

DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR AUTOMÁTICO DE LLUVIA

José Luis Carreras Nampulá¹, Carlos Manuel García Lara^{2*},
Eduardo Espinosa Medinilla², Raúl González Herrera²,
Pedro Vera Toledo², Rubén Alejandro Vázquez Sánchez²

¹ Maestría en Ciencias en Desarrollo Sustentable y Gestión de Riesgos.
Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas,
Lib. Norte Poniente 1150, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.P. 29000, México.

² Facultad de Ingenierías, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas,
Lib. Norte Poniente 1150, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.P. 29000, México.

Email: carlos.garcia@unicach.mx.



Para citar este artículo:

Carreras, J., Espinosa, E., García, C., González, R., Vázquez, R. y Vera, P. (2016) Diseño y calibración de un simulador automático de lluvia. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo* 5 (12) 23-37. doi: 10.31644/IMASD.12.2016.a02

RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó y construyó un simulador de lluvias utilizando materiales de bajo costo y de fácil transporte, el cual permitió controlar variables como intensidad, uniformidad y duración. Se controló el caudal con una electroválvula mediante un detector de cruce por cero, tarjeta de control y una etapa potencia. Los resultados indicaron que el comportamiento en la distribución espacial de la lluvia fue uniforme con un valor superior a 80%, intensidad de lluvia similares a episodios naturales con una energía cinética superior a 27 J/mm m², con un control del caudal de 97% de precisión.

Palabras clave

Simulación de lluvia, tamaño de la gota, energía cinética.

DESIGN AND CALIBRATION OF AN AUTOMATIC RAINFALL SIMULATOR

— *Abstract*—

In this work it was designed and built a rainfall simulator using low cost materials and easy to transport, which allowed control variables such as intensity, consistency and durability. a solenoid valve was controlled by a zero crossing detector, control board and a power stage. The results indicated that the behavior in the spatial distribution of rainfall was consistent with a value greater than 80%, intensity similar rain natural episodes with a kinetic energy greater than 27 J/mm m², with flow control 97% precision.

Keywords

Simulated rain, droplet size, kinetic energy.

La erosión hídrica es uno de los principales procesos de degradación de los suelos. Su estudio requiere de datos recopilados en periodos largos (5 a 10 años). Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para aplicar agua de forma similar a los episodios naturales. Son útiles para obtener datos de erosión, infiltración, escorrentía superficial y transporte de sedimentos. Lo anterior debido al impacto de las gotas de lluvia en función de la energía cinética (L. Wanga, 2014). Los simuladores permiten controlar la intensidad de la lluvia aplicada, son eficientes en términos de tiempo y mano de obra requerida y pueden adaptarse fácilmente para estudios de laboratorio (A. Moussouni, 2014). Las principales características de la lluvia natural que deben conseguir los simuladores de lluvia son (Sílvia C. P. Carvalho, 2014):

- Distribución aleatoria del tamaño de las gotas de lluvia.
- Velocidad de impacto similar a la velocidad terminal de las gotas de lluvia natural.
- Intensidad de lluvia correspondientes a las condiciones naturales
- Energía cinética similar a la de la lluvia natural.
- Lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas.

Existen dos tipos de simuladores de lluvia con base en el mecanismo generador de gotas, seleccionados en función de su disponibilidad, costo de construcción y el objetivo experimental.

El Método de goteo, donde la velocidad inicial de las gotas es cero (Ibañez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2012), tiene un costo relativamente bajo pero la velocidad final deseada se consigue a alturas de caída de 12 m y en las gotas de mayor diámetro (Gopinath Kathiravelu, 2016).

El Mecanismo de boquillas pulverizadoras, es aquel en que el agua sale a una velocidad inicial diferente de cero por estar sometida a una presión inicial determinada (Ibañez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2012). Este simulador puede proporcionar lluvias de intensidad diferente por lo cual es posible simular las características de la lluvia natural según la zona de estudio (Meyer L. D., 1958), (Benito Rueda & Gomez-Ulla, 1986), (Navas & Alberto, 1990), (Cerdá & Ibañez, 1997), (I. Abudi, 2012). El problema de este simulador es que se requieren intensidades muy elevadas para obtener tamaños de gotas similares a las de una lluvia natural, por lo que requieren de mecanismos que permitan disminuirla conservando las dimensiones de las gotas. Se han utilizado discos giratorios con una muesca radial (Ognjen Gabric, 2014), ubicado una boquilla en un sistema oscilante (G. B. Paige, 2003). En México se han utilizado el simulador de brazos rotativos (Marelli, Mir, Arce, & Lattanzi, 1984) y de movimiento oscilante en

aspersores (Marelli, Arce, J.M., & Masiero, B., 1986) (Marelli, Mir, Arce, & Lattanzi, 1984).

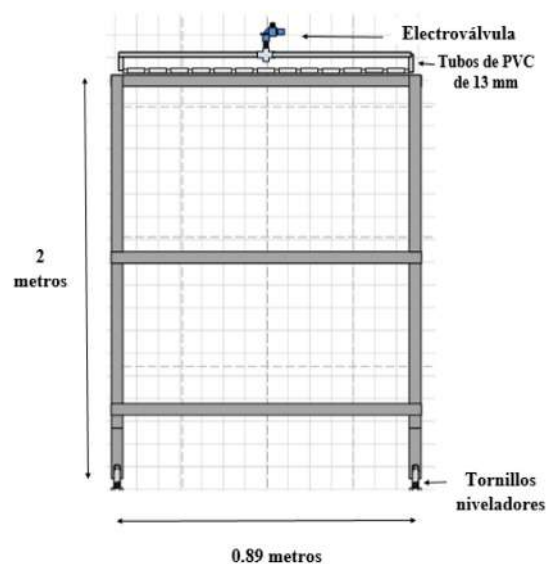
Otra característica importante es el tamaño de la gota de lluvia, ya que ésta influirá en la intensidad de la misma y en la energía cinética final. Existen diferentes técnicas para su medición utilizando papel filtro, relacionando el tamaño de la mancha en el papel con el tamaño de la gota de agua que lo causó (Jau-Yau, Chih-Chiang, Tai-Fang, & Ming-Ming, 2008), mediante fotografía (Salvador, R; Bautista-Capetillo, C; Burguete, J; Zapata, N; Serreta, A; Playán, E, 2009), (Abudi, Carmi, & Berliner, 2012), método de bolitas de harina (Parsakhoo, Lotfalian, Kavian, Hoseini, & Demir, 2012), utilizando espectropluviómetros (Grismar, 2012), entre otros.

En este trabajo se describen las características y el funcionamiento de un simulador de lluvia basado en pequeños orificios practicados en tubos de PVC.

Descripción del simulador

Se diseñó y construyó un modelo de simulador de lluvia, similar al desarrollado por (Carreras Nampulá, García Lara, Espinoza Medinilla, González Herrera, & Medina Sansón, 2015) con modificaciones en la estructura y funcionamiento, considerando las variables de intensidad y duración de las precipitaciones (Figura 1).

Figura 1. Estructura del simulador de lluvias.



Para el manejo del simulador se construyó un dispositivo detector de cruce por cero y una etapa de potencia controlados con una tarjeta Arduino UNO de bajo costo y de fácil integración con diferentes sistemas y software, lo que permitió generar desde gotas hasta un caudal conocido, empleando tubería de pvc de 12.3 mm en tramos de 0.8 m con orificios de aproximadamente 0.8 mm de diámetro separados 2 cm entre sí, formando un total de 481 (Figura 2 y 3).

Figura 2. Estructura del sistema de alimentación por aspersión continua

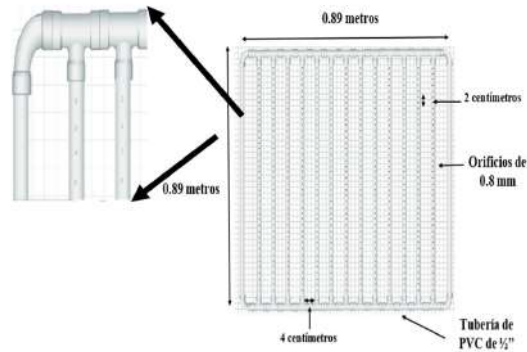


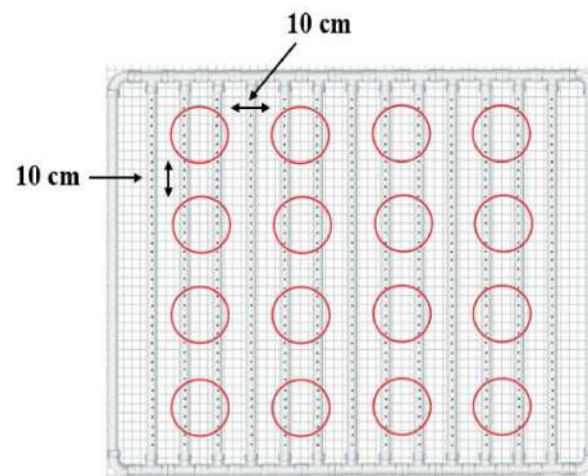
Figura 3. Dimensión de los orificios del sistema automático.



El caudal y formación de gotas se controló utilizando una electro-válvula, que permitió regularlo con un máximo de 1.5 l/s, para presiones de trabajo desde 20 Pa, a diferentes intervalos de tiempo. El suministro de agua se realizó utilizando un contenedor de 750 litros y mediante un sistema de tuberías, lo que permitió el transporte de agua hasta al simulador. Se colocó un protector de viento para evitar interferencias durante el experimento.

Se realizaron 5 ensayos con tres repeticiones, a 2 metros de altura para cinco diferentes caudales; la distribución espacial de la lluvia fue evaluada mediante 16 colectores de 1000 ml, distribuidos en cuatro filas a intervalos de 10 cm entre colectores y lo mismo por cada fila (área de trabajo del simulador), para determinar el volumen de agua acumulado durante 10 segundos (Figura 4). Cabe señalar que el número de repeticiones se consideró suficiente debido a que el volumen medido presentó una desviación estándar pequeña.

Figura 4. Distribución espacial de los recipientes colectores



Diámetro de la gota de lluvia

Debido a la variación natural de las gotas de lluvia, se evaluó el diámetro y volumen para un caudal reducido, empleando una cámara fotográfica marca Sony, modelo Cyber-shot DSC-W510 con una resolución de 12.1 megapíxeles, zoom óptico de 4x y gran angular de 26 mm, obteniéndose imágenes que se procesaron utilizando la técnica de sólidos de revolución para su presentación y análisis. Este método se realizó mediante el manejo de límites de sumas de volúmenes de pequeñas secciones o cortes circulares infinitesi-

males del sólido de revolución. Se utilizó un método de capas cilíndricas, tomando en consideración a los extremos como segmentos esféricos mientras que a las secciones intermedias se evaluaron como segmentos esféricos truncados, el volumen final se determinó por:

$$V = \frac{\pi}{3} h \left(\frac{3}{4} s^2 + h^2 \right) + \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{n-1} h (3a^2 + 3b^2 + h^2)$$

Donde h es el desplazamiento entre segmentos, s es el diámetro de cada segmento esférico, mientras que a y b son los diámetros por cada desplazamiento del segmento esférico truncado.

La velocidad de la gota de lluvia se determinó utilizando la ecuación propuesta por Gunn & Kinzer (1949), según la cual las gotas producidas por el simulador de lluvia tienen una velocidad terminal:

$$v = 2.9379 \ln(D_g) + 4.393$$

Siendo v , la velocidad (m/s) y D_g , el diámetro en mm de la gota, se debe considerar el valor constante del segundo término como la velocidad inicial de la gota.

Distribución espacial de la lluvia

La energía cinética de gotas de lluvia influye directamente en la separación de contaminantes, particularmente al inicio de un episodio de lluvia (Vaze, 2003). La homogeneidad de las gotas de lluvia, es directamente proporcional a la variabilidad espacial de la intensidad de la lluvia, tiene una influencia directa en la energía de impacto por unidad de área. Por lo anterior un simulador debe reproducir con precisión la energía cinética sobre un área de interés a una intensidad dada, así como con una distribución espacial uniforme. Un número obtenido en estudios previos consideró un coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) de 80% o mayor suficiente para considerar patrones de lluvia como realísticos (Moazed, 2010). El CUC se determinó mediante la expresión:

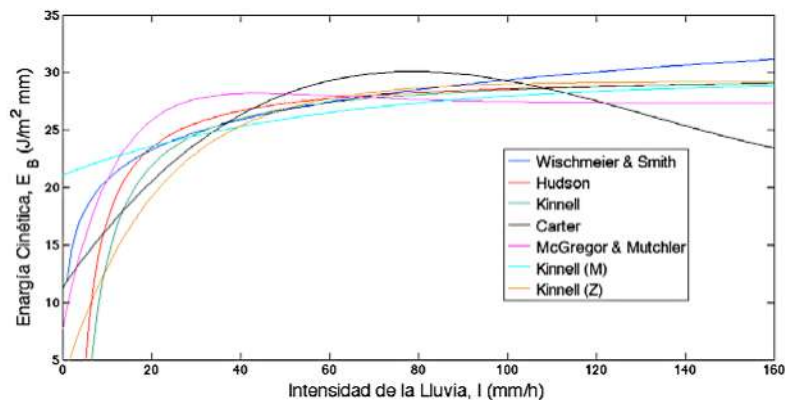
$$CUC (\%) = 100 \left(1 - \frac{\sum x}{m n} \right)$$

Donde m , es el valor medio; n , es el número de observaciones y x , es la desviación estándar de las observaciones individuales respecto de la media.

Energía Cinética

La energía cinética de la lluvia es un parámetro que ha sido utilizado para determinar el índice de erosión definida en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE por sus siglas en inglés), basada en la distribución del tamaño de la gota. En la Figura 5, se presentan diferentes curvas obtenidas a partir de diversas expresiones matemáticas según el autor o la zona de estudio. (Wischmeier, 1958), (Laws, 1943), (Hudson, 1961), (Kinell, 1973) (Carter, Greer, & Braud, 1974).

Figura 5. Comparación de la relación entre energía cinética e intensidad establecida en diferentes países con diferentes condiciones de lluvia.



En sus investigaciones Kinell, en 1973, determinó que la pérdida de suelo puede obtenerse de la energía total de la lluvia a intensidades superiores a la tasa media de aceptación de los suelos, debido a esto, es importante obtener estimaciones de la relación entre la intensidad y la energía cinética de la lluvia por zonas geográficas (Rosewell, 1986). Sin embargo, es posible que las diferencias observadas se deban a las técnicas utilizadas para medir las gotas de lluvia. A continuación, se expresa la ecuación para la energía cinética obtenida por Kinell:

$$Ec_K = e_{m\acute{a}x} [1 - a e^{-bl}]$$

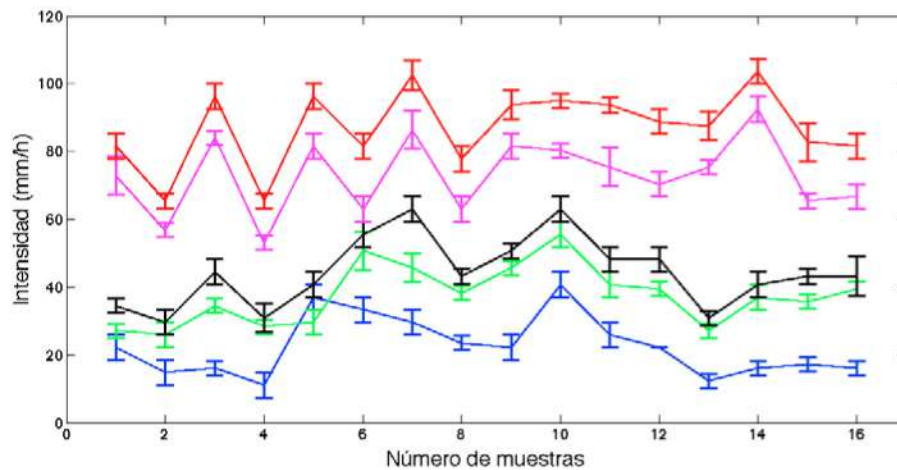
Donde $e_{m\acute{a}x}$, es la energía cinética máxima para una zona geográfica determinada; a y b representan constantes definidas en función de la zona de estudio.

Resultados

Se evaluó el tamaño de las gotas generadas a baja presión, con una velocidad inicial cero, obteniendo una altura de 5.54 mm y un diámetro de 4.55 mm, con lo anterior se determinó un volumen promedio de 75.2 μl , lo cual presenta una masa de 75.2 mg. Con el diámetro anterior y considerando la velocidad inicial de la gota, se determinó que la velocidad media de esta fue de 4.447 m/s.

Para la distribución espacial de la lluvia se utilizaron 16 contenedores vacíos, distribuidos en una malla simétrica ubicados a nivel del suelo. Las dimensiones de la malla fueron de 80 cm \times 80 cm (6400 cm²).

Figura 6. Intensidad de la lluvia obtenida a diferentes intervalos de control sobre la electro-válvula.

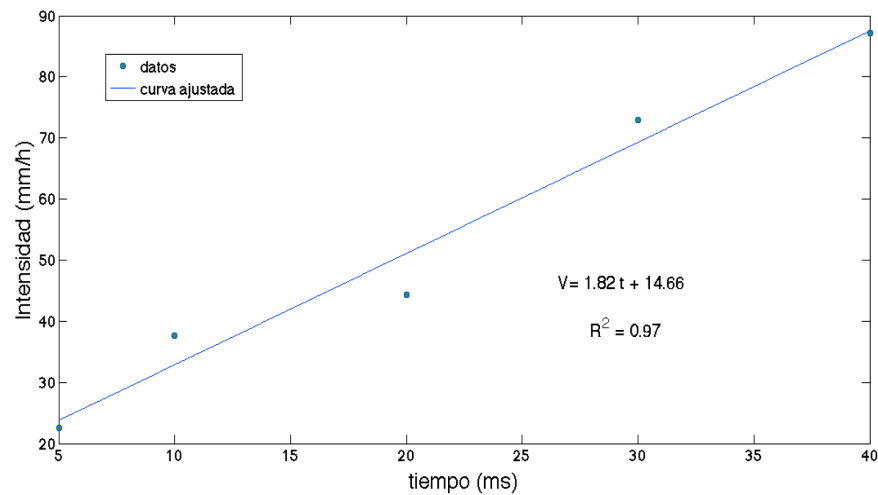


La Figura 6, presenta las mediciones de intensidad realizadas en un tiempo 10 segundos con 5 diferentes tiempos de control sobre la electroválvula (5, 10, 20, 30 y 40 ms), se evaluó el CUC (%) para cada evento obteniéndose los siguientes valores 69.52, 81.72, 82.46, 87.53 y 89.38, lo que representa un buen grado de uniformidad. Lo anterior se logró modificando la estructura, distribuyendo la presión del agua de manera uniforme y evitando holguras en la tubería. Sin embargo, se determinó para la intensidad menor un CUC deficiente, lo cual se debió a la presión mínima utilizada, por otro lado, al aumentarla se determinaron CUC buenos para las otras pruebas, lo que marca una relación clara entre la presión ejercida y la uniformidad de la lluvia simulada, es importante señalar que las variaciones presentes en la intensidad

de salida también están asociadas a imperfecciones en el hueco realizado, a residuos por la perforación y al ángulo de la perforación en la tubería.

Se determinaron las energías cinéticas ($J/mm\ m^2$) para cada intensidad de lluvia simulada siendo 23.83, 25.13, 25.61, 27.09 y 27.59, utilizando el modelo de Kinell utilizando los mismos coeficientes calculados para Florida, debido a la cercanía geográfica con México, estos valores corresponden a lluvias moderadas a intensas lo cual es aceptable debido a la búsqueda de factores que promueven la erosión del suelo.

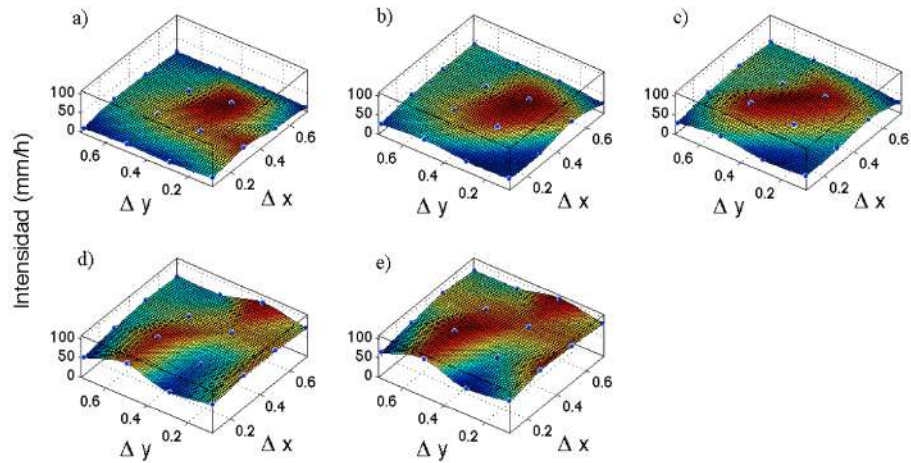
Figura 7. Promedios de Intensidad de la lluvia obtenida a diferentes intervalos de control sobre la electro-válvula con ajuste lineal.



Para el desarrollo del control de la electroválvula se realizó el promedio de la intensidad en cada uno de los tiempos de control efectuados, obteniéndose la gráfica de la Figura 7. En esta se presenta la ecuación lineal obtenida con un ajuste por mínimos cuadrados de 97%, lo cual expresa la precisión en el control de la intensidad del simulador de lluvia, además de la uniformidad en la distribución espacial mostrada anteriormente.

En la Figura 8, se observa la homogeneidad en la distribución espacial obtenida para cinco diferentes intensidades de lluvia. El coeficiente de uniformidad obtenido fue de 82.12% en promedio para los diferentes tiempos de apertura de la electro-válvula, lo cual es considerado como aceptable (Martínez-Mena, Abadía, & Castillo Sánchez, 2001). A pesar de los ajustes mecánicos realizados en el sistema se observa una tendencia a enfocar la intensidad en la parte central del área de impacto, por lo cual se requiere analizar cambios en el diseño para minimizar este efecto.

Figura 8. Distribución espacial de la Intensidad de la lluvia obtenida a cinco diferentes intervalos de control de la electro-válvula
a) 5 ms, b) 10 ms, c) 20 ms, d) 30 ms y e) 40 ms.



Conclusiones

El simulador construido fue de bajo costo y modular, presentó a diferentes tiempos de apertura de la electroválvula un coeficiente de uniformidad superior al 90%. Para una presión de 20 Pa, con un caudal de 1.5 l/s y una altura de 2 metros, se obtuvo un diámetro de gota de 4.5467 mm y una energía cinética de 23.83 para una lluvia de baja intensidad hasta 27.59 J/mm m² que corresponde a una lluvia muy intensa, logrando un coeficiente de uniformidad de 82.12%, lo cual se considera como aceptable, para la simulación de la lluvia se obtuvo un ajuste por mínimos cuadrados de 97% lo cual indica una alta repetitividad del sistema, logrando en conjunto lluvias simuladas comparadas a las presentadas en aquellas naturales. Se desarrolló y evaluó un sistema que pretende estudiar a futuro problemas de erosión en el suelo debido a la precipitación simulando las condiciones reales de una lluvia natural.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Moussouni, L. M. (2014). The Effect of Raindrop Kinetic Energy on Soil Erodibility. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* , 8 (12), 874-878.
- Abudi, L., Carmi, G., & Berliner, P. (6 de August de 2012). Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology* , 76-81.
- Blanquies, J., Scharff, M., & Hallock, B. (2003). The Design and Construction of a Rainfall Simulator. *International Erosion Control Association (IECA), 34th Annual Conference and Expo., Las Vegas, Nevada, February 24-28, 2003*. Las Vegas, Nevada.
- Benito Rueda, E., & Gomez-Ulla, A. &-F. (1986). Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erodabilidad del suelo y estabilidad de los agragados al agua. *Anales de Edafología y Agrobiología* , XLV (9-10), 1115-1126.
- Brandt, C. J. (1989). The size distribution of thoughfall drops under vegetation canopies. *Catena* (16), 507-524.
- Carreras Nampulá, J. L., García Lara, C. M., Espinoza Medinilla, E. E., González Herrera, R., & Medina Sansón, L. (2015). Análisis de la intensidad y duración de la lluvia simulada mediante manipulación manual, para el diseño y construcción de un simulador de lluvias. *Revista de Ciencias de la UNICACH* , 9 (2), 73-78.
- Carter, C. E., Greer, J. D., & Braud, H. J. (1974). Raindrop characteristics in south central United States. *Trans. ASAE* (17), 1033-1037.
- Cerdá, A., & Ibañez, S. &. (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology* (11), 163-170.
- Chow, W. T. (1965). Raindrop production for laboratory watershed experimentation. *J. Geophys. Res.* , 70 (24), 6111-6119.
- Christian Salles, J. P. (1999). Measurement of Simulated Drop Size Distribution with an Optical Spectro Pluviometer: Sample Size Considerations. *Earth Surf. Process. Landforms* (24), 545-556.
- G. B. Paige, J. J. (2003). The Walnut Gulch Rainfall Simulator: A Computer-Controlled Variable Intensity Rainfall Simulator. *Applied Engineering in Agriculture* , 20 (1), 25-31.
- Gopinath Kathiravelu, T. L. (2016). Rain Drop Measurement Techniques: A Review. *Water* , 8 (29), 20.
- Grismer, M. (2012). Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *CALIFORNIA AGRICULTURE* , 66 (3), 102-107.
- Gunn, R. &. (1949). Terminal Velocity of water droplets in stagnat air. *J. Meteorol.* (6), 243-248.

- Hudson, N. W. (1971). *Soil Conservation*. London: B. T. Batsford Ltd.
- Hudson, N. W. (1964). The flour pellet method for measuring the size of raindrops. *Department of conservation and extension. Research Bulletin* (4), 1-28.
- Hudson, N. W. (1961). An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of subtropical rainfall. *Rhod. Sci. Assoc. Proc. Trans.* (159), 14-25.
- I. Abudi, G. C. (2012). Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology* , 454-455, 76-81.
- Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2012). *El uso de un simulador de lluvia*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Jau-Yau, L., Chih-Chiang, S., Tai-Fang, L., & Ming-Ming, M. (2008). Number and volume raindrop size distributions in Taiwan. *Hydrological Processes* , 22 (13), 2148-2158.
- Kamphorst, A. (1987). A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility. *Netherlands Journal of Agricultural Science* (35), 407-415.
- Kinell, P. I. (1973). The problem of assessing the erosive power of rainfall from meteorological observations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* (37), 617-621.
- L. Wanga, Z. S. (2014). Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology* , 512 (6), 168-176.
- Laws, J. O. (1943). The relation of raindrop size to intensity. *Trans. Amer. Geophys. Union* (24), 452-459.
- Marelli, H. J., Mir, B. M., Arce, J., & Lattanzi, A. (1984). *Evaluación de erosión hídrica en suelo labrado* (Vol. 8). Argentina: Suelos y Agroclimatología.
- Marelli, H., Arce, J.M., & Masiero, B. (1986). Simulador de lluvias para investigación básica en conservación de suelos. *Pub. Técn.* No 8 , 15.
- Martínez-Mena, M. D., Abadía, R., & Castillo Sánchez, V. M. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *C & G* (15(1-2)), 31-43.
- Meyer, L. D. (1958). Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural Engineering* (39), 644-648.
- Meyer, L. D. (1965). The Design and Construction of a Rainfall Simulator. *Trans of the ASAE* , 8.
- Meyer, L. D. (1979). Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sid slopes. *Trans of the ASAE* (22), 100-103.

- Moazed, H., Bavi, A., Boroomand-Nasab, S., & Naseri, A. &. (2010). Effects of climatic and hydraulic parameters on water uniformity coefficient in solid set systems. *Journal of Applied Sciences* (10), 1792-1796.
- Morin, J., & Goldberg, D. &. (1967). A rainfall simulator with a rotating disc. *Trans of the ASAE* , 8 (1), 67-68.
- Multchler, C. K. (1967). Parameters for describing raindrop splash. *Journal of Soil and Water Conservation* , 22 (3), 91-94.
- Navas, A., & Alberto, F. M. (1990). Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology* (3), 385-397.
- Ognjen Gabric, D. P. (2014). Uncertainty assessment of rainfall simulator uniformity coefficient. *Journal of Faculty of Civil Engineering* , 661-667.
- Parsakhoo, A., Lotfalian, M., Kavian, A., Hoseini, S., & Demir, M. (2012). Calibration of a portable single nozzle rainfall simulator for soil erodibility study in hyrcanian forests. *African Journal of agricultural reseearch*, 7 (27).
- Rosewell, C. J. (1986). Rainfall Kinetic Energy in Eastern Australia. *Journal of Climate and Applied Meteorology* , 25, 1695-1701.
- Rostagno, C. M. (1995). Diseño de un simulador de lluvia para estudios de infiltración y erosión de suelos. *Ciencia del Suelo* , 13, 41-43.
- Salvador, R; Bautista-Capetillo, C; Burguete, J; Zapata, N; Serreta, A; Playán, E. (2009). A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers. *Irrigation Science* , 27 (4), 307-317.
- Sanroque, P., Rubio, J. L., & Sánchez, J. (1984). Simulador de lluvia para el estudio de la erosionabilidad del suelo en el laboratorio. *I Congreso de Geología*, I, 788-794.
- Sílvia C. P. Carvalho, J. L. (2014). Using meshes to change the characteristics of simulated rainfall produced by spray nozzles. *International Soil and Water Conservation Research* , 2 (2), 67-78.
- Wischmeier, W. H. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Amer. Geophys. Union* (39), 285-291.
- Vaze, J. &. (2003). Study of pollutant washoff from small impervious experimental plots. *Water Resources Research* (39), n/a.
- Wiesner, J. (1985). Bietraege zur Kenntniss des tropi Regens. *K. Akad Will Math. Naturw. Klesse* (104), 1397-1434.