



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TESIS**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y  
CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE  
LLUVIAS”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN  
DESARROLLO SUSTENTABLE Y  
GESTIÓN DE RIESGOS**

**PRESENTA**

**ING. JOSÉ LUIS CARRERAS NAMPULÁ**

**DIRECTOR**

**DR. EDUARDO ESTANISLAO ESPINOZA MEDINILLA**

**CODIRECTOR**

**DR. CARLOS MANUEL GARCÍA LARA**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

**Enero 2017**



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

## **TESIS**

### **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

### **MAESTRO EN CIENCIAS EN DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN DE RIESGOS**

**PRESENTA**

**ING. JOSÉ LUIS CARRERAS NAMPULÁ**

**DIRECTOR**

**DR. EDUARDO ESTANISLAO ESPINOZA MEDINILLA**

**CODIRECTOR**

**DR. CARLOS MANUEL GARCÍA LARA**

**ASESORES**

**DR. RAÚL GONZÁLEZ HERRERA**

**DR. LEOPOLDO MEDINA SANSÓN**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

**Enero 2017**

## **Agradecimientos**

Primeramente, agradezco a **Dios** por darme la vida y estar siempre conmigo en todo momento, por guiarme y darme la fuerza necesaria para seguir por el buen camino. Sin él no estaría escribiendo estas líneas y alcanzando un objetivo profesional más.

A la **Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas**, mi “**Alma Mater**” por haberme cobijado y brindarme todo lo necesario para mi formación profesional, a los maestros que día con día se esforzaron para transmitir sus conocimientos y ser parte de mi aprendizaje, gracias.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**. Por el apoyo económico durante los dos años de estudios, ya que me permitió la realización de la maestría.

Asimismo, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mis asesores de tesis que más que mis asesores los considero mis amigos:

Al **Dr. Eduardo E. Espinoza Medinilla**, por haber confiado en mí persona, por su amistad y haber dedicado tiempo, apoyo incondicional y sugerencias para la realización de este trabajo.

Al **Dr. Carlos Manuel García Lara**, por su confianza, por sus conocimientos y gran apoyo al haber dedicado tiempo en la revisión, corrección, consejos y aportaciones en este trabajo. Gracias por la paciencia.

Al **Dr. Raúl González Herrera**, por su amistad, por sus valiosas y atinadas observaciones que me permitieron comprender mejor las cosas para la realización de este trabajo.

Al **Dr. Leopoldo Medina Sansón**, por sus excelentes y atinados consejos para la realización de este trabajo.

A mis compañeros de generación por vivir esta aventura conmigo. Gracias por compartir tantos momentos juntos dentro y fuera de la universidad, con gran cariño y admiración les deseo siempre lo mejor.

## **Dedicatoria**

### **A mis padres.**

Sr. José Luis Carreras Melchor

Sra. Edid Anabey Nampulá Molina

Con amor y cariño escribo estas líneas, dándole las gracias por darme la vida y por sus sabios consejos, a ustedes que forjaron un carácter y sembraron en mi la semilla de prosperidad y que ahora está dando frutos. Gracias por que sin ustedes no estaría cumpliendo un sueño más, ustedes son mi más gran ejemplo a seguir y es a ustedes a quien quiero premiar con mi esfuerzo.

Para mí no existe un mejor regalo de Dios que poder tenerlos aún en vida y brindarme esa alegría de decirles gracias papá, gracias mamá por todo el apoyo moral y económico que me han brindado, estoy eternamente agradecido, los quiero mucho.

### **A mi hermana.**

Deyna Teresa, gracias por compartir tantas alegrías, tristezas y grandes momentos en mi vida, te quiero mucho.

### **A mis sobrinas.**

Paulette Anyed y Renata Yhoime. Mis pequeñitas, sé que aún no saben leer, pero espero que algún día éste le sirva para que hagan realidad sus sueños.

### **A toda mi demás familia.**

Que de alguna manera me apoyaron y creyeron en mí.

**Contenido**

<i>Índice de tablas</i> .....	<i>I</i>
<i>Índice de figuras</i> .....	<i>II</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>1</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>2</i>
<i>1. Introducción</i> .....	<i>3</i>
<i>1.1 Objetivos e Hipótesis</i> .....	<i>6</i>
<i>1.1.1 Objetivo General</i> .....	<i>6</i>
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i> .....	<i>6</i>
<i>1.2 Hipótesis</i> .....	<i>6</i>
<i>2. Antecedentes</i> .....	<i>7</i>
<i>2.1 Simuladores de lluvia</i> .....	<i>10</i>
<i>2.2 Tipos de simuladores de lluvia</i> .....	<i>11</i>
<i>2.2.1 Simuladores goteadores</i> .....	<i>11</i>
<i>2.2.2 Simuladores pulverizadores</i> .....	<i>12</i>
<i>2.3 Características deseables de la lluvia simulada</i> .....	<i>14</i>
<i>2.4 Ventajas y desventajas de los simuladores de lluvia</i> .....	<i>14</i>
<i>2.5 Relación entre intensidad, tamaño, velocidad y energía cinética de las precipitaciones</i>	<i>15</i>
<i>2.5.1 Diámetro y distribución de las gotas</i> .....	<i>15</i>
<i>2.5.2 Energía cinética</i> .....	<i>16</i>
<i>2.6 Métodos de medición del tamaño de las gotas</i> .....	<i>17</i>
<i>2.6.1 Método de mancha</i> .....	<i>18</i>
<i>2.6.2 Método de bolitas de harina</i> .....	<i>18</i>
<i>2.6.3 Método fotográfico</i> .....	<i>20</i>
<i>2.6.4 Método de inmersión en aceite</i> .....	<i>21</i>
<i>2.6.5 Disdrómetros</i> .....	<i>21</i>

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

2.7	<i>Modelos aplicados al estudio de la erosión hídrica del suelo</i> .....	22
2.7.1	<i>Tipos de modelos</i> .....	23
3.	<i>Metodología</i> .....	25
3.1	<i>Descripción del simulador de lluvia</i> .....	25
3.1.1	<i>Sistema hidráulico</i> .....	26
3.1.2	<i>Funcionamiento del sistema</i> .....	27
3.2	<i>Calibración del simulador de lluvia</i> .....	29
3.3	<i>Diámetro de la gota de lluvia</i> .....	31
3.4	<i>Velocidad de caída de la gota de lluvia</i> .....	32
3.5	<i>Distribución espacial de la lluvia</i> .....	33
3.6	<i>Energía cinética de la lluvia</i> .....	34
4.	<i>Resultados</i> .....	35
5.	<i>Conclusiones</i> .....	46
6.	<i>Referencias bibliográficas</i> .....	48
	<i>Resultados obtenidos del trabajo</i> .....	59
	<i>Anexos</i> .....	61

## Índice de tablas

<i>Tabla 1. Funciones matemáticas entre energía cinética (EC) e intensidad de la lluvia (I); a y b representan coeficientes empíricos que están en función de la zona de estudio.</i>	16
<i>Tabla 2. Estudios de investigación donde han utilizado el método de bolitas de harina.</i>	19
<i>Tabla 3. Estudios de investigación donde han utilizado el método fotográfico para determinar el tamaño de la gota.</i>	20
<i>Tabla 4. Estudios de investigación donde han determinado el tamaño de la gota utilizado el método de inmersión en aceite.</i>	21
<i>Tabla 5. Estudios donde se han utilizado simuladores de lluvias para evaluar los diferentes efectos que generan las precipitaciones.</i>	61
<i>Tabla 6. Estudios realizados en diferentes países donde han relacionado la energía cinética (<math>J/mm^2</math>) y la intensidad de lluvia. (mm/h).</i>	63
<i>Tabla 7. Lista de materiales utilizado para la construcción del simulador de lluvia.</i>	63
<i>Tabla 8. Lista de los componentes eléctricos para la construcción del circuito eléctrico.</i>	64
<i>Tabla 9. Datos históricos del comportamiento de la precipitación en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, recuperado de la comisión nacional del agua 2015.</i>	65
<i>Tabla 10. Datos de la estación de la facultad de ingeniería ambiental del comportamiento de la precipitación del día 19 de mayo del 2016.</i>	66

**Índice de figuras**

*Figura 1. Simulador de lluvia tipo gotero desarrollado por (Aoki & Sereno, 2006).* \_\_\_\_\_ 12

*Figura 2. Esquema del funcionamiento del simulador de lluvia tipo pulverizador desarrollado por (Kinner & Moody, 2008).* \_\_\_\_\_ 13

*Figura 3. Proceso de deformación de las gotas de lluvia. Fuente (Horstmeyer, 2008).* \_\_\_\_\_ 15

*Figura 4. Comparación de la relación entre energía cinética e intensidad establecida en diferentes países con diferentes condiciones de lluvia.* \_\_\_\_\_ 17

*Figura 5. a) Muestra de gotas sobre la harina en una bandeja de 2 cm de profundidad, b) Muestras de bolitas de harina después del secado en la estufa.* \_\_\_\_\_ 19

*Figura 6. Criterios de clasificación de los modelos, procesos contemplados y principales datos de entrada.* \_\_\_\_\_ 24

*Figura 7. Esquema metodológico.* \_\_\_\_\_ 25

*Figura 8. Diseño de la estructura del simulador de lluvias.* \_\_\_\_\_ 26

*Figura 9. Dispositivo utilizado para trazar una línea recta en el tubo.* \_\_\_\_\_ 27

*Figura 10. Dimensiones de los orificios realizados en el sistema de aspersion.* \_\_\_\_\_ 27

*Figura 11. Señal del dispositivo detector de cruce por cero, pulsos a 0°, 180° y 360°.* \_\_\_\_\_ 28

*Figura 12. Sistemas de control por gravedad a) Válvula esfera de latón roscable de 1 pulgada, b) electroválvula marca Daewoo.* \_\_\_\_\_ 29

*Figura 13. Sistemas de control a presión a) Válvula esfera de latón roscable de 1 pulgada con límites de posición, b) Válvula esfera de latón de 1 pulgada automatizada.* \_\_\_\_\_ 29

*Figura 14. Climograma promedio mensual de 1988 - 2013. Elaboración propia con datos de CNA (2015).* \_\_\_\_\_ 30

*Figura 15. Comportamiento de la precipitación del día 19 de mayo del 2016 en Ciudad Universitaria (UNICACH).* \_\_\_\_\_ 31

*Figura 16. Cortes infinitesimales de solidos de revolución.* \_\_\_\_\_ 32

*Figura 17. Distribución espacial de los recipientes colectores.* \_\_\_\_\_ 33

*Figura 18. Comportamiento de la intensidad de la lluvia a diferentes intervalos de control sobre la válvula.* \_\_\_\_\_ 35

*Figura 19. Distribución espacial de la Intensidad de la lluvia obtenida a través del control manual durante a) 30° con 60 s, b) 30° con 120 s, c) 40° con 60 s, d) 40° con 120 s.* \_\_\_\_\_ 36

*Figura 20. Intensidad de la lluvia a diferentes intervalos de control sobre la electroválvula.* \_\_\_\_\_ 37



<i>Figura 21. Promedios de intensidad de la lluvia obtenida a diferentes intervalos de control sobre la electroválvula con ajuste lineal.</i>	38
<i>Figura 22. Distribución espacial de la intensidad de la lluvia obtenida a cinco diferentes intervalos de control de la electroválvula a) 5 ms, b) 10 ms, c) 20 ms, d) 30 ms y e) 40 ms.</i>	39
<i>Figura 23. Intensidad de la lluvia obtenida con control manual con límites de posición a diferentes grados de apertura.</i>	40
<i>Figura 24. Promedios de la intensidad de lluvia a diferentes intervalos de control con ajuste lineal.</i>	41
<i>Figura 25. Distribución espacial de la intensidad de la lluvia a diferentes grados de apertura de la válvula con límite de posición a) 10°, b) 20°, c) 30°, d) 40°, e) 50°, f) 60° y g) 70°.</i>	42
<i>Figura 26. Intensidad de la lluvia obtenida a través del control automatizado a diferentes intervalos de control.</i>	43
<i>Figura 27. Promedios de intensidad de la lluvia obtenida a través del control automatizado a diferentes intervalos de control con su ajuste lineal.</i>	44
<i>Figura 28. Distribución espacial de la intensidad de la lluvia obtenida a diferentes intervalos de control automatizado a) 10°, b) 20°, c) 30°, d) 40°, e) 50°, f) 60° y g) 70°.</i>	45
<i>Figura 29. Diagrama del circuito eléctrico.</i>	64
<i>Figura 30. Placa con los diferentes componentes eléctricos.</i>	64

## **Resumen**

El presente trabajo describe el diseño, construcción y operación de un simulador de lluvias híbrido empleando materiales de bajo costo y de fácil transporte, permitió controlar variables como intensidad, tiempo y distribución. Se desarrollaron dos sistemas con diferente caudal el primero fue controlado por gravedad con una válvula esfera y una electroválvula y el segundo aplicando presión controlada con una válvula con límites de posición y una válvula automatizada a través de un detector de cruce por cero, una tarjeta de control y una etapa potencia. Con el sistema de control manual se obtuvo una distribución espacial de lluvia simulada en promedio del 92.8% y una energía cinética de 28.9 J/mm m<sup>2</sup> y con la electroválvula el comportamiento en la distribución espacial de la lluvia fue superior al 80%, con una energía cinética superior a 27 J/mm m<sup>2</sup> y con un control del caudal de 97% de precisión. Los valores del comportamiento en la distribución espacial de la lluvia obtenidos con el sistema a presión fueron uniformes a través del sistema de control manual con límites de posición; y automatizado con un CUC de 84.9% y 87.6% respectivamente, con una energía cinética superior a 28.0 J/mm m<sup>2</sup> para los dos mecanismos y con un control de caudal del 94% y 93%, respectivamente.

**Palabras claves:** Lluvia simulada, distribución espacial, calibración, intensidad, tamaño de la gota, energía cinética.

**Abstract**

The present work describes the design, construction and operation of a simulator of rainfall hybrid using materials of low cost and easy to transport, allowed control variables such as intensity, time and distribution. Developed two systems with different flow conditions the first controlled by gravity with a valve area and a solenoid valve and the second applying pressure controlled with a valve with position limits and an automated valve through a detector of zero crossing, a control card and a power stage. With the manual control system was obtained a spatial distribution of simulated rain on average of 92.8% and a kinetic energy of 28.9 J/mm m<sup>2</sup> and with solenoid valve the behavior in the spatial distribution of the rain was higher than 80%, with a kinetic energy greater than 27 J/mm m<sup>2</sup> and with a control of the flow of 97% accuracy. The values of the behavior in the spatial distribution of the rain obtained with the system to pressure were uniform across the manual control system with position limits; and automated with a CUC of 84.9% and 87.6% respectively, with a kinetic energy greater than 28.0 J/mm m<sup>2</sup> for the two mechanisms and with a flow control of 94% and 93%, respectively.

**Keywords:** Simulated rain, spatial distribution, calibration, intensity, size of droplet, kinetic energy.

## 1. Introducción

El suelo es un recurso vital y en gran medida no renovable, lo que implica que su pérdida y degradación no son reversibles en el periodo de una vida humana (FAO, 2015). Cada vez se sabe más acerca de los problemas que afectan al suelo gracias-a las investigaciones que se han realizado en los últimos años.

La erosión del suelo es uno de los principales problemas de degradación en el mundo, la cual ocasiona impactos ambientales y económicos a través de sus efectos sobre los sistemas de producción agrícola, de infraestructura y de calidad del agua, alterando la calidad de vida de la población y dificultando la seguridad alimentaria lo cual representa un serio problema para el desarrollo sostenible (Qing-feng *et al.*, 2008).

A medida que las ciudades crecen por la migración del campo a la ciudad, las necesidades de sus habitantes sobre el suelo aumentan considerablemente, ejerciendo una presión cada vez mayor sobre este recurso natural, siendo este el más afectado por las actividades antropogénicas, agrícolas e industriales que a menudo resulta en la degradación del suelo y la disminución de sus funciones (FAO, 2009). Los efectos hidrológicos por el crecimiento de la población en las ciudades son el aumento de la cantidad de escorrentía, tierras erosionadas, disminución de la recarga de los acuíferos y la eliminación de los cauces de las corrientes naturales.

Por su ubicación geográfica, el estado de Chiapas ha sido afectado en los últimos años por fenómenos meteorológicos extremos, causando problemas en los sistemas de producción agrícola, pecuaria y forestal al erosionar el suelo, así como también daños a la infraestructura hidroagrícola, de comunicaciones y a las viviendas, y lo que es más lamentable de pérdidas humanas, a través de los escurrimientos que se generan (Pérez-Nieto *et al.*, 2012).

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

Uno de los fenómenos meteorológicos extremos que ha afectado el estado fue ocasionado por el ciclón tropical Stan en octubre del 2005, el cual causó daños en 71 municipios, ocasionando la muerte de 14 personas, así como 300 mil damnificados. Otra afectación producto de las lluvias intensas fue la que sucedió en noviembre del 2007 en la localidad de San Juan de Grijalva del municipio de Ostuacan, la cual se vio afectada por un gran deslizamiento de ladera que originó una gran ola producto de deslizamiento, causando la muerte de 25 de sus habitantes.

En particular la ciudad de Tuxtla Gutiérrez capital del estado, se ha visto afectada por los diferentes sucesos hidrológicos que han afectado el estado de Chiapas, los cuales han ocasionado inundaciones pluviales y fluviales en la zona urbana, dejando daños materiales e incluso causando muerte entre su población. Entre las afectaciones se puede mencionar las ocasionadas por el fenómeno meteorológico “Larry” en octubre del 2003 causando inundaciones por el desbordamiento del río Sabinal, luego de una precipitación de más de 83 mm. En octubre del 2005 el municipio se volvió ver afectado por la tormenta tropical “Stan” afectando a más de 60 mil tuxtlecos por la falta de agua potable debido a las lluvias permanentes, otro fenómeno meteorológico que afectó a la capital fue la tormenta tropical “Dean” en agosto del 2007, la cual se presentó con lluvias de 62.4 mm en la zona poniente, de 44.3 mm en la zona nororiente y de 55.7 mm en la zona suroriente, la cual causó inundaciones. El 12 de agosto del 2015 la capital chiapaneca se vio afectada a causa de una lluvia puntual de 111.6 mm sobre el lado poniente y de 80 mm sobre el lado oriente ocasionando el arrastre de vehículos, así como afectaciones en 11 colonias de la ciudad, recientemente una lluvia severa ocurrida el 02 de septiembre de 2016 afectó al municipio causando inundaciones y la muerte de tres personas.

Uno de los problemas para estudiar estos procesos es la necesidad de contar con una lluvia natural, pues es muy difícil saber con certeza, donde y cuando lloverá, así como, sí el evento tendrá la intensidad y duración necesaria para producir algún efecto.

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

Para estudiar este u otros procesos se necesitan de datos recopilados en periodos largos, por lo cual, se han desarrollado diferentes instrumentos que permiten reproducir bajo escenarios controladas los efectos de la precipitación, siendo uno de estos instrumentos los simuladores de lluvia, los cuales tienen diferentes diseños según su aplicación. Algunos tienen boquillas, otros tienen placas con orificio o agujas hipodérmicas de donde emergen gotas con una intensidad definida, asimismo poseen diferentes sistemas mecánicos que van desde mangueras, tuberías de policlorato de vinilo (PVC), tuberías metálicas además de tener formas cuadradas, rectangulares y triangulares según las necesidades de cada investigador.

A pesar de que se han desarrollado diferentes diseños de simuladores de lluvia estos tienen un costo muy elevado, los materiales utilizados en su construcción no son fáciles de conseguir y aunado a esto no permiten el control con diferentes mecanismos. Por tales motivos se diseñó y construyó un simulador de lluvias tipo híbrido, de bajo costo, de fácil construcción e instalación tanto en laboratorio como en campo, con un sistema generador de gotas con tubos de PVC, los cuales permiten trabajar con diferentes rangos de intensidad por gravedad o presión, logrando controlarse mediante sistema de control manual o automatizado.

Esto hace evidente la necesidad de realizar este tipo de trabajos, ya que permite minimizar los impactos sociales y económicos que generan las precipitaciones en el estado y principalmente en el municipio por no disponer de los medios apropiados para su obtención o por desconocimiento de la importancia de la misma.

## **1.1 Objetivos e Hipótesis**

### **1.1.1 Objetivo General**

- ✓ Diseñar, construir y calibrar un simulador automático de lluvias que permita controlar diferentes parámetros físicos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Caracterizar el dispositivo mecánico para mejorar la distribución de la presión.
- ✓ Caracterizar el sistema electrónico para determinar diferentes intensidades de lluvia.
- ✓ Determinar el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) para cada intensidad.
- ✓ Calcular el tamaño de la gota para evaluar la velocidad de caída.
- ✓ Controlar la intensidad para determinar la energía cinética de la lluvia.

## **1.2 Hipótesis**

- Es posible desarrollar un simulador de lluvias que se asemeje a una lluvia natural y que permita comparar su efecto con relación a una lluvia natural.

## 2. Antecedentes

Existen diferentes estudios que se han desarrollado utilizando simuladores de lluvias (Anexo 1) para el análisis de los diferentes procesos involucrados en la erosión, en Chile, (Lagos & Pizarro, 2006) utilizaron un simulador de lluvias basado en (Cazalac, 2004) para el estudio de la erosión hídrica en donde compararon distintos métodos de medición de pérdida de suelos. El simulador consistió en una línea de siete aspersores con espaciamientos de 1 metro (m), los cuales funcionaban con agua presurizada y cubrían una superficie de 5 m de largo y 2 m de ancho.

El estudio desarrollado por (Palmaricciotti *et al*, 2014) realizaron un simulador de lluvias tipo goteador, el cual consistió en una base de 1 m<sup>2</sup> y una altura de 2.5 m, el equipo estaba conformado por un sistema de 50 tubos con 1650 goteros de goma separados 6 cm entre sí, el sistema sostenía una malla de 3 mm debajo de los tubos para generar gotas de diferentes tamaños, el equipo permitió trabajar en un rango de entre 30 y 300 mm/h durante 30 min, obteniendo un tamaño de gota de 0.4 y 5 mm con una velocidad promedio de caída de 1.8 a 2.6 m/s, respectivamente.

Asimismo (Abudi *et al.*, 2012) diseñaron y construyeron un simulador de lluvias de boquillas pulverizadoras, el dispositivo gira a través de un motor eléctrico y por medio de un engrane disminuyeron la velocidad de giro, el equipo fue empleado para estudiar los procesos de escorrentía y erosión del suelo sobre parcelas de 1 x 2 m, el equipo trabajo con una intensidad de 130 mm/h, consiguiendo tamaños de gotas entre 1 – 1.2 mm y 2.4 - 3 mm con una velocidad terminal de entre 4 y 5 m/s y de 7 y 8 m/s, respectivamente.

En otro estudio usaron un simulador de lluvias tipo pulverizador para obtener un índice modificado de erodabilidad mediante el cual evaluaron las tasas de erosión anual para caminos forestales. Con el simulador realizaron pruebas durante 30 min a una intensidad de 100 mm h<sup>-1</sup>



## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

sobre parcelas de 1.5 x 2 m de largo; con una energía cinética estimada de 0.295 MJ ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> similar a la energía cinética de una lluvia de alta intensidad (Sheridan *et al.*, 2008).

Por su parte (Arnaez *et al.*, 2007), emplearon un simulador de lluvia tipo pulverizador para comparar la escorrentía y producción de sedimentos bajo distintas intensidades de lluvia en una plantación de viñas en España. El simulador consistió en un aspersor ubicado a 2.5 m de altura con agua presurizada y simulaciones durante 30 min, sobre una parcela de 0.45 m de diámetro. Utilizaron tres tipos de aspersores para tres intensidades de lluvia: menor a 40, entre 45 y 70, y mayor a 70 mm h<sup>-1</sup> obteniendo una energía cinética de 9.1, 11.6 y 15.6 kJ m<sup>-2</sup> m<sup>1</sup>, respectivamente. Los autores mencionan, entre sus conclusiones que tanto el reducido tamaño de la parcela como la dificultad de reproducir lluvias naturales limitan la información obtenida.

En la región central de la provincia de Córdoba, Argentina (Aoki & Sereno, 2006), utilizaron un microsimulador de lluvias tipo goteador para estudiar la infiltración del agua en el suelo sobre una parcela de 0.25 m x 0.25 m, el cual consistía en una caja porta goteros de acrílico, en cuya base se encontraban 49 tubos plásticos formadores de gotas donde la presión del agua estaba dada por la altura del depósito de agua. Formándose gotas de 4.7 milímetros (mm) de diámetro en promedio para una altura de caída de 1.5 m, la energía cinética estimada fue de 12.7 kJ m<sup>-2</sup> m<sup>1</sup>. Entre sus conclusiones los autores mencionan que la velocidad de infiltración en el agroecosistema no fue afectada por las distintas condiciones edáficas de los sitios, intensidad de lluvia simulada y humedad antecedente.

En el estudio realizado por (Echeverría *et al.*, 2006), emplearon un simulador de lluvias portátil tipo pulverizador para calcular la erodabilidad de tres suelos representativos del sur de la región semiárida argentina, que posteriormente la compararon con la estimada por los modelos WEPP y USLE. El estudio lo realizaron en suelos Bahía Blanca (SBB), Cabildo (SC) y Villarino (SV) en donde aplicaron dos lluvias consecutivas de 32 mm en 30 min con una energía cinética de

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

275 kJ ha<sup>-1</sup> mm<sup>1</sup>. Las pérdidas de suelo debido a la 1° y 2° lluvia para SV fueron de 3.26 y 5.86 Mg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>; SC 2.04 y 5.53 Mg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>; SBB 0.75 y 2.66 Mg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>; respectivamente.

Asimismo en la unidad Chinchiná, Melanudands en Colombia (Hincapié & Rivera, 2003) manipularon un simulador de lluvias tipo pulverizador para determinar el factor de erodabilidad entre surcos (K-WEPP), el equipo permitió aplicar una intensidad de lluvia de 100 mm.h<sup>-1</sup> durante una hora. Utilizaron tres metodologías para evaluar la erodabilidad entre surcos, la primera en parcelas de 1 m<sup>2</sup> en condiciones de campo; la segunda en moldes de 0.0825 m<sup>2</sup> y muestras no disturbadas en laboratorio; y la tercera en bandejas de 0.0825 m<sup>2</sup> y muestras disturbadas en laboratorio; estas últimas se separaron y se clasificaron por el tamaño de los agregados; 2-1, 1-0.5 y <0.5 mm de diámetro promedio. Se correlacionó entre el factor erodabilidad determinado en campo y laboratorio. El factor K-WEPP determinado en campo varió entre 107.519 a 159.425 kg.s.m<sup>-4</sup>: en laboratorio osciló entre 90.814 kg.s.m<sup>-4</sup> y 2.496, 129 kg.s.m<sup>-4</sup>.

El trabajo realizado por (Martínez-Mena *et al.*, 2001), en la zona del Sureste peninsular en Murcia (España), construyeron un simulador de lluvias tipo pulverizador para estudiar los cambios en las propiedades físicas del suelo sobre parcelas de 2 x 2 m, mediante ocho simulaciones de 20 min de duración. El equipo consistió en una armazón cuadrada de 2.5 m de lado, soportado por cuatro pilares con una altura de 3.60 m. Utilizaron dos tipos de boquillas: la primera trabajó a 100,000 pascales (Pa), con 33 mm h<sup>-1</sup> de intensidad de la lluvia, y la segunda, lo hizo a 90,000 Pa y 60 mm h<sup>-1</sup> de intensidad. El coeficiente de uniformidad de la lluvia fue de 89 y 91, respectivamente. Destacando el bajo consumo de agua del simulador aproximadamente de 200 y 350 litros (l) para cada una de las intensidades durante los 20 min de simulación.

Otro estudio realizado en la Pichincha cerca de Quito en Ecuador (Poulenard *et al.*, 2001), manipularon un simulador de lluvias tipo pulverizador para parcelas naturales de 1 m<sup>2</sup>, en donde llevaron a cabo la simulación de lluvia en dos sitios diferentes para evaluar el efecto en las

propiedades hidrodinámicas del suelo; por su parte (Cerdá *et al.*, 1997) usaron un simulador de lluvias portátil tipo pulverizador para terrenos accidentados sobre parcelas de 0.24 m<sup>2</sup> con un rango de intensidad de 54.6 mm h<sup>-1</sup> durante 20 min.

En la república mexicana existen trabajos realizados en donde se han utilizado simuladores de lluvia tipo pulverizador (Marelli *et al.*, 1984) para evaluar la infiltración, escurrimiento, y erosión del suelo bajo diferentes situaciones: 1) suelo labrado sin cobertura; 2) suelo labrado sin cobertura y con bordes; 3) suelo labrado con rastrojo en superficie y 4) suelo labrado con rastrojo incorporado. El equipo trabajó en un rango de intensidad de entre 60 y 120 mm/h sobre parcelas de 4 x 10 m aplicando lluvias durante 15, 30 y 60 min. Los resultados mostraron que los mayores volúmenes de escurrimiento y de infiltración ocurrieron en la primera lluvia. Asimismo (Marelli *et al.*, 1984; Marelli *et al.*, 1986) realizaron un simulador de lluvias tipo pulverizador con movimiento oscilante con el cual simularon lluvias sobre parcelas de 1m<sup>2</sup>.

### **2.1 Simuladores de lluvia**

Uno de los más grandes problemas en la investigación de la erosión hídrica es la necesidad de contar con una lluvia natural para observar la pérdida de suelo, ya que es imposible predecir con certeza dónde y cuándo ocurrirán los eventos, así como su intensidad y duración, además si estas características son suficientes para producir procesos de infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo.

Para el estudio de estos procesos se han desarrollado instrumentos que reproduzcan bajo escenarios controlados los efectos de la precipitación, siendo estos los simuladores de lluvia, el cual es un instrumento de investigación diseñado para aplicar agua de forma similar a los episodios naturales (Benito *et al.*, 2001; Humphry *et al.*, 2002; Ibáñez *et al.*, 2012). Estos instrumentos permiten realizar estudios sobre las interacciones suelo-lluvia bajo condiciones controladas, además de observar el efecto de las lluvias como generador de costras o sellos superficiales (Carmi & Berliner, 2008). Los datos obtenidos a partir de ensayos con simuladores de lluvia permiten

describir, mediante modelos matemáticos el proceso de infiltración de agua en el suelo (Aoki & Sereno, 2006) ya que 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 (Moussouni *et al.*, 2014).

### **2.2 Tipos de simuladores de lluvia**

Existe una amplia bibliografía acerca de los distintos simuladores de lluvia que han sido utilizados en los últimos años por distintos investigadores que van desde sistemas sencillos hasta sistemas más complejos. Los diferentes tipos son agrupados con base al mecanismo generador de gotas y seleccionados según su tamaño, si usa agua presurizada o por gravedad, o si la emisión del agua es de forma rotatoria, intermitente o de aspersion continua, en función de la disponibilidad, costos de construcción y del objetivo experimental. Sin embargo, se pueden diferenciar dos clases principales de simuladores de lluvia: los goteadores sin presión y los pulverizadores.

#### **2.2.1 Simuladores goteadores**

En este tipo de simulador la formación de gotas se genera en la punta de los materiales empleados para tal efecto (tubos finos de vidrio o agujas hipodérmicas), consiguiendo que su peso supere la tensión superficial y permita caer la gota, el tamaño y formación de la gota está relacionada con la dimensión del tubo o aguja hipodérmica, así como de la presión de trabajo (Figura 1). Su costo es relativamente bajo, pero la velocidad final deseada se consigue a alturas de caída de 12 m y en aquellas gotas de mayor diámetro (Gopinath *et al.*, 2016).

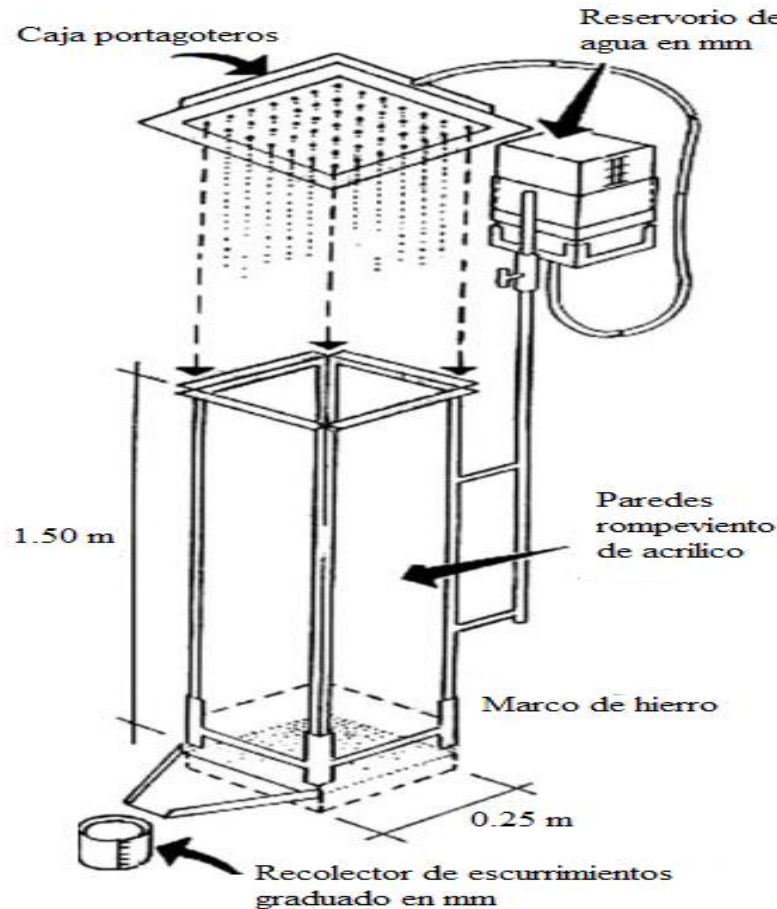


Figura 1. Simulador de lluvia tipo gotero desarrollado por (Aoki & Sereno, 2006).

### 2.2.2 Simuladores pulverizadores

Este tipo de simulador el agua sale a una velocidad inicial diferente de cero (Figura 2) por estar sometida a una presión inicial determinada (Ibáñez *et al.*, 2012), permitiendo proporcionar lluvias de diferentes intensidades, por lo cual es posible simular las características de la lluvia natural según la zona de estudio (Meyer, 1958; Benito *et al.*, 1986; Navas *et al.*, 1990; Cerdà *et al.*, 1997; Abudi, *et al.*, 2012). Uno de los principales problemas de este simulador es que requiere intensidades muy elevadas para generar 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.

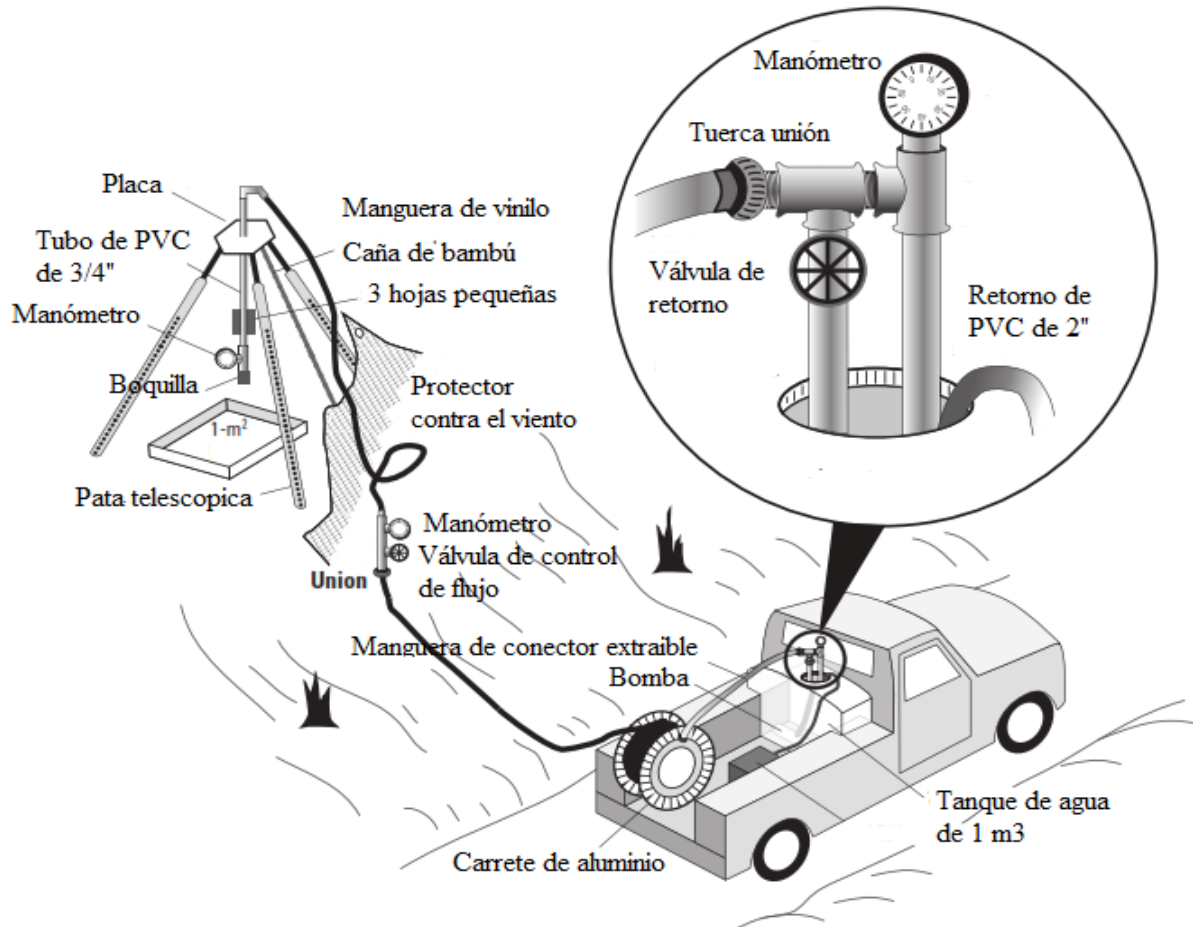


Figura 2. Esquema del funcionamiento del simulador de lluvia tipo pulverizador desarrollado por (Kinner & Moody, 2008).

Su principal ventaja es que, en función de la boquilla seleccionada, de la presión de salida del agua y de la altura a la que se sitúa se pueden obtener lluvias de intensidades y energías muy diferentes, seleccionando aquellas que correspondan a las características de la lluvia natural de la zona. Su mayor problema radica en que suelen obtenerse distribuciones de tamaños óptimos a intensidades demasiado elevadas por lo que se han empleado mecanismos que permitan disminuir la intensidad y mantener la distribución de las gotas. Como sistemas correctores se han utilizado discos giratorios con una muesca radial (Ognjen Gabric, 2014) o ubicando una boquilla en un sistema oscilante (Paige *et al.*, 2004).

### **2.3 Características deseables de la lluvia simulada**

Para simular una lluvia es conveniente reproducir lo más exactamente posible todas las características físicas de una lluvia natural, aunque es admisible cierta flexibilidad debido a la complejidad de una lluvia natural (Hudson, 1997), pero no es indispensable fabricar un simulador perfecto, si no reproducir aquellas variables que son de interés, limitado por las cualidades físicas del aparato. Las principales características de la lluvia natural que deben conseguir los simuladores de lluvia son (Blanquies *et al.*, 2003; Carvalho *et al.*, 2014):

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

### **2.4 Ventajas y desventajas de los simuladores de lluvia**

Las principales ventajas del uso de los simuladores de lluvia son:

- Su portabilidad.
- Reproduce una lluvia varias veces reduciendo el tiempo de experimentación.
- Facilita la comparación de ensayos bajo un mismo sistema de simulación de lluvia.
- Permite el control de variables como (intensidad, duración y magnitud), así como de las condiciones de la superficie del suelo (cobertura, tipo y uso de suelo).

Dentro de las desventajas principales que presentan estos instrumentos se pueden mencionar:

- No reproducen con exactitud una lluvia natural.
- Son poco representativos al llover sobre un área muy pequeña.

- Es probable que se vean afectados por el viento, aunque sea posible solucionar con la aplicación de un protector de viento, lo cual reduce la ventaja de simplicidad.
- Las mediciones obtenidas a partir de pruebas efectuadas con simuladores en pequeñas parcelas no pueden extrapolarse a superficies extensas.

## 2.5 Relación entre intensidad, tamaño, velocidad y energía cinética de las precipitaciones

### 2.5.1 Diámetro y distribución de las gotas

Dado que las precipitaciones poseen diferentes intensidades estas se componen por gotas de diferentes tamaños, por lo que se hace necesario determinar la proporción de gotas grandes y pequeñas, es decir, la distribución de tamaños y el modo en que estas varían en los diferentes tipos de precipitaciones. Cabe mencionar que una precipitación de baja intensidad se forma por gotas pequeñas, mientras que una precipitación intensa se compone de gotas de tamaños mayores. La relación entre la intensidad de lluvia y el tamaño de las gotas se puede explicar en el proceso de formación y desarrollo de las precipitaciones (Figura 3).

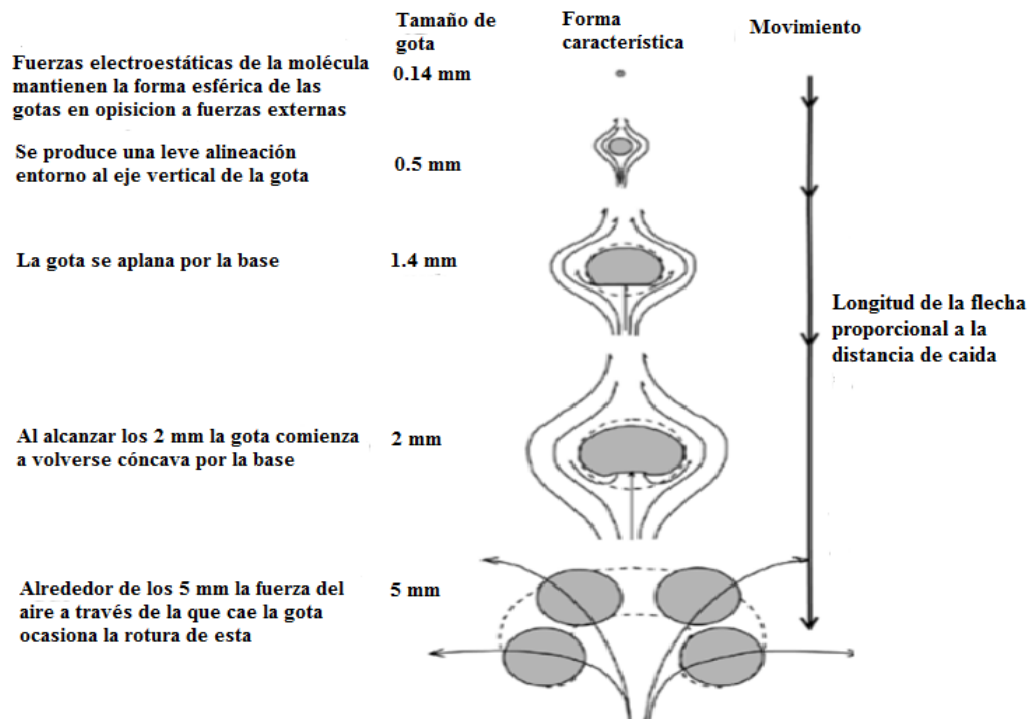


Figura 3. Proceso de deformación de las gotas de lluvia. Fuente (Horstmeyer, 2008).



### 2.5.2 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, la cual se basa en la suma de la energía cinética de las gotas individuales, en función del tamaño y de la velocidad de caída de estas, siendo constantemente utilizada como un parámetro deseable de un simulador de lluvias, debido a que esta se relaciona con la capacidad de la lluvia para ocasionar erosión. Existen diferentes trabajos que han tratado de relacionar la energía cinética ( $E_C$ ) con la intensidad de la lluvia ( $I$ ) a escalas temporales, permitiendo la estimación de la energía de la lluvia a partir de relaciones matemáticas en función de la intensidad ( $E_C$ - $I$ ). Los cuales han usado principalmente tres tipos de relaciones, basadas en las funciones potencial, logarítmica y exponencial (Tabla 1).

*Tabla 1. Funciones matemáticas entre energía cinética ( $E_C$ ) e intensidad de la lluvia ( $I$ );  $a$  y  $b$  representan coeficientes empíricos que están en función de la zona de estudio.*

<b>Función matemática</b>	<b>Ecuación</b>
Potencial	$E_C = aI^b$
Logarítmica	$E_C = a + b \log I$
Exponencial	$E_C = e_{max} [1 - a \exp(-bI)]$

Los modelos potencial y logarítmico evalúan la energía cinética adecuadamente a bajas intensidades de lluvia, pero la sobreestiman a intensidades elevadas. Sin embargo, el modelo exponencial consigue un mejor ajuste a intensidades elevadas, aunque puede minimizar ligeramente los valores de  $E_C$  a intensidades bajas. En la Figura 4, se muestran las curvas obtenidas de diferentes estudios (Anexo 2) que han intentado identificar la ecuación que represente la relación entre la energía cinética ( $E_C$ ) y la intensidad de la lluvia ( $I$ ) según la zona de estudio (Wischmeier, 1958; Hudson, 1961; Kinell, 1973; Carter *et al.*, 1974; Zanchi & Torri, 1980; Rosewell, 1986; Onaga *et al.*, 1988; Coutinho & Tomás, 1995; Jayawardena & Rezaur, 2000; Van Dijk *et al.*, 2002).

Sin embargo, la naturaleza de la ecuación no se incrementa continuamente, si no que se estabiliza a una determinada intensidad.

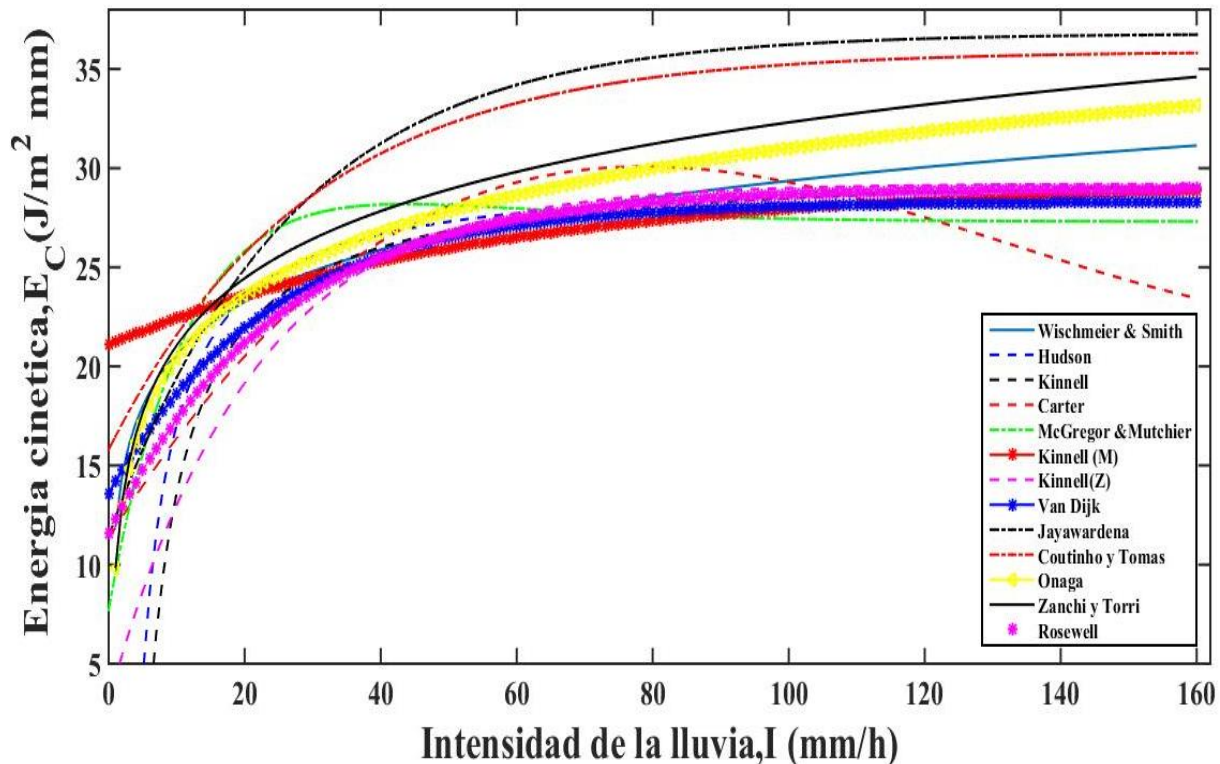


Figura 4. Comparación de la relación entre energía cinética e intensidad establecida en diferentes países con diferentes condiciones de lluvia.

A pesar de las diferencias observadas en la variabilidad entre las distintas relaciones de energía cinética y la intensidad de lluvia, es posible que estas se deban a diferencias en las características atmosféricas y físicas de las precipitaciones, a las técnicas utilizadas para medir la gota de lluvia, así como a las características geográficas de la zona de estudio. Por lo mencionado anteriormente se utilizó el modelo de Kinnell (1973), el cual se representa en la Figura 4 en color rojo, se utilizaron los mismos coeficientes calculados para Florida, debido a la cercanía geográfica con la república mexicana.

## 2.6 Métodos de medición del tamaño de las gotas

La medición de los tamaños de gotas ha sido objeto de estudio de numerosos trabajos experimentales desde hace muchos años, para lo cual se han empleado diferentes metodologías

algunas más o menos sencillas y precisas, pero todas con el mismo objetivo, el de conocer el tamaño y la velocidad de caída de las gotas, las cuales son un factor transcendental para el estudio del proceso de erosión del suelo.

Existen diversas técnicas para medir las distribuciones de tamaños de las gotas de lluvia, tales como el papel filtro, relacionando el tamaño de la mancha en el papel con el tamaño de la gota de agua que lo causó (Lu *et al.*, 2008), método de bolitas de harina (Arnaez *et al.*, 2007; Parsakhoo *et al.*, 2012), mediante fotografía (Salvador *et al.*, 2009; Abudi *et al.*, 2012) y el método más reciente utilizando disdrómetros ópticos o espectropluviómetros de alta resolución (Brawn & Upton, 2008; Fernández-Raga *et al.*, 2010; Grismer, 2012) para determinar la velocidad y forma de la gota de lluvia.

### **2.6.1 Método de mancha**

Este método implica el uso de papel hidrosensible para medir el tamaño de las gotas de lluvia, las cuales caen sobre la hoja de papel en un breve periodo de tiempo (Lu *et al.*, 2008). Tras el impacto de las gotas, la superficie del papel amarilla que tiene el papel se tiñen de color azul dejando marcas permanentes en este, las cuales se miden y cuentan cuidadosamente para proporcionar información acerca de las gotas de lluvia. Una de las limitaciones de este método es que las manchas de las gotas pueden superponerse en muestreos prolongados, lo que puede hacer difícil su medición.

### **2.6.2 Método de bolitas de harina**

Este método se basa en la captura de las gotas de lluvias en bandejas con harina, la duración de las pruebas es de aproximadamente 2 seg con el objetivo de que la gota no sea duplicada (Pérez-Latorre *et al.*, 2010), las cuales al impactar contra la harina forman unos grumos que representan el tamaño de estas. Una vez finalizado el experimento es necesario secar la harina y separar las gotas a través de un tamiz (Figura 5), las cuales se desecan en una estufa formándose unas bolitas y cuyo tamaño está relacionado con el diámetro de las gotas.

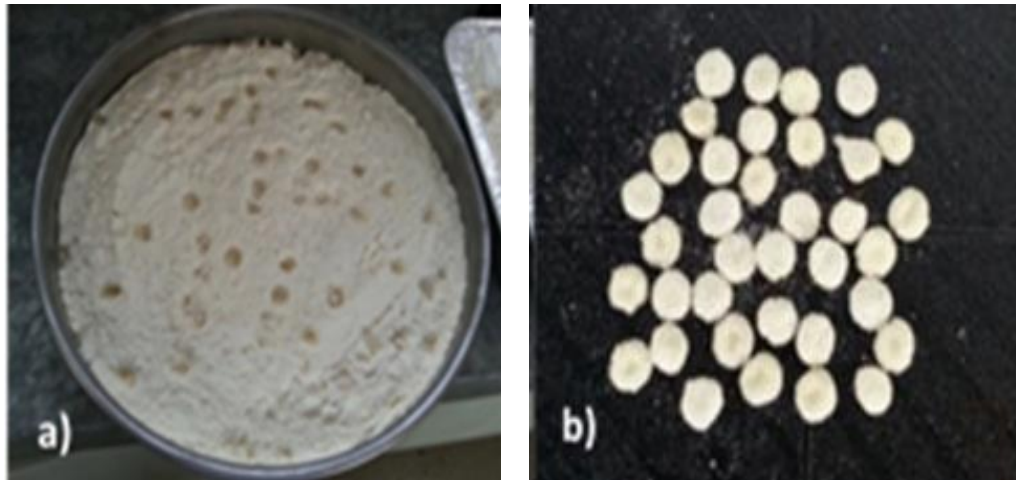


Figura 5. a) Muestra de gotas sobre la harina en una bandeja de 2 cm de profundidad, b) Muestras de bolitas de harina después del secado en la estufa.

Esta técnica fue perfeccionada por (Arnaez *et al.*, 2007), para lo cual utilizaron un análisis digital a través de fotografía y así poder determinar los tamaños de gota. Existen diferentes campos de investigación donde han utilizado esta técnica (Tabla 2) como son el de erosión del suelo así como estudios de calidad de las aguas pluviales (Ogunye & Boussabaine, 2002; Pérez-Latorre *et al.*, 2010).

Tabla 2. Estudios de investigación donde han utilizado el método de bolitas de harina.

Estudio de investigación	Propósito	Método utilizado
(Ogunye & Boussabaine, 2002)	Verificar el tamaño de las gotas producidas por la boquilla en el estudio de lluvia simulada.	El tiempo de exposición se limita a 1 s para minimizar la unión de las bolitas de harina. Se requiere un tamaño de muestra grande para minimizar la variabilidad en los conteos de las gotas grandes.
(Arnaez <i>et al.</i> , 2007)	Verificar el tamaño de las gotas producidas por la boquilla en el estudio de lluvia simulada.	Emplearon el método fotográfico para procesar las fotos de las pequeñas bolitas de harina que se formaron por la lluvia simulada.
(Pérez-Latorre <i>et al.</i> , 2010)	Verificar el tamaño de las gotas producidas por la boquilla en el estudio de lluvia simulada.	Utilizaron una capa de harina (1 cm de profundidad) colocaron una superficie de 50 cm*50 cm, y compactaron utilizando una regla. La superficie de la harina estaba

		cubierta para protegerlo de la lluvia, excepto cuando la cubierta se removía por 2 s durante la simulación para recoger muestras de gota. El diámetro de las bolitas se midió usando un calibrador de tamaño (+ - 0.1 mm).
--	--	--

### 2.6.3 Método fotográfico

La distribución del tamaño y velocidad de movimiento de las gotas puede ser realizada a través de la técnica fotográfica de alta velocidad (Sudheer & Panda, 2000) y de baja velocidad (Salvador *et al.*, 2009) en las que se muestran la trayectoria de las gotas y, a su vez, facilita el cálculo de longitud, diámetro, ángulo y velocidad de caída. Existen diversos trabajos de investigación donde han utilizado esta técnica para caracterizar el tamaño de las gotas, los cuales se resumen en la Tabla 3. Esta técnica se puede ver afectada por interferencias ambientales como el viento, ya que puede causar errores en la medición (Haruya & Tsuda, 2012).

*Tabla 3. Estudios de investigación donde han utilizado el método fotográfico para determinar el tamaño de la gota.*

<b>Estudio de investigación</b>	<b>Metodología utilizada</b>
(Sudheer & Panda, 2000)	Utilizaron una cámara digital de alta resolución, la cual produjo imágenes digitales que fueron convertidas por un CCD (dispositivo de acoplamiento de carga) manipulando un sistema informático, lo que les permitió agregar pixeles a las imágenes para contar y medir el tamaño de las gotas.
(Salvador <i>et al.</i> , 2009)	Manejaron una obturación de baja velocidad resultando en gotas que aparecen como figuras cilíndricas en una fotografía. La velocidad y el diámetro de la gota lo calcularon con base a la velocidad de obturación seleccionada.
(Abudi <i>et al.</i> , 2012)	Utilizaron una cámara PCI-800sc Motion-Scope®, empleando un software especial para el procesamiento de las gotas. Las imágenes evaluadas son el resultado del tamaño y velocidad de caída de las gotas.

#### 2.6.4 Método de inmersión en aceite

La técnica de inmersión en aceite es una técnica que no requiere calibración o equipos especiales, consiste en recoger gotas en un recipiente que contenga la mezcla ligera de cualquier liquido viscoso para aprovechar la diferencia entre las densidades de los dos fluidos al entrar en contacto. Este método puede ser utilizado en cualquier aceite de baja viscosidad (Cruvinel *et al.*, 1996; Cruvinel *et al.*, 1999; de Luna *et al.*, 2000), y en varios líquidos alternativos como: aceite de parafina, aceite hidráulico, aceite de silicona, aceite mineral y la grasa, la baja viscosidad y la naturaleza hidrofóbica del aceite hace que se formen gotas de forma esférica, permitiendo el conteo de estas y su medición ya sea por medio de un microscopio o mediante fotografía (Eigel *et al.*, 1983; Cruvinel *et al.*, 1996). Algunos estudios donde se ha empleado esta técnica se resumen en la Tabla 4.

*Tabla 4. Estudios de investigación donde han determinado el tamaño de la gota utilizado el método de inmersión en aceite.*

<b>Estudio de investigación</b>	<b>Metodología utilizada</b>
(Cruvinel <i>et al.</i> , 1996; Cruvinel <i>et al.</i> , 1999)	Emplearon dos cámaras de video una marca Sony® TR50BR y la otra marca Matrox® PIP-640B utilizándolo en combinación con el método de inmersión en aceite para calcular los tamaños de las gotas.
(de Luna <i>et al.</i> , 2000)	Emplearon una cámara de estado sólido mediante una tarjeta digital modelo DT-2851 con 512 x 512 pixeles, para registrar los diámetros de las gotas.

#### 2.6.5 Disdrómetros

Recientemente se ha avanzado en la utilización de aparatos automáticos para la medición de las características de las gotas de la lluvia, como son los disdrómetros (Campos *et al.*, 2006; Uijlenhoet *et al.*, 2006), los cuales permiten caracterizar directamente el conjunto de tamaños de gotas de la

lluvia, relacionado con la energía cinética y por tanto con su diámetro. Uno de los problemas de estos aparatos es su alto costo, por lo que se trata de encontrar métodos alternativos.

Existen diferentes tipos de disdrómetros entre ellos el disdrómetro acústico (Nystuen, 2001), el cual se basa en una onda de presión generada por el impacto de las gotas sobre una superficie, el disdrómetro de video bidimensional que permite registrar proyecciones de imágenes ortogonales de las gotas a medida que atraviesan el área de detección, y pueden proporcionar información de la velocidad y la forma, de las gotas de agua individuales (Kruger & Krajewski, 2002); y el disdrómetro óptico basado en el oscurecimiento de un haz de luz láser infrarroja al ser atravesado por las gotas de lluvia (Löffler-Mang & Jürg 2000; Fernández-Raga *et al.*, 2010) permitiendo medir no sólo el tamaño de las gotas de lluvia, sino también su velocidad e incluso su forma, lo que ha permitido disponer de mediciones más precisas de la energía cinética.

### **2.7 Modelos aplicados al estudio de la erosión hídrica del suelo**

Existe una serie de definiciones y clasificaciones muy diversa de los modelos que pueden ser aplicados al estudio de la erosión del suelo. Los cuales no son más que aproximaciones de sistemas reales, la confiabilidad de sus predicciones dependerá de qué tan bien haya sido definida la estructura matemática de estos y qué tan bien haya sido parametrizado (Hogue *et al.*, 2006).

Coexisten más de 80 modelos que incorporan la erosión en su estructura, ya sea como un módulo independiente o como una parte intrínseca de modelos modificados (Karydas *et al.*, 2012; Lilly *et al.*, 2009). Estos modelos se distinguen principalmente por su nivel de complejidad, por los procesos que tienen en cuenta, cómo se representan, por los datos de entrada y de calibración necesarios. La elección del modelo a utilizar va depender de los objetivos y de los resultados que se pretendan obtener, considerando las características del área de estudio, el análisis espacial, la escala temporal, la precisión y la validación del modelo, así como los requisitos del hardware. En

este contexto se observa que el tipo de modelos de erosión, así como sucede en otros tipos de procesos de clasificación, dependerá de los criterios considerados.

### **2.7.1 Tipos de modelos**

Existen diferentes tipos de modelos para evaluar la erosión del suelo los cuales dependen de los procesos físicos simulados, de algoritmos que describan estos procesos y de datos necesarios para su implementación, diferentes autores señalan que se pueden considerar tres tipos principales de modelos: los empíricos, conceptuales y los basados físicamente (De Vente & Poesen, 2005; Merritt *et al.*, 2003).

Por el contrario Furegatti (2012) presentó una clasificación tipológica de los modelos que simulan la erosión, aunque mucho más amplia, subdividiéndolas en siete categorías: conceptuales, basados en procesos, los basados físicamente, empíricos o de regresión, semi cuantitativos, global basado en la física de la degradación del suelo y evolución del relieve (Figura 6). Consideró, además, que los modelos basados físicamente se pueden dividir en tres sub-tipos, sobre todo en base a un evento de lluvia, basado en la continuidad de la lluvia y su distribución espacial.

Además de estos diversos aspectos o criterios de clasificación, los modelos de erosión pueden ser aplicados para evaluar procesos y características específicas erosivas, así como involucrar diferentes factores de erosividad y erosionabilidad en términos de objetivos y resultados a alcanzar (Hasholt, 2002). Sin embargo, las diferencias entre estos modelos no siempre son claras y asiste cada vez más el uso de modelos que incorporan una mezcla de procedimientos, de modo que su tipo es a veces subjetivamente diferente.

De igual manera Karydas *et al.*,(2012), señalaron que la clasificación de los modelos tiene que considerar varios aspectos en relación con varios parámetros de erosión, como la extensión y duración de la aplicación, los factores que influyen, teniendo en cuenta los procesos, las formas de peligro, el tipo de algoritmo y el tipo de evaluación (Figura 6).



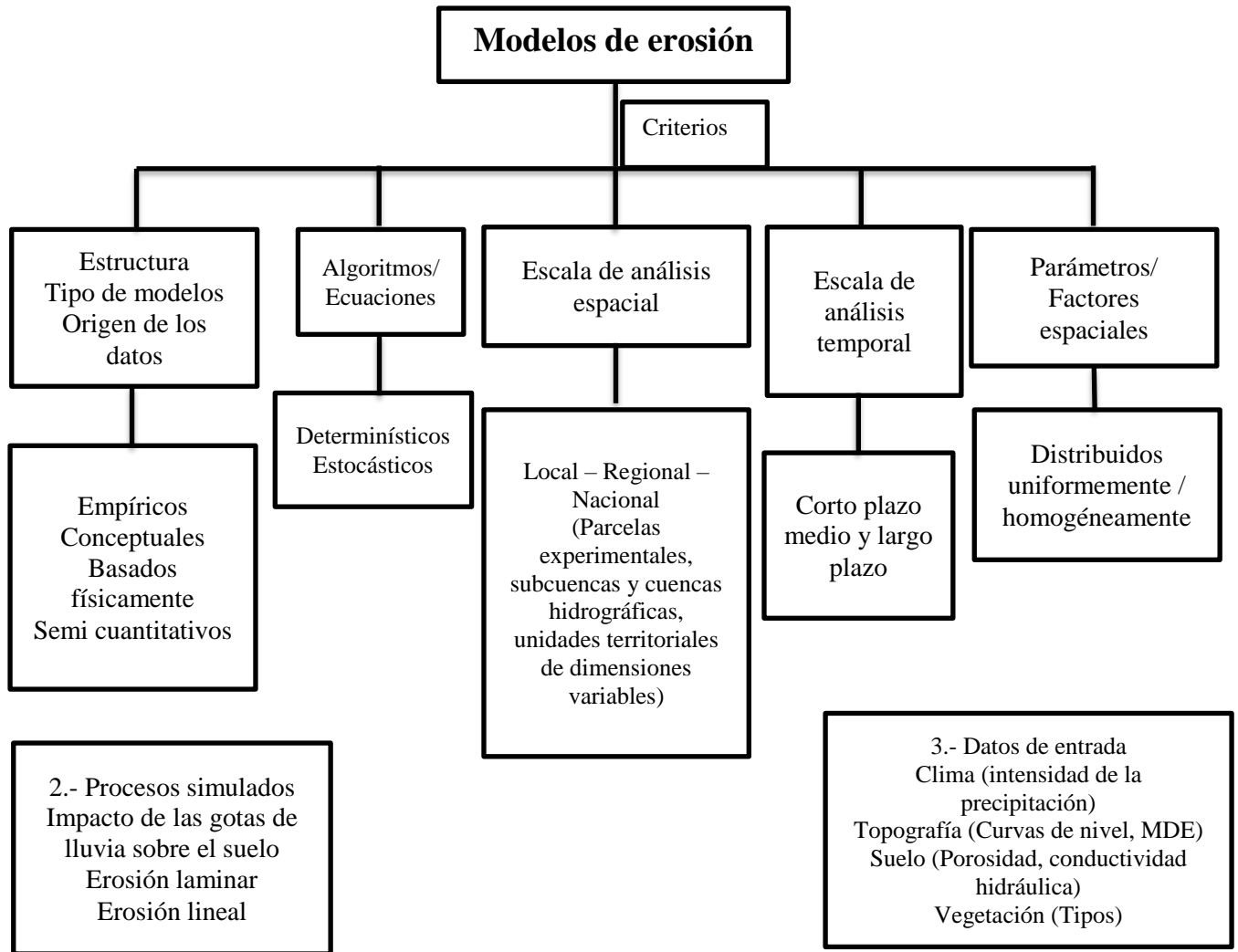


Figura 6. Criterios de clasificación de los modelos, procesos contemplados y principales datos de entrada.

### 3. Metodología

En este apartado se describe el proceso que se realizó para cumplir con los objetivos del proyecto, el cual abarca el diseño, construcción y calibración del equipo, como se muestra en la Figura 7.

Para elaborar el simulador de lluvia se realizó una investigación previa de los simuladores ya existentes, para conocer sus variaciones, aplicaciones y limitaciones. Se encontró información en revistas prestigiosas como Elsevier (Abudi *et al.*, 2012), libros de autores reconocidos (Hudson, 1997), y universidades e instituciones dedicadas a la investigación en suelos y agua (Cazalac, 2004).

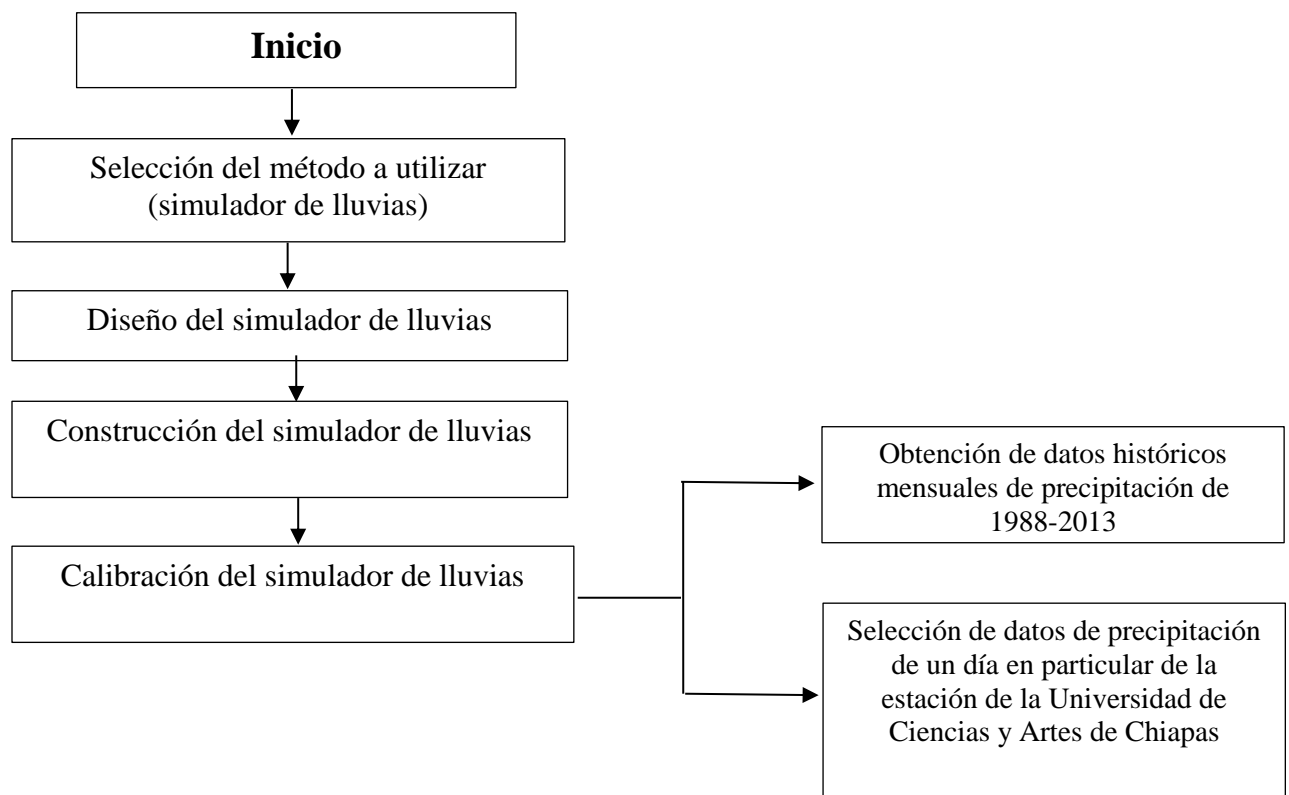


Figura 7. Esquema metodológico.

#### 3.1 Descripción del simulador de lluvia

Se diseñó y construyó un simulador de lluvias híbrido, similar al desarrollado por (Carreras *et al.*, 2015) con modificaciones en la estructura y funcionamiento, considerando las variables de uniformidad, intensidad y duración de las precipitaciones.

El simulador construido consta de dos partes principales que son la estructura metálica y el sistema hidráulico, la estructura del simulador es de tubería de zintro de 1" con una altura de 2 m

para simular bien la caída de la gota de lluvia, el ancho es de 0.8 m para efecto de realizar una distribución homogénea en el terreno y tener la menor pérdida de gotas, cuenta con cuatro tornillos niveladores de acero inoxidable de 3 pulgadas, los cuales le permiten adecuarse a las condiciones del terreno. Los elementos principales considerados en la fabricación del equipo se muestran en la Figura 8 y en el Anexo 3 se describen los materiales utilizados para su construcción.

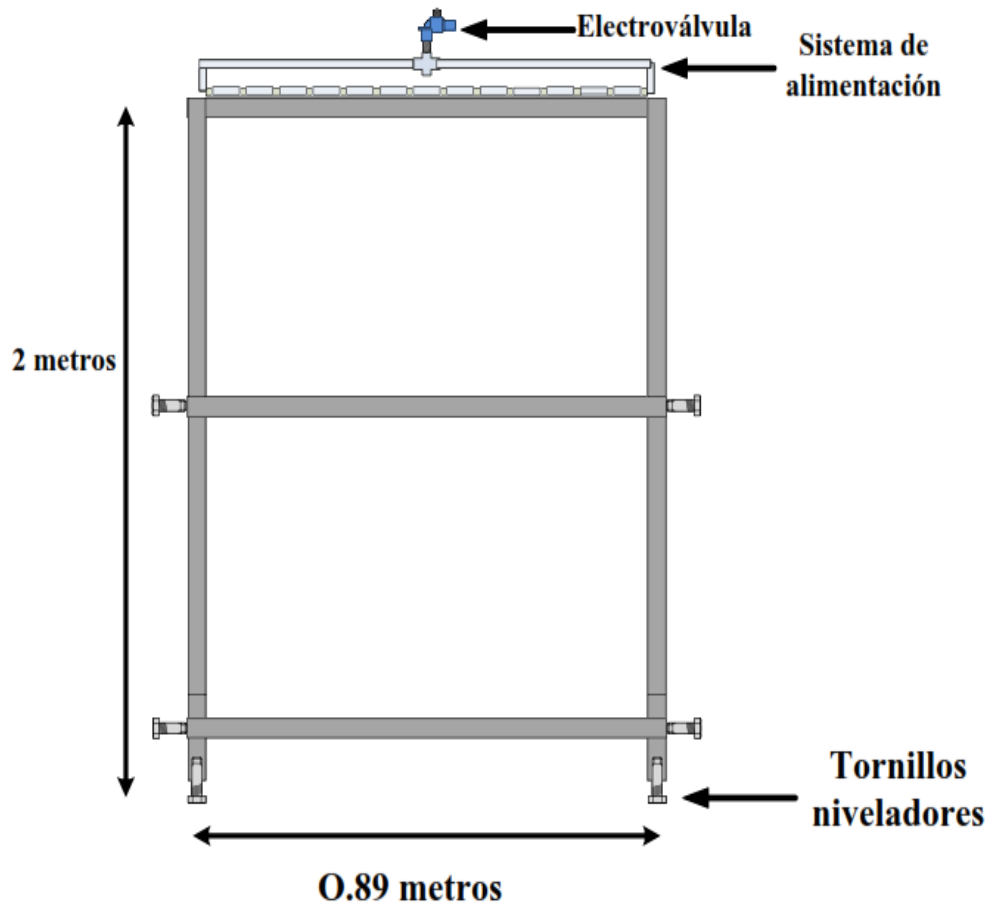


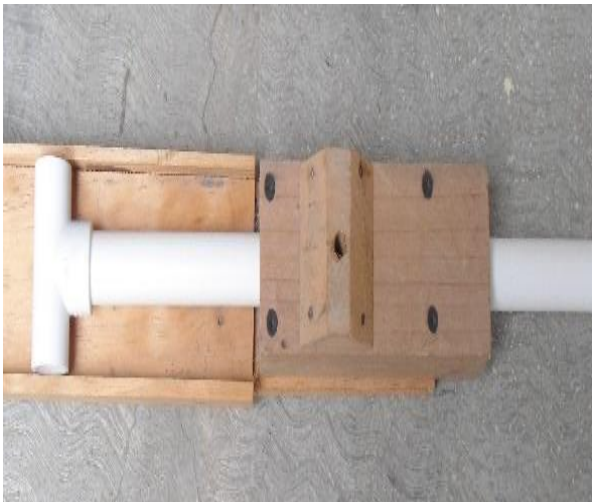
Figura 8. Diseño de la estructura del simulador de lluvias.

### 3.1.1 Sistema hidráulico

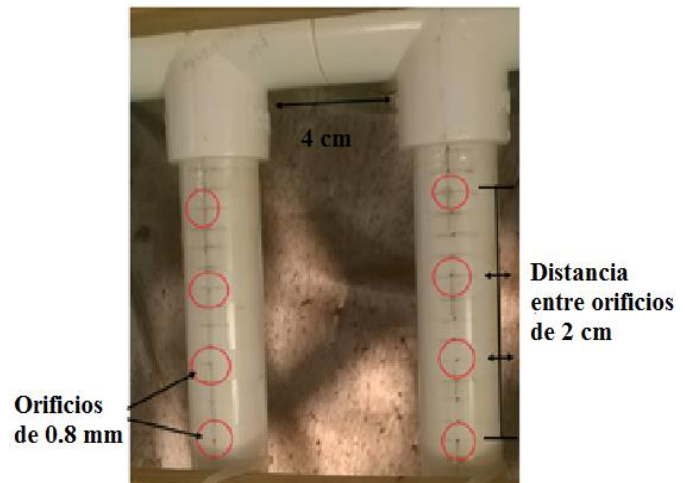
El mecanismo generador de la lluvia consistió en un sistema de aspersión continua con agua presurizada para microparcels de  $0.8 \text{ m}^2$  de área efectiva, el sistema se conformó por 13 líneas de alimentación de tubos policlorato de vinilo (PVC) de 13 mm en tramos de 0.8 m, los cuales se trazaron en línea recta empleando un carrito de madera (Figura 9) para realizar los orificios de aproximadamente 0.8 mm de diámetro, separados 2 cm entre sí (Figura 10) formando un total de

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

481 orificios. El caudal y formación de las gotas fueron controlados por diferentes mecanismos de control a través de dos procesos el primero por gravedad y el segundo aplicando presión mediante una bomba centrífuga marca rotoplas modelo Cm 050/23m de 1/2 Hp. El suministro de agua se realizó utilizando un contenedor de 750 litros y mediante un sistema de tuberías permitió el transporte de agua hasta el equipo. Se colocó un protector de viento para evitar interferencias durante los experimentos.



*Figura 9. Dispositivo utilizado para trazar una línea recta en el tubo.*



*Figura 10. Dimensiones de los orificios realizados en el sistema de aspersión.*

### 3.1.2 Funcionamiento del sistema

Para el manejo del simulador se construyó una etapa de potencia y un dispositivo detector de cruce por cero (Anexo 4), la cual es una onda senoidal que circula durante un tiempo en un sentido y viceversa en razón de 60 ciclos por segundo, y a cada medio periodo pasa por cero (Figura 11). Ambos fueron monitoreados y controlados con una tarjeta Arduino UNO, de bajo costo y de fácil integración con diferentes sistemas y software, la cual se conecta vía USB permitiendo programar el microcontrolador desde la PC. La tarjeta dispone de 14 pines que pueden configurarse como entradas o salidas y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V. Esta también dispone de entradas y salidas analógicas, mediante



## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

realizó empleando una válvula esfera de latón roscable con límites de posición (Figura 13a) de 1 pulgada marca Foset durante 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60° y 70° de apertura en un tiempo de 8 s y con una válvula esfera de latón de 1 pulgada automatizada (Figura 13b) con un servomotor modelo MG995 con torque de 15 Kg/cm a una apertura de 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60° y 70° durante 8 s.

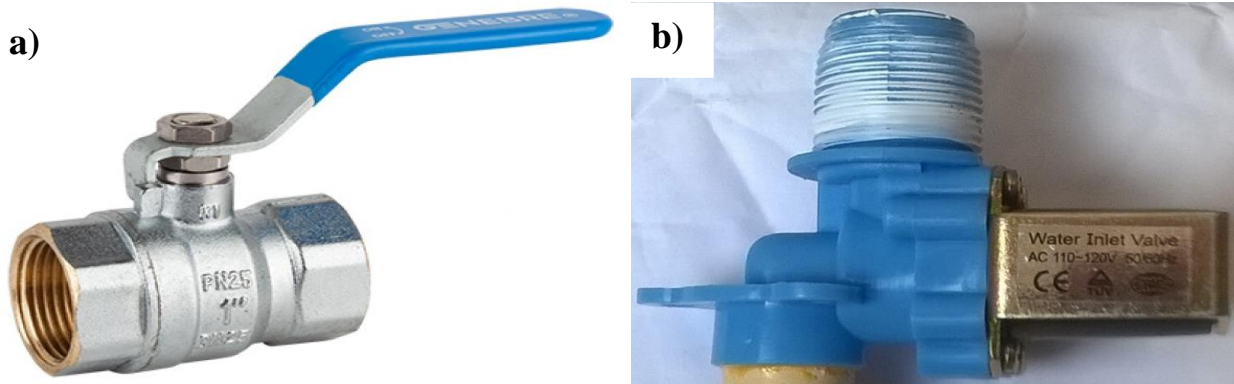


Figura 12. Sistemas de control por gravedad a) Válvula esfera de latón roscable de 1 pulgada, b) electroválvula marca Daewoo.

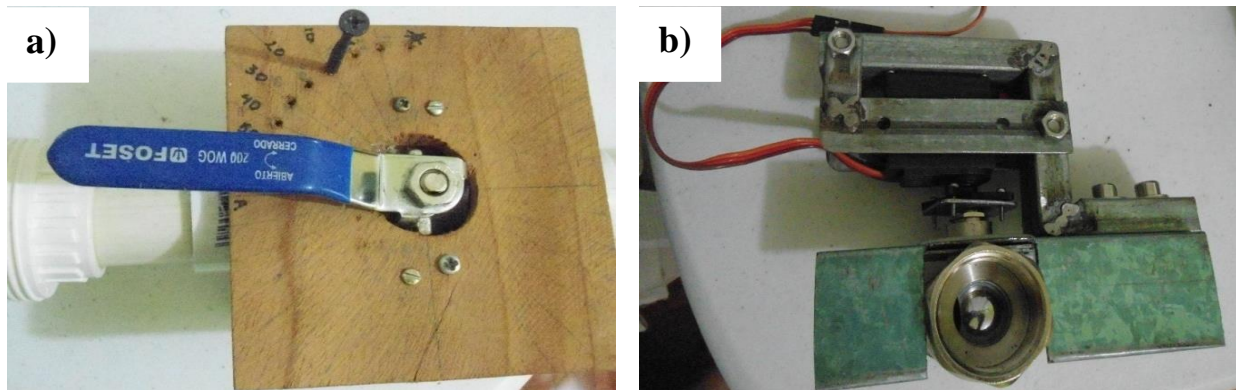


Figura 13. Sistemas de control a presión a) Válvula esfera de latón roscable de 1 pulgada con límites de posición, b) Válvula esfera de latón de 1 pulgada automatizada.

### 3.2 Calibración del simulador de lluvia

Para conocer el comportamiento histórico de la precipitación del municipio de Tuxtla Gutiérrez se recurrieron a los datos de precipitación de la estación meteorológica 00007238 El Sabinal del municipio de Tuxtla Gutiérrez que tiene una latitud: 16° 45' 33'', longitud: 93° 5' 19'' y una altitud

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

de 498 m.s.n.m. En la Figura 14 se muestra el comportamiento histórico de la precipitación del municipio, la cual fue obtenida de la base de datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los datos analizados son de Enero de 1988 a Diciembre de 2013 obteniendo un total de 25 años (Anexo 3).

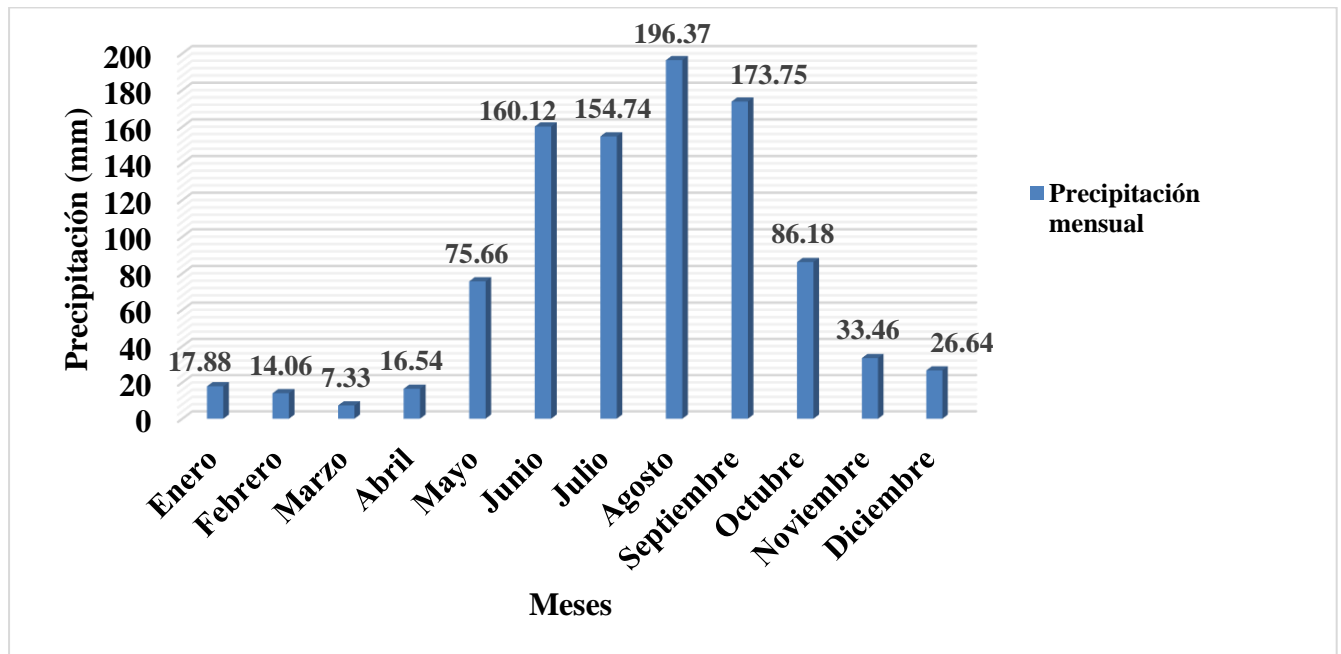


Figura 14. Climograma promedio mensual de 1988 - 2013. Elaboración propia con datos de CNA (2015).

La calibración del simulador de lluvia se llevó a cabo en la Facultad de Ingeniería Ambiental en las instalaciones de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, la cual consistió en realizar una serie de ensayos encaminados a reproducir una lluvia real, con base al comportamiento de la lluvia del municipio de un día en particular, para lo cual se recurrió al registro de la estación climatológica de Ingeniería Ambiental por su cercanía al sitio de trabajo. En la Figura 15 se muestra el comportamiento de la precipitación suscitada el día 19 de mayo del 2015, la cual se describe en el Anexo 4.

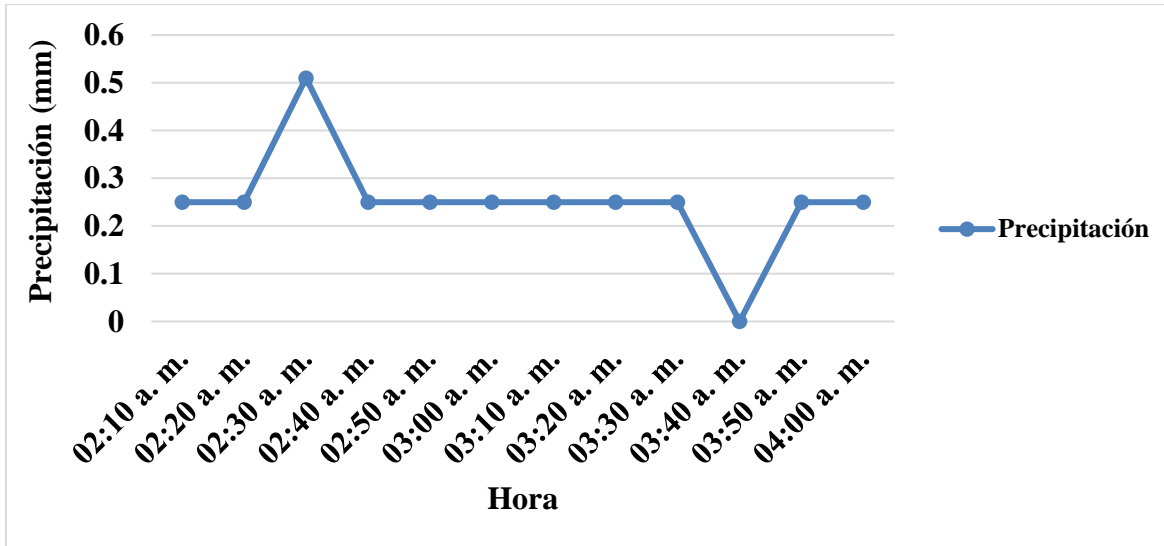


Figura 15. Comportamiento de la precipitación del día 19 de mayo del 2016 en Ciudad Universitaria (UNICACH).

### 3.3 Diámetro de la gota de lluvia

Para caracterizar el tamaño de las gotas emitidas por el sistema, 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, las cuales se procesaron utilizando la técnica de sólidos de revolución para su presentación y análisis. Esta técnica consiste en hacer girar una región plana alrededor de una recta, para lo cual es posible utilizar uno de los ejes del plano cartesiano para rotarlo a la función  $f(x)$ .

Este método se realizó mediante la suma del volumen de pequeñas secciones o cortes circulares infinitesimales de corta altura (discos) del sólido de revolución. Se utilizó el método de capas cilíndricas, considerando a los extremos como segmentos esféricos, mientras que las secciones intermedias se evaluaron como segmentos esféricos truncados (Figura 16), el volumen final se determinó por:

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



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.

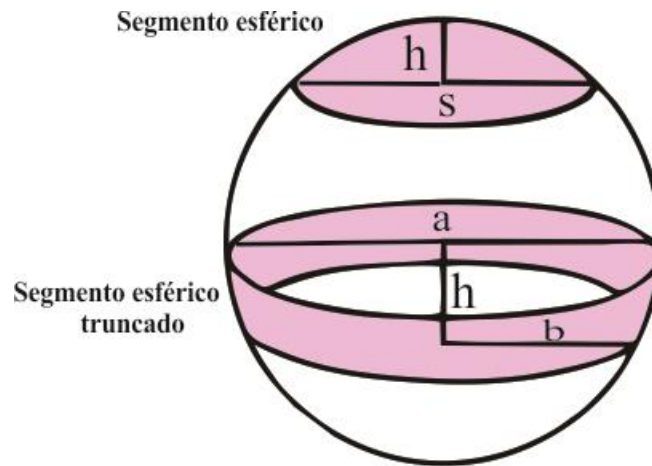


Figura 16. Cortes infinitesimales de solidos de revolución.

### 3.4 Velocidad de caída de la gota de lluvia

Para medir la velocidad de caída de la gota de lluvia existen diferentes técnicas de las cuales una está basada en la intensidad de la lluvia y la otra en la distribución diamétrica de la gota, para fines de este estudio se utilizó la intensidad de la lluvia para el cálculo de la velocidad de caída de la gota de lluvia.

Esto debido a que las gotas de lluvia al caer alcanzan una velocidad máxima (terminal), lo cual se produce cuando la fuerza de aceleración gravitacional que es igual a la resistencia de la gota que cae através del aire. La velocidad de caída de la gota está en función del tamaño de esta, la cual aumenta a un valor cercano a los 9 m/s para las gotas de mayor tamaño.

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:

$$v = 2.9379 \ln(D_g) + 4.393 \quad (2)$$

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.

### 3.5 Distribución espacial de la lluvia

Con el fin de generar información cuantitativa acerca de la distribución espacial y reproductibilidad de las precipitaciones se dividió la parcela en celdas de 10 \* 10 cm, para evaluar la pluviosidad se colocaron 16 recipientes de 1000 ml, los cuales tienen una altura de 14 cm y un diámetro de 11 cm. Los recipientes se situaron a cada 10 cm en dirección “x” y lo mismo en dirección “y”, para estimar el volumen de agua acumulado con los diferentes mecanismos de control a diferentes intervalos de tiempo (Figura 17). El número de repeticiones se consideró suficiente debido a que el volumen medido tanto en control manual como automático presentaron una desviación estándar del 5 y 1% respectivamente.

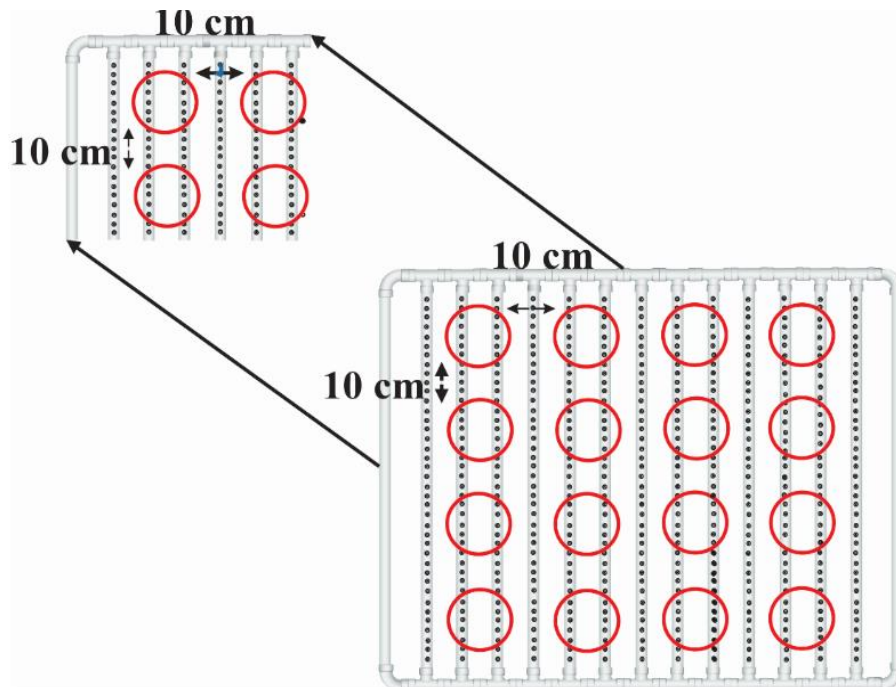


Figura 17. Distribución espacial de los recipientes colectores.

Para caracterizar la distribución espacial del agua en el sistema para los diferentes mecanismos de control y a diferentes presiones de trabajo se determinó mediante la expresión:

$$CUC (\%) = 100 \left( 1 - \frac{\sum x}{m n} \right) \quad (3)$$

donde *CUC* es el coeficiente de uniformidad de Christiansen; *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.

### 3.6 Energía cinética 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 & Chiew, 2003). Siendo la energía cinética un parámetro del potencial erosivo de la lluvia la cual representa la energía total disponible para la disgregación del suelo, compactación superficial por impacto de las gotas y deslizamiento por salpicadura. El cálculo de la energía cinética ha sido utilizada para determinar el índice de erosión definida en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE por sus siglas en ingles), basada en la distribución del tamaño de la gota.

Para la energía cinética se utilizó la ecuación de Kinell (1973), el cual 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 (Van Dijk *et al.*, 2002). A continuación, se muestra la ecuación para el cálculo de la energía cinética obtenida por Kinell:

$$Ec_K = e_{m\acute{a}x} [1 - ae^{-bI}] \quad (4)$$

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.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del diseño, construcción y calibración del simulador de lluvias con los diferentes mecanismos de control.

#### 4. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de cada simulación de lluvia con los diferentes mecanismos de control utilizados muestran la relación entre la presión y el tiempo de apertura en el mecanismo de control empleado, observándose ligeros cambios en el comportamiento de la intensidad en cada uno de los orificios, lo cual se debe al tipo de control utilizado, a impurezas presentes en el agua, al ángulo de perforación de los orificios y a las rebabas que pudieron quedar dentro del tubo.

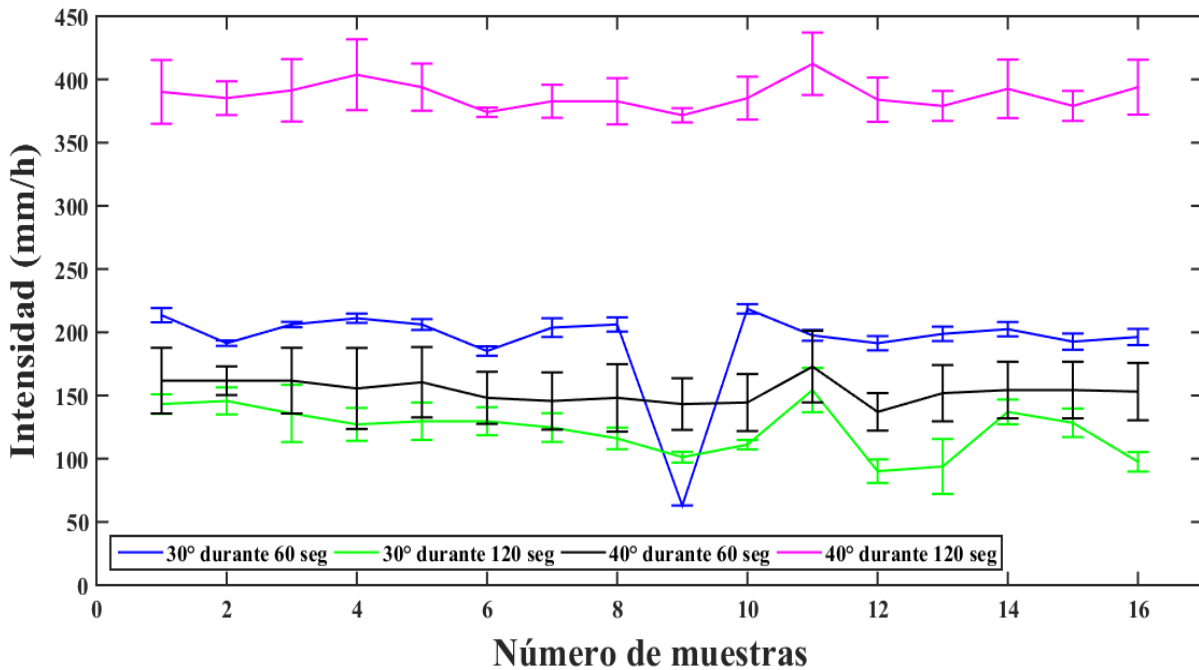


Figura 18. Comportamiento de la intensidad de la lluvia a diferentes intervalos de control sobre la válvula.

En la Figura 18, se presenta el comportamiento de la intensidad con mecanismo de control manual en un tiempo de 60 y 120 s. con diferentes grados de apertura sobre la válvula (30 y 40°), obteniéndose un CUC (%) de 90.9, 87.06, 95.4 y 97.9, el cual represento un alto grado de uniformidad. Los valores de energía cinética ( $J/mm\ m^2$ ) obtenidos para cada intensidad de lluvia simulada fueron de 29.0, 28.40, 28.8 y 29.3, lo cual se debió a la cantidad de orificios y tubos que

poseía, además de que el tiempo de simulación fue mayor, lo que permitió tener una mejor estabilización en el llenado de los tubos.

Sin embargo, se determinó que el sistema de control a pesar de tener coeficientes de uniformidad muy buenos, no proporciona un adecuado control en la intensidad de la lluvia simulada, lo cual se debe a que es muy difícil precisar la apertura de la válvula a la misma posición.

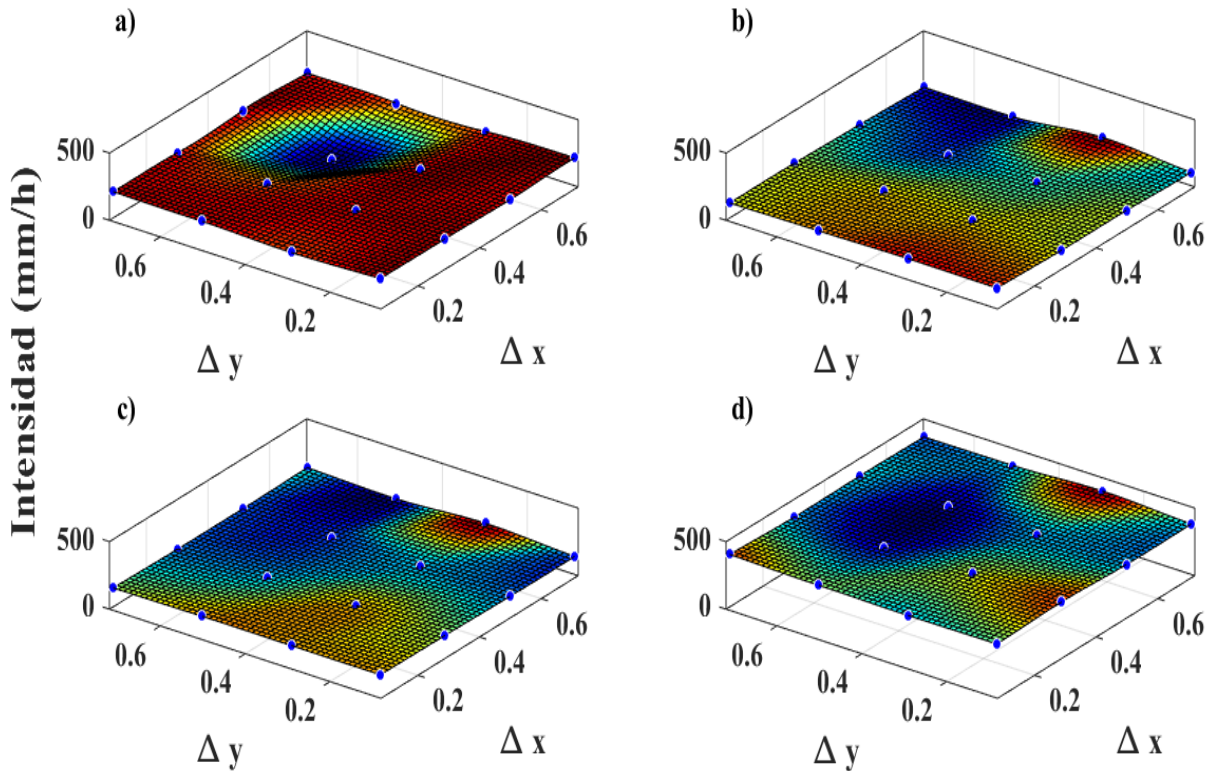


Figura 19. Distribución espacial de la Intensidad de la lluvia obtenida a través del control manual durante a)  $30^\circ$  con 60 s, b)  $30^\circ$  con 120 s, c)  $40^\circ$  con 60 s, d)  $40^\circ$  con 120 s.

En la Figura 19, se presentan los modelos de la distribución espacial obtenida en los diferentes grados de apertura de la válvula en las que se observan variaciones marcadas en color azul, obteniéndose una uniformidad en promedio del 92.8% en los cuatro grados de apertura de la válvula. Por lo que es necesario realizar ajustes mecánicos y de control en el sistema.

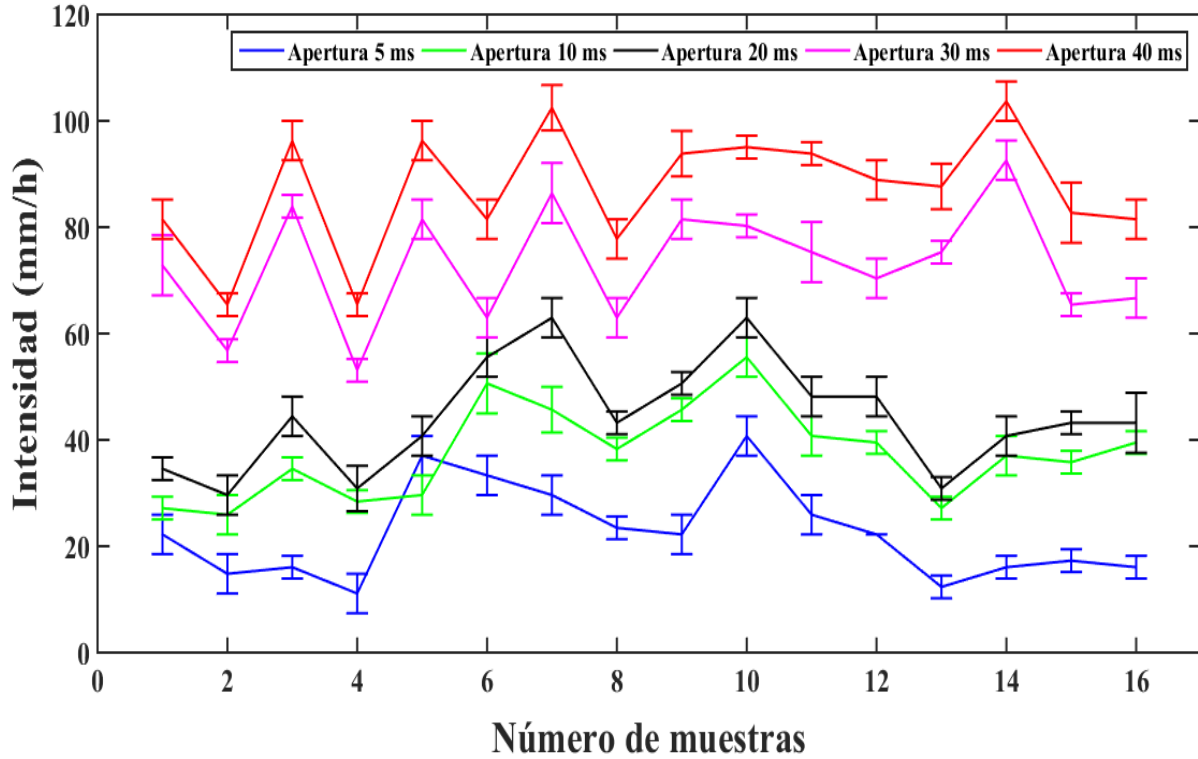
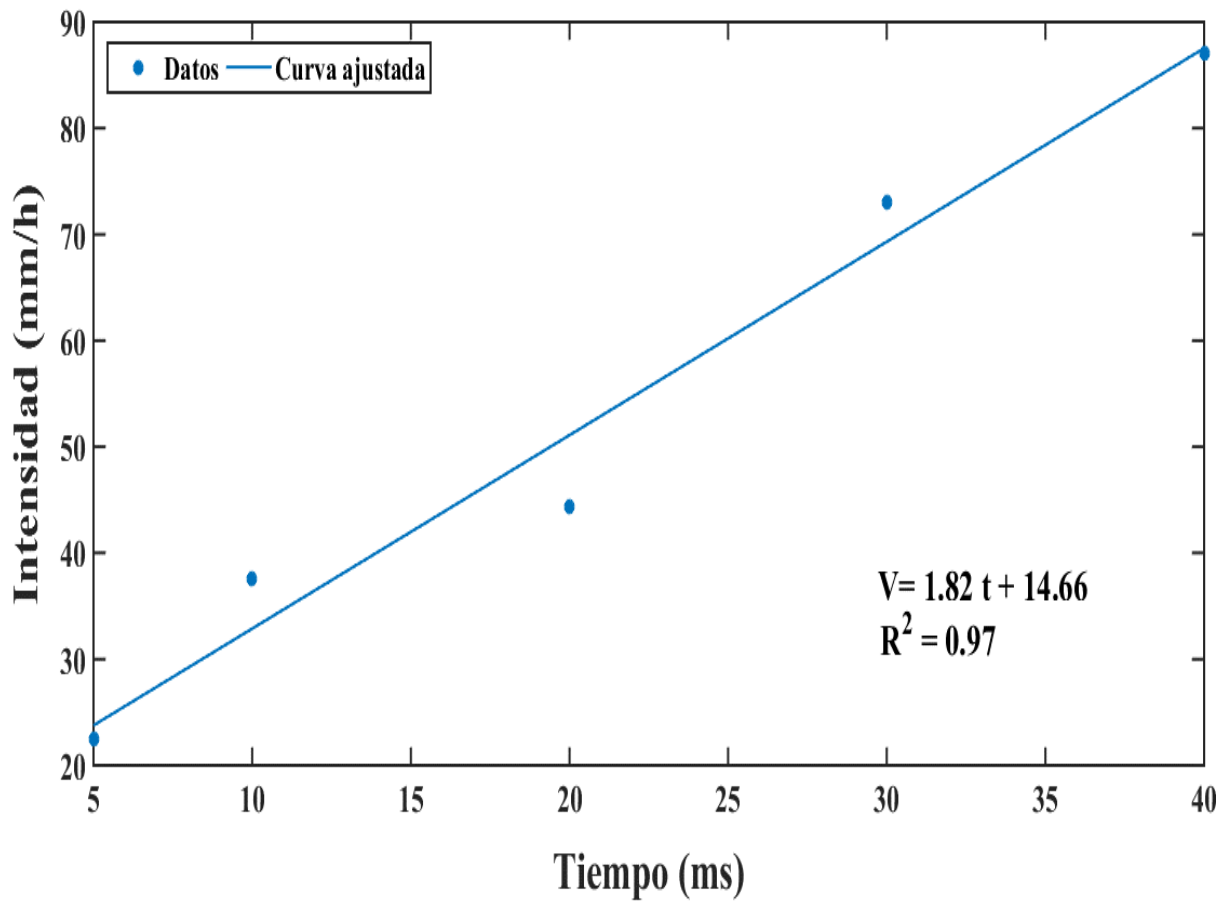


Figura 20. Intensidad de la lluvia a diferentes intervalos de control sobre la electroválvula.

En la Figura 20, se presentan los resultados con el sistema de control automatizado en un tiempo de 10 s. a diferentes tiempos de control sobre la electroválvula (5, 10, 20, 30 y 40 ms). Los CUC (%) obtenidos para cada intensidad de lluvia fueron de 69.52, 81.72, 82.46, 87.53 y 89.38, lo que representa un buen grado de uniformidad, con energías cinéticas ( $J/mm\ m^2$ ) de cada intensidad de lluvia de 23.83, 25.13, 25.61, 27.09 y 27.59. Lo cual se obtuvo modificando la estructura, automatizando la técnica de control, distribuyendo la presión del agua de manera uniforme y evitando holguras en la tubería. A pesar de haber realizado esas modificaciones, se indagó que la intensidad menor posee un CUC deficiente, lo cual se debió a la presión mínima utilizada, en cambio para las otras intensidades se determinaron CUC muy buenos, lo que marca una relación entre la presión y el tiempo de control. Es importante señalar que los cambios en el comportamiento

en la intensidad de lluvia simulada están relacionados con tipo de control, a impurezas del agua, a rebabas que pudieron quedar por la perforación y al ángulo de perforación de los orificios.



*Figura 21. Promedios de intensidad de la lluvia obtenida a diferentes intervalos de control sobre la electroválvula con ajuste lineal.*

En la Figura 21, se observa el promedio de la intensidad en cada uno de los tiempos de control utilizados, en esta se presenta la ecuación lineal obtenida con un ajuste por mínimos cuadrados de 97%, lo que representa la regularidad en el control de la intensidad de la lluvia simulada, además del comportamiento de la uniformidad mostrada anteriormente.

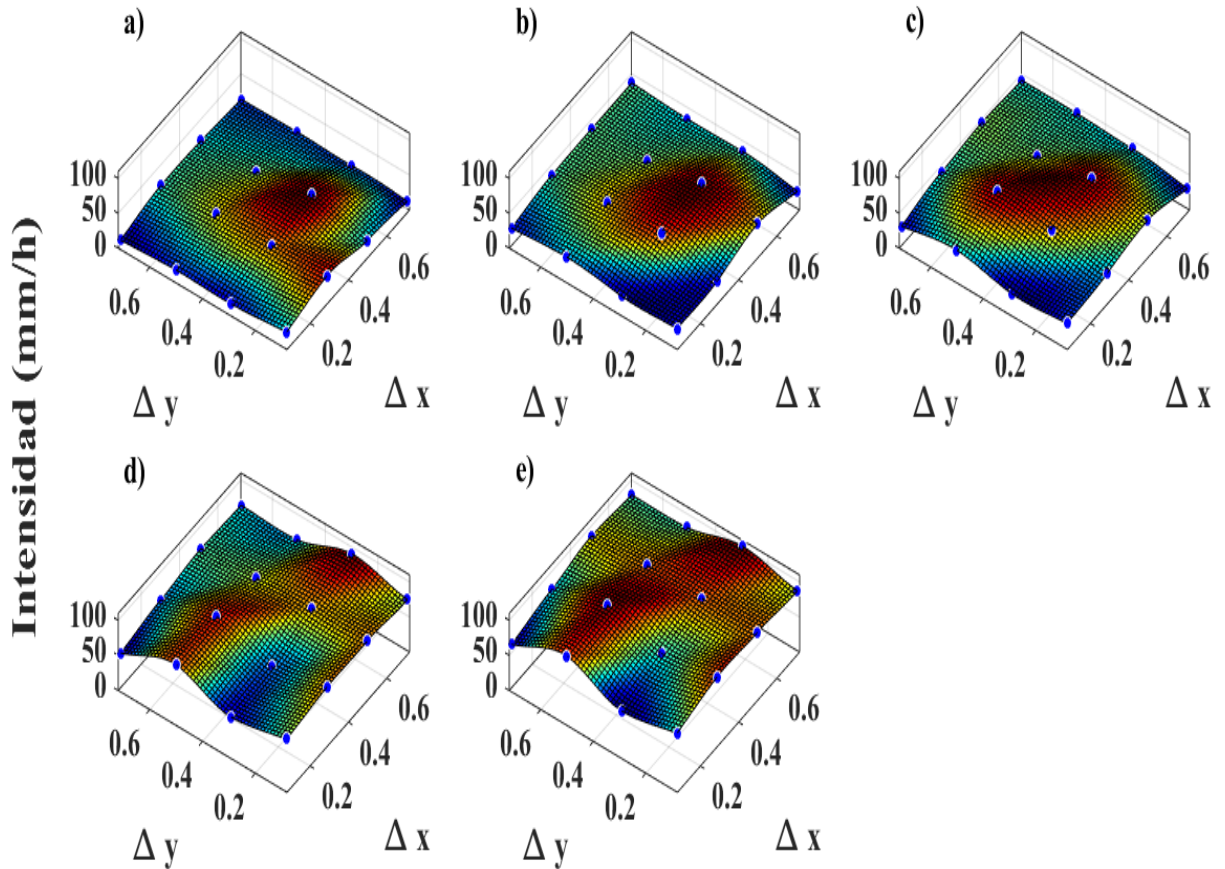


Figura 22. Distribución espacial de la intensidad de la lluvia obtenida a cinco diferentes intervalos de control de la electroválvula a) 5 ms, b) 10 ms, c) 20 ms, d) 30 ms y e) 40 ms.

En la Figura 22, se observa la homogeneidad en la distribución espacial obtenida para cinco diferentes intensidades de lluvia. El promedio del CUC (%) para los diferentes tiempos de apertura de la electroválvula fue de 82.12%, lo cual es considerado como aceptable (Herngren, 2005; Egodawatta, 2007; Moazed 2010). 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 de analizar cambios en el diseño para minimizar este efecto.



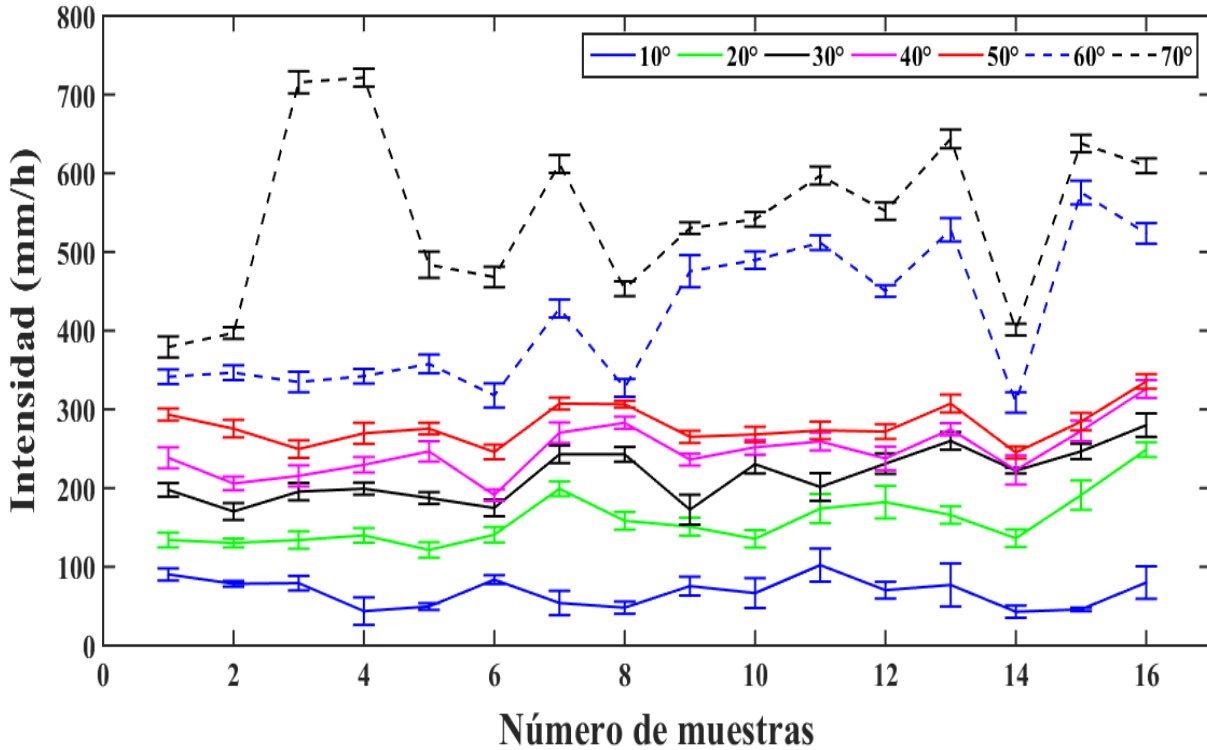


Figura 23. Intensidad de la lluvia obtenida con control manual con límites de posición a diferentes grados de apertura.

Los resultados con el control manual con límites de posición se muestran en la Figura 23, donde se representa el comportamiento de las diversas intensidades con diferentes grados de control sobre la válvula (10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°y 70°). Se calculó el CUC (%) para cada intensidad de lluvia simulada obteniéndose los valores siguientes 77.0, 83.7, 86.8, 89.7, 93.0, 80.4, 83.6, lo cual es considerado como aceptable (Herngren, 2005; Egodawatta, 2007; Moazed 2010). Las energías cinéticas (J/mm m<sup>2</sup>) obtenidas de cada intensidad de lluvia fueron de 26.9, 28.8, 29.1, 29.2, 29.2, 29.3 Y 29.3. Lo cual se obtuvo modificando la técnica de control, aumentando y distribuyendo la presión del agua dentro del sistema. A pesar de haber realizado esas modificaciones, se determinó para la menor intensidad un CUC regular, en cambio para las otras intensidades se determinaron CUC muy buenos, lo cual muestra la relación entre la presión y el

tiempo de control, cabe también mencionar que el cambio en la intensidad de lluvia simulada está relacionado con lo mencionado anteriormente.

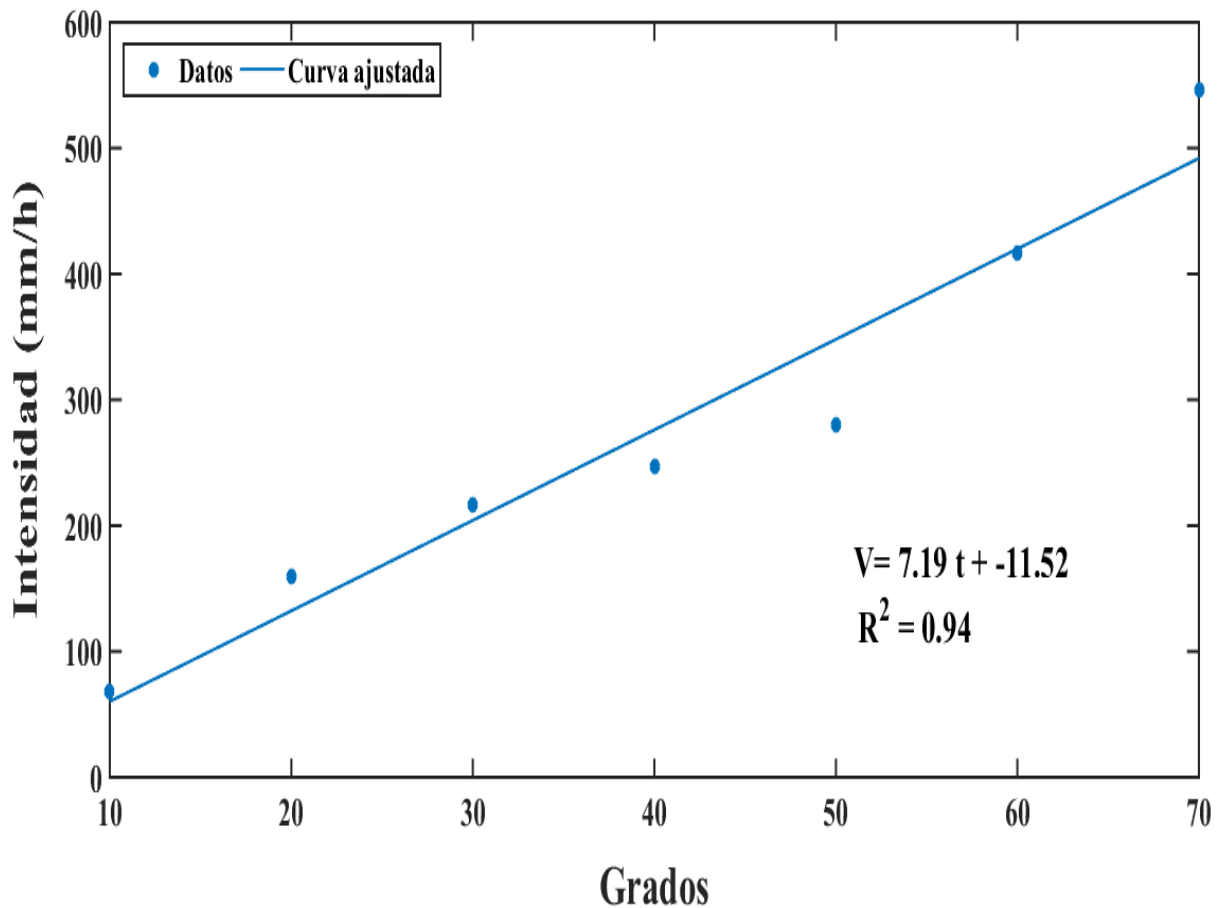


Figura 24. Promedios de la intensidad de lluvia a diferentes intervalos de control con ajuste lineal.

En la Figura 24, se observa, el comportamiento del sistema a diferentes grados de apertura de la válvula con tope, en la que se presenta la ecuación obtenida con un ajuste por mínimos cuadrados del 94%, lo que representa la regularidad en la intensidad de la lluvia simulada.

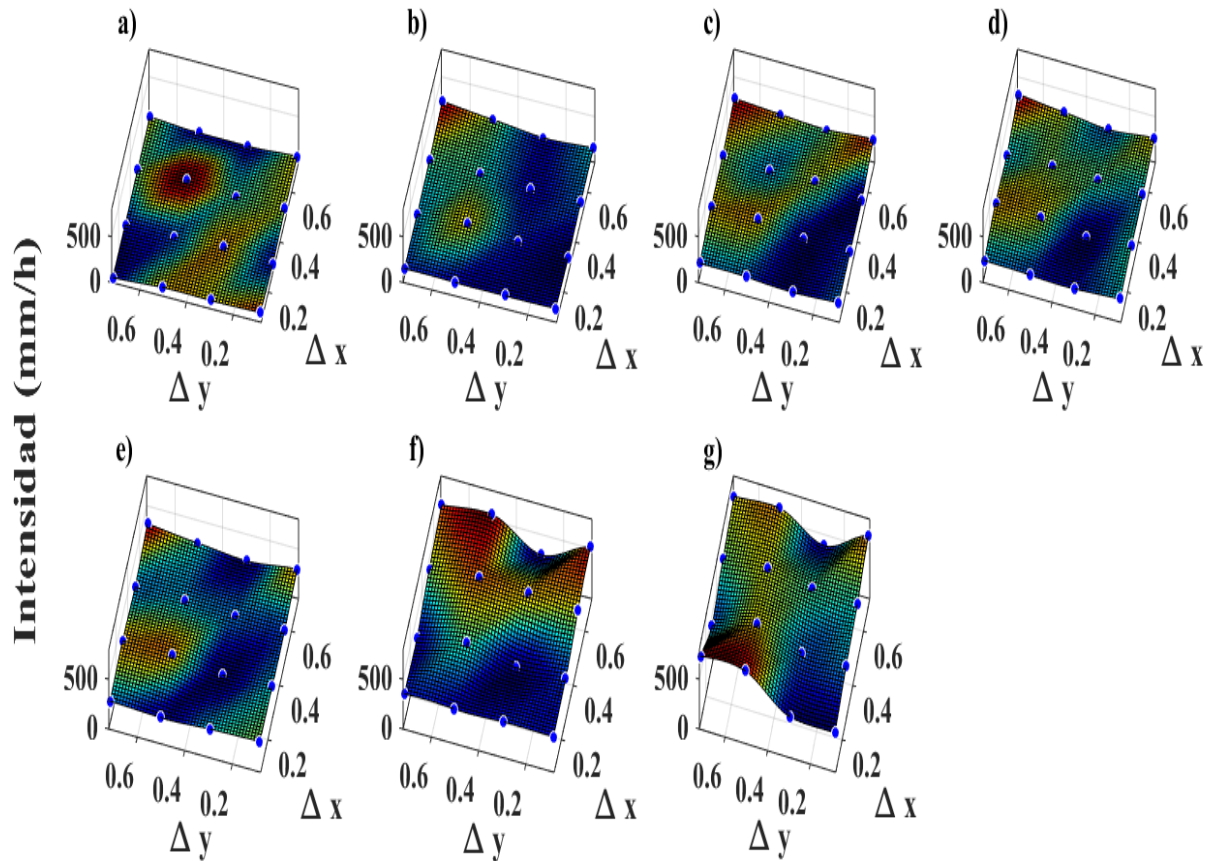


Figura 25. Distribución espacial de la intensidad de la lluvia a diferentes grados de apertura de la válvula con límite de posición a)  $10^\circ$ , b)  $20^\circ$ , c)  $30^\circ$ , d)  $40^\circ$ , e)  $50^\circ$ , f)  $60^\circ$  y g)  $70^\circ$ .

En la Figura 25, se muestra la distribución espacial cúbica ajustada del comportamiento de la lluvia simulada a diferentes intensidades de lluvia, con un coeficiente de uniformidad obtenido en promedio del 85%, lo cual es aceptable. A pesar de automatizar el sistema de control, aumentar la presión y de realizar ajustes mecánicos al sistema, se muestra una tendencia en el área de impacto en la parte superior izquierda, por lo cual se necesita realizar cambios en la perforación de los orificios para disminuir este efecto.

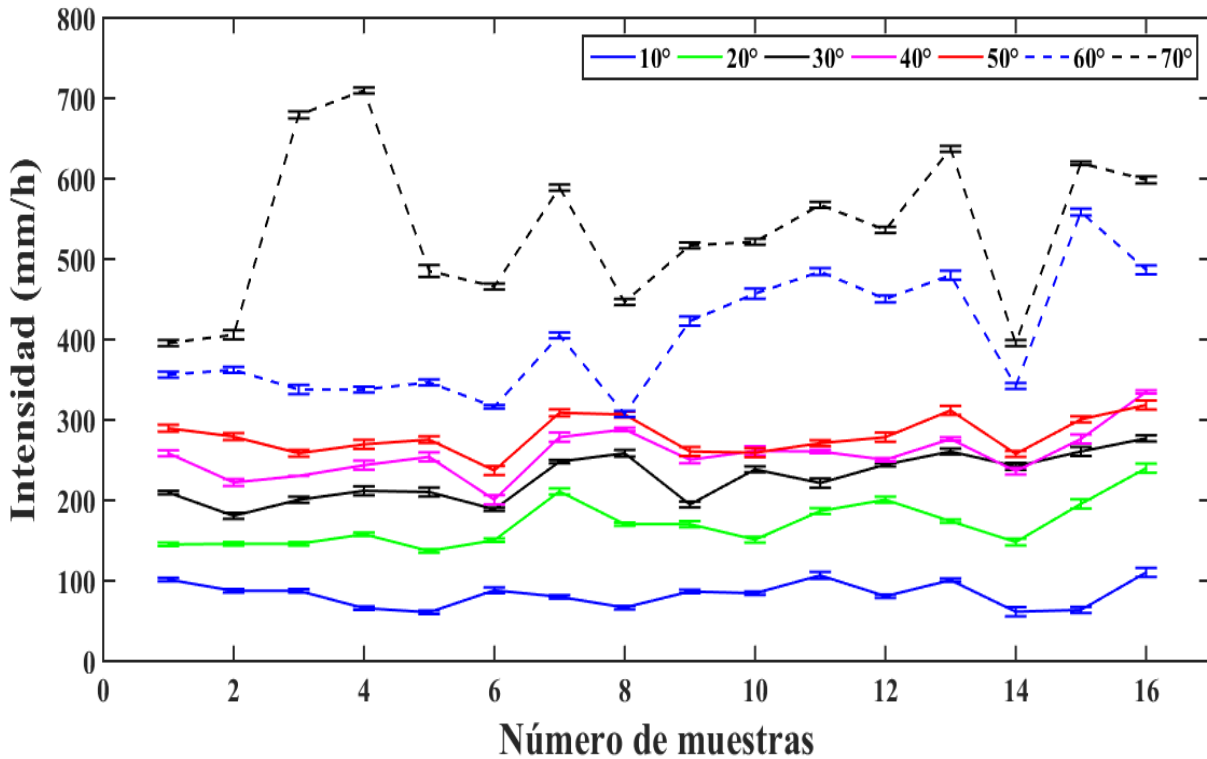


Figura 26. Intensidad de la lluvia obtenida a través del control automatizado a diferentes intervalos de control.

Los resultados con el sistema de control automatizado se presentan en la Figura 26, el cual representa el comportamiento de las intensidades a diferentes grados de control sobre la válvula (10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60° y 70°). Se determinaron los CUC (%) para cada intensidad de lluvia de 84.4, 86.5, 88.7, 91.6, 93.1, 83.9 y 84.8, lo cual es considerado como aceptable (Herngren, 2005; Egodawatta, 2007; Moazed 2010), con valores de energía cinética (J/mm m<sup>2</sup>) para cada intensidad de 27.5, 28.9, 29.2, 29.2, 29.2, 29.3 y 29.3. Lo cual se obtuvo automatizando el sistema de control, aumentando y distribuyendo la presión del agua en el sistema y evitando curvas en las tuberías. Con lo cual se logró controlar con mayor precisión el flujo de salida del agua y obtener coeficientes de uniformidad muy aceptables en las diferentes intensidades, evidenciándose que el tipo de control, el aumento de la presión de trabajo y minimizando curvaturas en el sistema ayudan a tener un buen grado de uniformidad de una lluvia simulada.

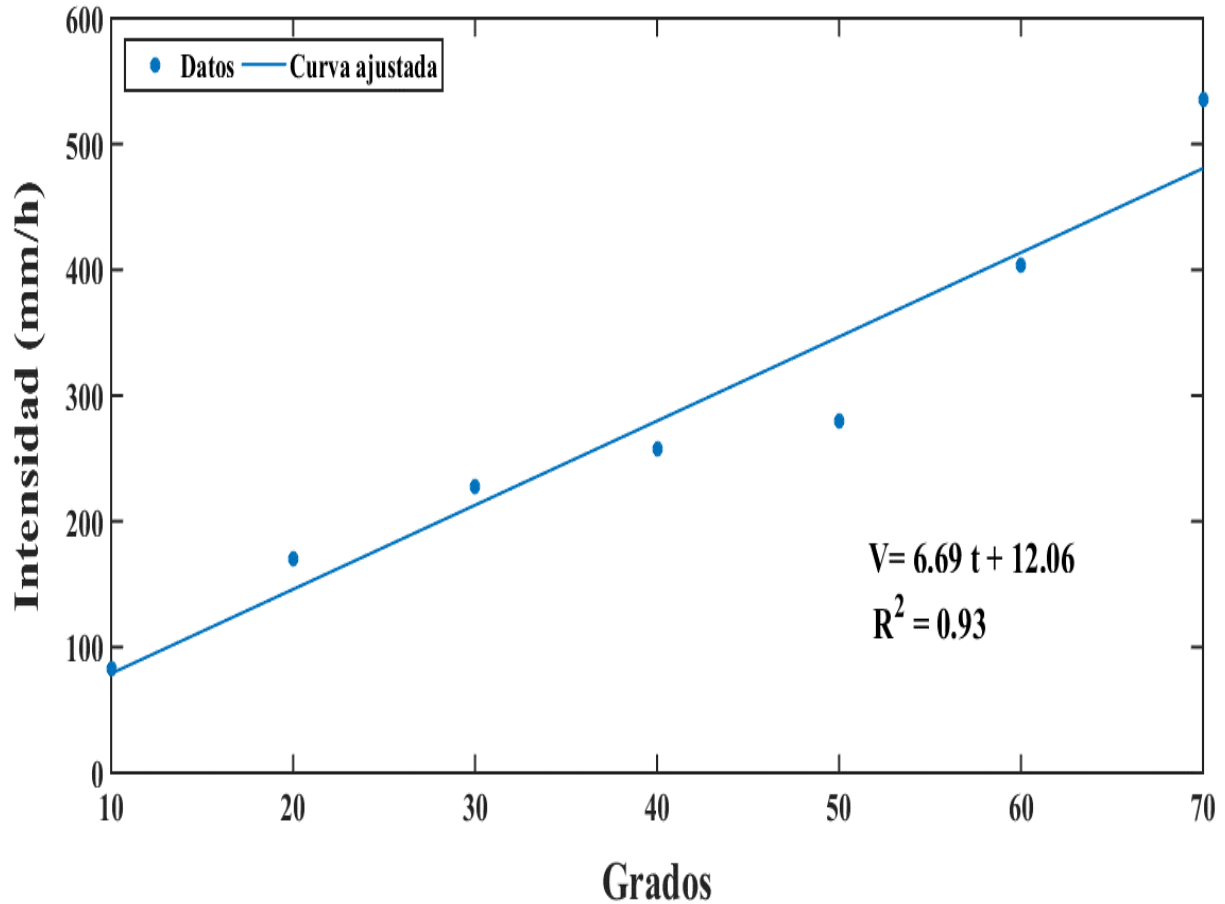


Figura 27. Promedios de intensidad de la lluvia obtenida a través del control automatizado a diferentes intervalos de control con su ajuste lineal.

Para perfeccionar el control de la válvula automatizada se realizó el promedio de la intensidad en cada uno de los tiempos de control efectuados, obteniéndose la gráfica de la Figura 27. En que se ostenta la ecuación lineal conseguida con un ajuste por mínimos cuadrados del 93%, representando la regularidad en el control de la intensidad de la lluvia.

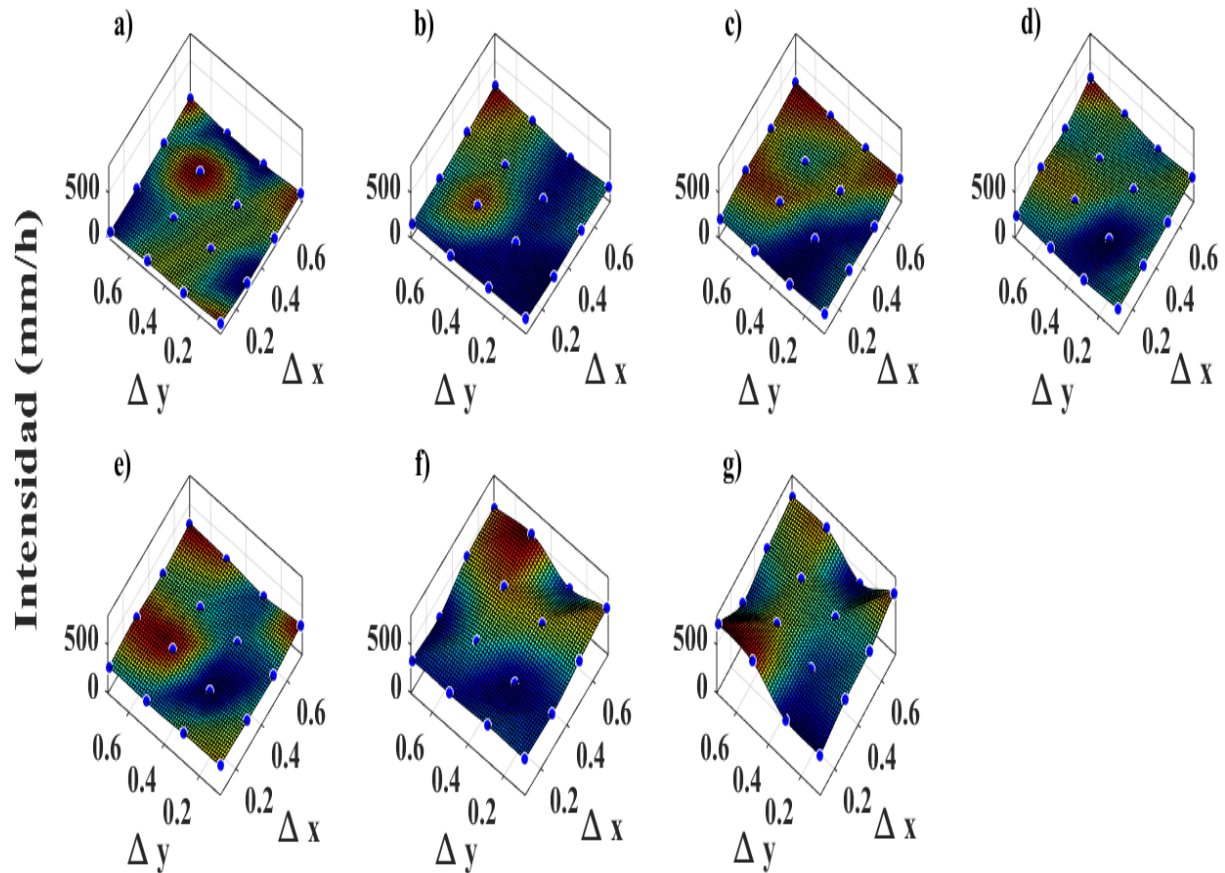


Figura 28. Distribución espacial de la intensidad de la lluvia obtenida a diferentes intervalos de control automatizado a) 10°, b) 20°, c) 30°, d) 40°, e) 50°, f) 60° y g) 70°.

En la Figura 28, se presenta la distribución espacial cúbica ajustada del comportamiento de la lluvia simulada a diferentes tiempos de apertura de la válvula automatizada, obteniéndose un promedio del coeficiente de uniformidad del 87.6%, por lo que se considera muy aceptable. Cabe mencionar que, a pesar de tener ese coeficiente de uniformidad, se observan pequeñas variaciones marcadas en color rojo en la parte superior izquierda, lo que hace indispensable perfeccionar aún más el diseño del sistema para obtener una distribución espacial más uniforme.

## 5. Conclusiones

De los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se puede concluir que:

El diseño, construcción y operación del simulador de lluvias permitieron utilizar materiales de bajo costo, de fácil transporte y montaje en campo o en laboratorio.

El simulador de lluvias permitió utilizar diferentes mecanismos de control para generar desde gotas hasta un flujo constante a diferentes presiones de trabajo e intervalos de tiempo.

El diseño mecánico de la tubería permitió mejorar la presión de salida del agua.

A pesar de que el sistema de control manual posee un CUC superior al 90%, el control de los ángulos de apertura de la válvula es imprescindible a través de este sistema.

A partir de los diferentes sistemas de control se pudo construir modelos matemáticos que representan el comportamiento del volumen de la salida en función del tiempo de apertura de cada mecanismo de control.

Los resultados de las pruebas realizadas por gravedad a través del mecanismo de control manual presentaron un coeficiente de uniformidad superior al 90% y una energía cinética en promedio de  $28.9 \text{ J/mm m}^2$ , con el control con electroválvula a diferentes tiempos de apertura presentó un coeficiente de uniformidad superior al 90%, con una energía cinética de 23.8 para una lluvia de baja intensidad hasta  $27.6 \text{ J/mm m}^2$  que corresponde a una lluvia muy intensa, logrando un coeficiente de uniformidad del sistema del 82.12%, obteniéndose un ajuste por mínimos cuadrados de 97%, lo cual indica una alta repetitividad del sistema.

Para presiones de trabajo mayores utilizando la válvula con límites de posición presentó a diferentes grados de apertura de esta un coeficiente de uniformidad superior al 90%, con una energía cinética en promedio de  $28.8 \text{ J/mm m}^2$ , obteniéndose un coeficiente de uniformidad del sistema en promedio del 85%, con un ajuste por mínimos cuadrados en el control del 94%, lo cual indica una alta repetitividad, con el control con válvula automatizada (servomotor) presentó a

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

diferentes tiempos de apertura de la válvula un coeficiente de uniformidad superior al 90%, con energías cinéticas para una lluvia de baja intensidad de 27.5 y de hasta de 29.3 J/mm m<sup>2</sup> para una lluvia muy intensa, logrando un coeficiente de uniformidad del sistema en promedio del 88%, con un control por ajuste de mínimos cuadrados del 93%, lo cual indica una alta repetitividad del sistema.

De los diferentes mecanismos de control empleados por gravedad o con presión, el que tiene mayor coeficiente de uniformidad en promedio es el mecanismo de control manual con un 93%, lo cual es debido a que los orificios fueron menos, tuvo menos tuberías y el tiempo de simulación fue mayor estabilizando la circulación del agua en la tubería.

De los tres sistemas de control con menor tiempo de simulación el que presenta mayor coeficiente de uniformidad es el mecanismo de control automatizado con un 88% en promedio, con margen de error mínimo en el control, lo cual indica su alta repetibilidad, presentando una energía cinética en promedio de 29 J/mm m<sup>2</sup>, la cual aumenta conforme a la intensidad, lo cual se logró aumentando la presión y automatizando el sistema control, mientras que en el control manual a pesar de ser más homogéneo su desventaja es que presenta un mayor margen de error en el control, ya que es muy difícil repetir la apertura a la misma distancia.

Otra ventaja del sistema es que no existe diferencia significativa en los coeficientes de uniformidad en los diferentes mecanismos de control utilizados, lo cual quiere decir que el sistema se estabiliza muy rápido.

Finalmente, el trabajo a seguir con el simulador de lluvias construido es estudiar uno de los problemas que generan las precipitaciones como es la erosión del suelo esto debido a que facilita y reduce los plazos de la investigación, ya que es muy difícil saber con certeza, donde y cuando lloverá, así como sí el evento tendrá la intensidad y duración necesaria para causar erosión.



## 6. Referencias bibliográficas

- Abudi, I., Carmi, G., & Berliner, P. (2012). Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology*, 454–455, 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.056>
- Aoki, A. M., & Sereno, R. (2006). Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientía*, 23(1), 23–31.
- Arnaez, V. J., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., & Ortigosa, L. (2007). Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Elsevier*, 93(2), 324–334. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.013>
- Benito, E., de Blas, E., Santiago, J. L., & Varela, M. E. (2001). Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe Coruña*, 26, 211–220.
- Benito Rueda, E., & Gómez Ulloa, A. & F. (1986). Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erodabilidad del suelo y estabilidad de los agregados. *Anales de Edafología y Agrobiología*, XLV (9–10), 1115–1126.
- Bian, B., Cheng, X.-J., & Li, L. (2011). Investigation of urban water quality using simulated rainfall in a medium size city of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 183(1–4), 217–229. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1916-y>
- 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*. Recuperado a partir de [http://digitalcommons.calpoly.edu/ersc\\_fac/22](http://digitalcommons.calpoly.edu/ersc_fac/22)
- Brawn, D., & Upton, G. (2008). Estimation of an atmospheric gamma drop size distribution using disdrometer data. *Atmospheric Research*, 87(1), 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.07.006>

- Campos, E. F., Zawadzki, I., Petitdidier, M., & Fernandez, W. (2006). Measurement of raindrop size distributions in tropical rain at Costa Rica. *Journal of Hydrology*, (328), 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.047>
- Carmi, G., & Berliner, P. (2008). The effect of soil crust on the generation of runoff on small plots in an arid environment. *Catena*, 74, 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.02.002>
- Carreras Nampulá, J. L., García Lara, C. M., Espinoza Medinilla, E., Gonzáles Herrera, R., & Medina Sansón. (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., J. D. Greer, H. J. Braud, & J. M. Floyd. (1974). Raindrop Characteristics in South Central United States. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1033–1037. <https://doi.org/10.13031/2013.37021>
- Carvalho, S. C. P., de Lima, J. L. M. P., & de Lima, M. I. P. (2014). Using meshes to change the characteristics of simulated rainfall produced by spray nozzles. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(2), 67–78. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30007-1](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30007-1)
- Cazalac. (2004). *Simulador de lluvia, construcción y especificaciones* (p. 12). La Serena, Chile.
- Cerdá, A., Ibáñez, S., & Calvo, A. (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, (11), 163–170. [https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00135-3](https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00135-3)
- Cerdà, A., Ibáñez, S., & Calvo, A. (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, 11(2), 163–170. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00135-3)

- Corona, R., Wilson, T., D'Adderio, L. P., Porcù, F., Montaldo, N., & Albertson, J. (2013). On the Estimation of Surface Runoff through a New Plot Scale Rainfall Simulator in Sardinia, Italy. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 875–884. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.097>
- Coutinho, M. A., & Tomás, P. P. (1995). Characterization of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Center. *CATENA*, 25(1–4), 187–197. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00009-H](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00009-H)
- Cruvinel, P. E., Minatel, E. R., Mucheroni, M. L., Vieira, R. S., & Crestana, S. (1996). An Automatic Method Based on Image Processing for Measurements of Drop Size Distribution from Agricultural Sprinklers. In *Proceedings of Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica E Processamento de Imagens (SIBGRAPI)*, 39–46.
- Cruvinel, P. E., Vieira, S. R., Crestana, S., Minatel, E. R., Mucheroni, M. L., & Neto, A. T. (1999). Image processing in automated measurements of raindrop size and distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 23(3), 205–217. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00043-5)
- de Luna, E., Laguna, A., & Giráldez, J. V. (2000). The role of olive trees in rainfall erosivity and runoff and sediment yield in the soil beneath. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4(1), 141–153. <https://doi.org/10.5194/hess-4-141-2000>
- De Vente, J., & Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Science Direct*, 71(1–2), 95–125. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
- Echeverría, N. E., Vallejos, A. G., & Silenzi, J. C. (2006a). Erodabilidad de suelos del sur de la Región Semiárida argentina. *Ciencia Del Suelo*, 24(1), 49–57.

- Echeverría, N. E., Vallejos, A. G., & Silenzi, J. C. (2006b). Erodabilidad de suelos del sur de la Región Semiárida argentina. *Ciencia del suelo*, 24(1), 49–57.
- Egodawatta, P. K. (2007). *Translation of small-plot scale pollutant build-up and wash-off measurements to urban catchment scale* (Thesis). Queensland University of Technology. Recuperado a partir de <http://eprints.qut.edu.au/16502/>
- Eigel, J. D., & I. D. Moore. (1983). A Simplified Technique for Measuring Raindrop Size and Distribution. *Transactions of the ASAE*, 26(4), 1079–1084. <https://doi.org/10.13031/2013.34080>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- FAO. (2015). Carta mundial de los suelos revisada. Recuperado el 14 de abril de 2016, a partir de <http://www.fao.org/3/b-i4965s.pdf>
- Fernández-Raga, M., Fraile, R., Keizer, J. J., Varela Teijeiro, M. E., Castro, A., Palencia, C., ... Da Costa Marques, R. L. (2010). The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: An application to splash erosion. *Atmospheric Research*, 96(2–3), 225–240. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.07.013>
- Furegatti, S. A. (2012). *Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ* (Doctoral). Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Gopinath, K., Lucke Terry, & Nichols Peter. (2016). Rain Drop Measurement Techniques: A Review, 8(29), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w8010029>
- Grismer, M. E. (2012). Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion. *California Agriculture*, 66(3). <https://doi.org/10.3733/ca.v066n03p102>

- Hacker, P. T. (1956). An oil-stream photomicrographic aeroscope for obtaining cloud liquid-water content and droplet size distributions in flight. *ResearchGate*. Recuperado a partir de [https://www.researchgate.net/publication/4718780\\_An\\_oil-stream\\_photomicrographic\\_aeroscope\\_for\\_obtaining\\_cloud\\_liquid-water\\_content\\_and\\_droplet\\_size\\_distributions\\_in\\_flight](https://www.researchgate.net/publication/4718780_An_oil-stream_photomicrographic_aeroscope_for_obtaining_cloud_liquid-water_content_and_droplet_size_distributions_in_flight)
- Haruya Minda, & Tsuda, N. (2012). Low-cost laser disdrometer with the capability of hydrometeor imaging. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 7(S1), S132–S138. <https://doi.org/10.1002/tee.21827>
- Hasholt, B. (2002). *Modelling erosion, sediment transport and sediment yield* (Technical Documents in Hydrology No. 60) (p. 263). Paris: UNESCO.
- Herngren, L. F. (2005). *Build-up and wash-off process kinetics of PAHs and heavy metals on paved surfaces using simulated rainfall* (Thesis). Queensland University of Technology. Recuperado a partir de <http://eprints.qut.edu.au/16111/>
- Hincapié, G. E., & Rivera, P. H. (2003). Validación del factor erodabilidad en suelos de la unidad Chinchiná, Melanudands, mediante el uso de simulador de lluvias, *54*(1), 77–89.
- Hogue, T. S., Gupta, H., & Sorooshian, S. (2006). A “User-Friendly” approach to parameter estimation in hydrologic models. *Journal of Hydrology*, *320*(1–2), 202–217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.009>
- Horstmeyer, S. L. (2008). Deformation of Falling Rain Drops. Recuperado el 4 de octubre de 2016, a partir de <http://www.shorstmeyer.com/wxfaq/float/dropdeform.html>
- Hudson, N. (1961). An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of subtropical rainfall. *Rhod. Sci. Assoc. Proc. Trans*, (159), 14–25.

- Hudson, 68. (1997). Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68). En *Capítulo 6. Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. Ampthill, Bedford Reino Unido.
- Humphry, B. D., T. Edwards, D., & Sharpley, A. (2002). A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(2), 199–204.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Blanquer, G. (2012). El uso de un simulador de lluvia. Recuperado a partir de <https://riunet.upv.es/handle/10251/16571>
- Jayawardena, A. W., & Rezaur, R. B. (2000). Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong. *Hydrological Processes*, 14(6), 1069–1082. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000430\)14:6<1069: AID-HYP997>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000430)14:6<1069: AID-HYP997>3.0.CO;2-Q)
- Junior, S. F. S., & Siqueira, E. Q. (2011). Development and Calibration of a Rainfall Simulator for Urban Hydrology Research. En 12 (pp. 11–16). Porto Alegre/Brazil.
- Karydas, C. G., Panagos, P., & Gitas, I. Z. (2012). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth* 2014, 7(3), 229–250. <https://doi.org/http://doi.org/10.1080/17538947.2012.671380>
- Kinell, P. I. A. (1973). The problem of assessing the erosive power of rainfall from meteorological observations. *Proc Soil Sci Soc Am*. Recuperado a partir de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201303145977>
- Kinner, D. A., & Moody, J. A. (2008). *Infiltration and runoff measurements on steep burned hillslopes using a rainfall simulator with variable rain intensities* (No. Report 2007–5211) (p. 64). Denver Colorado: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

- Kruger, A., & Krajewski, W. F. (2002). Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(5), 602–617. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0602: TDVDAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0602: TDVDAD>2.0.CO;2)
- Lagos Farías, E. G., & Pizarro Tapia, R. (Prof G. (2006). *Caracterizacion del proceso precipitacion-escorrentia solida utilizando un simulador de lluvia*. (Thesis). Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingenieria Forestal. Recuperado a partir de <http://dspace.utralca.cl/handle/1950/3779>
- Lilly, A. G., Jordan, L., Baggaley, N., Birnie, R., Futter, M., Higgins, A., & Towers, W. (2009). *Climate change, land management and erosion in the organic and organomineral soils in Scotland and Northern Ireland* (ROAME No. F06AC104 - SNIFFER UKCC21 No. Scottish Natural Heritage Commissioned Report N°. -325) (p. 262). Macaulay: University of Stirling.
- Löffler-Mang, M., & Jürg Joss. (2000). An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(2), 130–139. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0130: AODFMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0130: AODFMS>2.0.CO;2)
- Lu, J.-Y., Su, C.-C., Lu, T.-F., & Maa, M.-M. (2008). Number and volume raindrop size distributions in Taiwan. *Hydrological Processes*, 22(13), 2148–2158. <https://doi.org/10.1002/hyp.6814>
- Marelli, H., Arce, J., & Masiero, B. (1986). Simulador de lluvias para investigación básica en conservación de suelos. *Técnica*, 8(15).
- Marelli, H., Mir, B., Arce, J., & Lattanzi, A. (1984). Evaluación de erosión hídrica en suelo labrado. *Argentina: Suelos y Agroclimatología.*, 8.

- Martínez-Mena, M. D., Abadía, R., Castillo Sánchez, V. M., & Albaladejo Montoro, J. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *Revista C & G*, *15*(1–2), 31–43.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., & Jakeman, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, *18*, 761–799.
- Meyer, L. (1958). Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural Engineering*, *39*, 644–648.
- Moazed, H., Bavi, A., Boroomand-, S., Naseri, A., & Albaji, M. (2010). Effects of Climatic and Hydraulic Parameters on Water Uniformity Coefficient in Solid Set Systems. *Journal of Applied Sciences*, *10*(16), 1792–1796. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.1792.1796>
- Moussouni, A., Mouzai, L., & Bouhadeb, B. (2014). The Effect of Raindrop Kinetic Energy on Soil Erodibility. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, *8*(12). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.066>
- Navas, A., Alberto, F., Machín, J., & Galán, A. (1990). Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology*, *3*(4), 385–397. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(90\)90019-Y](https://doi.org/10.1016/0933-3630(90)90019-Y)
- Nystuen, J. A. (2001). Listening to Raindrops from Underwater: An Acoustic Disdrometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *18*(10), 1640–1657. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<1640:LTRFUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<1640:LTRFUA>2.0.CO;2)
- Ognjen Gabric. (2014). Uncertainty Assessment of Rainfall Simulator Uniformity Coefficient. *Journal of Faculty of Civil Engineering*, 661–667.
- Ogunye, F. O., & Boussabaine, H. (2002). Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment. *Construction and Building Materials*, *16*(3), 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00010-7)



- Onaga, K. S., Yoshinaga, A., & Rimwanich, S. (1988). Rainfall erosion and how to control its effects on farmland in Okinawa. *Land Conservation for Future Generations Department of Land Development, Bangkok*.
- Paige, G. B., Stone, J. J., Smith, J. R., & Kennedy, J. R. (2004). Walnut Gulch Rainfall Simulator: a computer-controlled variable intensity rainfall simulator. *Applied Engineering in Agriculture*. Recuperado a partir de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300988275>
- Palmaricciotti, G., Patzke, J., Hellmers, S., Manojlovic, N., & Fröhle, P. (2014). Rainfall Simulator RS-TUHH – Planning, Construction and Use. *Institute for River and Coastal Engineering*, 1–9.
- Parsakhoo, A., Lotfalian, M., Kavian, A., Hoseini, S. A., & 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). <https://doi.org/10.5897/AJAR12.202>
- Pérez-Latorre, F. J., de Castro, L., & Delgado, A. (2010). A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. *Soil and Tillage Research*, 107(1), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.12.009>
- Pérez-Nieto, S., Arellano-Monterrosas, J. L., Ibáñez-Castillo, L. A., & Hernández-Saucedo, F. R. (2012). Estimación De La Erosión Hídrica Provocada Por El Huracán Stan En Las Cuencas Costeras De Chiapas, México. Recuperado el 30 de junio de 2016, a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57324446001>
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J. L., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Elsevier*, 45(3), 185–2007. [https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00148-5](https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00148-5)

- Qing-feng, Z., Li, W., & Fa-qi, W. (2008). GIS-Based Assessment of Soil Erosion at Nihe Gou Catchment. *Agricultural Sciences in China*, 7(6), 746–753. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60110-8](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60110-8)
- Rosewell, C. J. (1986). Rainfall Kinetic Energy in Eastern Australia. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(11), 1695–1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<1695:RKEIEA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<1695:RKEIEA>2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0147-2>
- Sheridan, G. J., Noske, P. J., Lane, P. N. J., & Sherwin, C. B. (2008). Using rainfall simulation and site measurements to predict annual interrill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. *CATENA*, 73(1), 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.08.006>
- Sudheer, K. P., & Panda, R. K. (2000). Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles. *Agricultural Water Management*, 45(2), 159–167. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00079-7)
- Uijlenhoet, R., Porrà, J. M., Torres, D. S., & Creutin, J.-D. (2006). Analytical solutions to sampling effects in drop size distribution measurements during stationary rainfall: Estimation of bulk rainfall variables. *Journal of Hydrology*, 328(1–2), 65 à 82. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.043>
- Van Dijk, A. I. J. M., Bruijnzeel, L. A., & Rosewell, C. J. (2002). Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261(1–4), 1–23. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00020-3)

Vaze, J., & Chiew, F. H. S. (2003). Study of pollutant washoff from small impervious experimental plots. *Water Resources Research*, 39(6), 1160. <https://doi.org/10.1029/2002WR001786>

Wischmeier, W. H. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Amer. Geophys. Union*, (39), 285–291.

Zanchi, C., & Torri, D. (1980). Evaluation of rainfall energy in central Italy. *Soil Erosion Assessment*, 133–142.

### Resultados obtenidos del trabajo

1. Elaboración del primer artículo que tiene por nombre **“Análisis de la intensidad y duración de la lluvia simulada mediante manipulación manual, para el diseño y construcción de un simulador de lluvias”**, Revista LACANDONIA, año 9, vol. 9, no. 2: 73-78, diciembre de 2015.
2. Participación en el primer coloquio internacional “Los nuevos horizontes de la Sustentabilidad y la Gestión de Riesgos en el Siglo XXI” celebrado del 24 al 25 de septiembre del 2015 en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas con el tema **“Análisis de la intensidad y duración de la lluvia simulada utilizando dispositivos de control eléctrico”**.
3. Participación como ponente en el XX Ciclo de seminarios de la escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) celebrado el 2 de marzo del 2016 con el tema **“Simulador de lluvia”**.
4. Participación en el Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Tabasco 2016, celebrado del 9 al 11 de marzo 2016 en Villahermosa, Tabasco, México con el tema **"Sistema automático para la simulación de lluvias para estudios de escorrentía superficial y erosión de suelo"**, el artículo se encuentra publicado en las memorias del congreso en el portal de internet AcademiaJournals.com, con ISSN 1946-5351, vol.8 #1, 2016.
5. Participación en el primer coloquio de investigación “Desarrollo Sustentable y Gestión de Riesgos” celebrado el 14 de junio del 2016 en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas con el tema **“Diseño, construcción y calibración de un simulador de lluvias”**.

6. Elaboración del artículo: **“Diseño y calibración de un simulador automático de lluvia”**, Revista Espacio I+D vol. no. 12: 23-37, octubre de 2016 con ISSN: 2007 – 6703.
7. Elaboración del artículo: **“Diseño, construcción y calibración de un simulador de lluvia para investigación de procesos hidrológicos”** el cual fue enviado a la Revista Interciencia para su evaluación.

**Anexos**

**Anexo 1.**

*Tabla 5. Estudios donde se han utilizado simuladores de lluvias para evaluar los diferentes efectos que generan las precipitaciones.*

<b>Estudio y localización</b>	<b>Tamaño de la parcela</b>	<b>Tipo de simulador</b>	<b>Intensidad mm h<sup>-1</sup></b>	<b>CUC (%)</b>	<b>Energía cinética</b>	<b>Velocidad terminal (m/s)</b>	<b>Tipo de lluvia simulada</b>	<b>Portabilidad</b>
(Corona <i>et al.</i> , 2013) Sardinia, Italia	3.6 * 4.2 m	Pulverizador	31 - 62	62 - 75	n. r	Rango entre 1.1 – 5.1	Continua	Si
(Bian <i>et al.</i> , 2011) Zhenjiang, Este de China	3 * 4 m	Pulverizador	40 - 110	n. r	n. r	n. r	Intermitente	Si
(Junior & Siqueira, 2011) Goiânia, GO, Brasil	1.5 * 2 m	Pulverizador	40 - 182	68.3 – 82.2	n. r	8.4	Intermitente	Si
(Sheridan <i>et al.</i> , 2008)	1.5 * 2 m	Pulverizador	100	n. r	0.295 MJ ha <sup>-1</sup> mm <sup>1</sup>	n. r	Continua	Si
(Arnaez <i>et al.</i> , 2007) La Rioja, España	0.45 m de diámetro	Pulverizador	<40 45-70 >70	n. r	9.1 11.6 15.6	4.4 y 5.3	Continua	Si
(Echeverría <i>et al.</i> , 2006) Argentina	1*1 m	Pulverizador	32	n. r	275 kJ ha <sup>-1</sup> mm <sup>1</sup>	n. r	Continua	Si

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

(Aoki & Sereno, 2006)  Córdoba, Argentina	0.25 *0.25 m	Goteador	15 y 130	n. r	12.7 kJ m <sup>-2</sup> m <sup>1</sup>	n. r	Continua	Si
(Hincapié G. & Rivera P., 2003)  m.n. d= muestras no disturbadas m.d= muestras disturbadas  Caldas, Colombia	Parcelas de 1m <sup>2</sup> .  Bandejas de 0.08258 m <sup>2</sup> /m.n.d. Bandejas de 0.08258 m <sup>2</sup> /m.d.	Pulverizador	100	n. r	n. r	n. r	Continua	Si
(Vaze & Chiew, 2003)  Melbourne, Australia	2.1 * 0.7	Pulverizador	20 – 60	>90	n. r	n. r	n. r	Si
(Martínez-Mena <i>et al.</i> , 2001)  Murcia, España	2 * 2 m	Pulverizador	33 y 60	88.76 y 91.29	275.07 y 1070.29 J m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	4.51 y 5.94 m s <sup>-1</sup>	Continua	Si
(Poulenard <i>et al.</i> , 2001)  Norte de Ecuador	1 m <sup>2</sup>	Pulverizador	20, 27, 50, 70, 90 y 120	n. r	118, 168, 340, 499, 663 y 918 J. m <sup>-2</sup>	n. r	Continua	Si
(Cerdà <i>et al.</i> , 1997)  Sureste de España	0.24 m <sup>2</sup>	Pulverizador	54.6	93.24	7.1 J m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup>	3.4	Continua	Si

n. r= No reportado

**Anexo 2.**

*Tabla 6. Estudios realizados en diferentes países donde han relacionado la energía cinética ( $J/mm\ m^2$ ) y la intensidad de lluvia. (mm/h).*

<b>Autor</b>	<b>País</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Rango de intensidad (mm h<sup>-1</sup>)</b>
(Wischmeier, 1958)	EE.UU.	$E_c = 11.87 + 8.73 \log_{10} I$	0.4-144
(Hudson, 1965)	Zimbabwe	$E_c = 29.8 - (127/I)$	n. r
(Carter <i>et al.</i> , 1974)	Sur y centro de EE. UU.	$EC = 11.32 + 0.5546 (I) - 0.005 \cdot 10^{-2} \cdot I^2 + 0.00126 \cdot 10^{-4} I^3$	< 260
(Rosewell, 1986)	New South, Australia	$E_c = 29 [1 - 0.6 \exp^{-0.04 I}]$	1-146
(Coutinho & Tomás, 1995)	Portugal	$E_c = 35.9 [1 - 0.56 \exp(-0.034 I)]$	0-120
(Zanchi & Torri, 1980)	Italia	$E_c = 9.81 + 11.25 \log_{10} I$	1-140
(Jayawardena & Rezaur, 2000)	Hong Kong	$E_c = 36.8 [1 - 0.69 \exp^{-0.038 I}]$	12-120
(Onaga <i>et al.</i> , 1988)	Okinawa, Japón	$E_c = 9.81 + 10.60 \log I$	n. r
(Van Dijk <i>et al.</i> , 2002)	Australia	$E_c = 28.3 [1 - 0.52 \exp^{-0.042 I}]$	n. r

n. r= No reportado

**Anexo 3.-**

*Tabla 7. Lista de materiales utilizado para la construcción del simulador de lluvia.*

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
3 tramos	Tubería metaliza de zintro de 1"
22 metros	Tubería de 12.7 mm (½") de PVC
8 metros	Tubería de 25.4 mm (1.1/4") de PVC
5 unidades	Codos de PVC de 1.1/4"
5 unidades	Codos de PVC de 1"
8 unidades	Codos de PVC de ½"
26 unidades	TEE de PVC de ½"
3 unidades	Adaptador macho de 1"
5 unidades	Adaptador macho de ½"
1 unidad	Cruz de ¾"
4 unidades	Reducción de ¾" a ½"
1 unidad	Reducción de 1.1/4" a ½"
3 unidades	Tuerca unión de 1"
1 unidad	Tuerca unión de ½"
2 unidades	Válvula esfera de 1 pulgada para cementar de PVC
6 unidades	Cinta teflón
1 unidad	Lija para fontanero de 1 m de largo
2 unidades	Pegamento para PVC marca FOSET de 500 ml
1 unidad	Broca para metal de 1/32



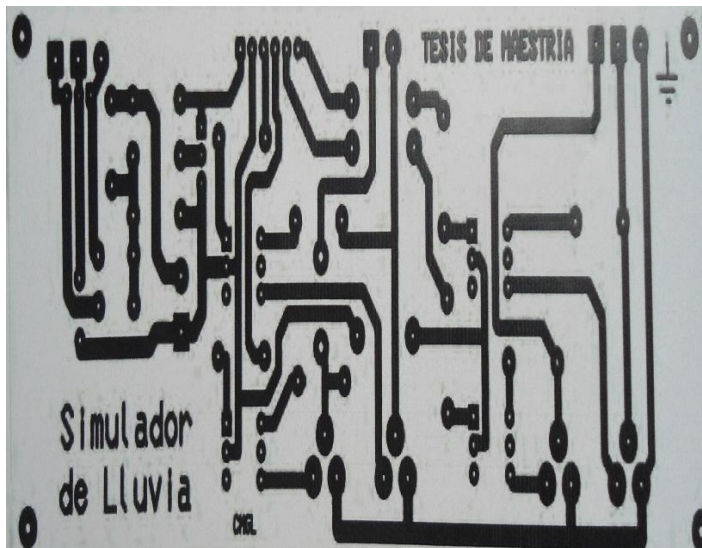
## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

1 unidad	Válvula esfera de latón roscable de 1" marca Foset
1 unidad	Electroválvula marca Daewoo modelo 3615403710
1 unidad	Servomotor modelo MG995 con torque de 15 Kg/cm
1 unidad	Bomba de ½ hp, marca rotoplas modelo Cm 050/23m
1 unidad	Tinaco marca rotoplas de 750 litros

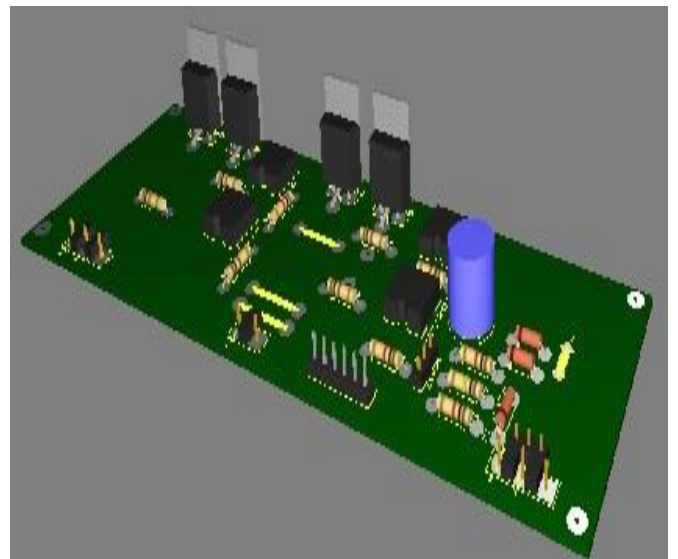
### Anexo 4.-

*Tabla 8. Lista de los componentes eléctricos para la construcción del circuito eléctrico.*

Cantidad	Descripción
4 unidades	TRIAC BTA08
4 unidades	MOC 3011
1 unidad	Capacitor de 1000 $\mu$ F
8 unidades	Resistencias de 330 $\Omega$
4 unidades	Resistencias de 1 k $\Omega$
3 unidades	Diodo rectificador
1 unidad	Transistor Bc547
2 unidades	Kulkas con 3 tornillos
1 unidad	Kulka con 2 tornillos
1 unidad	Placa fenólica o baquelita
1 unidad	Transformador
8 unidades	Terminales de cobre
1 unidad	Metro de termofil
24 metros	Cable dúplex # 12



*Figura 29. Diagrama del circuito eléctrico.*



*Figura 30. Placa con los diferentes componentes eléctricos.*

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS

**Anexo 5.-**

*Tabla 9. Datos históricos del comportamiento de la precipitación en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, recuperado de la comisión nacional del agua 2015.*

Numero: 00007238													
Nombre: EL SABINAL, TUXTLA GUTIERREZ													
Codigo Elem: 208													
Nombre Elem: LLUVIA TOTAL MENSUAL													
	<b>MESES</b>												
	<b>ENE.</b>	<b>FEB.</b>	<b>MAR.</b>	<b>ABR.</b>	<b>MAY.</b>	<b>JUN.</b>	<b>JUL.</b>	<b>AGO.</b>	<b>SEP.</b>	<b>OCT.</b>	<b>NOV.</b>	<b>DIC.</b>	<b>SUMA</b>
1988	92.1	42.1	0	9.2	33	234.1	182.3	353.5	217.6	100.9	16.5	11.5	1292.8
1989	31.1	84.5	0	28.9	86.9	87.3	301.2	119.5	298.9	128	44.2	32.7	1243.2
1990	67.4	38	8.7	40.9	44	228.3	92.7	177.5	149	127.4	162.2	62.4	1198.5
1991	32.5	19.5	5	0	87	62.5	121.9	117.2	248.8	116.5	52	53.4	916.3
1992	54.5	7	32	25.5	23.5	291.3	226.8	138.5			41.5	117	957.6
1993	56.5	10	58	0	147.5	356.5	163.5	319	148.5	113	12	56.5	1441
1994	57	30		8	126	67	15	133.1	194		69	86.5	785.6
1995	3	18.5	17	65	71	109.4	223.5	328	232.5	64	28	16	1175.9
1996	0	0	5	87	150	20		163	149	28	53	25	680
1997	0	48	20	25	23	190	182	54	194.5	56	100.5		893
1998	21	15	6	0	27.5	125	195.2	167.5	130	118	158.5	52.5	1016.2
1999	9	26	0	21	77.5	383	180	169	615.1	471.5	21.3		1973.4
2000	17.8	5	0	10	173.5	128	142	184	228	140	64	47	1139.3
2005		0	3	0	67	111.4	217.5	275	76.4	102.5	2		854.8
2006	0	0	0	10.1	230.7	188.6	189.6	200.1	225.8	67.7	0.3		1112.9
2007		0	3.5	0	87.7	144.8	121.8	381.2	152.9				891.9
2008						213.7	278	229.8		26.6	0.7		748.8
2009		0	0.8	7.9	39.1	245.2			86.5	164.6			544.1
2010		0.5	0	53.4	75.4	302.8							432.1
2011		0	1.6		7.5	110.4	232.6	365.5	382.2	73.9	0.3	0	1174
2012	0	12.6	13.8	19.6	47.4	124.2	120.7	325.4	167.9	26.2	0	4.7	862.5
2013	0.6	0	0	0	175.2	279.6	188.5	140	305.2				1089.1
Minimo	0	0	0	0	7.5	20	15	54	76.4	26.2	0	0	
Maximo	92.1	84.5	58	87	230.7	383	301.2	381.2	615.1	471.5	162.2	117	
Promedio	27.656	16.985	8.72	20.575	85.733	181.95	177.62	217.04	221.2	113.22	45.888	43.476	
Des. Est.	29.518	21.746	14.387	24.279	60.218	99.011	66.536	97.716	121.84	101.27	50.486	33.671	

**Anexo 6.-***Tabla 10. Datos de la estación de la facultad de ingeniería ambiental del comportamiento de la precipitación del día 19 de mayo del 2016.*

<b>Día</b>	<b>Hora</b>	<b>Lluvia (mm)</b>
19/05/16	2:10 a.m.	0.25
19/05/16	2:20 a.m.	0.25
19/05/16	2:30 a.m.	0.51
19/05/16	2:40 a.m.	0.25
19/05/16	2:50 a.m.	0.25
19/05/16	3:00 a.m.	0.25
19/05/16	3:10 a.m.	0.25
19/05/16	3:20 a.m.	0.25
19/05/16	3:30 a.m.	0.25
19/05/16	3:40 a.m.	0
19/05/16	3:50 a.m.	0.25
19/05/16	4:00 a.m.	0.25