

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Agrícola**

**Análisis de requerimientos, diseño y construcción
de un simulador de lluvia a nivel de laboratorio,
para la cuantificación de propiedades física-
erosivas de gotas**

Por:

Alexander José Kaune Schmidt

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Noviembre 2010

Análisis de requerimientos, diseño y construcción de un simulador de lluvia a nivel de laboratorio, para la cuantificación de propiedades físico-erosivas de gotas

Por:

Alexander José Kaune Schmidt

Sometido a la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica como requisito para optar por el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Aprobado por:

Ing. Georges Govaere Vicarioli, PhD.
Presidente del Tribunal

Ing. José Francisco Aguilar Pereira, MSc.
Director de Escuela y Tesis

Ing. Daniel Baudrit Ruiz, MSc.
Comité Asesor

Ing. Henry Alfaro Chavarría, MSc.
Comité Asesor

Ing. Ronald Aguilar Álvarez
Comité Asesor

“Sólo cuando el último árbol esté muerto, el último río envenenado, y el último pez atrapado, te darás cuenta que no puedes comer dinero”.

- Sabiduría indoamericana

AGRADECIMIENTO

A mi familia, Papa, Mama, Andrés, Daniel, Marcel: Son los mejores. Sus consejos, apoyo y amor, me han dado la fortaleza para alcanzar mis metas. Los quiero a todos.

A mis compañeros y amigos, Ronald y Mauricio: Gracias por escuchar y ayudar. “Vamos para adelante”.

A mi director de tesis, Francisco: Gracias por la guía y la paciencia. “Él que no sufre no gana”.

A mis lectores de tesis: Georges, Daniel y Henry. Gracias por sus recomendaciones. “Todos aprendemos a escuchar”.

A Jorge Arroyo: “Cuando las gotas no se ponen más pequeñas...” ¡Gracias!

A Walter Fernández: Gracias por la ayuda brindada.

A Don Herman: Gracias por la ayuda brindada.

A Don Carlos y Don Olman: Gracias por la ayuda brindada.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1 Justificación	1
1.2 Problemática	1
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico	4
2.1 Antecedentes	4
2.1.1 Simuladores de lluvia.....	4
2.1.2 Medición de diámetro y distribución de gotas de lluvia	5
2.2 Características deseables de la lluvia simulada	6
2.3 Ventajas y desventajas de simuladores de lluvia.....	6
2.4 Tipos de simuladores de lluvia	7
2.4.1 Simuladores de lluvia sin presión	7
2.4.2 Simuladores de lluvia a presión	7
2.5 Características físicas de la lluvia	10
2.5.1 Diámetro y distribución de gotas	10
2.5.2 Velocidad de caída de gotas.....	14
2.5.3 Energía cinética	17
2.5.4 Relación de energía cinética contra intensidad de lluvia natural	18
2.6 La erosividad de la lluvia.....	19
2.6.1 Impacto de la gota y escorrentía	19
2.6.2 Desprendimiento del suelo.....	20
CAPÍTULO 3: Metodología	22
3.1 Metodología para obtener curva de calibración	22
3.1.1 Determinación del volumen de las gotas	22
3.1.2 Determinación del diámetro medio de las gotas.....	24
3.1.3 Obtención de la relación entre diámetro medio de gota y la masa media de glóbulos de harina formados	25
3.1.4 Generación de gotas con diámetro menor	27
3.2 Metodología para la construcción y funcionamiento del simulador de lluvia.....	29
3.2.1 Materiales y equipo para la construcción del simulador.....	29
3.2.2 Ensamble del simulador	31

3.2.3 Ubicación del simulador de lluvia.....	32
3.2.4 Puesta en marcha del sistema.....	32
3.2.5 Coordenadas para colocar artefactos de medición	34
3.3 Metodología para obtener uniformidad de lámina de agua generada por el simulador	35
3.3.1 Pruebas preliminares	35
3.3.2 Pruebas finales.....	37
3.4 Metodología para obtener diámetro y distribución de gotas generadas por el simulador	39
3.4.1 Pruebas preliminares	39
3.4.2 Pruebas finales.....	42
3.5 Metodología para validar medición de velocidad de caída de gotas con cámara fotográfica	45
3.6 Metodología para obtener velocidades de caída de gotas con el simulador.....	47
CAPÍTULO 4: Resultados y análisis	49
4.1 Curva de calibración entre glóbulos de harina y gotas de agua	49
4.1.1 Diámetro medio de gota.....	49
4.1.2 Masa de glóbulos de harina.....	50
4.1.3 Curva de calibración.....	51
4.2 Uniformidad e intensidad de boquillas	53
4.3 Diámetro y distribución de gotas de lluvia simulada.....	57
4.4 Velocidad de caída de gotas.....	60
4.5 Energía por superficie por lámina de aplicación	62
4.5.1 Comparación con otros simuladores	62
4.5.2 Comparación con lluvia natural.....	62
CAPÍTULO 5: Consideraciones finales	64
5.1 Conclusiones	64
5.2 Algunas aplicaciones que pueden ser desarrolladas como resultado de este proyecto	65
5.3 Recomendaciones	65
BIBLIOGRAFÍA	66
APÉNDICE	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Simulador de lluvia con boquilla pulverizadora.....	5
Figura 2.2 Simulador de lluvia a presión.....	8
Figura 2.3 Perfil de distribución para una presión baja.....	9
Figura 2.4 Perfil de distribución para una presión alta.....	9
Figura 2.5 Perfil de distribución para una presión sugerida.....	9
Figura 2.6 Diámetro de gota según el 50% del volumen total.....	11
Figura 2.7 Distribución de gotas de lluvia natural.....	12
Figura 2.8 Relación entre el diámetro de gota correspondiente al volumen mediano y la intensidad.....	12
Figura 2.9 Curva de calibración.....	13
Figura 2.10 Fuerzas sobre una gota en el aire con velocidad terminal.....	15
Figura 2.11 Velocidad terminal según diámetro de gota, para una presión ambiente ($P = 1013 \text{ mb}$) y una temperatura ($T = 20^\circ\text{C}$).....	16
Figura 2.12 Velocidad de gotas para altura de caída.....	17
Figura 2.13 Relación de intensidad de lluvia natural con energía cinética.....	19
Figura 2.14 Relación entre el tamaño medio de las partículas del suelo y energía de la lluvia requerida para desprender 1 kg de sedimentos (el área sombreada muestra la variación de los resultados experimentales).....	21
Figura 3.1 Recolección de gotas en “beaker”.....	23
Figura 3.2 Agujas hipodérmicas utilizadas.....	24
Figura 3.3 Caída de gotas sobre harina.....	26
Figura 3.4 “Electrodrip” para generar gotas de menor diámetro.....	28
Figura 3.5 Simulador de lluvia y superficie de aplicación efectiva.....	31
Figura 3.6 Manómetro a la salida de boquilla.....	33
Figura 3.7 Coordenadas rectangulares del plano de pruebas.....	34

Figura 3.8 Perfil característico de la boquilla FL-5VS a 69 kPa.	36
Figura 3.9 Perfil característico de la boquilla FL-8VS a 21 kPa.	37
Figura 3.10 Superficie de aplicación efectiva (cuadro azul).	38
Figura 3.11 Glóbulos de harina obtenidos a 69 kPa (10 lb/pul ²).	40
Figura 3.12 Cajas petri con harina bajo el simulador.	41
Figura 3.13 Muestras de harina en cajas petri pequeñas.	42
Figura 3.14 Bandeja con harina compactada.	43
Figura 3.15 Gotas recibidas en bandeja con harina.	44
Figura 3.16 Glóbulos de harina.	45
Figura 3.17 Línea formada por una gota.	46
Figura 3.18 Colocación de cámara y zonas de recepción de gotas.	48
Figura 4.1 Diámetros de gota generados en laboratorio.	49
Figura 4.2 Masa de glóbulo para métodos de generación de gotas.	51
Figura 4.3 Curva de calibración, masa de glóbulo contra diámetro de gota.	52
Figura 4.4 Puntos de calibración generados por dos autores.	53
Figura 4.5 Distribución de intensidades para 21 kPa (medición 4).	55
Figura 4.6 Distribución de intensidades para 17 kPa (medición 1).	56
Figura 4.7 Distribución de intensidades para 14 kPa (medición 1).	57
Figura 4.8 Porcentaje de masa total de glóbulos de harina para 21 kPa.	58
Figura 4.9 Porcentaje de masa total de glóbulos de harina para 17 kPa.	58
Figura 4.10 Porcentaje de masa total de glóbulos de harina para 14 kPa.	59
Figura 4.11 Porcentaje de volumen acumulado de gotas.	59
Figura 4.12 Velocidad de caída para diferentes presiones residuales.	61
Figura 4.13 Energía generada para intensidades de lluvia.	63
Figura 6.1 Obtención de línea generada por la caída de gota para el simulador de lluvia... ..	80
Figura 6.2 Balanza semi-analítica y analizadora de humedad.	81
Figura 6.3 Balanza analítica.	82

Figura 6.4 Medición de lámina de agua con pluviómetro.....	83
Figura 6.5 Anemómetro digital.....	83
Figura 6.6 Termómetro digital.....	84
Figura 6.7 Obtención del tiempo de secado para muestras de harina en laboratorio.....	84
Figura 6.8 Boquilla pulverizadora de cono lleno modelo Fulljet.....	85
Figura 6.9 Boquilla pulverizadora de cono lleno modelo Fulljet FL-8VS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Energía cinética de la lluvia y de la escorrentía (Hudson, 1982).....	20
Tabla 3.1 Lista de materiales para el simulador de lluvia (El Autor).	29
Tabla 4.1 Coeficiente de uniformidad e intensidad (El Autor).	53
Tabla 4.2 Valores D50 para diferentes presiones residuales (El Autor).	60
Tabla 4.3 Velocidad de caída media y desviación estándar para diferentes presiones residuales (El Autor).	61
Tabla 4.4 Diferentes energías generadas por simuladores con boquillas pulverizadoras colocadas a una altura, h, sobre una superficie de aplicación (El Autor).	62
Tabla 6.1 Obtención de diámetro de gota para curva de calibración (El Autor).	68
Tabla 6.2 Obtención de masa de glóbulo de harina (El Autor).	75
Tabla 6.3 Medición para obtener distribución de tamaños de gotas de lluvia a una presión de 14 kPa (El Autor).	77
Tabla 6.4 Medición para obtener distribución de tamaños de gotas de lluvia a una presión de 17 kPa (El Autor).	77
Tabla 6.5 Medición para obtener distribución de tamaños de gotas de lluvia a una presión de 21 kPa (El Autor).	78
Tabla 6.6 Obtención de velocidades de caída para gotas del simulador (El Autor).	79

RESUMEN

Se diseñó y se construyó un simulador de lluvia a presión, con una boquilla pulverizadora marca Teejet modelo Fulljet FL-8VS posicionada a 2 metros sobre una superficie de aplicación. El objetivo fue establecer intensidades de lluvia controladas y desarrollar una metodología para la medición de los factores físico-erosivos de la lluvia: diámetro, distribución y velocidad de caída de gotas para finalmente calcular la energía generada.

El proyecto se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química y en la Estación Experimental Fabio Baudrit de la Universidad de Costa Rica, y contó con el apoyo de la escuela de Ingeniería Agrícola de la misma universidad.

Inicialmente se desarrolló una curva de calibración en el laboratorio entre la masa de glóbulos de harina y el diámetro de gotas. A partir de esta curva de calibración se determinaron diámetros de gota generados por el simulador de lluvia para tres presiones residuales en una superficie de aplicación efectiva de 0,600 metros x 0,600 metros. Por otro lado, se determinó una velocidad media de caída de gotas utilizando una cámara fotográfica de alta resolución.

Se obtuvo un diámetro de volumen medio de 1,08 mm, 1,34 mm y 1,73 mm y una velocidad media de caída de 3,73 m/s, 3,35 m/s y 4,49 m/s para una presión residual de 21 kPa (3 lb/pul²), 17 kPa (2,5 lb/pul²) y 14 kPa (2,0 lb/pul²) respectivamente. Según estos resultados se calculó que la mayor energía generada por el simulador fue de 10 J/m²/mm para una intensidad de lluvia media de 197,3 mm/h.

Palabras clave: Simulador de lluvia, diámetro y distribución de gotas, velocidad de caída, energía cinética.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Justificación

Estudiantes, docentes, e investigadores, tanto de la escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, como de otras instituciones relacionadas, requieren un simulador de lluvia que pueda facilitar la investigación y la evaluación de la erosión en suelos bajo la acción de gotas de lluvia.

1.2 Problemática

La erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción del viento o del agua. Incluye el proceso de desprendimiento de partículas de la tierra, el transporte subsecuente y la deposición de estos sedimentos sobre la superficie (Ritter et al., 2001).

La erosión del suelo es un proceso natural, pero se ha magnificado debido al aumento de la población humana que provoca una presión sobre el uso de la tierra. Esta presión conlleva a la ampliación de la frontera agrícola, destrucción de los bosques, y utilización de tierras no aptas para cultivar, ya sea por razones de pendiente o tipos de suelos. La degradación de estas tierras crece rápidamente por un sobre uso, mal manejo de cultivos, e inadecuadas prácticas de conservación.

Las consecuencias hidrológicas asociadas a estos fenómenos son el aumento de la cantidad de escorrentía, tierras erosionadas, disminución de la recarga de los acuíferos, ampliación de las fluctuaciones del caudal de los ríos y contaminación del agua.

En Costa Rica las tasas de erosión son generalmente altas debido a la topografía accidentada y a la frecuencia e intensidades de las lluvias. Se ha obtenido datos de pérdida de suelo de 108 toneladas por hectárea, en un solo día, en la zona norte de Cartago (Cubero, 1996).

Las tasas de erosión hídrica dependen de parámetros multifactoriales, tanto de las condiciones del terreno (textura, cobertura, pendiente, compactación, contenido de humedad, etc.), como del comportamiento de los eventos de lluvia (intensidad, duración, frecuencia, tamaño de gotas, etc.). Para efectos de evaluación e investigación, los factores del terreno pueden ser controlados relativamente bien. Por otro lado, predecir el comportamiento de la lluvia natural depende de análisis meteorológicos e hidrológicos, que conllevan a una cierta incertidumbre. Además, la variabilidad de un evento de lluvia dificulta identificar los parámetros que afectan o interactúan en el proceso de la erosión.

Debido a que la lluvia natural es impredecible y variable se han construido modelos físicos en laboratorio para simular condiciones de lluvia, y así determinar la respuesta del terreno o definir coberturas apropiadas ante el impacto de gotas o la escorrentía (ASTM D 6459-07). También se debe considerar que estudios de campo sobre procesos físicos o químicos de lluvia natural requieren financiamiento considerable y largos períodos de observación (10 a 20 años) para recolectar suficiente información (de Lima et al., 2001), por lo que una alternativa más efectiva a nivel de costos es utilizar estos aparatos para aplicar lluvias controladas sobre superficies pequeñas. Estos aparatos son conocidos como simuladores de lluvia, los cuales tienen diferentes diseños, según su aplicación. Algunos tienen boquillas, otros tienen placas con orificios, a donde emergen gotas con una intensidad definida.

A pesar de que Monge (2009) ya había desarrollado un simulador de lluvia para la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, el aparato no generaba una distribución de tamaño de gotas y la altura de caída de las mismas era muy baja. Por lo tanto, se debía construir un aparato con características diferentes para simular una lluvia “más natural” y poder desarrollar una metodología para medir el diámetro y velocidad de caída de gotas. Resulta de interés determinar las propiedades físico-erosivas de gotas, ya que la energía cinética de las gotas, asociada con la masa y la velocidad de caída, puede ser hasta 1000 veces mayor que la energía cinética del flujo sobre la superficie del terreno (Silva-Araya, 2010). Algunos investigadores han utilizado aparatos electrónicos, como el disdrómetro, para medir gotas de lluvia (Campos et al., 2005; Uijlenhoet et al., 2004), el problema es que estos aparatos son costosos, por lo que se trata de encontrar métodos alternativos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Construir y calibrar un simulador de lluvia con boquilla pulverizadora de cono lleno a nivel de laboratorio, con el fin de desarrollar una metodología para determinar el diámetro, distribución y velocidad de caída de gotas de lluvia generadas, y establecer valores de energías como parámetros fijos de erosividad.

1.3.2 Objetivos específicos

- i) Evaluar información sobre la elaboración, operación y aplicación de simuladores de lluvia.
- ii) Construir un simulador de lluvia a presión con boquilla pulverizadora de cono lleno.
- iii) Desarrollar pruebas preliminares para seleccionar la boquilla adecuada y definir la superficie de aplicación efectiva.
- iv) Desarrollar una curva de calibración entre diámetro de gotas y masa de glóbulos de harina.
- v) Determinar el diámetro y distribución de gotas de lluvia definidas en una superficie de aplicación efectiva para diferentes presiones de operación del simulador.
- vi) Obtener una velocidad de caída media de gotas para diferentes presiones de operación del simulador.
- vii) Calcular la energía cinética total para las gotas generadas a cada presión de operación del simulador.
- viii) Comparar los resultados obtenidos de energía con otros simuladores y lluvia natural.

CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Simuladores de lluvia

La necesidad de reproducir bajo condiciones controladas los efectos de la precipitación, y en especial del impacto de gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión, condujeron al desarrollo de diferentes aparatos y mecanismos que tratan de simular la lluvia natural (Monge, 2009).

Unidades de investigación y facultades en universidades han desarrollado prototipos, los cuales han sido calibrados de manera que pueden reproducir intensidades de lluvia, con diámetro de gotas y velocidades de caída específicos.

El Departamento de Producción Vegetal, Unidad Docente de Suelos, de la Universidad Politécnica de Valencia, diseñó y operó un simulador de lluvia pequeño y portátil (Cerdeira et al., 1996). En este caso se determinó el coeficiente de uniformidad, intensidad de lluvia, diámetro de gotas y velocidad de caída de las mismas para diferentes presiones de operación del sistema.

También en España, el Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del suelo en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Vigo construyó un simulador de lluvia con boquilla pulverizadora de cono lleno modelo Fulljet (Figura, 2.1). Se realizaron las mediciones del tamaño y distribución de gotas utilizando harina. Además se estimó la velocidad de caída de las gotas con base en la ecuación diferencial que explica la caída de objetos esféricos en un fluido.

Por otro lado, el departamento del interior de Estados Unidos, sobre estudios geológicos, desarrolló un simulador de lluvia portátil con intensidades de lluvia variables (Kinner et al., 2008). En este caso, se definió un área de estudio de un metro cuadrado y se determinó la intensidad de lluvia a lo largo de dos ejes de referencia.

En la escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, se construyó un simulador de lluvia portátil (Monge, 2009), el cual sirvió para realizar pruebas de infiltración y escorrentía superficial.

Estos aparatos no solo se han utilizado para la investigación en infiltración, escorrentía y control de erosión, si no que van ligados con temas de interés en la hidromecánica, como el comportamiento físico de las gotas de agua en el aire (Bollrich, 1989).



Figura 2.1 Simulador de lluvia con boquilla pulverizadora.

Fuente: Benito et al., 2001.

2.1.2 Medición de diámetro y distribución de gotas de lluvia

Las primeras mediciones del tamaño de las gotas de lluvia de que se tiene noticia fueron efectuadas por Lowe en 1892, quien las recogió en placas planas de pizarra que habían sido cuadrículadas, de manera que el tamaño de las gotas interceptadas pudiera medirse. Este método de calcular el tamaño de una gota a partir del tamaño de la señal que deja el impacto en algún dispositivo colector, es uno de los más populares (Hudson, 1982).

Los investigadores que han realizado mediciones de la distribución y el diámetro de gotas de lluvia han utilizado diferentes métodos para conseguirlo. Hudson (1982) utilizó por primera vez un método llamado “bolitas de harina”, el cual consistió en colocar capas de harina como receptores de gotas de lluvia. Jiménez (1996) aplicó el mismo método para obtener el diámetro de gotas de lluvia natural en dos zonas pluviométricas en Costa Rica, y Benito et al. (2001) lo utilizó para lluvia simulada. Por otro lado, Campos et al. (2005),

utilizó un aparato electrónico (disdrómetro) para determinar el diámetro de gotas de lluvia natural en una zona específica en Costa Rica.

2.2 Características deseables de la lluvia simulada

Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para aplicar agua de forma similar a los episodios tormentosos naturales (Benito et al., 2001). Aun así es complicado obtener todas las características de la lluvia natural, pero no se trata de fabricar un simulador perfecto, si no de reproducir aquellas variables que son de interés, limitado por las cualidades físicas del aparato. A continuación, se detallan las características deseables de la lluvia simulada (Hudson, 1997):

- Que el tamaño y distribución de las gotas sea similar a la lluvia natural.
- Que la velocidad de caída similar a la velocidad terminal de las gotas en la lluvia natural.
- Que la intensidad de lluvia corresponda a las condiciones naturales.
- Que la energía cinética sea similar a la de la lluvia natural.
- Que la lluvia sea uniforme y que haya una distribución aleatoria de las gotas.

2.3 Ventajas y desventajas de simuladores de lluvia

La siguiente lista se refiere a aplicaciones de campo, aunque cabe remarcar que los simuladores de lluvia son más útiles en las investigaciones de laboratorio (Hudson, 1997).

Ventajas

Capacidad de tomar numerosas mediciones rápidamente sin tener que esperar las precipitaciones naturales;

Posibilidad de trabajar con precipitaciones constantemente controladas, eliminando de ese modo la errática e imprevisible variabilidad de la lluvia natural;

En general es más rápido y sencillo establecer un simulador sobre los tratamientos de los cultivos existentes que establecer tratamientos sobre parcelas de escorrentía.

Desventajas

Es barato y sencillo de utilizar un pequeño simulador sobre una parcela de ensayo de unos pocos metros cuadrados, pero los simuladores para cubrir parcelas de campo de, por ejemplo 100 m², son grandes, caros, y voluminosos;

Las mediciones de la escorrentía y de la erosión a partir de pruebas con simuladores efectuadas en pequeñas parcelas no pueden extrapolarse a condiciones de campo; es preferible limitarlas a comparaciones, como cuál de tres tratamientos de cultivo sufre menor erosión en las condiciones de los ensayos con simulador, o a la comparación de valores relativos de la erosionabilidad de diferentes tipos de suelos;

Es probable que los simuladores sean afectados por el viento; la necesidad de montar un parabrisas reduce la ventaja de simplicidad.

2.4 Tipos de simuladores de lluvia

Los simuladores de lluvia se pueden separar en dos tipos: simuladores de lluvia sin presión y simuladores de lluvia a presión (Hudson, 1997). A continuación, se presentan algunas características.

2.4.1 Simuladores de lluvia sin presión

Simuladores sencillos utilizan el principio de que las gotas se forman y caen desde los extremos de los tubos conectados con un suministrador de agua. El tamaño de la gota está relacionado con la dimensión del tubo. Se han utilizado tubos de metal, vidrio o plástico o agujas hipodérmicas que se fabrican con un alto grado de precisión.

Las ventajas de este método son que el tamaño de las gotas y su velocidad de caída son constantes, la distribución de la lluvia a través de la parcela de ensayo es uniforme y se puede lograr con baja presión del agua.

Las desventajas son que, las gotas golpean la parcela de prueba a una velocidad muy inferior a la velocidad terminal de la lluvia natural y, en consecuencia, los valores de la energía cinética son también reducidos. Una gota grande de cinco milímetros de diámetro necesita una altura de caída de unos 12 metros para alcanzar la velocidad terminal y esto es difícil de lograr en condiciones de campo. En cierta medida, esto se puede compensar utilizando gotas de mayor tamaño que las lluvias de la lluvia natural. Otra desventaja es que la dimensión de la parcela de ensayo es reducida a causa de las dificultades prácticas para construir un depósito suficientemente grande para la formación de gotas.

2.4.2 Simuladores de lluvia a presión

Estos son simuladores accionados por una bomba que impulsa el agua a través de una tubería hasta una o varias boquillas para sacar el agua en forma pulverizadora (figura 2.2). Al igual que los formadores de gotas sin presión estos simuladores consiguen una velocidad de impacto de gota reducida, a menos que caigan de una altura considerable. La velocidad de impacto de las gotas puede aumentarse apuntando el aspersor o boquilla hacia abajo, ya que de esta manera habrá una velocidad inicial dada por la presión. La ventaja es que proporciona una distribución de gotas en un área de aplicación específica.

En el comercio existen muchos tipos boquillas, algunas diseñadas para otros fines y otras creadas especialmente para los simuladores de lluvia. Una gran dificultad estriba en que si la boquilla tiene que incluir gotas del tamaño máximo que se producen en la lluvia natural, el agujero de la boquilla tendrá que ser grande, de unos tres milímetros de diámetro. No obstante, incluso con baja presión de agua, la intensidad producida por las boquillas de este tamaño es mayor que la de la lluvia natural.

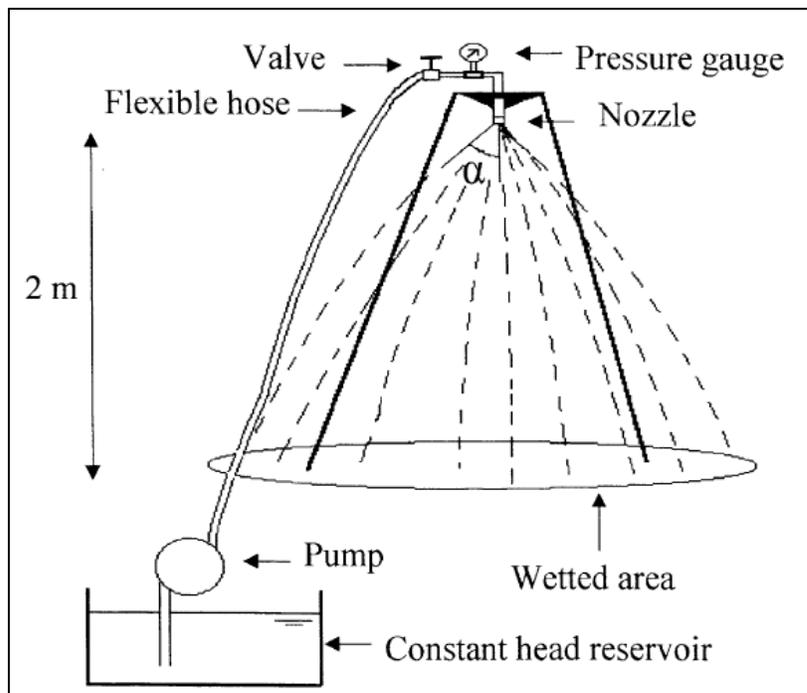


Figura 2.2 Simulador de lluvia a presión.

Fuente: de Lima et al., 2001.

2.4.2.1 Uniformidad de lámina de agua

Cada boquilla tiene un perfil característico de precipitación, que depende de la presión de operación y que puede variar como sigue:

Baja presión produce gotas grandes en anillos a cierta distancia de la boquilla, provocando una pobre distribución del agua (figura 2.3).

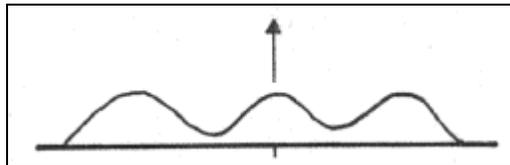


Figura 2.3 Perfil de distribución para una presión baja.
Fuente: Zuñiga, 2004.

Mayores presiones de la especificada, el agua se nebuliza en pequeñas gotas que son fácilmente afectadas por el viento y el anillo de humedecimiento se concentra alrededor de la boquilla (figura 2.4).

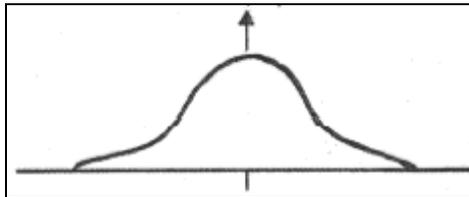


Figura 2.4 Perfil de distribución para una presión alta.
Fuente: Zuñiga, 2004.

Dentro del rango de presión sugerido, el patrón de humedecimiento podría ser semejante al de la figura 2.5.

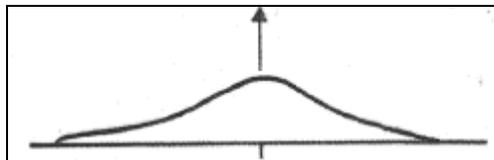


Figura 2.5 Perfil de distribución para una presión sugerida.
Fuente: Zuñiga, 2004.

2.4.2.2 Coeficiente de uniformidad

Normalmente el coeficiente de uniformidad ha sido un método práctico para medir la efectividad de un riego por aspersión. Algunos autores, como Cerda et al. (1996) han utilizado este coeficiente para establecer el grado de uniformidad en la zona de aplicación de un simulador de lluvia a presión o con boquilla pulverizadora.

El coeficiente de uniformidad, CU, llamado también el coeficiente de uniformidad de Christiansen se aplica según la siguiente ecuación (Fangmeier, 1996):

$$CU = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n |y_i - d|\right)/n}{d} \quad (2.1)$$

Donde:

y_i = lámina de agua recibida.

d = promedio de láminas de agua recibida.

n = número de mediciones.

Este coeficiente indica, el grado en el cual el agua ha sido aplicada para una lámina uniforme en una superficie específica. En condiciones de riego por aspersión se recomiendan valores de coeficiente de uniformidad mayores de 0,85 (Zuñiga, 2004).

2.5 Características físicas de la lluvia

2.5.1 Diámetro y distribución de gotas

Puesto que la lluvia está compuesta por gotas de todos los tamaños, se hace necesario determinar la proporción de gotas grandes y pequeñas, o sea, la distribución por tamaños, y el modo en que esta distribución varía en los distintos tipos de lluvia. A partir de la observación cotidiana se deduce claramente que la lluvia de escasa intensidad que puede durar varios días está formada principalmente por gotas pequeñas, mientras que la lluvia muy intensa de una tormenta, tiene por lo menos algunas gotas mucho mayores. Empleando tanto el método de la gota teñida, como el de la bolita de harina, se recoge una muestra de lluvia y así puede determinarse la distribución por tamaños (Hudson, 1982).

La mejor forma de dar un índice de distribución de tamaño de gotas es el volumen mediano del diámetro de gotas. Este es el diámetro de gota tal que la mitad del volumen de la lluvia cae en forma de gotas con diámetros menores y la otra mitad con gotas mayores (figura 2.6).

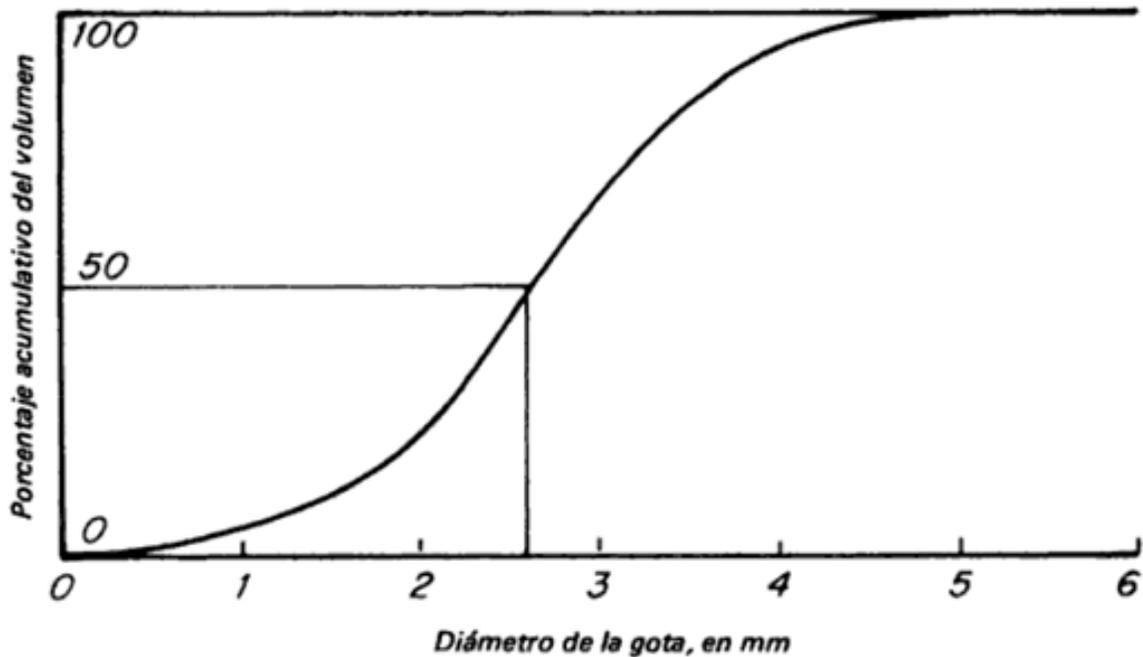


Figura 2.6 Diámetro de gota según el 50% del volumen total.
Fuente: Hudson, 1997.

En la figura 2.7, se observan las curvas de distribución para diferentes intensidades y queda claro que el valor de la moda de diámetro de gotas llega a 80 o 100 mm/h, pero luego decrece a intensidades mayores. Lo anterior se ha demostrado para intensidades comunes en zonas templadas, pero hacen falta más estudios en zonas tropicales para entender el comportamiento de gotas para intensidades mayores.

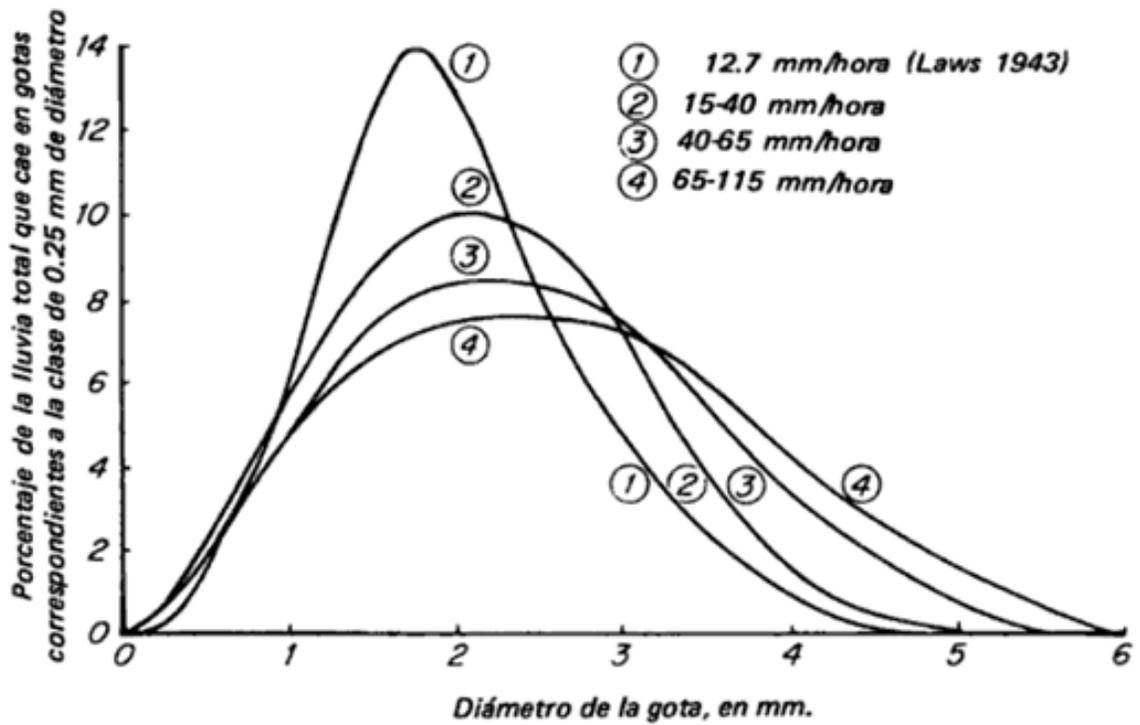


Figura 2.7 Distribución de gotas de lluvia natural.
Fuente: Hudson, 1997.

También se puede relacionar el diámetro del volumen mediano con las intensidades de lluvia como se muestra en la figura 2.8.

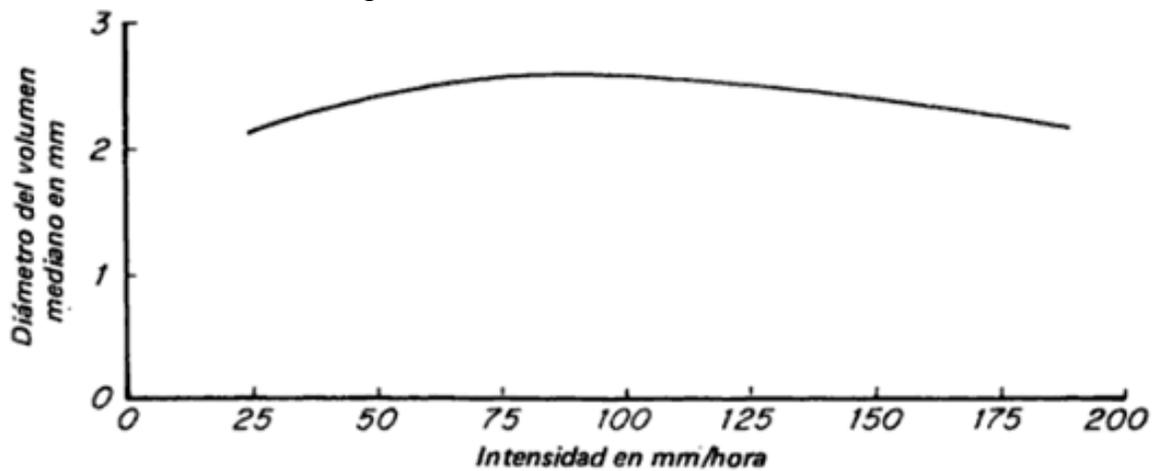


Figura 2.8 Relación entre el diámetro de gota correspondiente al volumen mediano y la intensidad.
Fuente: Hudson, 1997.

2.5.1.1 Método de la harina

Según Hudson (1982), se puede obtener el diámetro de gotas utilizando harina. Se recoge una muestra de lluvia en un plato que contiene harina. Cada gota de lluvia forma un pequeño glóbulo de harina húmeda que, cuando se seca, se convierte en un glóbulo duro, fácilmente separable de la harina no aglutinada. Una calibración puede establecer previamente la relación entre el tamaño de la bolita de harina y el de la gota que la forma (figura 2.9).

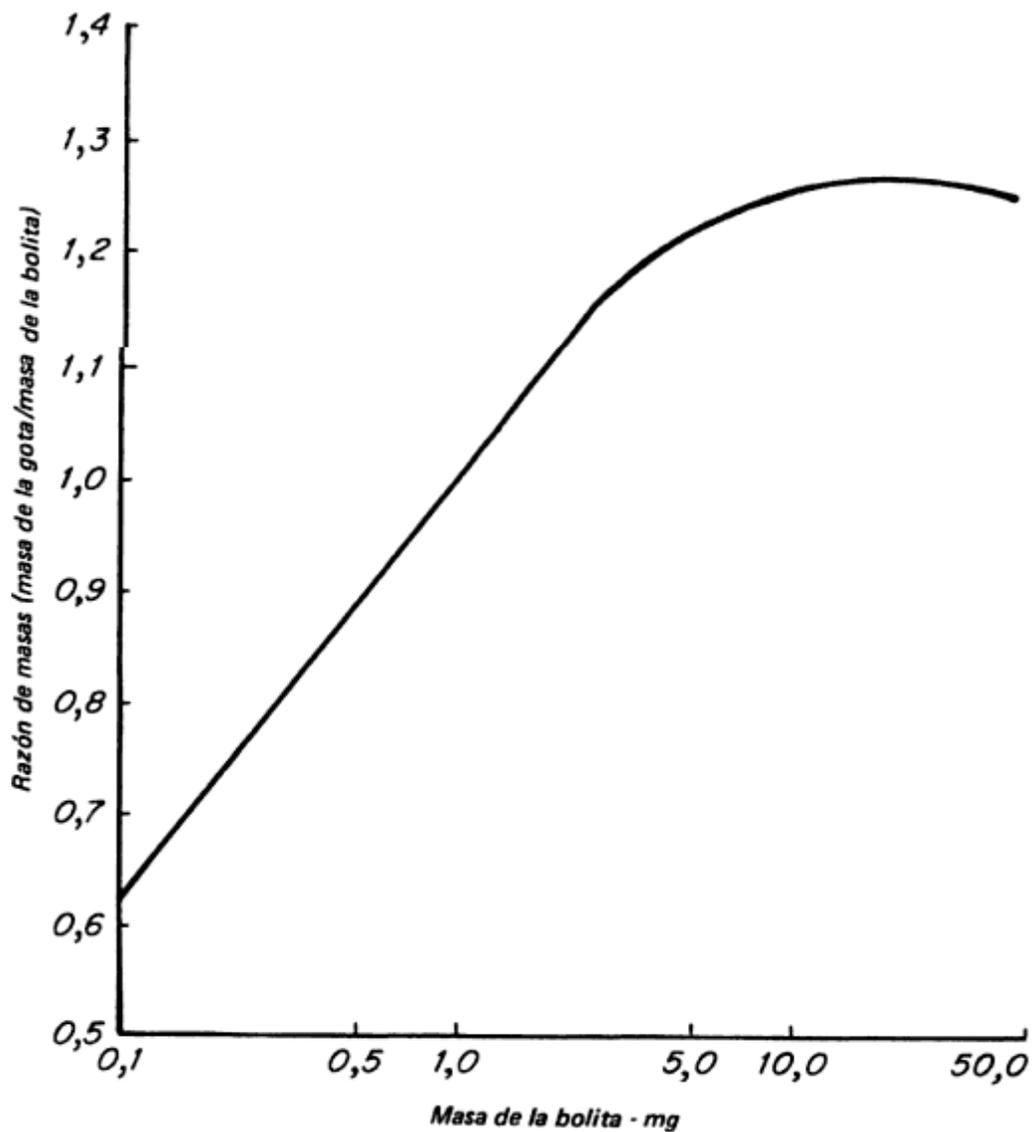


Figura 2.9 Curva de calibración.

Fuente: Hudson, 1982.

2.5.2 Velocidad de caída de gotas

2.5.2.1 Velocidad terminal

La velocidad terminal se refiere a que un cuerpo en caída libre se acelera por la fuerza gravitacional, hasta que la resistencia ofrecida por la fricción del medio se equilibra con la fuerza de atracción ejercida por la gravedad terrestre. Al llegar al punto de equilibrio, su velocidad permanece constante. Esto se denomina velocidad terminal, y depende del tamaño y de la forma del cuerpo que cae, sujetas a las condiciones atmosféricas y de atracción gravitacional (Mason, 1971).

Para una esfera de radio r (m), masa m (kg), cayendo con velocidad constante v (m/s) a través de un fluido de densidad ρ' (kg/m³) y viscosidad dinámica μ (N s/m²) experimenta una resistencia o fuerza de arrastre F_D (N):

$$F_D = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho' \cdot v^2 \quad (2.2)$$

A donde C_D es conocida como el coeficiente de arrastre y está en función del número de Reynolds Re :

$$Re = 2 \cdot v \cdot r \cdot \rho' / \mu \quad (2.3)$$

C_D está definido por la ecuación:

$$C_D \cdot Re / 24 = F_D / 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v \quad (2.4)$$

A donde el término $6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v$ representa las fuerzas viscosas F_v actuando sobre la esfera. Para una esfera cayendo a su velocidad terminal debido a la gravedad g (m/s²), la fuerza de arrastre F_D es igual al peso de la esfera $m \cdot g$ (en realidad es el peso menos el empuje del fluido). En este caso para una gota de agua cayendo a través del aire, el empuje del aire E puede ser despreciable y se tiene (figura 2.10):

$$\frac{C_D \cdot Re}{24} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v} \quad (2.5)$$

A donde ρ (kg/m³) es la densidad de la gota.

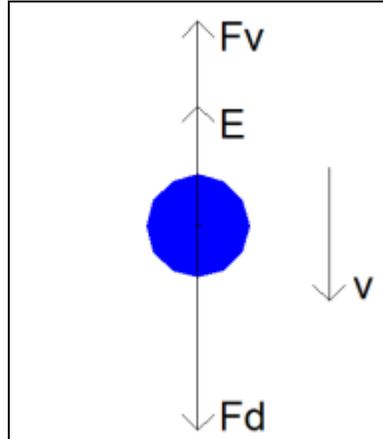


Figura 2.10 Fuerzas sobre una gota en el aire con velocidad terminal.

Fuente: El Autor.

En el caso especial a donde la fuerza de arrastre F_D sobre la esfera se equilibra con las fuerzas viscosas se tiene lo siguiente:

$$F_D = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g$$

Donde:

$$C_D = 24 / \text{Re}$$

y:

$$v = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot r^2 / 9 \cdot \mu \quad (2.6)$$

La anterior ecuación representa la ley de Stokes y tiene una precisión del 2% para gotas de agua con $\text{Re} \leq 0,1$. Para gotas con $\text{Re} = 1$ la velocidad en realidad ya es un 10% menor que la correspondiente a la velocidad de Stokes.

Ya que la ecuación está restringida a valores de Reynolds Re pequeños, se han realizado mediciones de la velocidad terminal para diferentes tamaños de gotas en condiciones atmosféricas determinadas. A continuación, se detallan las velocidades terminales para diferentes diámetros de gotas según mediciones recopiladas por Mason (1971).

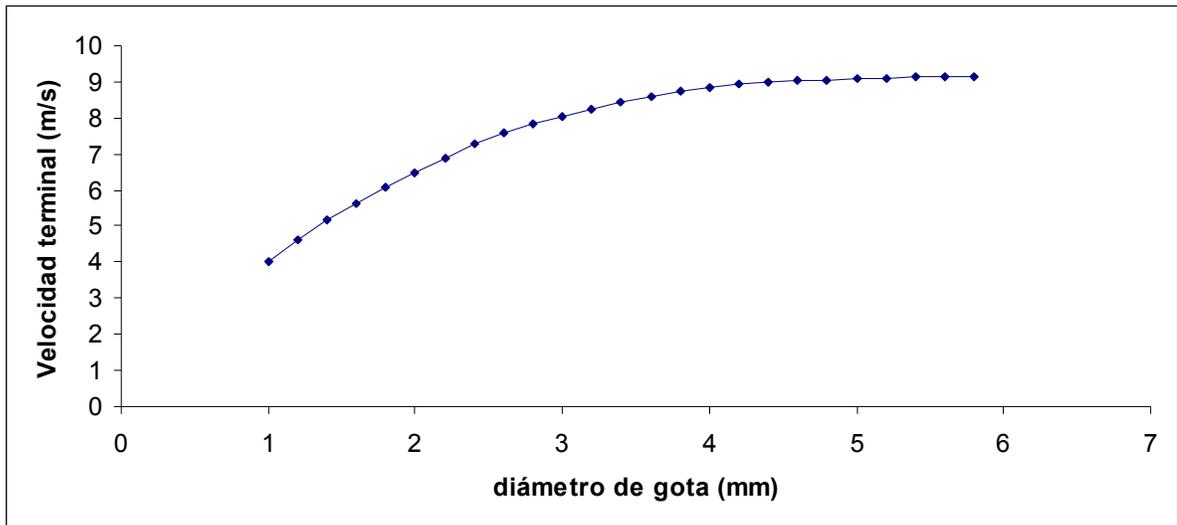


Figura 2.11 Velocidad terminal según diámetro de gota, para una presión ambiente ($P = 1013 \text{ mb}$) y una temperatura ($T = 20^\circ\text{C}$).
Fuente: Mason, 1971.

2.5.2.2 Velocidad para alturas de caída

Investigadoras han medido la velocidad de caída de gotas con diámetros de 1 a 6 mm para alturas de caída de 0,5 a 20 metros. Se encontró que el 95% de gotas para 6 mm de diámetro alcanzaron su velocidad terminal para alturas de caída menores a 8 metros. Para propósitos prácticos se puede afirmar que el total de gotas alcanza la velocidad terminal a partir de 20 metros (Mason, 1971).

A continuación, se muestran las velocidades de caída para diámetros de gota de 1,17 a 6,1 milímetros para alturas de caída de 0,5 metros a 20 metros (figura 2.12).

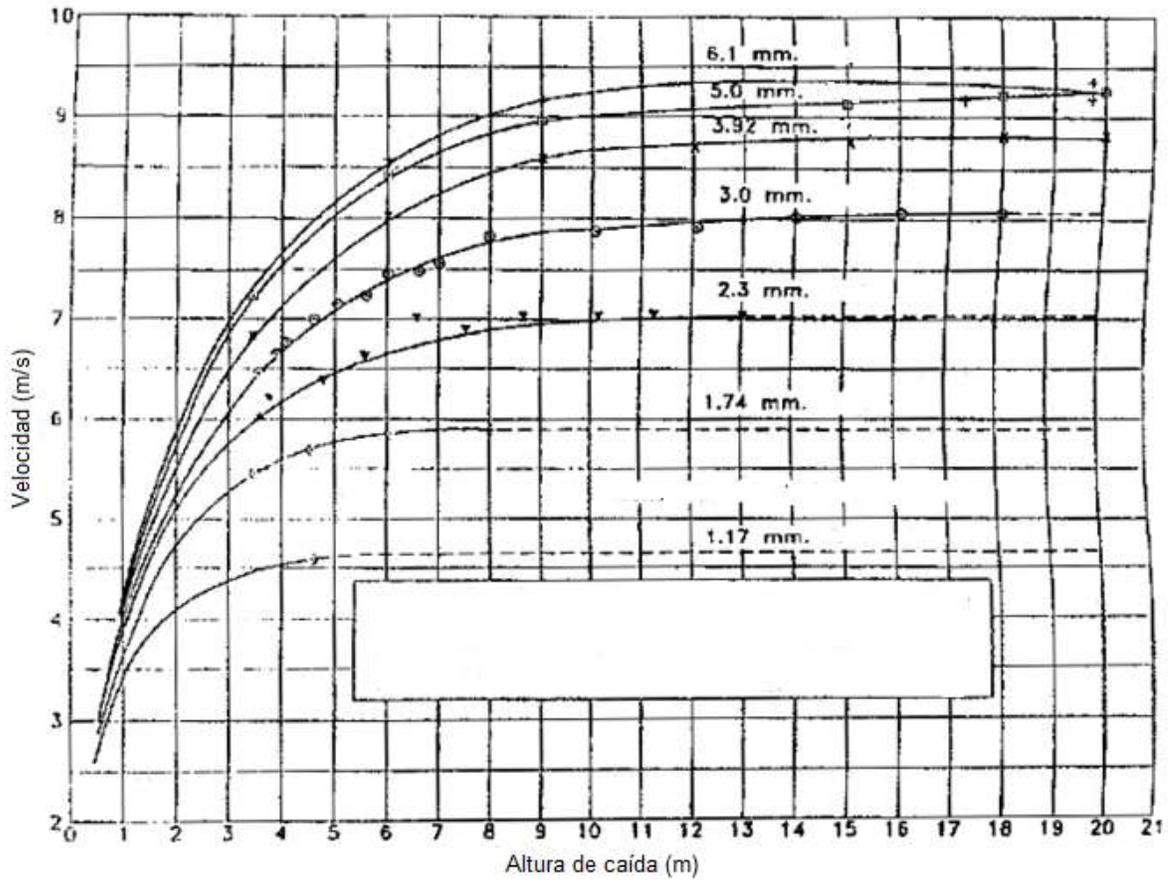


Figura 2.12 Velocidad de gotas para altura de caída.
Fuente: ASTM Internacional, D 6459 – 07.

2.5.3 Energía cinética

La energía cinética es la energía de un cuerpo en movimiento. A continuación, se detalla la ecuación de la energía cinética utilizada para cuantificar la energía generada por la masa y la velocidad de caída.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.7)$$

E : energía (J)

m : masa (kg)

v : velocidad (m/s)

El método más común de determinar el contenido de energía de lluvias naturales o artificiales es calcular esta a partir de las propiedades físicas de las gotas de lluvia. Para hacer esto es necesario conocer: a) velocidad de caída de las gotas de lluvia (v_i); b) el tamaño de las gotas de lluvia (d_i); y c) la distribución del tamaño de gotas (n_i) (Jiménez, 1996).

La energía cinética por unidad de volumen de lluvia, E_v (J/m² mm) es:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3 \cdot v_i^2 \cdot n_i}{\sum_{i=1}^N d_i^3 \cdot n_i} \quad (2.8)$$

Donde ρ es la densidad de la gota de lluvia (g/cm³), n_i es el número o fracción de gotas en el intervalo de diámetro de gotas y caracterizado por un diámetro efectivo d_i (mm), v_i es la velocidad de impacto de la gota de lluvia (m/s), y N es el número de intervalos de diámetro de gotas.

2.5.4 Relación de energía cinética contra intensidad de lluvia natural

La energía cinética de la lluvia es la suma de la energía cinética de las gotas individuales.

La energía cinética está en función del tamaño y de la velocidad de caída, y se utiliza frecuentemente como un parámetro deseable para un simulador, ya que la energía cinética está estrechamente relacionada con la capacidad de la lluvia para causar erosión.

La energía cinética de la lluvia natural varía con la intensidad. Investigadores han realizado diversos estudios de esta relación en diferentes lugares del mundo, y se han determinado curvas que describen esta relación. Hudson (1982) encontró que existe un límite superior a donde la energía cinética no sigue aumentando al tener mayores intensidades (figura 2.13). Lo anterior, debido a que el tamaño de las gotas de lluvia no sigue aumentando, ya que se disgregan al llegar a una intensidad específica. En general, se puede afirmar que el límite superior de la energía cinética es el resultado del límite superior del tamaño de las gotas de lluvia (Hudson, 1997).

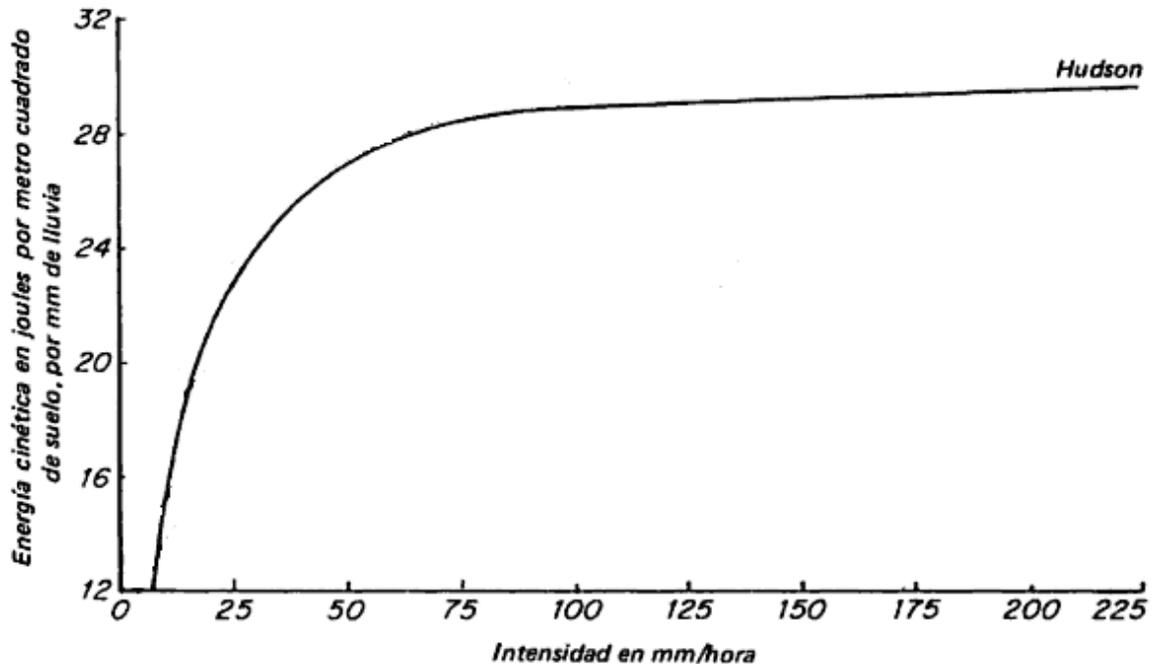


Figura 2.13 Relación de intensidad de lluvia natural con energía cinética.
Fuente: Hudson, 1982.

2.6 La erosividad de la lluvia

La erosividad es la capacidad potencial de la lluvia para provocar la erosión. Está función de las características físicas de la lluvia (Morgan, 1997).

2.6.1 Impacto de la gota y escorrentía

La erosión del suelo es un trabajo mecánico en el sentido físico del término, según el cual, trabajo equivale a un gasto de energía, y ésta se gasta en todas las fases de la erosión: para romper los agregados del suelo, para dispersar las partículas en el aire, en la turbulencia del flujo superficial, en desprender y transportar partículas de tierra, etc. Si se consideran las fuentes de energía cinética disponible, puede explicarse por qué es tan importante la erosión de impacto en el conjunto del proceso erosivo. En la tabla 2.1 se compara la energía cinética de la lluvia que cae con la que corresponde al agua de escorrentía. La diferencia en la cantidad de energía disponible es muy grande, dominando con mucho la correspondiente a la lluvia.

Tabla 2.1 Energía cinética de la lluvia y de la escorrentía (Hudson, 1982).

	Lluvia	Escorrentía
Masa	Supongamos que la masa de la lluvia que cae es R.	Si se supone un 25% de escorrentía, la masa circulante es R/4
Velocidad	Supongamos una velocidad límite de 8 m/seg.	Supongamos una velocidad de flujo superficial igual a 1 m/seg.
Energía Cinética	$1/2 * R * (8)^2 = 32R$	$1/2 * R/4 * (1)^2 = R/8$

Finalmente la erosión puede descomponerse en separación, o sea, arrancamiento de las partículas sueltas del suelo, en transporte y, finalmente, en sedimentación de dichas partículas. Se comprende que el principal efecto de las gotas de lluvia sea el desprender las partículas, mientras que el efecto principal de la escorrentía sea el transporte de estas partículas desprendidas. También se ve claro que en condiciones de lluvia intensa sea el arrancamiento por impacto la parte más importante del proceso (Hudson, 1982).

2.6.2 Desprendimiento del suelo

Estudios de la energía cinética necesaria para desprender un kilogramo de sedimentos por impacto de las gotas de lluvia demuestran que la energía mínima se requiere para partículas de 0,125 mm, y que las partículas entre 0,063 mm y 0,250 mm son las más vulnerables al desprendimiento (figura 2.14). Las partículas más grandes son resistentes al desprendimiento por su peso, y las arcillosas son resistentes debido a que la energía de las gotas de lluvia tiene que romper la adherencia o los enlaces químicos que ligan los minerales que forman las partículas de arcilla (Morgan, 1997).

El desprendimiento en los suelos no sólo depende de su textura, sino también de la resistencia al esfuerzo cortante de la superficie del suelo (Morgan, 1997).

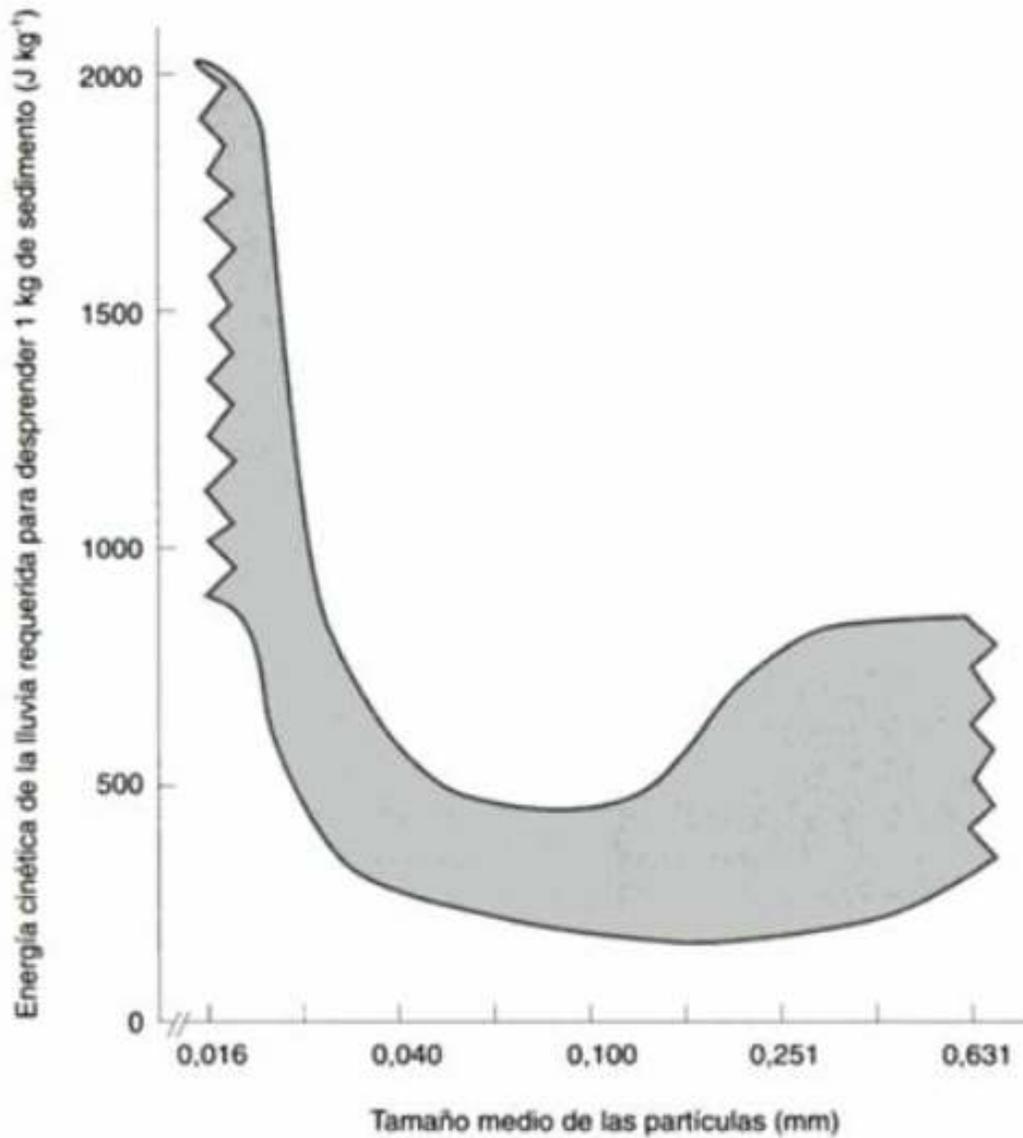


Figura 2.14 Relación entre el tamaño medio de las partículas del suelo y energía de la lluvia requerida para desprender 1 kg de sedimentos (el área sombreada muestra la variación de los resultados experimentales).

Fuente: Morgan, 1997.

CAPÍTULO 3: Metodología

3.1 Metodología para obtener curva de calibración

Hudson (1982) y Jiménez (1996) mencionaron el uso de una curva de calibración entre la masa de glóbulos de harina y el tamaño de gotas de lluvia, pero no detallaron la compactación inicial de la harina ni el contenido de humedad de la misma.

Para determinar el volumen, diámetro de gotas y masa de glóbulos de harina, para obtener finalmente la curva de calibración, se compactó cada muestra a $0,058 \text{ N/cm}^2$ y el contenido de humedad de la harina antes de aplicar las gotas se mantuvo en 13,90%, lo cual se midió con una balanza analizadora humedad (figura 6.2). Además se fijó la utilización de cajas petri para facilitar la utilización de pequeñas muestras de harina de 98 gramos.

Las mediciones se realizaron entre temperaturas de $24,6^\circ\text{C}$ y $26,7^\circ\text{C}$ (figura 6.6). Para temperaturas entre $24,5$ y $26,3^\circ\text{C}$ se utilizó una densidad para la gota de 997 kg/m^3 . Para temperaturas mayores de $26,3^\circ\text{C}$ se utilizó una densidad de 996 kg/m^3 para calcular el volumen medio de gota (tabla 6.1).

Estas mediciones se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica.

3.1.1 Determinación del volumen de las gotas

En un soporte se colocó una bureta con una válvula reguladora de flujo con la posibilidad de insertar agujas hipodérmicas de diferentes tamaños para manipular diámetro de gotas. Se instaló de tal forma que se pudiera colocar el orificio de un “beaker” de 25 ml cerca de la punta de la aguja (figura 3.1).



Figura 3.1 Recolección de gotas en “beaker”.
Fuente: El Autor.

La válvula reguladora de flujo se abrió por completo para insertar 5 gotas en un “beaker” de 25 ml pesando esta muestra en una balanza analítica (figura 6.3). Se realizaron 8 repeticiones (figura 6.1).

Para cada tipo de aguja (figura 3.2), se estableció una columna de agua en la bureta, de tal manera que las gotas no cayeran con una velocidad muy alta, para evitar complicaciones posteriores en la medición de glóbulos de harina.

Se obtuvo la masa media por gota, con lo que se pudo calcular el volumen medio de esta con la ecuación de la densidad, la cual se presenta a continuación:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.1)$$

Donde:

V : Volumen medio de gota (m^3)
 m : Masa media de gota (kg)
 ρ : Densidad de la gota (kg/m^3)



Figura 3.2 Aguja hipodérmica utilizada.
Fuente: El Autor.

3.1.2 Determinación del diámetro medio de las gotas

Se utilizó la ecuación del volumen de una esfera para el cálculo del diámetro de una gota; utilizando los datos de volumen obtenidos en el paso anterior.

$$d = \sqrt[3]{6 \cdot V / \pi} \cdot 1000 \quad (3.2)$$

Donde:

d : Diámetro medio de la gota (mm)

V : Volumen medio de la gota (m³)

3.1.3 Obtención de la relación entre diámetro medio de gota y la masa media de glóbulos de harina formados

Para obtener esta relación se debe conocer de antemano el diámetro medio de gota que cae sobre una lámina de harina. En este caso se dejaron caer por gravedad 30 gotas de cada una de las agujas antes mencionadas sobre una caja petri que contenía una capa de harina de medio centímetro de espesor. Esta capa se uniformizó con una cuchara pequeña y se colocó sobre ella un peso definido para compactar a la presión mencionada en 3.1.

El sistema compuesto por una bureta y una aguja se ajustó a una estructura de soporte con una prensa de tal forma que la aguja estuviera dirigida perpendicularmente al plano del piso a dos metros de altura (figura 3.3). En el piso se colocó la caja petri con la muestra de harina de tal manera que pudiera recibir las gotas generadas. Se debía mover ligeramente la posición de la caja petri en el piso para que cada gota cayera sobre la harina seca.



Figura 3.3 Caída de gotas sobre harina.
Fuente: El Autor.

Posteriormente, se colocó cada caja petri con la muestra de harina en un horno a una temperatura de 110°C por un período de una hora y media. Este tiempo se estableció realizando una prueba de estabilización de peso en el horno para la muestra de harina con las gotas más grandes (figura 6.7).

Al terminar el tiempo de secado, se sacó la caja petri del horno vertiendo la harina sobre un tamiz con 0,841 mm de apertura para separar los glóbulos de harina duros de la harina blanda. Al visualizar solamente los glóbulos de harina duros en el tamiz se procedió a seleccionar 20 glóbulos, los cuales se pesaron en una balanza analítica (tabla 6.2).

3.1.4 Generación de gotas con diámetro menor

Durante el proceso de obtención de la curva de calibración, se construyó el simulador de lluvia a presión, con el cual se realizaron pruebas preliminares para determinar de manera visual con muestras de harina el tamaño de gotas generado por el aparato. Se determinó que había un porcentaje alto de gotas que no iba a estar dentro del rango de medición establecido por el tamaño de agujas disponibles, por lo tanto se debía generar gotas de menor tamaño en el laboratorio.

Debido a que las gotas generadas por la aguja de menor tamaño (aguja amarilla), no generaban gotas suficientemente pequeñas se debió generar algún método para reducir la tensión superficial existente a la salida de esta aguja y por ende obtener gotas de diámetro menor. Para lograrlo se conectó a la bureta un sistema eléctrico llamado “Electrodrip” desarrollado por Arroyo (2010). Este sistema consistió de un aparato que generaba aproximadamente un voltaje de 15000 V a partir de una bobina con intensidades eléctricas bajas en el orden de micrones. Este voltaje se transmitió por medio de dos cables a través de la bureta (figura 3.4).

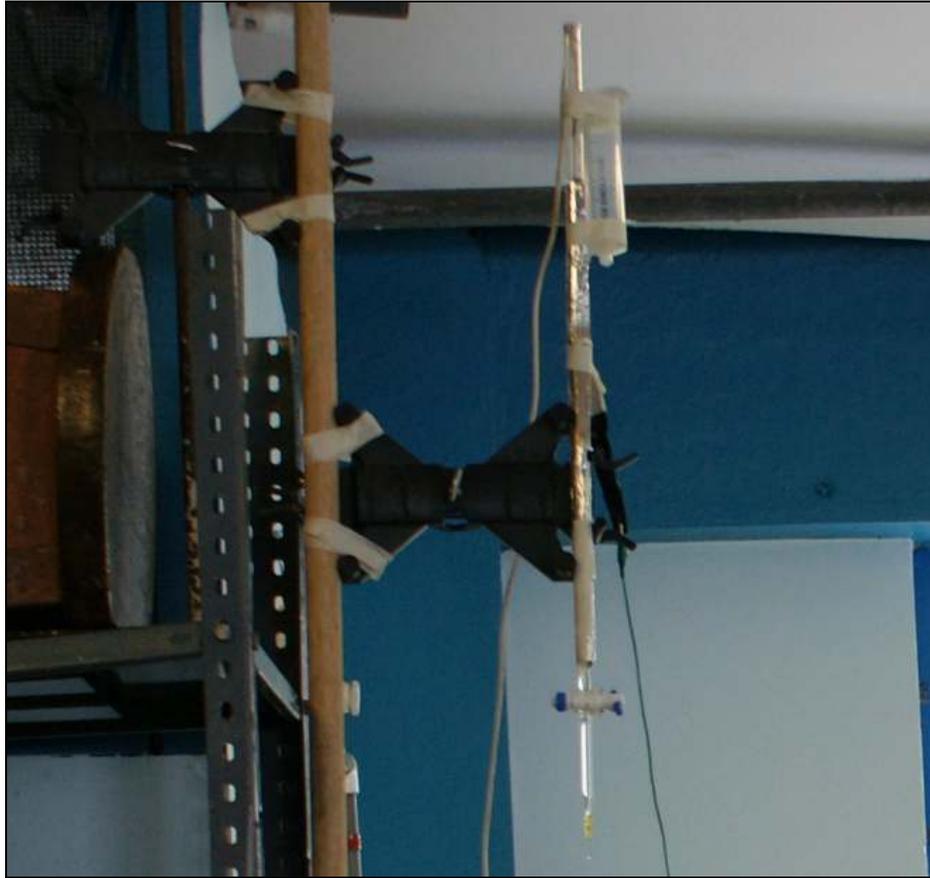


Figura 3.4 “Electrodrip” para generar gotas de menor diámetro.
Fuente: El Autor.

Para obtener finalmente gotas más pequeñas se ajustaba uno de los dos cables a una distancia determinada del nivel del agua dentro de la bureta. Este procedimiento necesitó de una coordinación importante, ya que se tenía que determinar visualmente que la gota disminuyera de tamaño y se mantuviera con un diámetro fijo para una altura determinada del cable dentro de la bureta.

Después de calibrar el tamaño de gota, se realizó una medición del peso de gotas antes y después de obtener las muestras en la harina, para corroborar que el diámetro de gota no tuviera una variación considerable durante el proceso de recepción de gotas sobre la harina.

3.2 Metodología para la construcción y funcionamiento del simulador de lluvia

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 (Cerde et al., 1996), libros de autores reconocidos (Hudson, 1997), y universidades e instituciones dedicadas a la investigación en suelos y agua (Universidad de Vigo, España; Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe, CAZALAC; U.S. Geological Survey).

Se determinó que para los objetivos planteados la mejor opción era construir un simulador de lluvia con boquilla pulverizadora de cono lleno, similar al desarrollado por Benito et al. (2001), Cerde et al. (1996) y Kinner et al. (2007).

3.2.1 Materiales y equipo para la construcción del simulador

Los materiales y el equipo para elaborar este simulador de lluvia, se consiguieron en ferreterías y empresas de producción de tuberías, accesorios, adaptadores de Cloruro de Polivinilo (PVC) y de metal en Costa Rica. Además se consiguieron materiales en la bodega de suministros de la escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica. Las boquillas pulverizadoras se consiguieron en empresas dedicadas a la venta de productos agrícolas.

A continuación, se detalla la lista de materiales para ensamblar el simulador de lluvia utilizado:

Tabla 3.1 Lista de materiales para el simulador de lluvia (El Autor).

Cantidad	Descripción
10 m	Tubería 12 mm polietileno
1 m	Tubería 25 mm (1") PVC
1 m	Tubería 18 mm (3/4") PVC
6 m	Tubería 12 mm (1/2") PVC
5 m	Cable de polietileno
2 uni	Tubería metálica 25 mm (1") x 2 mts
1 uni	Boquilla modelo Fulljet FL-8VS, marca Teejet
1 uni	Boquilla modelo Fulljet FL-5VS, marca Teejet

1 uni	Boquilla modelo TG-3, marca Teejet
1 uni	Boquilla modelo TG-5, marca Teejet
1 uni	Adaptador de boquilla
1 uni	Adaptador roscado 3/8" PVC x giratorio para adaptador de boquilla
3 uni	Adaptadores de PVC 1/2" a polietileno 12 mm
1 uni	Adaptador roscado polietileno 38 mm x 18 mm
1 uni	Manómetro de 0 a 103 kPa (0 a 15 lb/pul ²)
1 uni	Manómetro de 0 a 690 kPa (0 a 100 lb/pul ²)
5 uni	Teflón
1 uni	Liga de caucho de 1 m de largo y 4 cm de ancho
2 uni	Gaza 25 mm ajustable
1 uni	Adaptador entre tubos metálicos
2 uni	Gaza de oreja 25 mm
1 uni	Válvula de bola 25 mm (1") PVC
1 uni	Válvula de bola 18 mm (3/4") PVC
1 uni	Válvula de bola 12 mm (1/2") PVC
2 uni	Válvulas de compuerta 12 mm (1/2") HN
1 uni	Tee PVC 12 mm (1/2")
1 uni	Codo PVC 12 mm (1/2")
1 uni	Codo PVC 25 mm (1")
2 uni	Unión PVC 12 mm (1/2")
2 uni	Reducción PVC 12 mm (1/2") x 6 mm (1/4") roscado
4 uni	Reducción PVC 25 mm (1") x 12 mm (1/2")
1 uni	Reducción PVC 25 mm (1") x 18 mm (3/4")
1 uni	Bomba ½ HP, Marca Foras PE-60 (6 GPM @ 26 lb/pul ²)
1 uni	Tanque de captación de agua 450 litros

3.2.2 Ensamble del simulador

El simulador de lluvia se dividió en las siguientes partes para su ensamblaje adecuado y análisis correspondiente (las partes están numeradas en la figura 3.5):

1. Tanque de captación
2. Succión
3. Bomba
4. Descarga
5. Recirculación
6. Brazo metálico
7. Boquilla

A continuación, se presenta una figura (3.5) del simulador de lluvia y la superficie de aplicación efectiva, la cual fue definida en las pruebas preliminares (3.3.1):

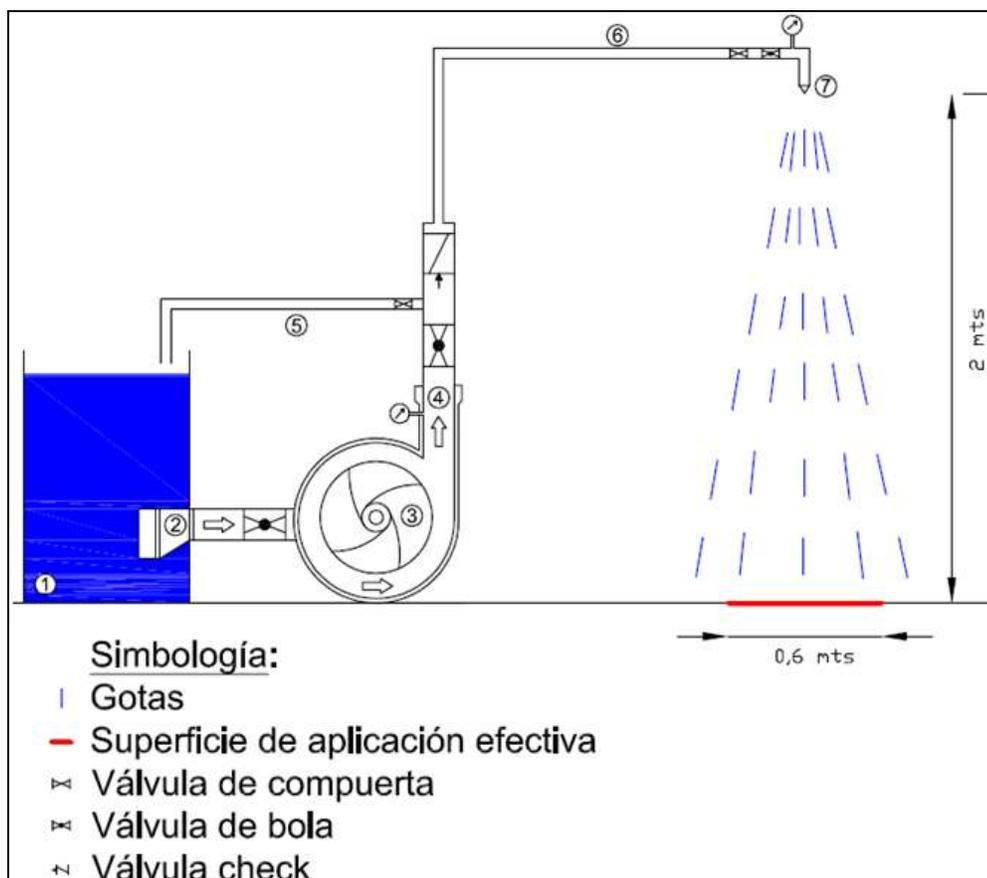


Figura 3.5 Simulador de lluvia y superficie de aplicación efectiva.

Fuente: El Autor

Para construir el simulador de lluvia, se comenzó a cortar la tubería de PVC e insertarla en los diferentes accesorios y válvulas con pegamento especial formando la descarga de la bomba, con dos salidas para conectar manguera de polietileno. Una salida se instaló como la recirculación del sistema, y la otra como la conducción que lleva al brazo metálico y finalmente a la boquilla (figura 6.9).

También se conectaron los accesorios y la válvula de la succión de la bomba al tanque de captación de agua. Para todo el proceso de instalación se contó con una segueta, una lima, y un aplicador de pegamento. Se aplicó teflón en los accesorios roscados para evitar fugas.

Para mantener el brazo metálico firme con la boquilla como referencia proyectada al piso, se instaló una tubería metálica vertical como soporte empotrado. El brazo metálico se conectó perpendicularmente con la tubería metálica vertical con un adaptador y se amarró una liga de caucho apretando externamente las dos tuberías para impedir el movimiento horizontal y vertical. Posteriormente se insertó la tubería de PVC dentro del brazo metálico. Se instaló una gaza ajustable en un extremo del brazo metálico para impedir el movimiento radial de la tubería de PVC. También se amarró en el mismo extremo del brazo metálico una cuerda de polietileno para mantener la posición horizontal.

3.2.3 Ubicación del simulador de lluvia

Se ubicó el simulador en una zona cerrada, segura, con acceso a agua, ubicada en la estación experimental Fabio Baudrit en Alajuela, a donde se tuvo que instalar una estructura metálica que sirviera como soporte para el tubo de PVC y la boquilla.

Se utilizó un anemómetro digital (figura 6.5) como control de las condiciones de viento. Se registraron velocidades menores a 0,5 m/s durante la realización de las pruebas.

Los requisitos para realizar las pruebas del simulador fueron los siguientes:

1. Lugar cerrado, sin condiciones de viento.
2. Buen drenaje en la zona de aplicación de agua.
3. Fuente de agua cercana.
4. Corriente eléctrica cercana.

3.2.4 Puesta en marcha del sistema

Se vertió agua al tanque de captación de 450 litros con la válvula de bola de 18 mm del tubo de succión cerrada. Se llenó el tanque hasta la mitad para evitar problemas de abastecimiento. Seguidamente, se abrió la válvula de 18 mm del tubo de succión para

purgar la bomba. Se revisó que todas las válvulas se encontraban abiertas y se encendió la bomba.

Al ver que salía agua por la boquilla del simulador y el sistema de recirculación vertía agua al tanque, se inició el proceso de calibración de la presión del sistema.

Se calibró la presión del sistema manipulando la válvula de compuerta en el brazo del simulador y la válvula de compuerta en el sistema de recirculación. Para medir la presión se contó con un manómetro en la descarga de la bomba y un manómetro a la salida de la boquilla. Se utilizó un manómetro de 0 a 103 kPa (0 a 15 lb/pul²) para medir la presión residual (figura 3.6). En la descarga de la bomba se mantuvo un manómetro de 0 a 690 kPa (0 a 100 lb/pul²).



Figura 3.6 Manómetro a la salida de boquilla.

Fuente: El Autor.

Se buscó que la bomba trabajara en un rango de presión de 138 a 207 kPa (20 a 30 lb/pul²) para mantener una buena eficiencia del equipo. Por otro lado, se verificó que la boquilla no tuviera obstrucciones, verificando visualmente que la lluvia generada formara una nube de gotas uniforme a 62 kPa (9 lb/pul²). Finalmente se reguló la presión residual de prueba y se procedió a apagar la bomba.

3.2.5 Coordenadas para colocar artefactos de medición

Después de tener el aparato inmobilizado espacialmente y haber determinado su funcionamiento, se procedió a definir coordenadas rectangulares en el plano de pruebas para colocar artefactos de medición. El plano de pruebas sirvió para definir la superficie de aplicación efectiva. Se escogió el punto (0,0) como el punto proyectado linealmente a la salida de la boquilla a una distancia vertical de 2 metros. A partir de ese punto, se especificaron dos ejes: eje A y eje B. Para cada eje se escogieron valores unitarios de distancias. Cada valor unitario representa 0,15 metros en el plano de pruebas. A continuación, se presenta el plano de pruebas con las coordenadas rectangulares (figura 3.7).

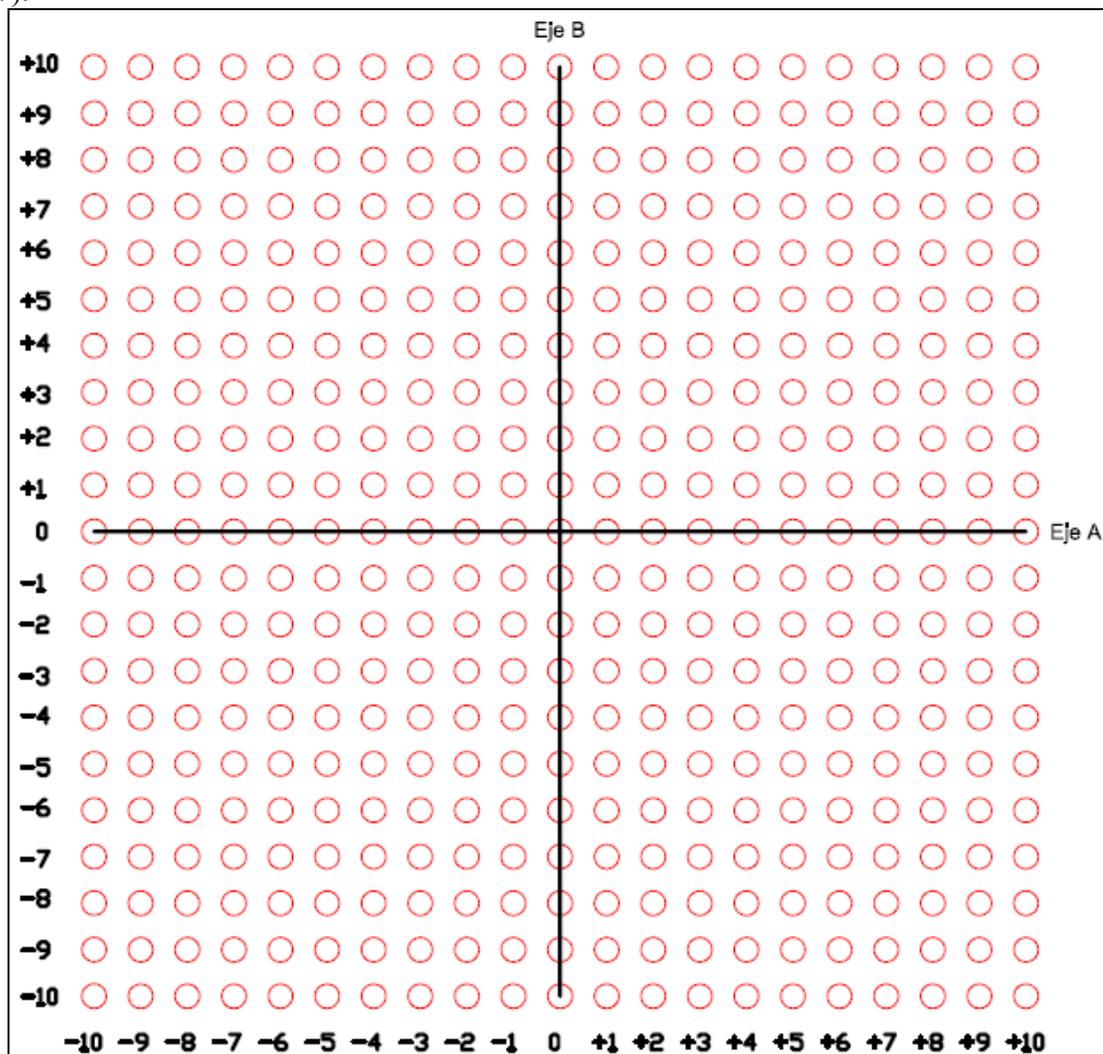


Figura 3.7 Coordenadas rectangulares del plano de pruebas.

Fuente: El Autor

3.3 Metodología para obtener uniformidad de lámina de agua generada por el simulador

3.3.1 Pruebas preliminares

Antes de realizar las pruebas definitivas de uniformidad de lámina de agua se tuvieron que realizar pruebas preliminares para ajustar la metodología de medición de lámina de agua y determinar qué modelo de boquilla pulverizadora de cono lleno utilizar, según aspectos de área y tiempo de aplicación e intensidad de lluvia.

Se utilizaron vasos plásticos con un diámetro de recepción de lámina de agua de 0,079 metros, colocados sobre el plano de pruebas con una configuración definida. Se midió la lámina de agua con un pluviómetro (figura 6.4), y se calculó la lámina de agua real multiplicando el valor medido por el área transversal interna de la boca del vaso entre el área transversal interna de la boca del pluviómetro.

Se realizaron evaluaciones de cuatro boquillas pulverizadoras de cono lleno marca TeeJet: FL-5VS, FL-8VS, TG-3, y TG-5. Estas fueron las únicas que se encontraron en el mercado costarricense. Las boquillas FL-XVS pertenecen a un modelo y las boquillas TG-X representan a otro.

3.3.1.1 Evaluación de boquillas FL-5VS y FL-8VS

Se colocaron los vasos plásticos sobre el plano de pruebas formando dos ejes (eje A y eje B) con una distancia entre vasos de 0,300 metros. Cada eje formaba una línea recta de 2,40 metros con el centro de esa línea en la coordenada (0,0). La distancia entre vasos fue tomada de las recomendaciones de la ASAE Standards (2004).

Se midió la lámina de agua en cada vaso generado por la boquilla FL-5VS para una presión residual del sistema de 69 kPa (10 lb/pul²) por un tiempo de aplicación de una hora.

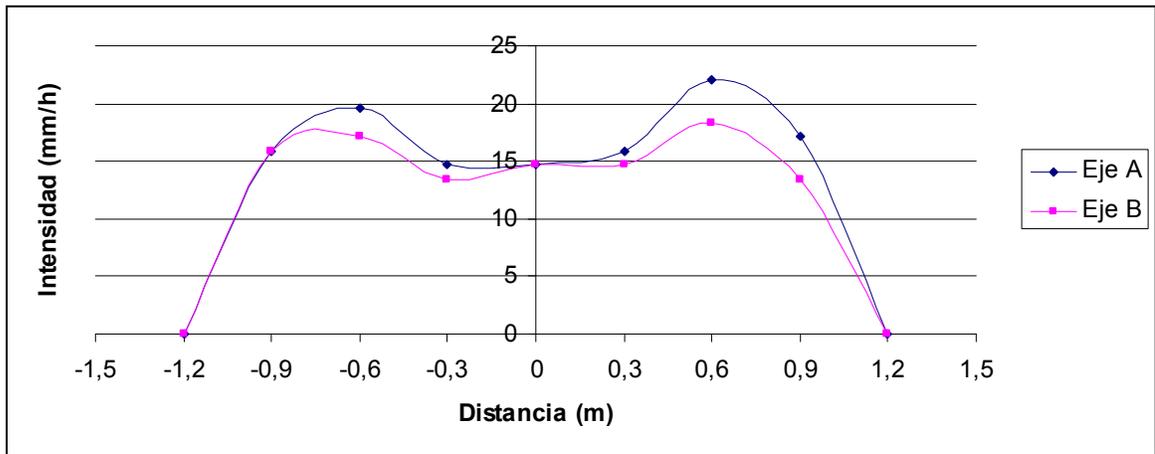


Figura 3.8 Perfil característico de la boquilla FL-5VS a 69 kPa.
Fuente: El Autor

Según los resultados obtenidos (figura 3.8) para una presión residual de 69 kPa (10 lb/pul²), se determinó que la zona a donde la intensidad es más uniforme es a una distancia máxima de 0,3 metros del punto (0,0).

Debido a que, a esta presión residual (69 kPa) no era posible medir el diámetro de gotas generado, según las pruebas preliminares con harina (3.4.1.1), se necesitaba bajar la presión para aumentar el diámetro de gota y poder utilizar la metodología planteada de medición de gotas.

Se decidió utilizar una presión residual de 21 kPa (3 lb/pul²), ya que visualmente se determinaron gotas más grandes. En este caso, se decidió utilizar una distancia entre vasos de 0,15 metros, ya que el radio de tiro era menor a esta presión y había que medir la uniformidad con mayor precisión. Los vasos tampoco se acercaron más uno del otro, ya que se quería tener una distancia prudente entre vasos para prevenir recepción de agua por salpicadura.

Además se cambió la boquilla FL-5VS por la FL-8VS, ya que la primera generaba una intensidad muy baja (22 mm/h como máximo), y según el manual de Teejet la boquilla FL-8VS aplicaba mayor caudal (figura 6.8). Se estableció para la boquilla FL-8VS, que se podía bajar el tiempo de aplicación de una hora a quince minutos, ya que para ese tiempo se podía recoger una cantidad adecuada de lámina de agua, la cual podía medirse con el pluviómetro. Además de ahorrar tiempo en las mediciones, este cambio también disminuyó la probabilidad de un error debido a variaciones de presión característico en un sistema de bombeo.

A continuación, se muestra el perfil característico de la boquilla FL-8VS a una presión residual de 21 kPa (figura 3.9). Según estos resultados, se decide utilizar una superficie de aplicación efectiva de 0,600 metros x 0,600 metros, ya que aproximadamente a 0,300 metros del centro, a cada dirección y en cada eje, se da un punto de flexión en la curva del perfil característico de la boquilla. En otras palabras, se consideró un patrón de uniformidad el cual tuviera como cualidad ningún o poco aumento en la intensidad hacia cada dirección de cada eje (eje A y B), pero además que ese aumento estuviera limitado por un cambio de tendencia de la razón de aumento de la intensidad (punto de flexión).

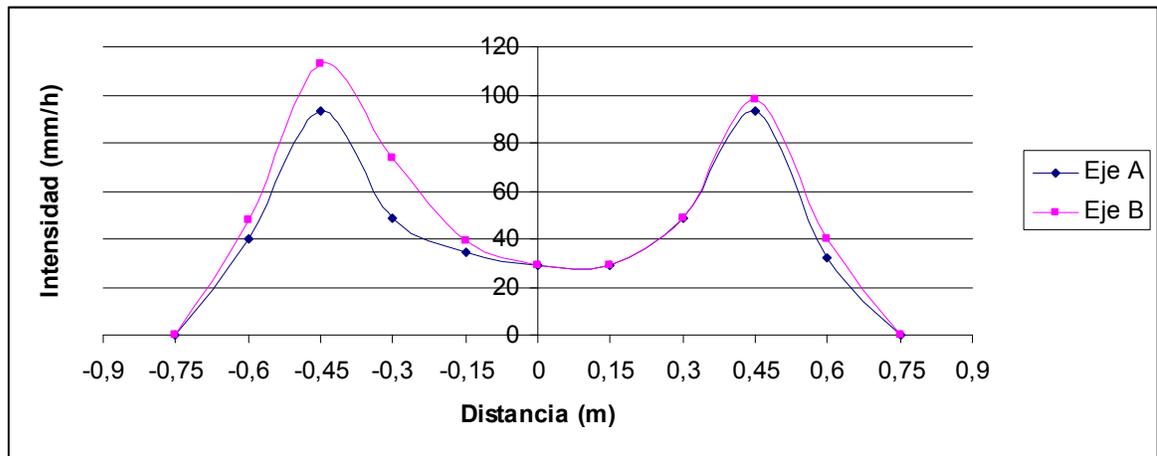


Figura 3.9 Perfil característico de la boquilla FL-8VS a 21 kPa.
Fuente: El Autor

3.3.1.2 Evaluación de boquillas TG-3 y TG-5

Se realizó una evaluación visual y una medición de lámina de agua del funcionamiento de las boquillas TG-3 y TG-5. Se determinó que estas cubrían un área mojada mucho menor que las boquillas FL-5VS y FL-8VS, por lo que no representaban una opción de optimización de la superficie de aplicación de efectiva. Además generaron una intensidad de lluvia de 400 mm/h a 800 mm/h, las cuales no representan intensidades de lluvia naturales en Costa Rica (Vahrson, 1990).

3.3.2 Pruebas finales

Se decidió utilizar la boquilla FL-8VS para el simulador de lluvia. Se realizaron las mediciones de uniformidad para esta boquilla con tres presiones residuales: 14 kPa (2,0 lb/pul²), 17 kPa (2,5 lb/pul²), y 21 kPa (3 lb/pul²). Se colocaron veinticinco vasos plásticos en el piso del invernadero en un cuadro de aplicación de 0,600 x 0,600 metros (figura 3.10), con uno de los vasos en el centro del cuadro (0,0). Los vasos tuvieron un diámetro de

apertura de 0,079 metros colocados a una distancia de 0,150 metros y el tiempo de aplicación se estableció en quince minutos. Siempre se colocó una línea más de vasos a los extremos como control.

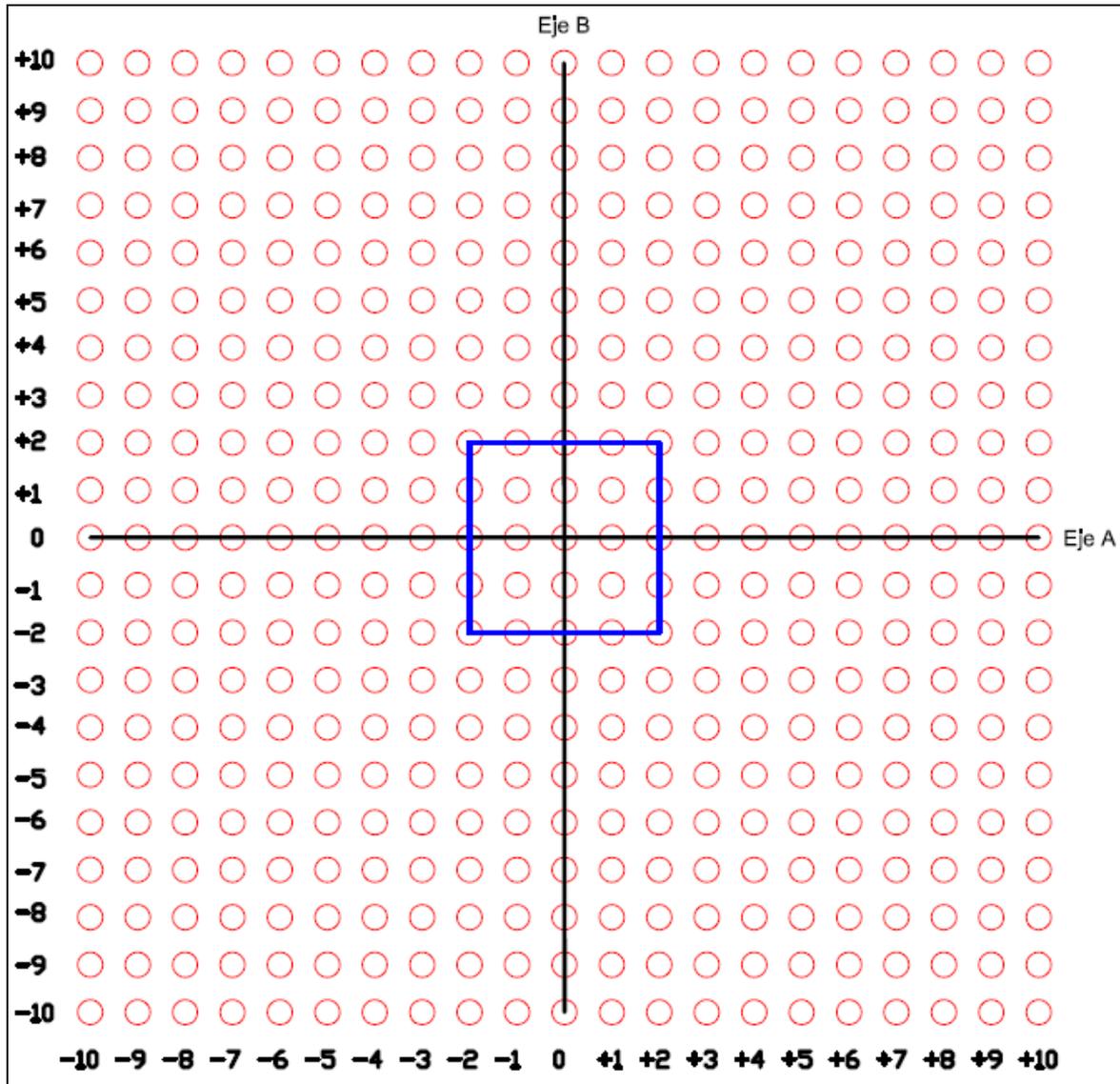


Figura 3.10 Superficie de aplicación efectiva (cuadro azul).

Fuente: El Autor

Las presiones residuales del sistema se seleccionaron en parte por las pruebas preliminares realizadas para determinar el diámetro y distribución de gotas generadas por el simulador (3.4.1).

3.4 Metodología para obtener diámetro y distribución de gotas generadas por el simulador

3.4.1 Pruebas preliminares

Para el uso de la harina, Hudson (1982) mencionó su aplicación para medir el tamaño de gotas de lluvia, pero no se encontró en sus referencias alguna metodología o recomendación para obtener la curva de calibración ni las condiciones de medición con harina, como contenido de humedad y compactación. Por otro lado, Jiménez (1996), presentó un procedimiento para obtener el tamaño de gotas con harina, pero este fue aplicado para recibir gotas de lluvia natural. Por lo tanto, fue necesario realizar pruebas preliminares para poder determinar el procedimiento más adecuado para realizar la medición de tamaño de gotas con harina para el simulador.

3.4.1.1 Tamaño de gotas según presión residual

Según la teoría, existe una presión ideal para el funcionamiento adecuado de un aspersor o boquilla. El fabricante de las boquillas normalmente recomienda el rango de presiones a usar. Para las boquillas FL-XVS el rango de operación sugerida es de 103 kPa (15 lb/pul²) a 276 kPa (40 lb/pul²) (figura 6.8). Normalmente el fabricante toma este criterio según las mejores condiciones de uniformidad. En este caso, lo que interesaba era obtener diámetro de gotas medibles con el método propuesto, por lo tanto se decidió utilizar una presión menor a la mínima recomendada, ya que a menor presión una boquilla genera un mayor tamaño de gotas.

Se realizó una prueba preliminar con una presión residual de 69 kPa (10 lb/pul²) con la boquilla FL-8VS, para revisar si el diámetro de gotas generado sobre la harina era medible con la metodología propuesta. La harina se esparció en una caja petri formando una lámina uniforme. Se calibró el simulador a 69 kPa (10 lb/pul²) y se colocó la muestra de harina de dos a tres segundos en la zona de pruebas en las coordenadas (0,0).

Se obtuvieron glóbulos de harina demasiado pequeños, como se observa en la figura 3.11.

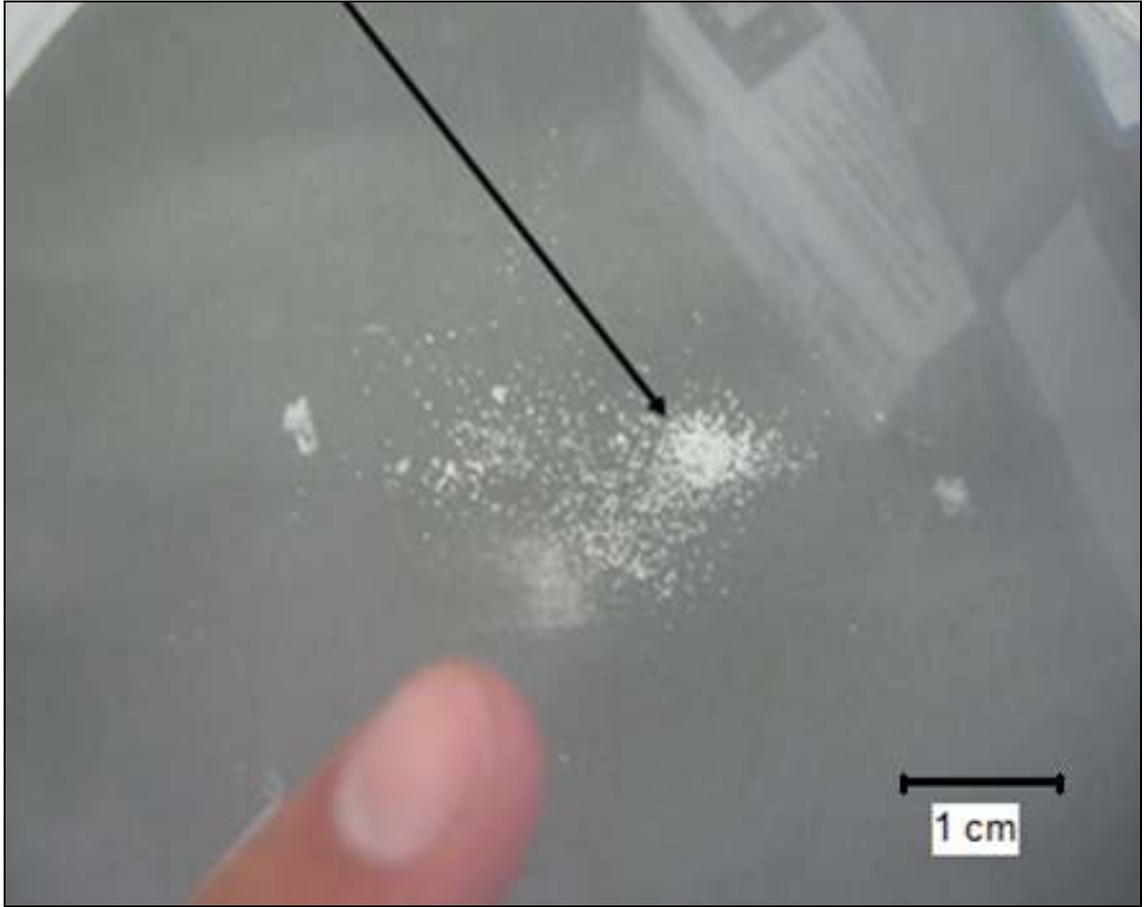


Figura 3.11 Glóbulos de harina obtenidos a 69 kPa (10 lb/pul²).
Fuente: El Autor

3.4.1.2 Tamaño de gotas en coordenadas específicas

Se colocaron nueve cajas petri pequeñas con muestras de harina a una distancia de 0,300 metros entre cada una, formando una cuadrícula de 0,600 x 0,600 metros, con el centro proyectado hacia la salida de la boquilla, como se observa en la figura 3.12.



Figura 3.12 Cajas petri con harina bajo el simulador.
Fuente: El Autor

Se puso a funcionar el simulador y se estabilizó la presión residual a 21 kPa (3,0 lb/pul²) con un manómetro de 0 a 103 kPa (0 a 15 lb/pul²), protegiendo inicialmente las muestras colocando el balde pequeño a la salida de la boquilla.

Al confirmar la presión residual, se quitó y se puso rápidamente el balde por una diferencia de tiempo de dos segundos para que las gotas cayeran sobre la harina. Posteriormente se secaron las muestras de harina a un ambiente de 30°C por 1 hora y media. Después de este tiempo de secado, se insertó cada muestra en bolsas herméticas individuales, las cuales se transportaron al laboratorio a donde se secaron en un horno a 110°C por una hora y media.

Se determinó de manera visual (figura 3.13) que las muestras de harina en los vértices de la cuadrícula recibieron las gotas de mayor tamaño.

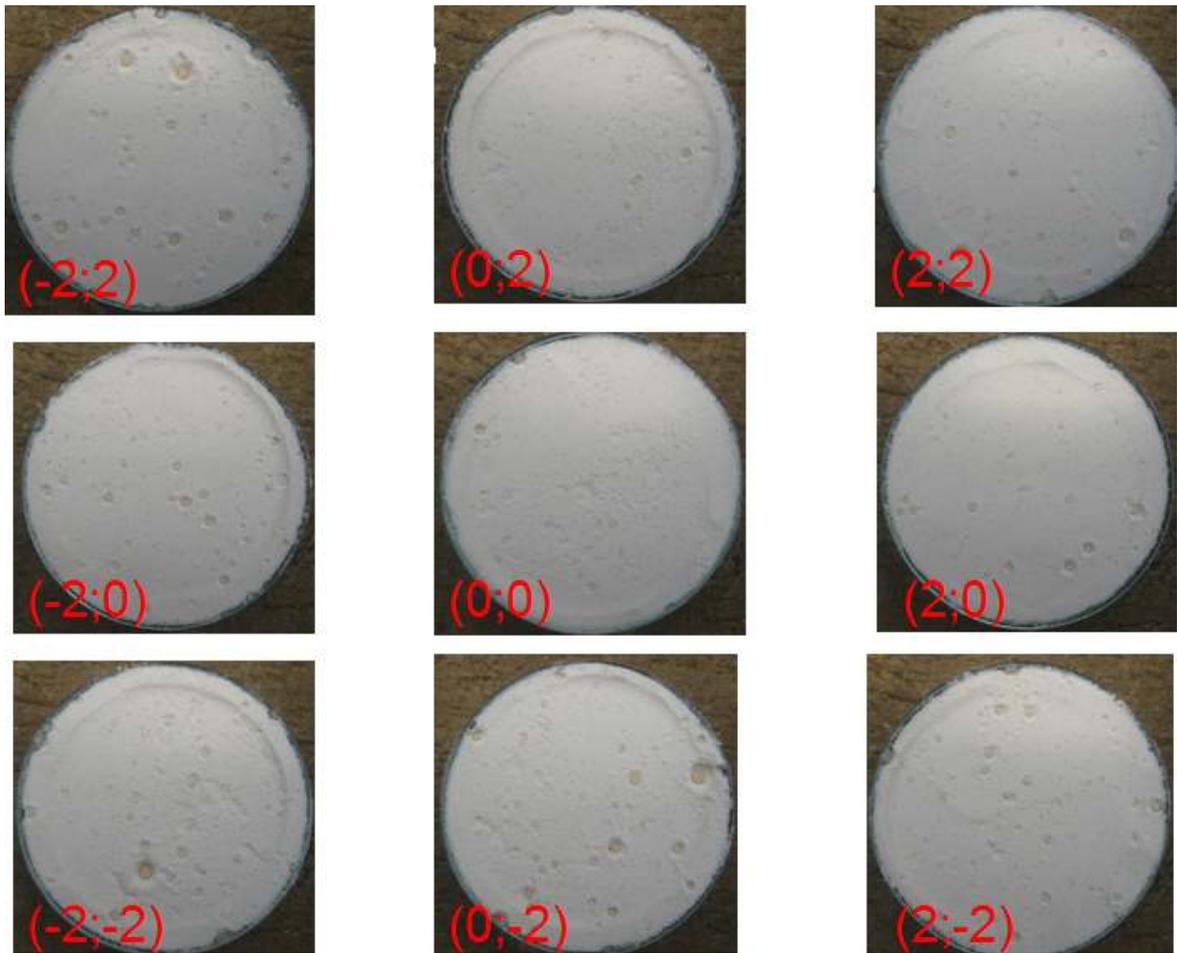


Figura 3.13 Muestras de harina en cajas petri pequeñas.

Fuente: El Autor

3.4.2 Pruebas finales

Se preparó una muestra de harina en una bandeja metálica de 0,600 metros x 0,600 metros x 0,030 metros. Inicialmente, se vertió la harina sobre la bandeja y se utilizó una cuchara grande para formar una lámina uniforme entre 1 a 1,5 centímetros de espesor. Posteriormente, se colocó una llaneta sobre cada sector de la lámina de harina generando una compactación de 0,058 N/cm² (figura 3.14). Se utilizaron pesos sobre la superficie de la llaneta para generar esta compactación.



Figura 3.14 Bandeja con harina compactada.

Fuente: El Autor

Al terminar de preparar la muestra de harina se colocó la bandeja metálica por debajo de la boquilla en las coordenadas ya definidas, asegurándose que el balde plástico esté cubriendo la boquilla. Posteriormente se encendió la bomba con la válvula de bola cerrada en el brazo del simulador. Al estar montado sobre la mesa se abrió la válvula de bola. A pesar de que la presión residual de la boquilla ya fue calibrada, se debió manipular la válvula de compuerta del brazo del simulador para ajustar la presión requerida.

Con la presión residual ajustada, se quitó y se puso el balde de plástico con un movimiento rápido con una diferencia de tiempo de dos segundos para obtener las muestras de gotas sobre la harina. Al poner el balde de plástico se utilizó un trapo para secar posibles gotas que puedan caer de la parte externa del balde mojado. Posteriormente se apagó el sistema y se retiró la bandeja metálica del piso. La muestra de harina con gotas (figura 3.15) se mantuvo secando en un ambiente cerrado a 30°C por 3 horas.



Figura 3.15 Gotas recibidas en bandeja con harina.

Fuente: El Autor

Después del tiempo de secado se vertió la muestra de harina con gotas en tres bolsas plásticas herméticas grandes.

Se vertió la muestra en bandejas para que pudiera secarse en un horno a 110°C por 4 horas y media.

Después de que la muestra ha sido secada, se empieza el proceso de tamizado. Para esto se utilizaron seis tamices de diferentes aperturas (2,00 mm, 1,68 mm, 1,41 mm, 1,19 mm, 1,00 mm y 0,841 mm). Se utilizó una máquina para tamizado, para facilitar el trabajo. Se obtuvieron muestras de tamaño de glóbulos en cada tamiz (tabla 6.3, tabla 6.4, tabla 6.5). Se pesó y se contó el total de glóbulos de cada tamiz en una balanza semi-analítica. En algunos casos donde la cantidad de glóbulos era muy alta, se contaba y se pesaba el 25% de la muestra (figura 3.16).



Figura 3.16 Glóbulos de harina.
Fuente: El Autor

Cuando se observaba que en el tamiz con abertura de 2,00 mm, tenía glóbulos muy grandes, se pasaban a otros tamices (2,38 mm y 2,83 mm) para separar más tamaños.

3.5 Metodología para validar medición de velocidad de caída de gotas con cámara fotográfica

Se decidió utilizar una cámara fotográfica de alta resolución marca Sony, modelo α 700 para obtener la velocidad de caída de gotas. Antes de utilizar este método con las gotas generadas con el simulador, se decidió realizar pruebas con un gotero. Se pegó un cartón amarillo a una pared con una escuadra instalada verticalmente al frente, de manera que se tuviera un nivel de referencia cuando se dejaban caer gotas de agua con un tinte azul a una altura de caída de 2 metros.

Se colocó la cámara fotográfica en el piso a una distancia de 1,23 metros del cartón. Seguidamente se puso la cámara en modo S, de tal manera que el tiempo de obturación pudiera ser manipulado por el usuario, y que la cámara calcularla automáticamente el valor F de abertura. Se calibró un tiempo de obturación de 1/60 segundos. Además la cámara se instaló de manera que pudiera tomar 5 fotos por segundo. La cámara se enfocó de tal manera que en la foto apareciera la línea horizontal del piso y el cartón amarillo con menos de 0,250 metros de altura, de manera que se pudiera tomar fotos a las gotas que cayeran

cerca del piso. Se procedió a dejar caer las gotas con tinte azul del gotero y tomar las fotos necesarias (figura 3.17).

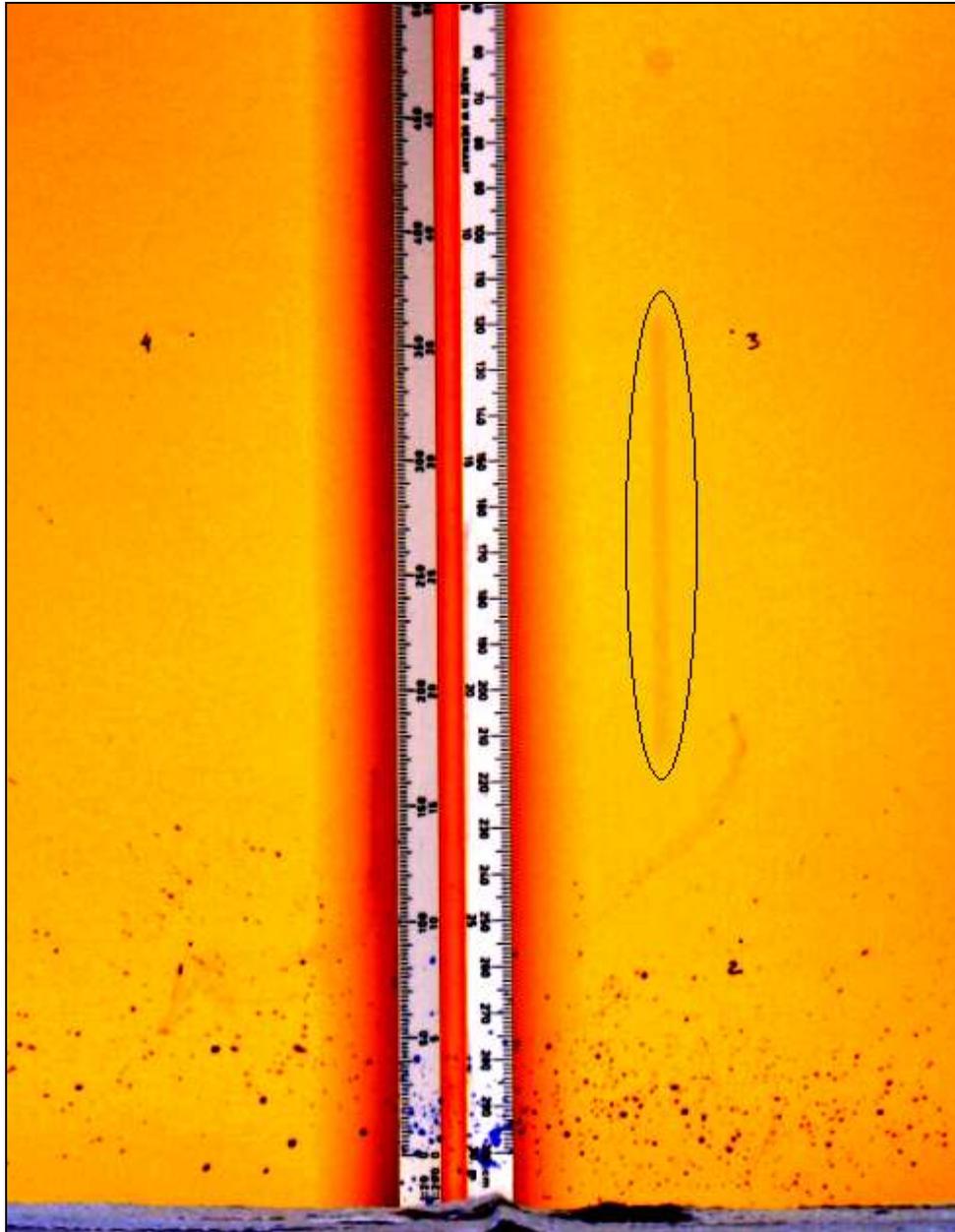


Figura 3.17 Línea formada por una gota.
Fuente: El Autor

Para determinar el diámetro de gota generado por el gotero se realizó la misma medición que en el capítulo 3.1.2. Después de haber tomado las fotos se procedió a descargarlas en la computadora y a revisar en cual foto quedó marcada una gota como una línea azul. Posteriormente, se midió la distancia de esa línea con referencia a la escuadra existente en la foto. Se dividió esa distancia con el tiempo de obturación de la cámara para obtener la velocidad de caída. Para validar esa velocidad calculada, se procedió a compararla con la velocidad de caída obtenida en la teoría (figura 2.12) para una distancia de caída y un diámetro determinado de gota. La velocidad calculada era idéntica por lo cual se validó la metodología.

3.6 Metodología para obtener velocidades de caída de gotas con el simulador

Se utilizó, la cámara fotográfica mencionada en 3.5 para tomar la imagen de gotas cayendo del simulador de lluvia. Se instaló un fondo negro a donde se insertó verticalmente una regla de 0,900 metros, para tener un nivel de referencia de medición. Se colocó la cámara en el piso a una distancia de 1,23 metros del fondo negro. Se ubicó una mesa detrás del fondo negro y otra al frente dejando una abertura de 0,150 metros para recibir las gotas generadas por el simulador (figura 3.18). Se instaló de tal manera que se tenían dos zonas de medición, la primera (zona A) formando un rectángulo en las coordenadas (0,1) (1,1) (1,-1) y (0,-1), y la segunda (zona B) en las coordenadas (1,1) (2,1) (2,-1) y (1,-1).

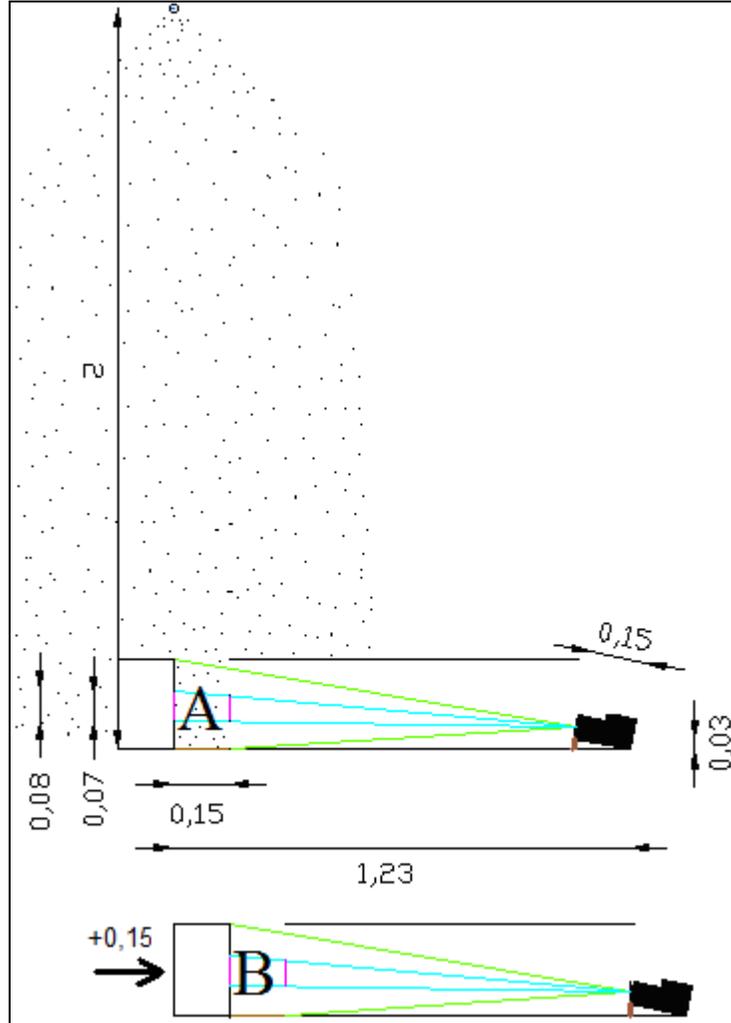


Figura 3.18 Colocación de cámara y zonas de recepción de gotas.
(Todas las unidades están en metros).

Fuente: El Autor

Se hicieron mediciones para cada presión residual mencionada para las zonas de medición A y B (tabla 6.6). Se calibró la cámara fotográfica de la misma manera que en el capítulo 3.5 para poder obtener las imágenes de las líneas formadas por la caída de gotas (figura 6.1).

Debido a que la relación distancia de la cámara al objetivo y distancia de la abertura de recepción de gotas es muy alta (7 a 1), se desprecia la diferencia de longitud ocasionada por la perspectiva. En un caso extremo el error de lectura de la línea generada por la gota puede ser del 12% (figura 3.18).

CAPÍTULO 4: Resultados y análisis

4.1 Curva de calibración entre glóbulos de harina y gotas de agua

4.1.1 Diámetro medio de gota

Según la metodología explicada en el capítulo 3, se determinó un diámetro medio máximo para la aguja verde de 2,90 milímetros y un diámetro medio mínimo para la aguja amarilla de 1,93 milímetros. Al utilizar electrogoteo se generaron gotas de diámetros menores alrededor de un milímetro (4.1).

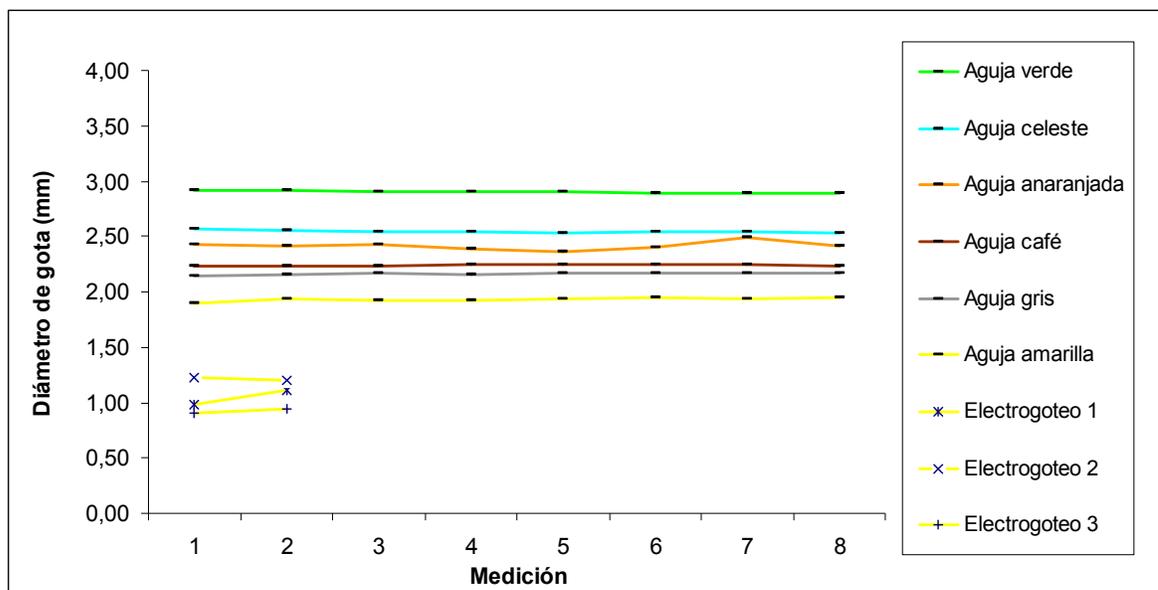


Figura 4.1 Diámetros de gota generados en laboratorio.

Fuente: El Autor.

Según se observa en la figura 4.1, existe una baja variabilidad entre mediciones realizadas con las agujas. Lo anterior, permite establecer un diámetro definido de gota para un tamaño de aguja, según el rango de temperaturas utilizado. Solamente la aguja anaranjada parece tener una variación considerable, por lo que se decidió desecharla para las mediciones con harina.

En el caso del electrogoteo no se pudo establecer un diámetro de gota fijo, ya que no se tenía a disposición un aparato que midiera el voltaje e intensidad que se aplicaba a la bureta y correlacionarlos con el diámetro de gota. Lo ideal hubiera sido generar una curva de calibración del diámetro de gota contra voltaje. Se decidió utilizar las gotas generadas con este método, midiendo siempre el diámetro de gota antes y después de realizar una

medición sobre la lámina de harina. Finalmente se obtuvieron gotas con diámetros entre 0,92 y 1,2 milímetros.

4.1.2 Masa de glóbulos de harina

De las seis agujas definidas con diámetro de gota se decidió no utilizar la anaranjada ni la gris para generar glóbulos de harina, ya que daban poca diferencia de tamaño en comparación a la aguja superior y a la inferior. Además la aguja anaranjada no mantuvo un diámetro de gota constante (figura 4.1).

Para las mediciones realizadas con las agujas sobre la harina se obtuvo una masa de glóbulo entre 4 a 11,5 miligramos. Para cada electrogoteo (1, 2 y 3) se determinó una masa de glóbulo de harina aproximada de un miligramo (figura 4.2).

La variación entre mediciones para la masa de glóbulo de harina, fue mayor para la aguja verde, la cual generaba el mayor tamaño de gota. Visualmente se determinó que para ese tamaño de gota (2,90 milímetros) hubo mayor desprendimiento de partículas de harina debido al impacto de la gota. Hay que considerar que la lámina de harina no era 100% plana o uniforme, por lo cual pudieron haber variaciones de impacto dependiendo en qué punto caía la gota. Al tener un diámetro de gota mayor se tuvo una mayor superficie de contacto por lo cual el impacto se dio sobre una superficie menos uniforme ocasionando diferencias en la cantidad de harina desprendida.

En realidad no se evaluó el grado de uniformidad de la lámina de harina por lo cual no se pueden dar conclusiones aseverantes en este tema. En todo caso no se utilizó un valor medio de la masa de glóbulo de harina entre mediciones para desarrollar la curva de calibración, debido a las variaciones obtenidas para todas las agujas (figura 4.2).

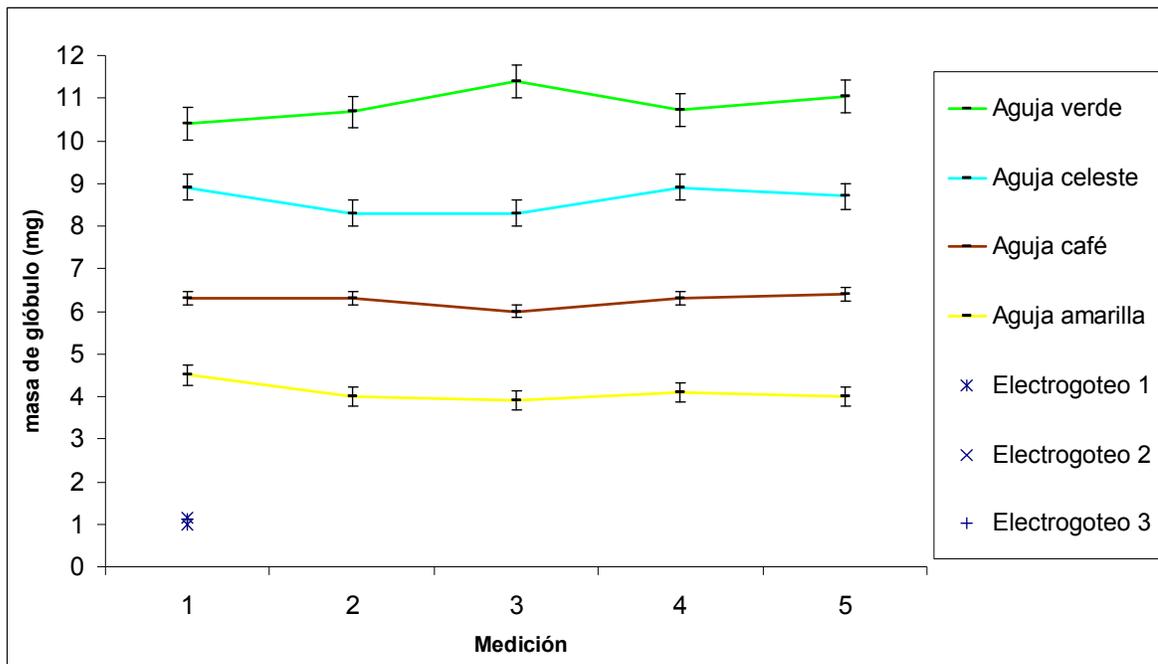


Figura 4.2 Masa de glóbulo para métodos de generación de gotas.
Fuente: El Autor

4.1.3 Curva de calibración

Se generó una curva de calibración de la masa de glóbulo de harina contra el diámetro de gota, según los resultados obtenidos en los capítulos 4.1.1 y 4.1.2 (figura 4.3). La ecuación potencial que describe esta curva, con un coeficiente de variación de 0,9789, es la siguiente:

$$m = 0,9667 \cdot d^{2,2855} \quad (4.1)$$

Donde:

m: masa de un glóbulo de harina (mg)
d: diámetro de gota (mm)

El rango de trabajo de la curva de calibración se encuentra desde 0,92 milímetros hasta 2,9 milímetros y el ámbito de trabajo se encuentra desde 0,80 miligramos hasta 11 miligramos.

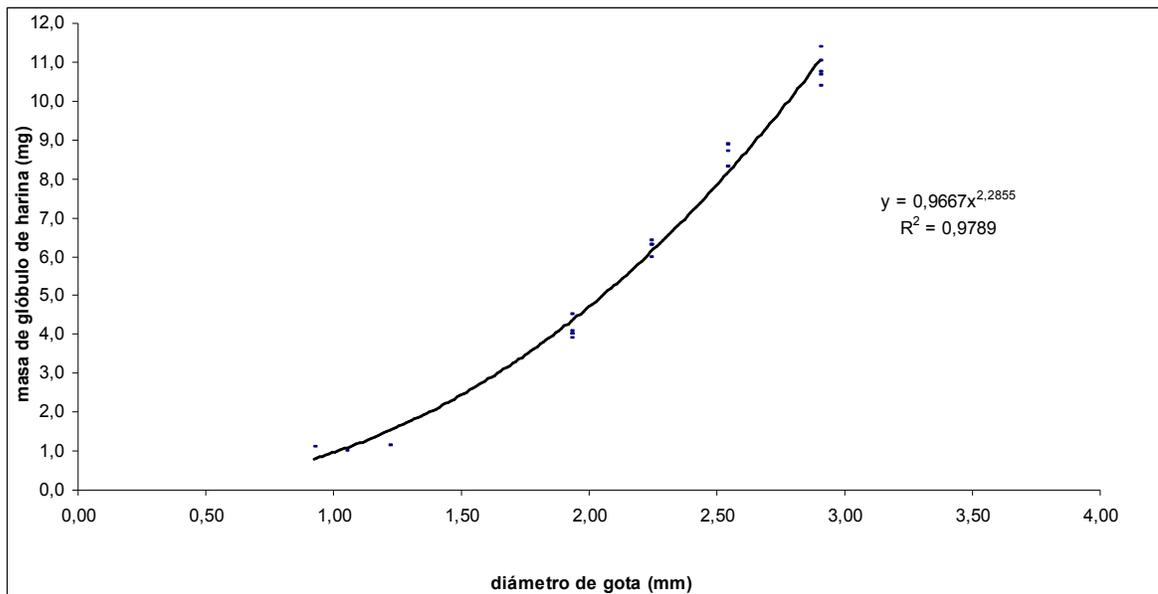


Figura 4.3 Curva de calibración, masa de glóbulo contra diámetro de gota.
Fuente: El Autor

En la figura 4.4 se presentan los puntos generados por Hudson (1982) y por la presente investigación para obtener una curva de calibración relacionando la razón masa de gota entre masa de glóbulo, contra masa de glóbulo. No se conoce el contenido de humedad ni el tipo de harina que utilizó Hudson (1982), por lo cual no es conveniente comparar una curva con la otra, pero sirve para demostrar que es importante establecer parámetros iniciales.

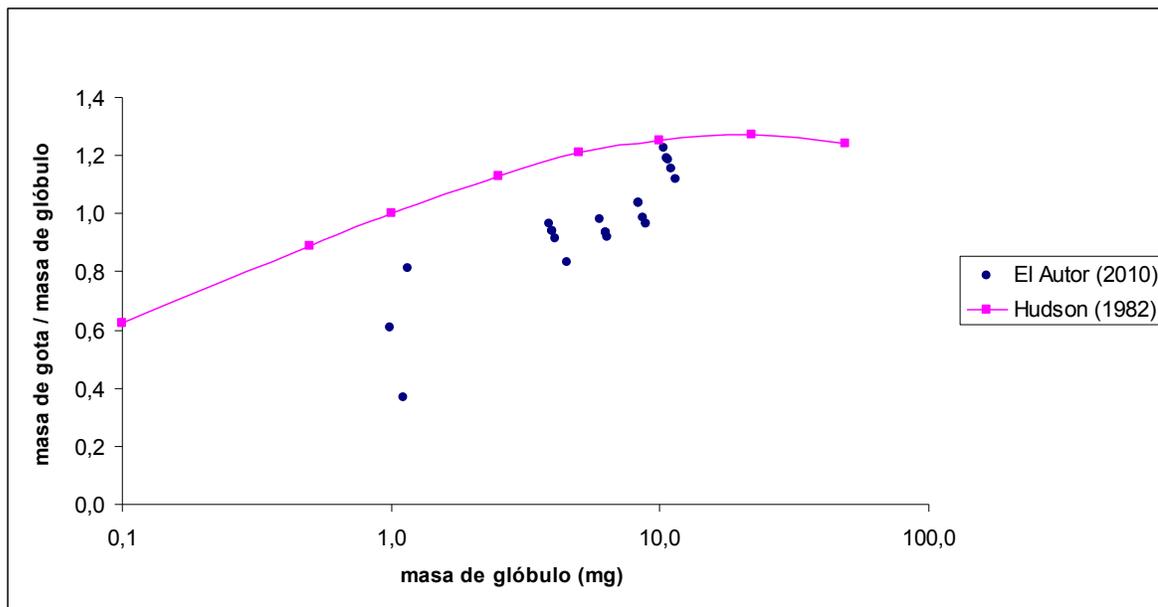


Figura 4.4 Puntos de calibración generados por dos autores.
Fuente: El Autor

4.2 Uniformidad e intensidad de boquillas

Se determinó que la boquilla modelo FL-8VS es la más adecuada para este simulador de lluvia, ya que genera intensidades de lluvia idénticas a las naturales, entre 31,0 mm/h y 197,3 mm/h. Como por ejemplo, la intensidad de lluvia media de 61,5 mm/h a una presión residual de 21 kPa y una superficie de aplicación de 0,600 metros x 0,600 metros (tabla 4.1), la cual representa un valor de intensidad máxima de lluvia natural de Pacayas con una duración de 45 minutos para un período de retorno de 10 años (Vahrson, 1990).

Tabla 4.1 Coeficiente de uniformidad e intensidad (El Autor).

Modelo de boquilla	Presión (kPa)	Medición	A1 = 0,300 m x 0,300 m		A2 = 0,600 m x 0,600 m	
			C.U. (%)	I (mm/h)	C.U. (%)	I (mm/h)
FL-8VS	21	1	86,7	35,3	68,8	56,2
	21	2	84,3	37,0	65,4	61,5
	21	3	82,5	31,0	62,6	56,2
	21	4	85,9	35,9	66,2	60,1
	17	1	82,3	59,3	69,6	99,7
	17	2	81,3	71,2	66,3	118,8
	14	1	77,2	139,8	39,6	197,3

Para la boquilla modelo FL-8VS se evaluó la intensidad para dos tamaños de superficie de aplicación para tres presiones residuales del sistema (tabla 4.1). Se encontró que a una menor presión residual se obtiene una mayor intensidad de lluvia media, pero con variaciones en la uniformidad. La uniformidad se mantuvo prácticamente igual para presiones de 21 kPa y 17 kPa, en cambio a una presión de 14 kPa la uniformidad se redujo de 4 a 10 puntos porcentuales para una superficie de aplicación de 0,300 metros x 0,300 metros, y de 23 a 30 puntos porcentuales para una superficie de aplicación de 0,600 metros x 0,600 metros.

Toda boquilla o aspersor tendrá un porcentaje de uniformidad sobre una superficie de aplicación. Normalmente se utilizan estos porcentajes para determinar que tan uniforme es la lámina de agua para un sistema de riego (Fangmeier, 2006). Según la delimitación del problema, no interesaba si este coeficiente de uniformidad era alto o bajo, ya que lo que se buscaba era poder medir el diámetro de gotas, según la metodología planteada. Aun así el valor sirve como punto de comparación para los parámetros establecidos de presión y superficie de aplicación.

Más importante que el coeficiente de uniformidad fue determinar la variación de la intensidad de lluvia según la distancia del centro de aplicación de la boquilla, lo que permite una mayor comprensión de la distribución del agua aplicada. Se aprecia en las figuras 4.5 y 4.6 que para presiones de 21 kPa y 17 kPa se tiene una tendencia al aumento de intensidades a mayor distancia con diferencias del centro a los extremos de 90 mm/h hasta 150 mm/h, respectivamente. En cambio, para una presión de 14 kPa no existe un patrón definido (figura 4.7), y existen picos pronunciados de intensidad en dos extremos de hasta 550 mm/h.

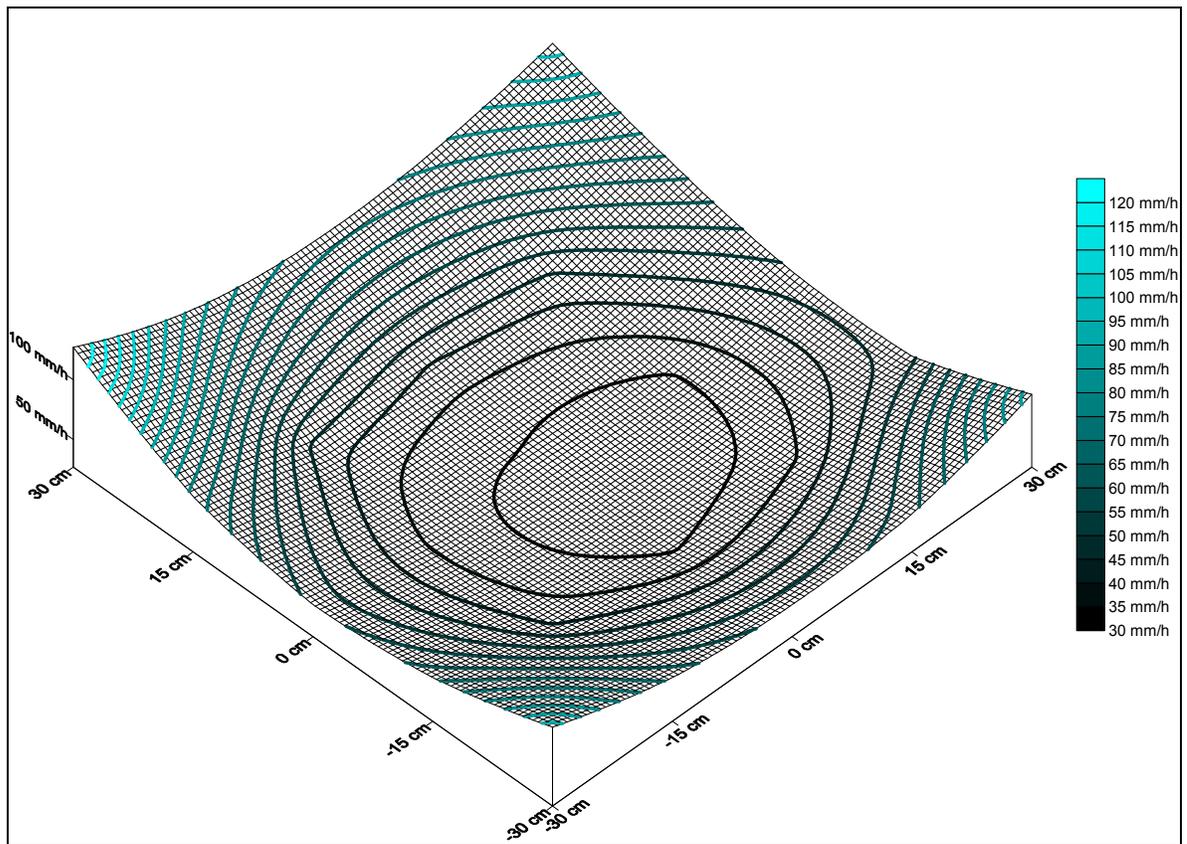


Figura 4.5 Distribución de intensidades para 21 kPa (medición 4).
Fuente: El Autor

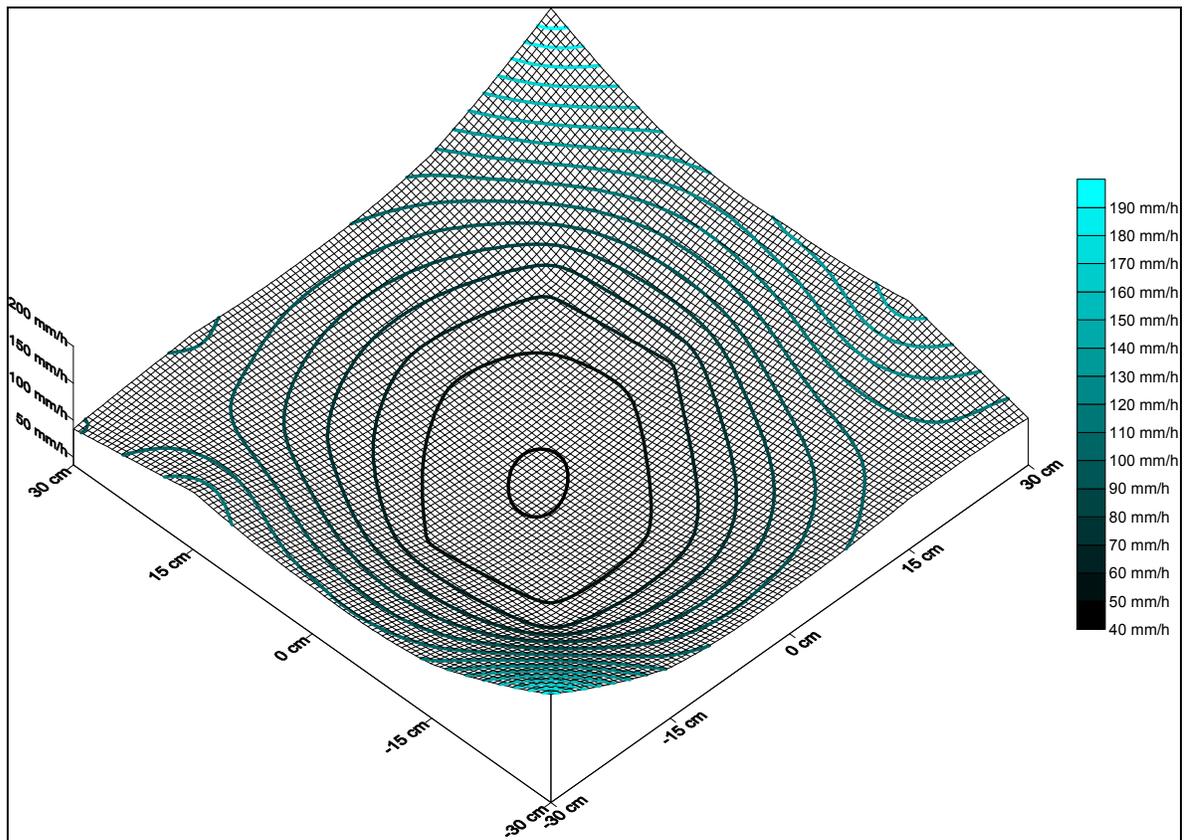


Figura 4.6 Distribución de intensidades para 17 kPa (medición 1).

Fuente: El Autor.

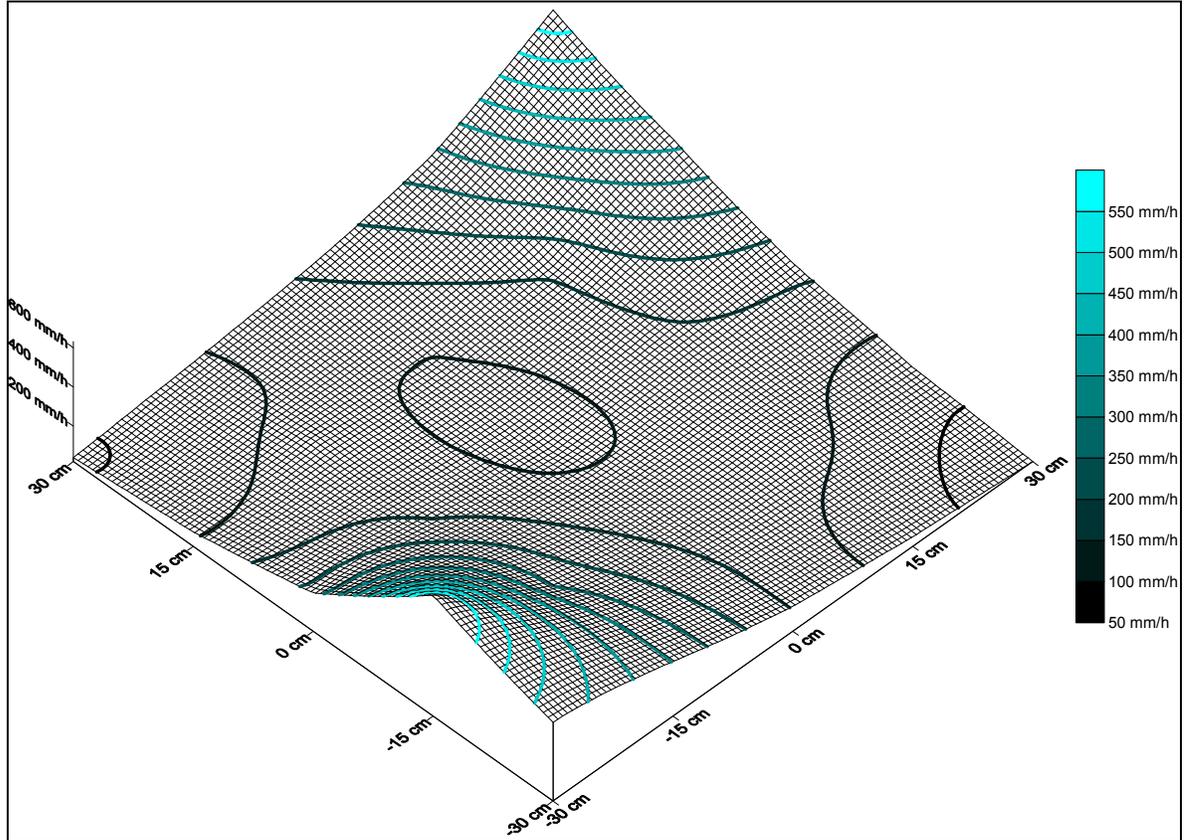


Figura 4.7 Distribución de intensidades para 14 kPa (medición 1).
Fuente: El Autor

4.3 Diámetro y distribución de gotas de lluvia simulada

Se realizó únicamente la cuantificación de diámetro y distribución de gotas para el área de aplicación de 0,600 metros x 0,600 metros para la boquilla modelo FL-8VS.

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran los resultados del porcentaje del peso total de glóbulos de harina obtenidos para las tres presiones residuales definidas.

Se determinó que para una presión residual de 21 kPa (figura 4.8) el 26,8% del total de glóbulos se encuentra por debajo del valor mínimo del ámbito de la curva de calibración, con una masa unitaria de 0,498 miligramos. En el caso de una presión residual de 17 kPa (figura 4.9) se reduce este porcentaje a un 19,3%, con una masa unitaria de 0,459 miligramos. Para 14 kPa (figura 4.10), el porcentaje de glóbulos menores a 0,80 miligramos se redujo a un 5,4%, pero se obtuvieron glóbulos con masas unitarias superiores a 11 miligramos, un 12,3% para glóbulos de 21,4 miligramos y un 15,1% para glóbulos de 11,9

miligramos. Por lo tanto, se obtuvo la menor muestra representativa a una presión de 14 kPa.

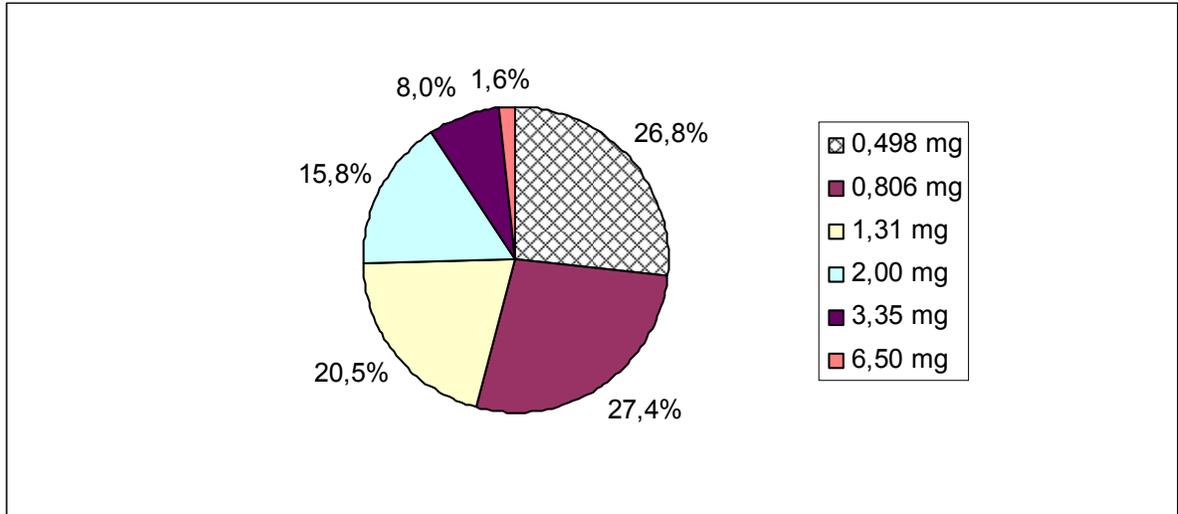


Figura 4.8 Porcentaje de masa total de glóbulos de harina para 21 kPa.
Fuente: El Autor.

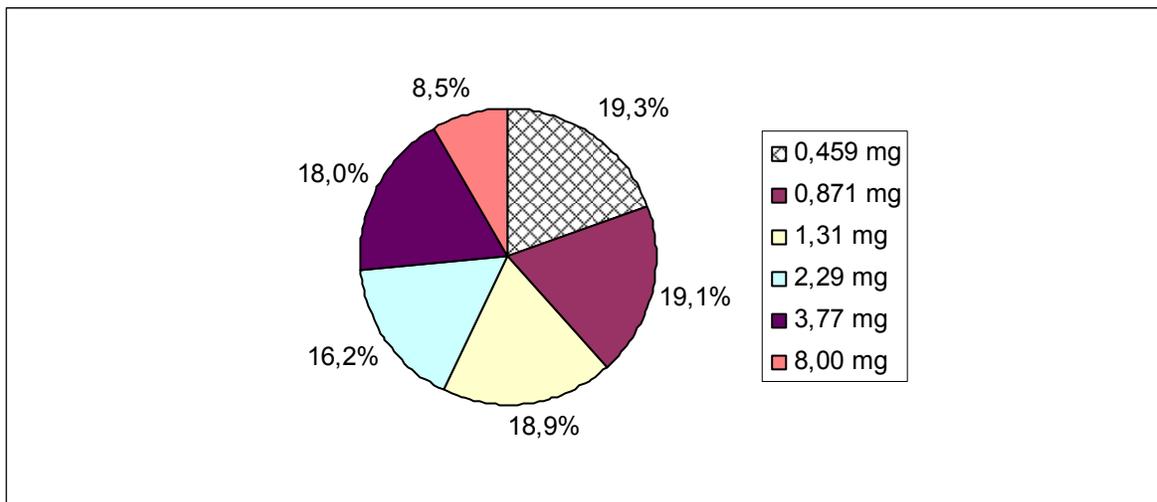


Figura 4.9 Porcentaje de masa total de glóbulos de harina para 17 kPa.
Fuente: El Autor

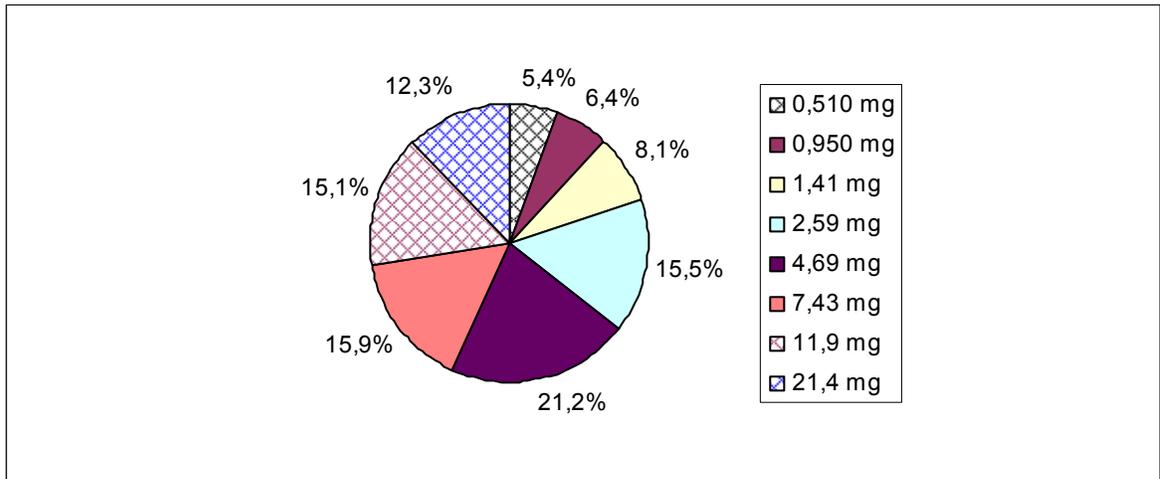


Figura 4.10 Porcentaje de masa total de glóbulos de harina para 14 kPa.
Fuente: El Autor

Se obtiene, con la curva de calibración, el diámetro de gota correspondiente a cada masa media de glóbulo de harina presentada en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10. Los valores de diámetro de gota se encuentran entre 0,92 milímetros y 2,50 milímetros. Se presenta el porcentaje de volumen acumulado de gotas contra el diámetro de gotas (figura 4.11) para obtener el diámetro de volumen medio (D50) para cada presión residual del sistema.

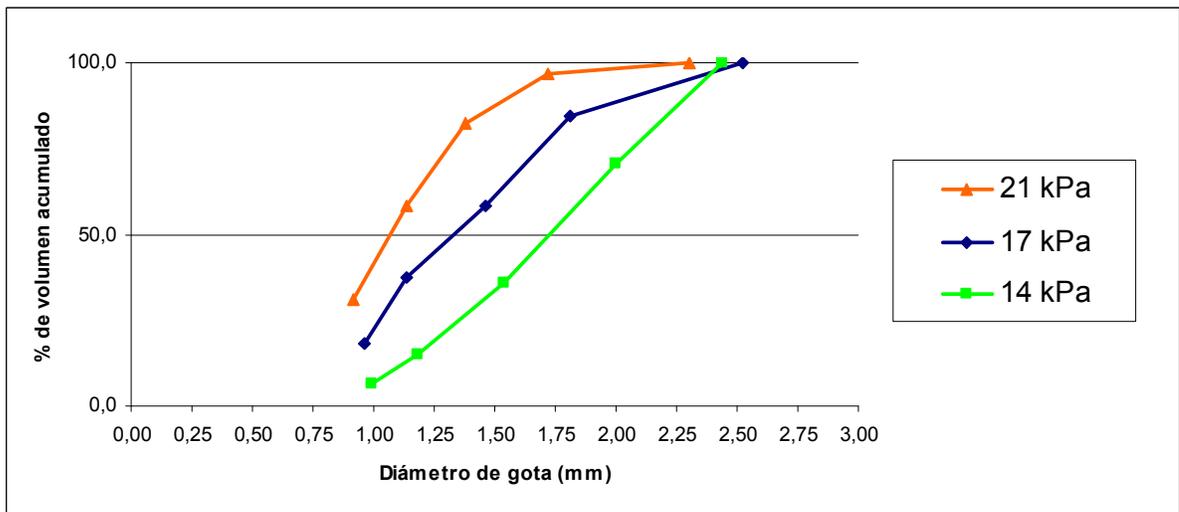


Figura 4.11 Porcentaje de volumen acumulado de gotas.
Fuente: El Autor.

A continuación, se presentan los valores D50 con su respectivo nivel de significancia basado en el porcentaje del peso total obtenido de glóbulos de harina que se encuentra

dentro del ámbito de la curva de calibración. El porcentaje del peso total es un valor importante para conocer el nivel de significancia en el cual se está trabajando. Se podrá mejorar este nivel de significancia aumentando la cantidad de puntos a los extremos de la curva de calibración generada.

Tabla 4.2 Valores D50 para diferentes presiones residuales (El Autor).

P (kPa)	D50 (mm)	% del peso total
21	1,08	73,2
17	1,34	80,7
14	1,73	67,2

4.4 Velocidad de caída de gotas

Se midieron entre 8 y 12 velocidades de caída para cada presión residual del sistema (tabla 6.6). Se calculó una velocidad media para cada presión residual, la cual corresponde a un diámetro de volumen medio. Evaluando las velocidades de caída obtenidas en esta investigación, con las velocidades terminales desarrolladas por Mason (1971), que se muestran en la figura 2.11, existe una similitud entre ambas velocidades. Tal es el caso para el diámetro de volumen medio de 1,08 milímetros a una presión residual de 21 kPa, a donde se midió una velocidad media de 3,73 m/s ($\sigma = 0,82$ m/s), y la velocidad terminal a ese diámetro, según Mason (1971) es de 4,2 m/s.

A pesar de que la altura de caída de gotas del simulador es de 2 metros, se alcanzan velocidades de caída aproximadas a las velocidades terminales (figura 2.11), ya que un sistema simulador con boquilla a presión, genera una velocidad inicial mayor a cero, lo cual compensa colocar la boquilla a una mayor altura sobre la superficie de aplicación para alcanzar la velocidad terminal. La figura 2.12 (ASTM), presenta curvas que relacionan las velocidades de caída a diferentes alturas y tamaño de gotas, las cuales fueron desarrolladas para velocidades iniciales de gota igual a cero. Según la condición anterior (velocidades iniciales de gota igual a cero) se tiene que para el rango de diámetros de operación del presente simulador (1 a 3 milímetros), la altura mínima requerida para alcanzar la velocidad terminal hubiera sido de 12 metros. Por lo tanto, el equipo es funcional y operativo para generar condiciones similares a la lluvia natural, dentro de las condiciones de operación establecidas en esta investigación, para aplicaciones que se desean desarrollar.

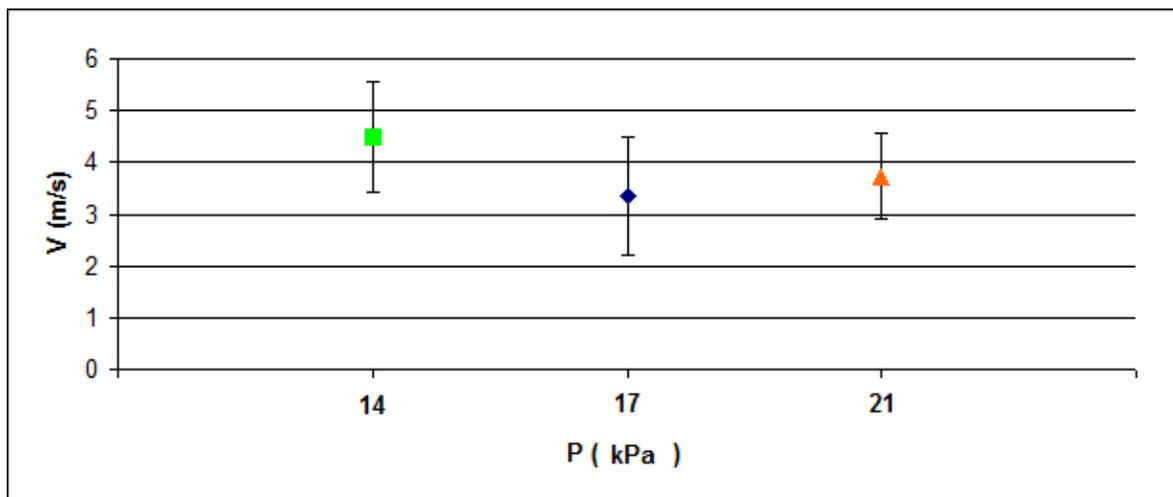


Figura 4.12 Velocidad de caída para diferentes presiones residuales.
Fuente: El Autor

Tabla 4.3 Velocidad de caída media y desviación estándar para diferentes presiones residuales (El Autor).

P (KPa)	V (m/s)	σ (m/s)
21	3,73	0,82
17	3,35	1,15
14	4,49	1,07

4.5 Energía por superficie por lámina de aplicación

4.5.1 Comparación con otros simuladores

Se determinó que la energía por superficie por lámina de aplicación generada a tres presiones es idéntica a la encontrada por diferentes autores para simuladores con boquilla pulverizadora (Kinner et al., 2001; Navas et al., 1996; Benito et al., 2001). En el caso de Benito (2001) la energía varía en un 30% en comparación a la generada a una presión de 14 kPa. Por otro lado, para Navas (1996), solo varía en un 3% en comparación al resultado obtenido a una presión de 21 kPa.

Tabla 4.4 Diferentes energías generadas por simuladores con boquillas pulverizadoras colocadas a una altura, h, sobre una superficie de aplicación (El Autor).

Boquilla	P (kPa)	h (m)	E (J/m ² mm)
FL-8VS (El Autor)	21	2,0	6,9
	17	2,0	5,6
	14	2,0	10
GG2.8W (Kinner et al., 2001)	34	1,4	4,0
HARDI-1553-10 (Cerde et al., 1996)	159	2,0	7,1
Fulljet 1/8 GG6SQ (Benito et al., 2001)	20	2,0	13

De acuerdo a los resultados para diferentes boquillas, no se puede definir la magnitud de la energía de aplicación para una presión específica (tabla 4.4). Las boquillas tienen diseños y tamaño de orificios disímiles, por lo cual pueden generar diferentes diámetros de gota a presiones iguales, por ende energías cinéticas desiguales.

Para la boquilla modelo FL-8VS se obtuvieron diferentes energías para las presiones utilizadas. Se determinó la mayor energía a la menor presión (14 kPa), lo anterior debido a que se tiene mayor diámetro de gotas con una mayor velocidad de caída.

4.5.2 Comparación con lluvia natural

Se determinó que las energías calculadas para cada intensidad de lluvia simulada son menores que las energías generadas para estas mismas intensidades de lluvia natural (figura 4.13). Según los estudios realizados por Hudson (1982) para lluvia natural (figura 2.13), se establece que la energía de impacto se encuentra alrededor de los 30 J/m² mm para una intensidad de 197 mm/h. En el caso de la lluvia simulada para 197 mm/h ocasiona solamente una energía de 10 J/m² mm, lo cual implica una tercera parte de la energía

ocasionada por la lluvia natural. Para una intensidad de lluvia simulada de 119 mm/h se origina la menor parte con un 20% de la energía de lluvia natural.

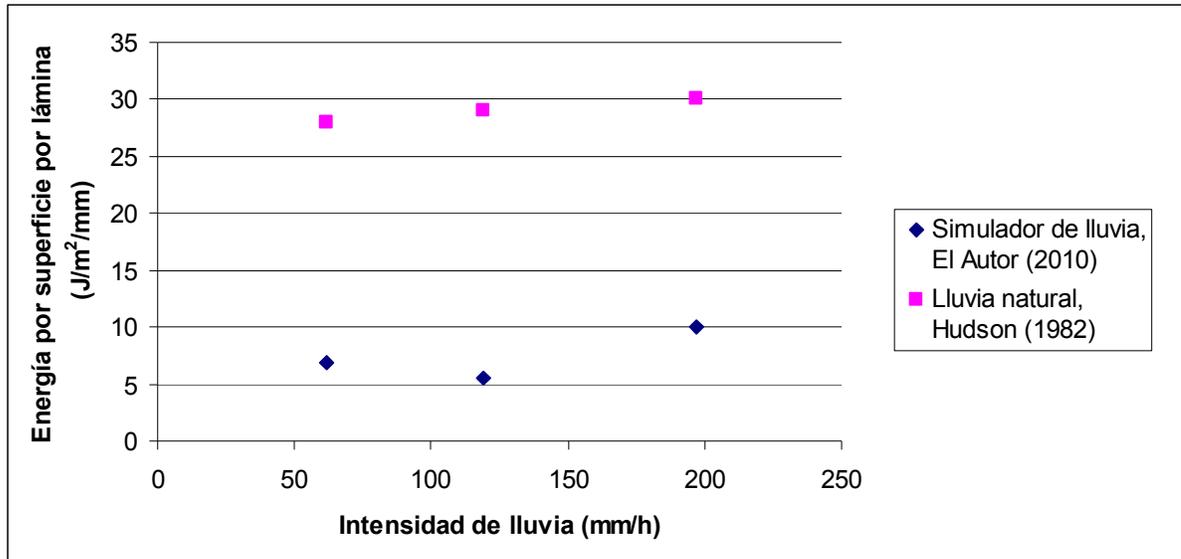


Figura 4.13 Energía generada para intensidades de lluvia.
Fuente: El Autor.

En realidad estos resultados no son comparables, ya que no se conoce las condiciones experimentales en las que trabajó Hudson (1982), a saber: condiciones de viento, metodología usada para obtener la distribución de los diámetros de gotas e intensidades de lluvia, superficie de medición, entre otras.

Por tanto es claro que no es correcto tratar de comparar estas energías, sin embargo hace valer el trabajo desarrollado en esta investigación, destacando las metodologías claramente validadas, que serán una base para estudios de lluvia natural y artificial.

CAPÍTULO 5: Consideraciones finales

5.1 Conclusiones

Se estableció una metodología que permite establecer criterios de diseño para escoger la boquilla adecuada para ser utilizada en un simulador de lluvia a presión, considerando: intensidades de lluvia natural, una superficie de aplicación efectiva, y un método de medición de tamaño y velocidades de caída de gotas.

El simulador de lluvia desarrollado tiene un rango operativo de intensidades de lluvia media de 62 mm/h a 197 mm/h para una superficie de aplicación efectiva de 0,600 metros x 0,600 metros para una boquilla pulverizadora de cono lleno marca Teejet modelo FL-8VS.

Se desarrolló y validó una metodología detallada para la determinación de diámetros de gota empleando la harina como medio de medición.

Se desarrolló una curva de calibración entre diámetro de gotas y masa de glóbulos de harina con un rango de medición de diámetro de gotas de 0,92 milímetros hasta 2,90 milímetros.

Se estableció un método para determinar el diámetro y la distribución de gotas generadas por el simulador de lluvia utilizando harina. El diámetro de volumen medio para tres presiones residuales para la boquilla modelo FL-8VS fue de 1,08 milímetros, 1,34 milímetros y 1,73 milímetros.

Se implementó un método para medir velocidades de caída de gotas utilizando una cámara fotográfica de alta resolución. Se determinó una velocidad de caída media para tres presiones residuales para la boquilla modelo FL-8VS de 4,49 m/s ($\sigma = 1,07$ m/s), 3,35 m/s ($\sigma = 1,15$ m/s) y 3,73 m/s ($\sigma = 0,82$ m/s).

El simulador de lluvia en cuestión está calibrado, según la presión, para que genere tres energías: 5,6 J/m² mm, 6,9 J/m² mm, y 10 J/m² mm. Estas energías son similares a las energías obtenidas en otros simuladores.

De la revisión bibliográfica se encontraron diferentes curvas de energía para lluvia natural, y se determinó que la curva de Hudson (1982) tiene las mejores condiciones para realizar el análisis comparativo. Sin embargo, se concluye que no es posible comparar las energías determinadas por Hudson (1982) para lluvia natural, con los resultados obtenidos en esta investigación, ya que no se conoce las variables y condiciones experimentales con las cuales se generaron las energías de lluvia natural.

5.2 Algunas aplicaciones que pueden ser desarrolladas como resultado de este proyecto

El simulador de lluvia en cuestión puede ser utilizado para realizar evaluaciones de erosión por impacto de gotas y por escorrentía a nivel de laboratorio. Además puede ser utilizado como aplicador de riego y fertilizantes para cultivos experimentales en ambientes controlados.

Poner a funcionar el simulador de lluvia sobre parcelas de escorrentía para evaluar mantas de control de erosión, u otros productos elaborados para ese fin para determinar su efectividad.

Utilizar el aparato en laboratorios, ya sea para fines educativos o de investigación para evaluar la uniformidad, caudal y presión de boquillas, así como aplicar la metodología propuesta para medir el diámetro de gotas generado.

En mediciones de eficiencia y aplicación de fertilizantes, fungicidas y agroquímicos.

El método de medición de gotas puede ser utilizado para lluvias naturales para analizar distribución y energía de gotas.

5.3 Recomendaciones

Para utilizar el aparato a nivel de campo es necesario contemplar diferentes aspectos de logística y diseño: sistema de protección del viento, portabilidad y facilidad de instalación, fuente de energía para operar la bomba y condiciones de pendiente del terreno, entre otras.

Si se desea utilizar una mayor superficie efectiva de aplicación del simulador, es necesario incorporar mayor cantidad de boquillas colocadas de tal forma que puedan generar una uniformidad e intensidad adecuada.

La metodología propuesta para realizar la curva de calibración entre glóbulos de harina y diámetro de gotas puede ser ampliada para diámetros de gotas mayores de 3 milímetros.

BIBLIOGRAFÍA

Arroyo, J. 2010. Sistema de alto voltaje para generar electrogoteo (“electrodrip”). Trabajo de investigación.

ASAE STANDARDS, 2004. Standards Engineering Practices Data. Procedure for Sprinkler Distribution Testing for Research Purposes.

ASTM International. Designation: D 6459 – 07. Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion.

Bollrich, G. 1989. Technische Hydromechanik/2. Spezielle Probleme. VEB Verlag für Bauwesen-Berlin.

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. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del suelo. Facultad de Ciencias. Universidad de Vigo.

Campos, E.F; Zawadzki, I.; Petitdidier, M.; Fernández, W. 2005. Measurement of raindrop size distributions in tropical rain at Costa Rica. Journal of Hydrology, Elsevier. Science Direct.

Cerda, A.; Ibañez, S.; Calvo, A. 1996. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. Soil Technology. Elsevier.

Cubero, D. 1996. Manual de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas. Ministerio de Agricultura y Ganadería; Organización de las naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.

De Lima, J.L.M.P.; Torfs, P.J.J.F.; Singh, V.P. 2001. A mathematical model for evaluating the effect of wind on downward-spraying rainfall simulators. CATENA, Elsevier. Science Direct.

Fangmeier Delmar, D.; Elliot William, J. 2006. Soil and Water Conservation Engineering. Fifth Edition. Thomson Delmar Learnig.

Hudson, N. W. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía (Boletín de Suelos de la FAO – 68). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma, 1997.

- Hudson, N. W. 1982. Conservación de Suelos. Editorial Reverté S.A. Impreso en España.
- Jiménez Guerra, A.O. 1996. Caracterización física de lluvias bajo dos regímenes pluviométricos y un perfil altitudinal en Costa Rica. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Kinner, D.A.; Moody, J.A. 2008. Infiltration and runoff measurements on steep burned hillslopes using a rainfall simulator with variable rain intensities: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5211, 64 p.; available online only.
- Mason, B.J. 1971. Oxford Monographs on Meteorology. The Physics of Clouds, Second Edition. Clarendon Press-Oxford.
- Monge Jeremías, R. 2009. Análisis de requerimientos, diseño y construcción de un simulador de lluvia portátil, para la cuantificación de la infiltración, escorrentía y erosión. Proyecto de graduación. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Primera edición, Ediciones Mundi-Prensa, España.
- Núñez Solís, J. 2001. Manejo y conservación de suelos-San José, C.R.: EUNED.
- Ritter F. W., Shirmohammadi A. 2001. Agricultural Nonpoint Source Pollution, Watershed Management and Hydrology. Lewis Publishers. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.
- Silva-Araya, W. 2010. Procesos y modelos matemáticos de erosión superficial. Revista CIEMI N° 64.
- Teejet. 2010. Manual de boquillas para aplicación al voleo. <http://www.teejet.com/spanish/home/products/spray-products/broadcast-spray-nozzles.aspx> (última revisión: 17 de setiembre 2010).
- Uijlenhoet, R.; Porra, J. M.; Sempere Torres, D.; Creutin, J.D. 2005. Analytical solutions to sampling effects in drop size distribution measurements during stationary rainfall: Estimation of bulk rainfall variables. Journal of Hydrology. Elsevier.
- Vahrson W.G., 1990. Intensidades críticas para el diseño de obras de conservación de suelos. Agronomía costarricense.
- Zuñiga Martínez, E. 2004. Diseño y evaluación del riego a presión. 1era edición. Editorial de la Universidad de Costa Rica.

APÉNDICE

Tabla 6.1 Obtención de diámetro de gota para curva de calibración (El Autor).

Aguja hipodérmica desechable				
Marca: Nipro				
Dimensiones: 13mm x 0,3mm				
Color: amarilla				
Fecha: 18/3/2010				
Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,01797	0,00359	1,90	24,5
2	0,01883	0,00377	1,93	24,6
3	0,01844	0,00369	1,92	24,5
4	0,01854	0,00371	1,92	24,6
5	0,01897	0,00379	1,94	24,5
6	0,01926	0,00385	1,95	24,6
7	0,01900	0,00380	1,94	24,7
8	0,01935	0,00387	1,95	24,8
Promedio (g)	0,01880		1,93	24,6
Desviación (g)	0,00046		0,02	0,11
m por gota (kg)		3,76E-06		
ρ (kg/m ³)		997		
V (m ³)		3,77E-09		
d (mm)		1,93		

Aguja hipodérmica desechable				
Marca: Nipro				
Dimensiones: 13mm x 0,4mm				
Color: gris				
Fecha: 18/3/2010				
Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,02577	0,00515	2,15	24,6
2	0,02594	0,00519	2,15	24,6
3	0,02660	0,00532	2,17	24,7
4	0,02614	0,00523	2,16	24,8
5	0,02643	0,00529	2,16	24,9

6	0,02651	0,00530	2,17	24,9
7	0,02667	0,00533	2,17	24,8
8	0,02647	0,00529	2,16	25,1
Promedio (g)	0,02632		2,16	24,8
Desviación (g)	0,00033		0,01	0,17

m por gota (kg)	5,26E-06
ρ (kg/m ³)	997
V (m ³)	5,28E-09
d (mm)	2,16

Aguja hipodérmica desechable

Marca: Nipro

Dimensiones: 13mm x 0,45mm

Color: café

Fecha: 25/3/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,02921	0,00584	2,24	25,1
2	0,02893	0,00579	2,23	25,2
3	0,02913	0,00583	2,23	26,1
4	0,02974	0,00595	2,25	25,7
5	0,02970	0,00594	2,25	26,0
6	0,02959	0,00592	2,25	25,5
7	0,02963	0,00593	2,25	25,4
8	0,02920	0,00584	2,24	25,3
Promedio (g)	0,02939		2,24	25,5
Desviación (g)	0,00031		0,01	0,37

m por gota (kg)	5,88E-06
ρ (kg/m ³)	997
V (m ³)	5,90E-09
d (mm)	2,24

Aguja hipodérmica desechable

Marca: Nipro

Dimensiones: 25mm x 0,5mm

Color: anaranjada

Fecha: 25/3/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,03743	0,00749	2,43	25,1
2	0,03645	0,00729	2,41	25,2
3	0,03725	0,00745	2,43	26,1
4	0,03545	0,00709	2,39	25,7
5	0,03444	0,00689	2,36	26,0
6	0,0362	0,00724	2,40	25,5
7	0,04055	0,00811	2,50	25,4
8	0,03639	0,00728	2,41	25,3
Promedio (g)	0,03677		2,41	25,5
Desviación (g)	0,00180		0,04	0,37

m por gota (kg)	7,35E-06
ρ (kg/m ³)	997
V (m ³)	7,38E-09
d (mm)	2,42

Aguja hipodérmica desechable

Marca: Nipro

Dimensiones: 25mm x 0,6mm

Color: celeste

Fecha: 25/3/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,04397	0,00879	2,56	25,6
2	0,04355	0,00871	2,56	25,9
3	0,04310	0,00862	2,55	26,3
4	0,04256	0,00851	2,54	26,3
5	0,04249	0,00850	2,54	26,7
6	0,04276	0,00855	2,54	28,1
7	0,04280	0,00856	2,54	27,4
8	0,04242	0,00848	2,53	27,0
Promedio (g)	0,04296		2,54	26,7
Desviación (g)	0,00055		0,01	0,82

m por gota (kg)	8,59E-06
-----------------	----------

ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	8,63E-09
d (mm)	2,54

Aguja hipodérmica desechable

Marca: Nipro

Dimensiones: 13mm x 0,3mm

Color: amarilla con jabón 100ml x 4 cucharadas de jabón (1 cucharada = 2,5ml)

Fecha: 28/5/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,01137	0,00227	1,63	28
2	0,01214	0,00243	1,67	
3	0,01092	0,00218	1,61	
4	0,01149	0,00230	1,64	
5	0,01178	0,00236	1,65	
6	0,01193	0,00239	1,66	
7	0,01187	0,00237	1,66	
8	0,01183	0,00237	1,65	
Promedio (g)	0,01167		1,64706	28,0
Desviación (g)	0,00039		0,01840	

m por gota (kg)	2,33E-06
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	2,34E-09
d (mm)	1,65

Micropipeta 0,1 μ l

Pegando gota con parte inferior del beaker

Fecha: 31/5/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,00560	0,00112	1,29	28
2	0,00406	0,00081	1,16	
3	0,00456	0,00091	1,20	
4	0,00631	0,00126	1,34	
5	0,0071	0,00142	1,40	
6	0,00396	0,00079	1,15	

7	0,00364	0,00073	1,12	
8	0,00562	0,00112	1,29	
Promedio (g)	0,00511		1,24	28
Desviación (g)	0,00124		0,10	

m por gota (kg)	1,02E-06
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	1,03E-09
d (mm)	1,25

Electrogoteo
Prueba de estabilidad
Fecha: 3/6/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,00913	0,00183	1,52	28
2	0,00906	0,00181	1,51	28
3	0,00997	0,00199	1,56	28
4	0,00773	0,00155	1,44	28
5	0,00803	0,00161	1,45	28
6	0,00886	0,00177	1,50	28
7	0,00846	0,00169	1,48	28
8	0,00928	0,00186	1,53	28
Promedio (g)	0,00882		1,50	28
Desviación (g)	0,00072		0,04	

m por gota (kg)	1,76E-06
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	1,77E-09
d (mm)	1,50

Electrogoteo

1

Fecha: 7/6/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,00247	0,00049	0,98	26
2	0,00354	0,00071	1,11	

Promedio (g)	0,00301	1,04	26
Desviación (g)	0,00076	0,09	

m por gota (kg)	6,01E-07
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	6,03E-10
d (mm)	1,05

Electrogoteo

2

Fecha: 7/6/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,00484	0,00097	1,23	26
2	0,00453	0,00091	1,20	
Promedio (g)	0,00469		1,22	26
Desviación (g)	0,00022		0,02	

m por gota (kg)	9,37E-07
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	9,41E-10
d (mm)	1,22

Electrogoteo

3

Fecha: 14/6/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,00192	0,00038	0,90	26
2	0,00216	0,00043	0,94	
Promedio (g)	0,00204		0,92	26
Desviación (g)	0,00017		0,03	

m por gota (kg)	4,08E-07
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	4,10E-10
d (mm)	0,92

Electrogoteo

Fecha: 14/6/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,00212	0,00042	0,93	26
2	0,00263	0,00053	1,00	
Promedio (g)	0,00238		0,97	26
Desviación (g)	0,00036		0,05	

m por gota (kg)	4,75E-07
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	4,77E-10
d (mm)	0,97

Aguja hipodérmica desechable

Marca: Nipro

Dimensiones:0,8mm

Color: verde

Fecha: 25/3/2010

Medición	masa (g)	masa por gota (g)	d (mm)	T (°C)
1	0,06448	0,01290	2,91	26
2	0,06474	0,01295	2,92	
3	0,06400	0,01280	2,91	
4	0,06348	0,01270	2,90	
5	0,06371	0,01274	2,90	
6	0,06278	0,01256	2,89	
7	0,06333	0,01267	2,89	
8	0,06269	0,01254	2,89	
Promedio (g)	0,06365		2,90	26
Desviación (g)	0,00074		0,011	

m por gota (kg)	1,27E-05
ρ (kg/m ³)	996
V (m ³)	1,28E-08
d (mm)	2,90

Tabla 6.2 Obtención de masa de glóbulo de harina (El Autor).

Aguja verde		
Medición	Masa 20 glóbulos (g)	Masa glóbulo (mg)
1	0,208	10,4
2	0,213	10,7
3	0,228	11,4
4	0,215	10,7
5	0,221	11,0
Promedio	0,217	10,8
Desviación estándar	0,008	0,4

Aguja celeste		
Medición	Masa 20 glóbulos (g)	Masa glóbulo (mg)
1	0,178	8,9
2	0,166	8,3
3	0,166	8,3
4	0,178	8,9
5	0,174	8,7
Promedio	0,172	8,6
Desviación estándar	0,006	0,3

Aguja café		
Medición	Masa 20 glóbulos (g)	Masa glóbulo (mg)
1	0,126	6,3
2	0,126	6,3
3	0,120	6,0
4	0,126	6,3
5	0,128	6,4
Promedio	0,125	6,3
Desviación estándar	0,003	0,2

Aguja amarilla		
Medición	Masa 20 glóbulos (g)	Masa glóbulo (mg)
1	0,090	4,5
2	0,080	4,0
3	0,078	3,9
4	0,082	4,1
5	0,080	4,0
Promedio	0,082	4,1
Desviación estándar	0,005	0,2

Electrogoteo1 Aguja amarilla		
Medición	Masa 20 glóbulos (g)	Masa glóbulo (mg)
1	0,023	1,2
2		
3		
4		

5

	Electrogoteo2 Aguja amarilla	
Medición	Masa 20 glóbulos (g)	Masa glóbulo (mg)
1	0,020	0,990
2		
3		
4		
5		

	Electrogoteo3 Aguja amarilla	
Medición	Masa 20 glóbulos (g)	Masa glóbulo (mg)
1	0,022	1,11
2		
3		
4		
5		

Tabla 6.3 Medición para obtener distribución de tamaños de gotas de lluvia a una presión de 14 kPa (El Autor).

Apertura tamiz (mm)	m total (g)	m glóbulo (mg)	Glóbulos recolectados	% m del total	d gota (mm)	V unitaria (m ³)	V total (m ³)	% V total	% V acumulado
0,841	0,304	0,51	592	5,4	<0,92	-	-	-	-
1,00	0,360	0,95	378	6,4	0,99	5,1E-10	1,9E-07	6,2	6,2
1,19	0,454	1,41	321	8,1	1,18	8,6E-10	2,8E-07	9,0	15,2
1,41	0,866	2,59	335	15,5	1,54	1,9E-09	6,4E-07	20,8	36,0
1,68	1,186	4,69	253	21,2	2,00	4,2E-09	1,1E-06	34,4	70,4
2,00	0,892	7,43	120	15,9	2,44	7,6E-09	9,1E-07	29,6	100,0
2,38	0,846	11,9	71	15,1	>2,90	-	-	-	-
2,83	0,686	21,4	32	12,3	>2,90	-	-	-	-

Tabla 6.4 Medición para obtener distribución de tamaños de gotas de lluvia a una presión de 17 kPa (El Autor).

Apertura tamiz (mm)	m total (g)	m glóbulo (mg)	Glóbulos recolectados	% m del total	d gota (mm)	V unitaria (m ³)	V total (m ³)	% V total	% V acumulado
0,841	0,494	0,459	1076	19,3	<0,92	-	-	-	-
1,00	0,488	0,871	560	19,1	0,96	4,6E-10	2,6E-07	18,0	18,0
1,19	0,482	1,31	367	18,9	1,14	7,8E-10	2,8E-07	19,7	37,7
1,41	0,414	2,29	181	16,2	1,46	1,6E-09	2,9E-07	20,4	58,1
1,68	0,460	3,77	122	18,0	1,81	3,1E-09	3,8E-07	26,2	84,3
2,00	0,216	8,00	27	8,46	2,52	8,4E-09	2,3E-07	15,7	100,0
2,38	0	0	0	0	-	-	-	-	-
2,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.5 Medición para obtener distribución de tamaños de gotas de lluvia a una presión de 21 kPa (El Autor).

Apertura tamiz (mm)	m total (g)	m glóbulo (mg)	Globulos recolectados	% m del total	d gota (mm)	V unitaria (m ³)	V total (m ³)	% V total	% V acumulado
0,841	0,448	0,498	900	26,8	<0,92				
1,00	0,458	0,806	568	27,4	0,92	4,1E-10	2,3E-07	30,9	30,9
1,19	0,342	1,31	262	20,5	1,14	7,8E-10	2,0E-07	27,2	58,1
1,41	0,264	2,00	132	15,8	1,38	1,4E-09	1,8E-07	24,3	82,4
1,68	0,134	3,35	40	8,0	1,72	2,7E-09	1,1E-07	14,2	96,6
2,00	0,026	6,50	4	1,6	2,3	6,4E-09	2,5E-08	3,4	100,0
2,38	0	0	0	0	-	-	-	-	-
2,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.6 Obtención de velocidades de caída para gotas del simulador (El Autor).

Medición	P (lb/pul ²)	Sector	Largo de línea (cm)	Obtulación (s)	F	V (m/s)
1	2	A	8,1	0,017	9	4,86
2	2	A	7,3	0,017	9	4,38
3	2	A	2,4	0,017	9	1,44
4	2	A	6,1	0,017	9	3,66
5	2	A	8	0,017	9	4,80
6	2	B	6,5	0,017	10	3,90
7	2	B	9	0,017	10	5,40
8	2	B	9,7	0,017	10	5,82
9	2	B	6,1	0,017	10	3,66
10	2	B	9	0,017	10	5,40
11	2	B	7,5	0,017	10	4,50
12	2	B	7,6	0,017	10	4,56
13	2	B	9	0,017	9	5,40
14	2	B	8,5	0,017	9	5,10
15	2	B	7,5	0,017	9	4,50
1	2,5	A	7	0,017	8	4,20
2	2,5	A	5,1	0,017	8	3,06
3	2,5	A	5,6	0,017	8	3,36
4	2,5	A	3,1	0,017	8	1,86
5	2,5	A	4,4	0,017	8	2,64
6	2,5	A	6,9	0,017	8	4,14
7	2,5	B	6,6	0,017	9	3,96
8	2,5	B	8,1	0,017	9	4,86
9	2,5	B	2,1	0,017	9	1,26
10	2,5	B	7	0,017	9	4,20
1	3	A	8	0,017	9	4,80
2	3	A	6,4	0,017	9	3,84
3	3	A	3,5	0,017	9	2,10
4	3	A	6,3	0,017	9	3,78
5	3	A	5,9	0,017	9	3,54
6	3	A	4,4	0,017	9	2,64
7	3	B	7,3	0,017	9	4,38
8	3	B	7,8	0,017	9	4,68
9	3	B	6,1	0,017	9	3,66
10	3	B	5,6	0,017	9	3,36
11	3	B	7	0,017	9	4,20



Figura 6.1 Obtención de línea generada por la caída de gota para el simulador de lluvia.
Fuente: El Autor



Figura 6.2 Balanza semi-analítica y analizadora de humedad.
Fuente: El Autor



Figura 6.3 Balanza analítica.
Fuente: El Autor



Figura 6.4 Medición de lámina de agua con pluviómetro.
Fuente: El Autor



Figura 6.5 Anemómetro digital.
Fuente: El Autor



Figura 6.6 Termómetro digital.
Fuente: El Autor

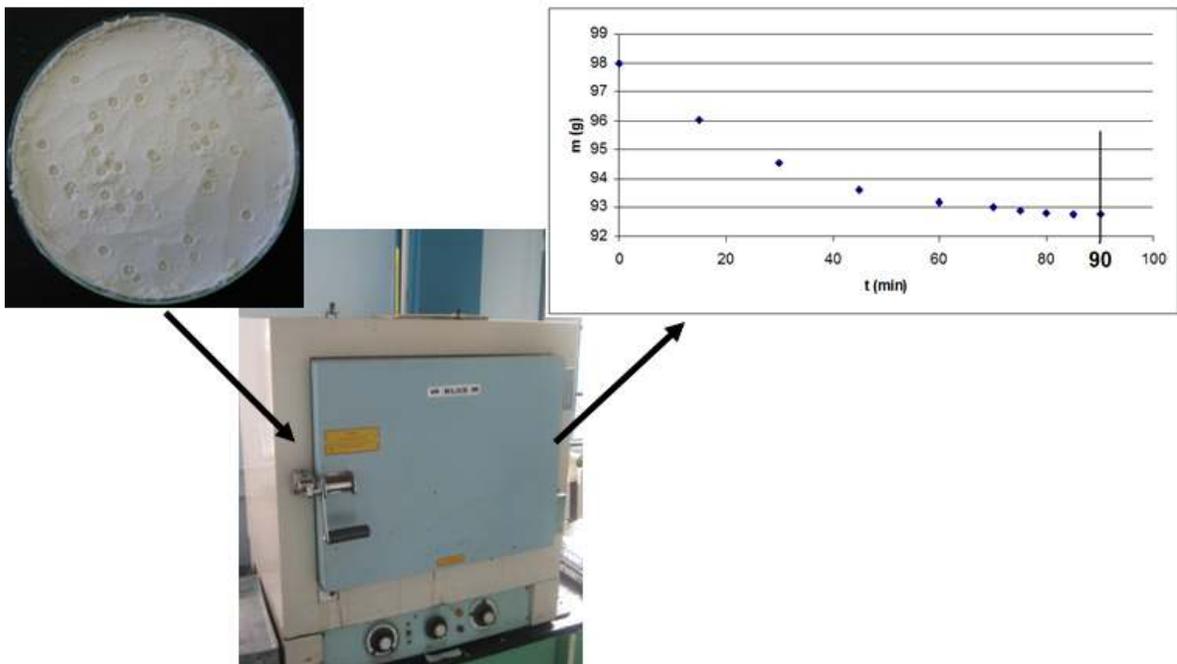


Figura 6.7 Obtención del tiempo de secado para muestras de harina en laboratorio.
Fuente: El Autor



FullJet Puntas de Pulverización Granangulares de Cono Lleno



Características:

- Gotas grandes para reducir la deriva.
- Excelente distribución con un rango de presiones de 1-3 bar (15-40 PSI).
- Ideales para uso en equipos con reguladores de pulverización.
- El ángulo amplio de la pulverización permite el uso de distancias de 100 cm (40 pulg.).
- Disponibles con sistema de codificación de colores VisiFlo® en acero inoxidable o Calcon® con palata de acero inoxidable.
- Se puede usar con tapa CP25607-*.NY para conexión Quick TeeJet®. Consulta la página 63 para más información.



Altura óptima de pulverización

50 cm	50 cm ²
75 cm	75 cm ²
100 cm	100 cm ²

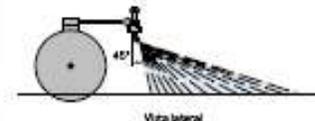
Las boquillas FullJet se deben orientar a unos 30°-45° respecto a la vertical para una distribución uniforme.

La altura de la boquilla de pulverización granangular es afectada por la orientación de la boquilla. El factor más importante es lograr un solape mínimo de 30%.

Consulte las páginas 173-187 para fórmulas útiles e información adicional.

Boquilla	Presión (bar)	Presión (PSI)	50cm						75cm					
			4	6	8	10	12	20	4	6	8	10	12	20
FL-6WS FL-6WC	1,0	1,19	357	238	179	143	95	71	179	119	89	71	48	35
	1,5	1,40	429	285	215	172	114	86	215	143	107	86	57	43
	2,0	1,69	507	338	254	203	135	101	254	169	127	101	68	51
	2,5	1,81	540	362	272	217	145	109	272	181	136	109	72	54
FL-4.5WS FL-4.5WC	1,0	1,26	460	312	234	187	125	94	234	156	117	94	62	47
	1,5	1,60	567	378	284	227	151	113	284	189	142	113	76	57
	2,0	2,14	642	428	321	257	171	130	321	214	161	128	85	64
	2,5	2,24	702	468	351	281	187	140	351	234	176	140	94	70
FL-6WS FL-6WC	1,0	2,56	768	512	384	307	205	154	384	256	192	154	102	77
	1,0	1,90	570	380	285	228	152	114	285	190	140	114	76	57
	1,5	2,29	687	458	344	275	180	137	344	229	172	137	90	69
	2,0	2,60	780	520	390	312	208	156	390	260	195	156	104	78
FL-10WS FL-10WC	1,0	2,89	967	578	434	347	231	172	434	289	217	172	116	87
	1,0	3,15	940	630	473	376	252	189	473	315	236	189	126	95
	1,0	3,27	711	474	356	284	190	142	356	237	178	142	95	71
	1,5	2,86	858	572	439	342	229	172	439	286	215	172	114	86
FL-19WS FL-19WC	1,0	3,29	1017	678	509	407	271	202	509	339	254	202	136	102
	1,5	3,62	1085	724	540	424	280	217	540	362	272	217	145	109
	2,0	3,92	1179	785	590	472	314	236	590	392	295	236	157	118
	1,0	3,56	1068	712	534	427	285	214	534	356	267	214	142	107
FL-19WS FL-19WC	1,5	4,29	1287	858	644	515	343	257	644	429	322	257	172	129
	2,0	4,84	1452	968	726	581	387	290	726	484	361	290	194	145
	2,5	5,40	1629	1086	815	652	434	326	815	540	407	326	217	162
	2,0	5,90	1770	1190	885	708	472	354	900	590	440	354	236	177

Nota: Siempre verifique dos veces los caudales de aplicación. Los valores indicados se basan en la pulverización de agua a 21°C (70°F).



Cómo hacer un pedido:

Especifique el número de punta.

Ejemplos:

FL-5WS - Acero inoxidable con codificación de colores VisiFlo

FL-5WC - Calcon con palata de acero inoxidable y codificación de colores VisiFlo

Figura 6.8 Boquilla pulverizadora de cono lleno modelo FullJet.

Fuente: Teejet, 2010



Figura 6.9 Boquilla pulverizadora de cono lleno modelo Fulljet FL-8VS.
Fuente: El Autor.