A. Zubiaur, Dr³.

^{1,2,3}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, eli.beltran.c@uni.pe, aarancibias@uni.edu.pe, mzubiaur@uni.edu.pe

Resumen— *Los simuladores de lluvia son herramientas fundamentales en el análisis de tormentas bajo el concepto de modelación física en un espacio controlado definido. En este artículo se aborda el mejoramiento de un simulador de lluvia considerando el coeficiente de uniformidad como parámetro clave. En base a ello, se proponen mejoras para el simulador de lluvia del Laboratorio Nacional de Hidráulica (Perú) utilizado para estudios de tormentas. Entonces, se evaluaron dos fases de prueba. En primer lugar, se evaluó la distribución del caudal por aspersión desde una boquilla sobre una superficie de 17,71 m², considerando tres alturas diferentes sobre esta área (2,5 m, 2 m y 1,5 m). Luego, se analizó el coeficiente de uniformidad de cada prueba para estimar el espaciamiento entre boquillas, que se determinó en 1,2 m. En la segunda fase se montó una parrilla de boquillas Fulljet ¼HH-14WSQ con el espaciamiento calculado y se evaluó la uniformidad del caudal de aspersión generado para las tres alturas probadas en la primera fase. Los resultados muestran un incremento del 8% en el coeficiente de uniformidad en comparación con el simulador de lluvia con espaciamiento de 1,5 m en el laboratorio. El rango de altura que produce un coeficiente de uniformidad mayor al 75% se encuentra entre 2 m y 2,5 m sobre la superficie de estudio.*

Palabras clave: *Simulador de lluvia, Coeficiente de uniformidad, Diseño, Indicador de elevación, Indicador espacial.*

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el cambio climático ha acarreado efectos significativos en los patrones de lluvia a nivel global. Estudios como el de [1] evidencian un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación, con sequías más prolongadas en algunas regiones y lluvias torrenciales en otras. [2] explica que estos cambios están vinculados a alteraciones en los ciclos hidrológicos, donde el calentamiento global intensifica la evaporación y la capacidad de la atmósfera para retener humedad, lo que deriva en patrones de lluvia más erráticos y extremos. Por su parte, [3] destacan que, en Europa, los modelos climáticos proyectan un incremento en la variabilidad de las precipitaciones, dependiendo de los escenarios de emisiones, lo que subraya la urgencia de comprender estos fenómenos con mayor precisión.

Estudiar estos efectos es de suma importancia bajo condiciones controladas, como la simulación de estos cambios en los patrones de lluvia. La lluvia es un factor importante en el estudio del flujo superficial, erosión de suelos, drenaje, entre otros, sin embargo, por su naturaleza presenta alta variabilidad en cuanto a su intensidad, desplazamiento espacial, tamaños de gota y patrones de tormenta; en consecuencia, su modelación resulta un gran desafío ante lo cual los simuladores de lluvia

representan una alternativa de costo – eficiencia adecuada para estudios de procesos hidrológicos bajo condiciones controladas [4]. Cobran mayor relevancia para el entendimiento de los sistemas de drenaje sostenibles como los techos verdes.

Los simuladores de Lluvia son equipos que se han usado por muchos años en estudios de erosión, infiltración y escurrimiento sobre distintos tipos de superficies y coberturas. Los simuladores usados en el campo de la investigación guardan ciertas semejanzas comunes: tienen una fuente de suministro propia, plataformas definidas y mecanismos de generación de precipitación controlados con la tasa de aplicación de un volumen de control sobre la plataforma definida [5].

Existen distintos tipos de simuladores de lluvia, pueden ser ascendentes o descendentes en términos de su configuración de aspersión, pequeños o grandes en función de su tamaño, y simples o complejos según sea su funcionamiento. Sin embargo, se pueden clasificar en términos generales en dos grupos más grandes: simuladores formadores de gotas y simuladores de boquilla presurizada [6].

La representación de una lluvia o tormenta a través de un simulador comprende una serie de características (altura de caída de lluvia, área de plataforma, espaciamiento entre boquillas, velocidad de caída, energía cinética, etc.) que se deben ajustar a valores correspondientes a una lluvia o tormenta natural; sin embargo, la implementación de un simulador de lluvia no implica siempre el uso de todas estas características para su funcionamiento; por el contrario, se ajusta según el campo de estudio en el que será aplicado, es decir, el campo dentro del proceso hidrológico donde el simulador de lluvia represente determinado fenómeno. [7]

Según [5] algunas de las características importantes de la lluvia son el tamaño de gota, velocidad de caída de lluvia, uniformidad de distribución, intensidad de lluvia y energía cinética; recientemente, [8] considera estas características como fundamentales para la simulación de lluvia, sin embargo, [6] mencionan que una simulación se puede dar en superficies erosionables y no erosionables, para esta última, las condiciones de energía cinética y velocidad de caída de lluvia no son relevantes.

Dentro de las características que se debe asegurar en el diseño de un simulador de lluvia una de las más discutidas es el coeficiente de uniformidad, esta variable es un indicador de la distribución espacial de un sistema de aspersión [9]. Sin embargo, su uso se enfocó en el desempeño de boquillas por aspersión sobre campos de cultivo, así como fueron los primeros ensayos de distribución espacial de [10]. Pero su

inclusión en el desempeño de simuladores de lluvia no implica representar la distribución espacial de precipitaciones o uniformidad debido a que una precipitación natural no es completamente uniforme [11] y que el valor de coeficiente de uniformidad como indicador de desempeño de un simulador de lluvia representa la repetitividad de ensayos bajo las mismas condiciones que puede tener un simulador de lluvia [12].

Además, [12] indican que el indicador de uniformidad como un único valor, coeficiente de uniformidad, estaría siendo representativo en simuladores de lluvia con plataforma de área pequeña, menores a 9 m², pero, esto se representa bajo escalas de clasificación de uniformidad como se observa en la tabla 1. Respecto a los valores de coeficiente uniformidad obtenidos, hay una amplia variedad de simuladores de lluvias ensayados entre los cuales se tiene a [12] quienes ensayaron en un área de 9 m² con aspersores Antelco VariJet 360° y a una altura de 1.2 m sobre la superficie; resultando en valores de coeficiente de uniformidad (CU) de 75.3% a 82.5 % de acuerdo con la distribución de receptores de lluvia usados; por su parte [13] realizó sus ensayos en una plataforma de 1 m x 2 m para simular la escorrentía producida por la lluvia simulada, para esto se usó unas duchas como formadores de gota a una altura de 1.8 m sobre la plataforma de ensayo, logrando un rango de coeficientes de uniformidad entre 81.2 % a 88.5 %; para el caso de [14] ensayaron en un simulador de lluvia portable, con boquillas Veejet 80100 y 80150 sobre un área de 0.7 m², logrando CU entre 70.14% a 77.33%; y por su lado, en los antecedentes nacionales tenemos a [15] quien evaluó el comportamiento hidráulico de un sistema de drenaje sostenible, usando un simulador de lluvia con una plataforma de 17.71 m² y 6 boquillas Fulljet 1/4HH-14WSQ a una elevación de 2.5 m sobre la plataforma, logrando CUs entre 69 % a 71%.

Como se aprecia en los antecedentes, la configuración de los diferentes simuladores de lluvia (RS) llevan consigo valores de CU mayores a 70% en su mayoría, sin embargo, estos resultados están ligados las variables en común de los RS, así como el tamaño de la plataforma de estudio, la altura/distancia entre las boquillas con la plataforma de estudio y la distribución y tipo de boquillas propiamente dichas; esto implica que habría relación entre estas variables con los valores del CU en el diseño de un simulador de lluvia. En particular, la relación entre la altura de caída de lluvia simulada y el coeficiente de uniformidad podría ser un indicador del desempeño de la uniformidad del simulador de lluvia, siendo así que a una altura insuficiente puede generar distribución no uniforme de la lluvia simulada o, incluso, afectar a otras características de la lluvia como son la velocidad de caída de gotas y su energía cinética. [16].

En la presente investigación, para desarrollar el diseño de un simulador de lluvia bajo el indicador de desempeño “CU”, se reconfiguró el simulador de lluvia del Laboratorio Nacional de Hidráulica que fue usado por [15] en el estudio de techos verdes; con esta investigación se abordará el indicador de CU para simuladores de lluvia con áreas de mayor tamaño al de [12] para obtener un desempeño de uniformidad de aceptable a

bueno acorde a la clasificación de la tabla 1 posteriormente utilizar el simulador en el estudio de tormentas replicando hietogramas y su influencia en la respuesta hidrológica de los techos verdes.

Asimismo, la relación altura de lluvia simulada/CU permitirá ampliar el rango de intensidades a comparación de un simulador de lluvia sin un sistema de deslizamiento vertical del sistema de aspersores, esto debido a que la proyección prismática de una boquilla se traslapa en relación a su espaciamento y altura de caída de lluvia simulada, generando así un variación en el flujo neto que ingresa a la plataforma.

TABLA 1
CLASIFICACIÓN DE DESEMPEÑO DE UNIFORMIDAD DE SIMULADORES DE LLUVIA

Autor	Year	CU
Little et al. (1993)	Very good	>90%
	Good	80 % - 90 %
	Poor	70 % - 79 %
	Action required	<69%
Keller and Bliesner (1990)	Acceptable	>84%
Karmeli (1978), Letey et al. (1990) and Li et al. (2011)	Acceptable	>= 70%
Iserloh et al. (2013)	Acceptable	61 % - 98 %

II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

A. MATERIALES: Simulador de Lluvia

El Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) del Perú, cuenta con un simulador de lluvia, el cual se usó en la investigación de [15], este simulador se implementó con un sistema hidráulico de impulsión de flujo que consideró una bomba de 1 HP, una red de tuberías de 3/4” y accesorios; un sistema de aspersión de 6 unidades de boquillas FullJet ¼ HH-14WSQ espaciado 1.5 m en 2 filas y ubicado a una altura de 2.5 m sobre la plataforma; respecto a la plataforma de estudio, es de 17.71 m² (3.72 m x 4.76 m) y con capacidad de modificar la pendiente de -10% a 50%. El sistema digital de toma de datos se configuró con flujómetros de ¾” y ½”, en el ingreso por el sistema de impulsión y en la descarga de la plataforma, respectivamente. El rango del CU que se logró con la configuración de Arone et al. (2023) es de 69% a 71% para un rango de intensidades entre 59.4 mm/h a 74.6 mm/h.

Con la finalidad de unificar el diseño, se tiene las siguientes componentes para la configuración del simulador de lluvia: a) Sistema soporte con capacidad de desplazamiento vertical, b) Sistema hidráulico de impulsión de flujo, c) Sistema de aspersión y el d) Sistema digital de toma de datos.

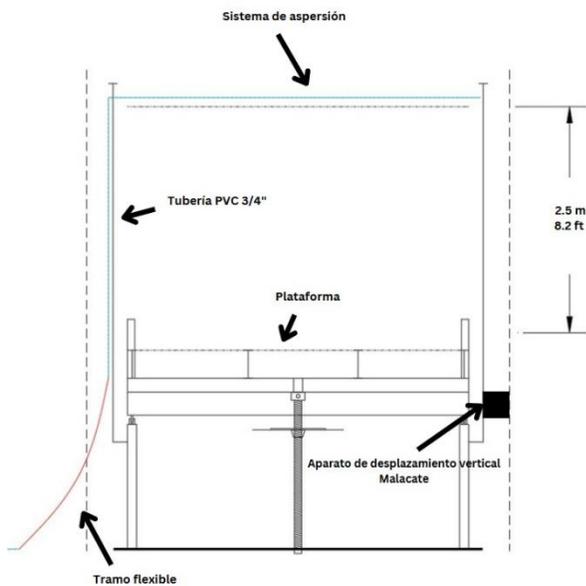


Fig. 1 Esquema de simulador de lluvia, vista frontal.

En la Fig.1 se aprecia la estructura de color gris, esta representa el sistema de soporte, asimismo, se visualiza que el espacio de desplazamiento en la vertical es de 2.5 m sobre la plataforma de 3.72 m x 4.76 m, de ancho y largo; respectivamente. Por otra parte, se tiene de color celeste el tramo vertical del sistema de impulsión que son un conjunto de tuberías de PVC de 3/4" y en la parte superior del simulador el sistema de aspersión y, de color rojo, un tramo de tubería flexible (maguera) de 1/2" que asegura el flujo continuo durante los desplazamientos en la vertical del sistema de impulsión. El sistema de impulsión comienza con la captación de flujo desde la cisterna de la división didáctica del Laboratorio

Nacional de Hidráulica, utilizando una bomba de 2HP. Desde allí, el agua es impulsada a través de una tubería de 1" que se extiende por un tramo horizontal de 2.5 metros. De este tramo, 1.2 metros corresponden a una tubería de PVC de 3/4", seguida de una válvula de control de flujo de 3/4" de tipo Globo y otro tramo de 1.2 metros de tubería de PVC de 3/4". A continuación, el sistema incorpora un sistema digital de toma de datos, que consta de dos flujómetros de 3/4" con capacidad de 60 l/min cada uno, instalados en paralelo. Después de los flujómetros, el flujo continúa a través de una tubería de PVC de 1" hasta llegar al punto previo a la conexión con el tramo flexible, que forma parte de la zona vertical del sistema de impulsión. Este diseño permite un control preciso del flujo y una medición eficiente de los datos, lo que es esencial para garantizar la reproducibilidad de los experimentos. La disposición del sistema, incluyendo la bomba, las tuberías y los dispositivos de medición, se puede observar en la Fig. 2. La combinación de materiales y componentes, como las tuberías de PVC y la válvula de control de flujo, asegura el funcionamiento del sistema para ensayar bajo condiciones controladas lo que se planteó en la metodología.

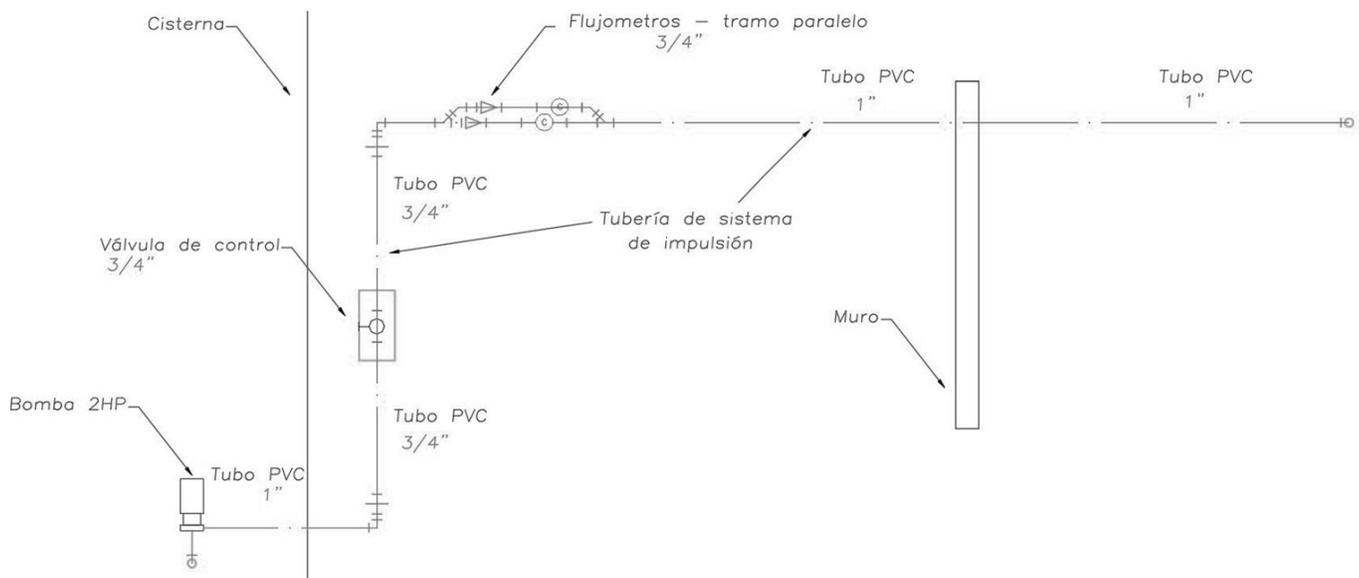


Fig. 2 Esquema del sistema de impulsión – tramo horizontal

El sistema de soporte con capacidad de desplazamiento vertical es conformado por un aparato que funciona con un torque para accionar las poleas conectadas a la parrilla de acero de perfiles cuadrados de 2"x2" que estará suspendida sobre la plataforma. En la Fig. 3 se visualiza el sistema de deslizamiento vertical en los ensayos de la primera fase. Este sistema proveerá de un mayor rango de intensidades al simulador en función de su posición vertical, de aquí la importancia del estudio de los coeficientes de uniformidad para diferentes alturas.



Fig. 3 Sistema de soporte con capacidad de desplazamiento vertical

Por otro lado, como parte de los sucesos en la primera fase de ensayos, se observó que hay influencia del viento en los resultados de los ensayos, de tal forma que la distribución de uniformidad del flujo sobre la plataforma se concentró en un área fuera de la zona proyectada del flujo de la boquilla, siendo así que el viento influye en la concentración de precipitación para el área de ensayo. Entonces, se planteó usar una cobertura alrededor de toda la estructura del simulador de lluvia para contrarrestar el efecto del viento. En la Fig. 4 se observa la estructura de madera que es adicional al simulador de lluvia y que se cubrió con malla Raschel 80% de color verde.



Fig. 4 Estructura adicional de madera y cobertura de malla Raschel 80%

B. Metodología

Los ensayos para evaluar el desempeño del indicador de uniformidad CU se realizaron en 2 fases:

PRIMERA FASE. La primera fase corresponde a realizar la medida del coeficiente de uniformidad para un solo aspersor, en este caso se empleó el mismo tipo de aspersor del simulador existente, esto es aspersor tipo Fulljet ¼ HH – 14WSQ fabricados por Spraying System con una abertura de 6.8 mm x 6.8 mm, con proyección del flujo de salida con geometría rectangular el cual varía en dimensión según la altura de caída del flujo. Ubicado en la parte central de la plataforma y con distancias en la vertical de 2.5 m, 2 m y 1.5 m sobre la plataforma donde llega el sistema de impulsión.

Una vez realizado la evaluación de un solo aspersor para las alturas antes mencionadas se procede a traslapar la distribución de uniformidad que se proyecta de los resultados de la primera fase y para cada altura a una distancia “e” que llamaremos espaciamiento calculado, se hará la comparación con el espaciamiento que se utilizó en el simulador de lluvia de [15] que es 1.5 m para una altura de 2.5 m de altura para un sistema de aspersión con 6 boquillas de tipo Fulljet ¼ HH – 14WSQ.

SEGUNDA FASE.

Por otra parte, la segunda fase es la evaluación de la uniformidad para un sistema de aspersores de 9 boquillas Fulljet ¼ HH – 14WSQ distribuidas espacialmente con el espaciamiento calculado; además, la evaluación se realizará de igual forma a la primera fase, utilizando las 3 alturas para realizar los ensayos.

En otro aspecto, la medición de la distribución de uniformidad se realizó mediante la captación de la lluvia

simulada en recipientes de 20 cm de diámetro ubicados entre sí cada 50 cm sobre la plataforma, como se indica en el esquema de la Fig. 5.

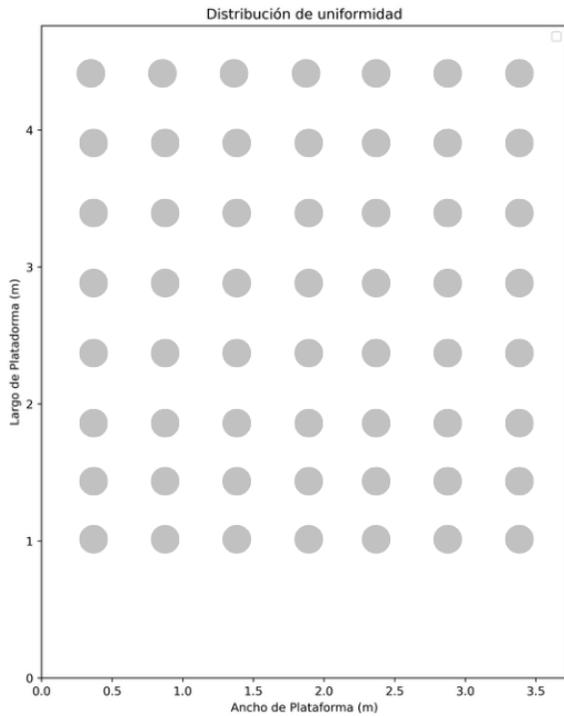


Fig. 5 Distribución de recipientes para la medición de la precipitación

Luego, para calcular el valor de indicador de uniformidad se usó el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU), así como se presentó en [9].

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Xi - Xm|}{nXm} \tag{1}$$

Donde Xi es la cantidad de agua precipitada dentro del recipiente, y Xm es el promedio de todos los “n” valores medidos en cada recipiente.

Para los ensayos de la primera fase se fijó el tiempo de simulación de 10 min, similar a lo considerado en el tiempo de concentración en el estudio de [15] y, asimismo, el sistema llega a un punto controlado después de 20 s, es decir, las condiciones del ensayo son las controladas y bajo las mismas condiciones después de los 20 s.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez que se realizaron los ensayos de la primera fase, se observó que la precipitación no se direccionaba en un solo punto de la plataforma, es decir que la cobertura de la malla Raschel contrarrestó la influencia del viento. Segundo, de cada altura de ensayo se estimó el espaciamiento “e” midiendo desde el punto central de la boquilla con el área donde se concentró mayor precipitación, esto implicó que la proyección de lluvia al traslaparse mantendrá la concentración alta de precipitación entre las 2 boquillas, en el centro del traslape, y la parte que se encuentra debajo de cada boquilla se uniformizó con la precipitación proveniente de la boquilla traslapada.

Respecto al caudal de ingreso por el sistema de impulsión se tuvo un valor medido de 2.38 gal/min (0.18 l/s) a la salida del aspersor; esto se corroboró con la presión de operación del sistema de impulsión y especificaciones de la propia boquilla, esta última indica que la capacidad de flujo a la salida de la boquilla es 2.6 gal/min (0.19 l/s) para una presión de trabajo de 40 PSI (275.79 KPa) que es la presión del sistema de impulsión planteado.

En Fig. 6(a), Fig. 6(b) y Fig. 6(c) se observa la distribución de uniformidad para las alturas de 1.5 m, 2 m y 2.5 m, en las que se logra visualizar la proyección del agua tiende a ser una geometría rectangular, sin embargo, hay zonas de mayor concentración de precipitación en las cuales se realizó la medición del espaciamiento calculado.

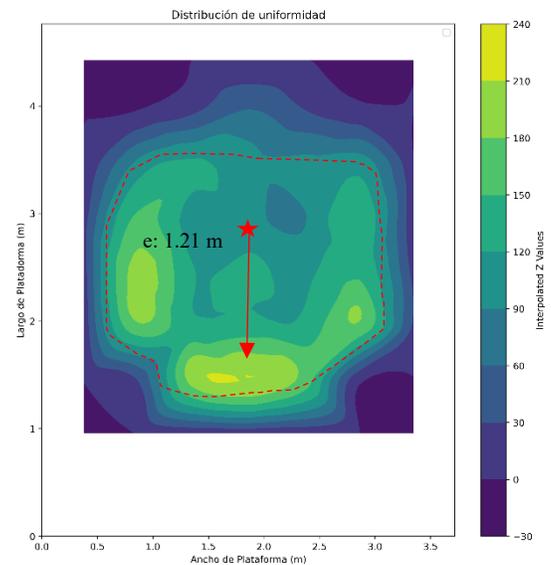


Fig. 6(a) Distribución de uniformidad para el ensayo fase1 – 1.5 m

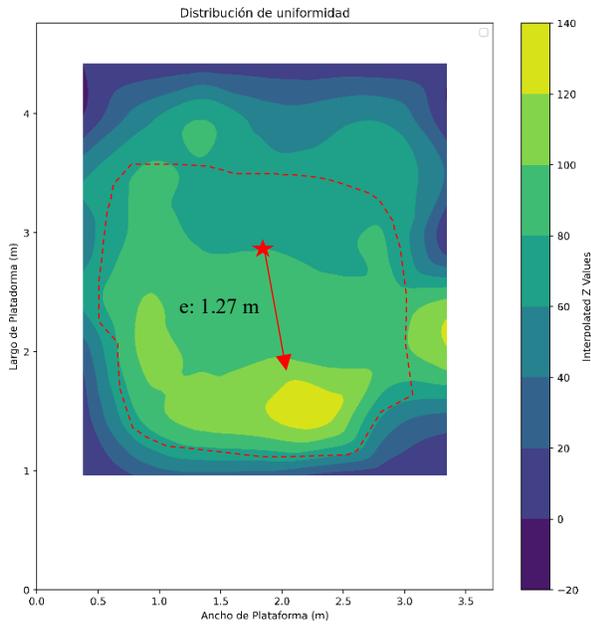


Fig. 6(b) Distribución de uniformidad para el ensayo fase1 – 2.0 m

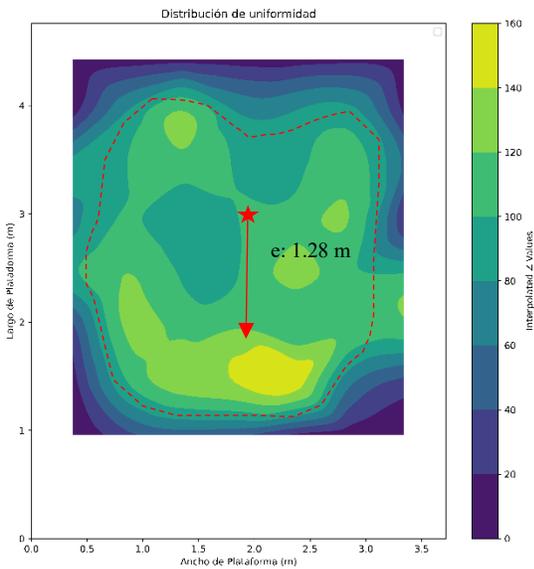


Fig. 6(c) Distribución de uniformidad para el ensayo fase1 – 3.0 m

Cualitativamente, la proyección es cuadrangular sobre la plataforma de los ensayos de la primera fase, además, se muestra como es la distribución de uniformidad de la boquilla FullJet ¼ HH-14WSQ; por otro lado, cuantitativamente, en la tabla 2 están los resultados del coeficiente de uniformidad para los ensayos de la primera fase.

TABLA 2
VALOR DE CU PARA LOS ENSAYOS DE LA FASE I

Calculate distance (m)	Fall Height (m)	CU (%)
1.21	1.5	47.31
1.27	2.0	67.45
1.28	2.5	70.01

Para una sola boquilla hay un incremento en la uniformidad directamente proporcional con la altura de caída de lluvia simulada.

Entonces, con los resultados de la primera fase se propuso que el espaciamiento entre boquillas será de 1.2 m, para ello se planteó una distribución de boquillas como se observa en Fig. 7, donde la conexión se realiza con tuberías de ¾” a los extremos y en las uniones hay 3 tuberías de ½” y es en estas donde se colocan las boquillas con el espaciamiento calculado. Cabe resaltar que en el sentido de mayor longitud de la plataforma el espaciamiento es 1.15 por motivos de empalme con los accesorios.

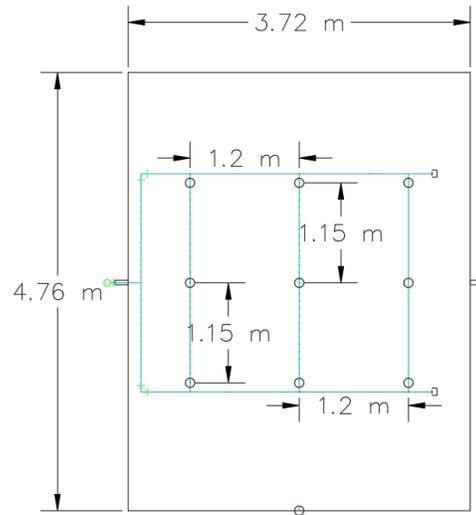


Fig. 7 Distribución de boquillas para el sistema de aspersión

Luego de realizar el esquema se procedió a la instalación sobre la plataforma, en la Fig. 8 se observa como quedó la instalación del sistema. Para la segunda fase de ensayos se tomó en consideración el mismo tiempo de ensayo de la primera fase, el método de medición fue con los mismos recipientes, entonces, en la Fig. 9(a), Fig. 9(b) y Fig. 9(c) se puede apreciar la distribución de uniformidad sobre la plataforma de los ensayos para todo el sistema instalado a las alturas de 1.5 m, 2.0 m y 2.5 m.



Fig. 8 Sistema de aspersión instalado

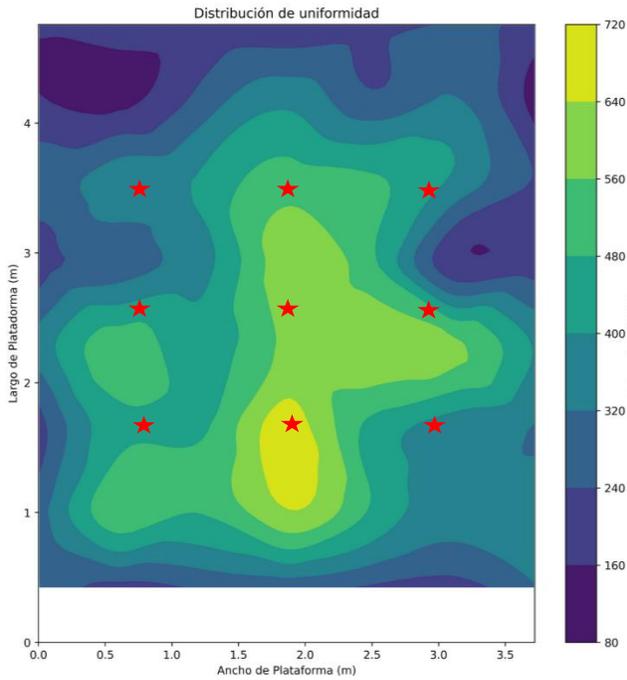


Fig. 9(a) Distribución de uniformidad sistema completo – 1.5 m

Se puede apreciar en la Fig. 9(a) que la zona central presenta mayor uniformidad respecto a los extremos de la plataforma, pero el patrón de concentración tiene una tendencia de disminuir desde el centro hacia los extremos de la plataforma, esto muestra que la distribución planteada actúa en conjunto mas no como proyecciones individuales de flujo por cada aspersor. Asimismo, el valor de coeficiente de uniformidad CU para este ensayo es de 70.97% lo cual concuerda con la descripción cualitativa.

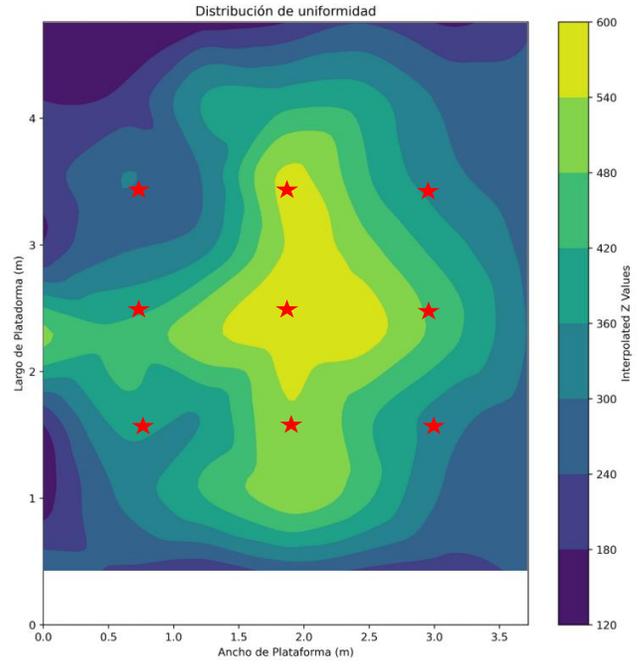


Fig. 9(b) Distribución de uniformidad sistema completo – 2.0 m

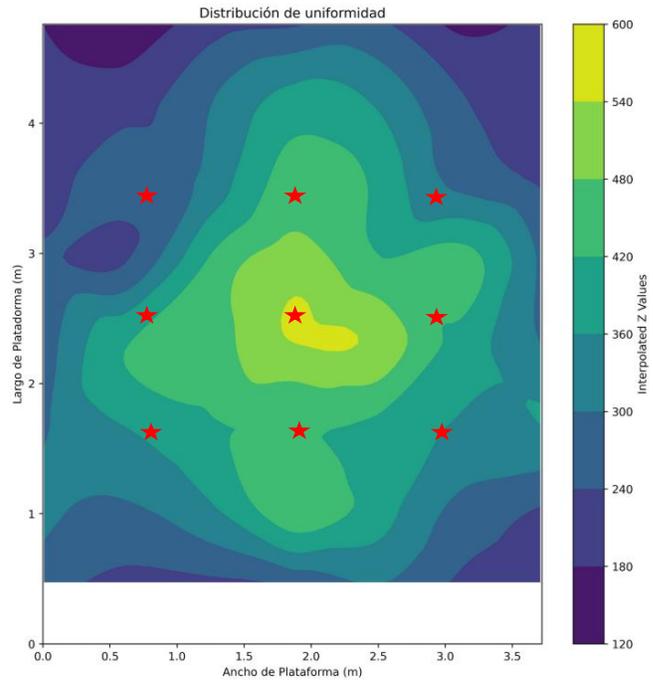


Fig. 9(c) Distribución de uniformidad sistema completo – 2.5 m

Respecto a los ensayos para las alturas de 2.0 m y 2.5 m se observó una mayor uniformidad en la parte central de la plataforma, en cuanto a los resultados de coeficiente de uniformidad estos son 76.38% y 78.97%, para 2.0 m y 2.5 m,

respectivamente. Asimismo, se observa que el incremento de la altura de caída de lluvia simulada del sistema de aspersión genera un flujo uniforme, pero con un traslape menor y las proyecciones individuales de cada aspersor se incrementan con las alturas; otro aspecto es el flujo neto que ingresa a la plataforma, conforme que incrementa la altura se observa que la concentración de flujo neto es en la parte central de la plataforma, sin embargo, de acuerdo al máximo volumen de precipitación acumulada en los recipientes (600 ml), para alturas menores a 2.0 m hay mayor flujo neto en la plataforma, a comparación de la Fig. 9(c), donde el máximo volumen registrado de 600 ml cubre un área pequeña en comparación con los ensayos para 1.5 m y 2.5 m.

Por otro lado, de acuerdo con la clasificación de la tabla 1, estamos en el rango de desempeño de uniformidad de aceptable a bueno para el simulador de lluvia planteado, considerando el rango de altura de 1.5 m a 2.5 m. En la Fig. 10 se observa la variación del coeficiente de uniformidad según a la altura de ensayo.

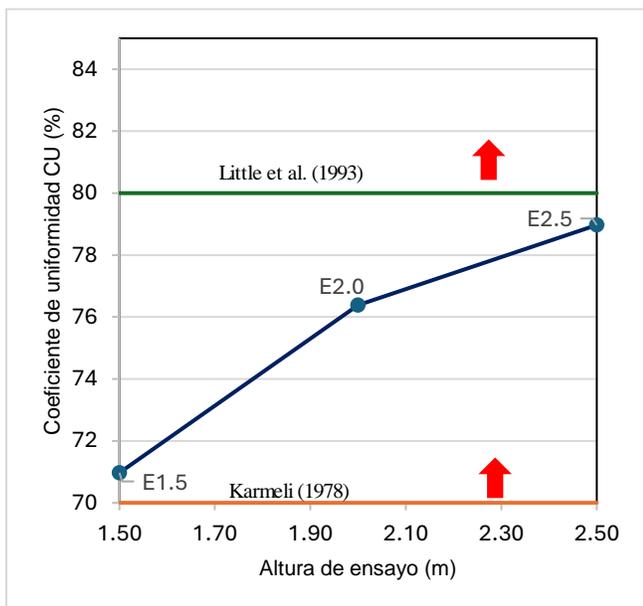


Fig. 10 Variación del coeficiente de uniformidad vs altura de caída de lluvia

Entonces, de los resultados del coeficiente de uniformidad se pudo clasificar el simulador de lluvia con desempeño de aceptable a bueno, asimismo, en relación a la mejora del simulador del Laboratorio Nacional de Hidráulica, se tuvo un incremento hasta el 78.97% en esta investigación con el espaciamiento de 1.2 m y una elevación de 2.5 m. Además, se observa que la relación entre la altura de caída de lluvia simulada y el sistema de aspersión es directa y que para altura de 2.0 m hacia arriba la uniformidad es mayor a 75 % y es en este rango en el cual se puede presentar los cambios de patrones

de lluvia bajo condiciones controladas como lo es el indicador de uniformidad.

V. CONCLUSIONES

En la presente investigación se diseñó un simulador de lluvia usando como criterio clave el coeficiente de uniformidad y la relación de altura de caída de lluvia, concluyendo en la mejora del simulador del Laboratorio Nacional de Hidráulica, logrando un coeficiente de uniformidad en el rango de 76.38% a 78.97%, y de acuerdo a la clasificación de desempeño de la tabla 1, el actual simulador del Laboratorio nacional de Hidráulica está en el rango de aceptable a bueno, además, los coeficiente de uniformidad de mayor valor se dan en el rango de altura de 2.0 m a 2.5 m, de esta forma el incremento de altura representa un incremento en el desempeño de uniformidad de un simulador de lluvia.

Asimismo, se recomienda la estimación de las variables de velocidad y energía cinética con relación de la altura de caída de lluvia simulada, por otro lado, la relación espaciamiento/caída de lluvia está relacionado con el flujo neto que ingresa a la plataforma de acuerdo con los resultados, por ende, se debe incluir en futuros estudios la relación de estos parámetros con las intensidades que se puede generar con el simulador de lluvia. Otro punto de apertura es la relación entre el flujo neto que precipita en la plataforma respecto a la altura de simulación, pues hay una relación indirecta entre estas 2 variables.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo financiero dado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (VRI), como parte de las actividades del proyecto de investigación FIC-PFR-06-2024. Los autores también agradecen el apoyo del Laboratorio Nacional de hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería por facilitar el acceso a sus instalaciones y el uso del equipamiento.

REFERENCIAS

- [1] L. V. Alexander et al., "Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 111, no. D5, 2006, doi: 10.1029/2005JD006290.
- [2] K. E. Trenberth, "Changes in precipitation with climate change," *Clim. Res.*, vol. 47, no. 1-2, pp. 123–138, 2011, doi: 10.3354/cr00953.
- [3] J. Rajczak and C. Schär, "Climate change impacts on extreme precipitation in Europe: Influence of emission scenario and model uncertainty," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 44, no. 3, pp. 1459–1466, 2017, doi: 10.1002/2016GL071345.
- [4] Meena, R. K., Sen, S., Nanda, A., Dass, B., & Mishra, A. (2022). A contribution to rainfall simulator design – a concept of moving storm automation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(16), 4379–4390. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4379-2022>
- [5] R. Cáceres, "Diseño y construcción de un modelo de simulación de lluvias para investigación de pérdida de suelos," Thesis for fulfillment of the Civil Engineering Title, Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, Lima, Perú, 2008.

- [6] Yakubu, M. L., & Yusop, Z. (2017). Adaptability of rainfall simulators as a research tool on urban sealed surfaces – a review. *Journal Des Sciences Hydrologiques [Hydrological Sciences Journal]*, 62(6), 996–1012. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267355>
- [7] Ricks, M. D., Horne, M. A., Faulkner, B., Zech, W. C., Fang, X., Donald, W. N., & Perez, M. A. (2019). Design of a pressurized rainfall simulator for evaluating performance of erosion control practices. *Water*, 11(11), 2386. <https://doi.org/10.3390/w11112386>
- [8] Gemlack Ngasoh, F., Crown Mbajiorgu, C., Boniface Kamai, M., & Onyekachi Okoro, G. (2021). A revisit of rainfall simulator as a potential tool for hydrological research. In *Agrometeorology*. IntechOpen.
- [9] J. E. Christiansen, "Irrigation by Sprinkling," University of California Agricultural Experiment Station Bulletin*, no. 670, pp. 124, 1942.
- [10] F. E. Staebner, *Tests of spray irrigation equipment*. Washington, D.C: U.S. Dept. Agric., 1931.
- [11] Meyer, L. (1988) 'Rainfall simulation for soil conservations research', in Lal, R. (Eds.) 'Soil erosion research methods: 154 – 166.
- [12] Green, D., & Pattison, I. (2022). Christiansen uniformity revisited: Rethinking uniformity assessment in rainfall simulator studies. *Catena*, 217(106424), 106424. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106424>
- [13] Ngasoh, F. G., Mbajiongu, C. C., Istifanus, A. B., & Vinking, J. M. (2022). Design, development and testing of a hydrological process demonstration system. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 10(6), 111–120. <https://doi.org/10.36347/sjet.2022.v10i06.003>
- [14] De Sousa Costa, A. R., Alvarenga, L. A., Thebaldi, M. S., Melo, P. A., Colombo, A., & Isidoro, J. M. G. P. (2023). Portable rainfall simulator: evaluation and suitability of plot geometry to improve rainfall uniformity. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 28. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220220198>
- [15] J. A. Velasquez, A. L. A. Samaniego, and J. M. K. Zevallos, "Analysis of the influence of green roofs in the reduction of the stormwater runoff hydrograph of a high Andean city in Ayacucho, Peru," *LACCEI*, Jan. 2023, doi: 10.18687/laccei2023.1.1.1452.
- [16] T. Iserloh, W. Fister, M. Seeger, H. Willger, and J. B. Ries, "A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion," *Soil and Tillage Research*, vol. 124, pp. 131–137, 2012, doi: 10.1016/j.still.2012.05.016