

# CARACTERIZACIÓN DE LAS GOTAS EMITIDAS POR UN ASPERSOR DE IMPACTO DE DOS BOQUILLAS, APLICANDO TÉCNICA FOTOGRÁFICA

• Carlos Bautista-Capetillo\* • Héctor Hugo Márquez-Villagrana •  
• Manuel Zavala-Trejo •

*Universidad Autónoma de Zacatecas, México*

\*Autor de correspondencia

• Enrique Playán-Jubillar •

*Estación Experimental de Aula Dei, España*

## Resumen

El presente trabajo ha permitido caracterizar un aspersor de impacto equipado con dos boquillas de aspersión (la principal de 3.97 mm y la secundaria de 3.18 mm) mediante técnicas fotográficas. El aspersor analizado presenta una curva radial con perfil triangular de aplicación de agua. Esto hace que sea muy adecuado para el riego agrícola y que la caracterización de las gotas emitidas sea más realista que las realizadas anteriormente con aspersores de una sola boquilla. Las presiones hidráulicas evaluadas fueron 150, 200, 250 y 300 kPa, y las características de las gotas se midieron en puntos de observación colocados a 3, 6, 9 y 12 m desde el aspersor. Para llevar a cabo los experimentos se eligieron alturas de 1.65 y 2.55 m, medidas entre la superficie del suelo y el centro del aspersor. Las gotas fueron evaluadas a una altura de 1.15 m sobre la superficie del suelo. Los resultados reportados derivan de 4 100 fotografías brutas, 1 450 fotografías con gotas válidas, y un total de 7 285 gotas analizadas, que han permitido caracterizar el aspersor con base en el diámetro de las gotas, su velocidad y el ángulo respecto de la vertical. Se han establecido curvas de frecuencia y volumen de gotas para las dos boquillas y alturas, así como relaciones diámetro-velocidad y ángulo-velocidad para cada combinación de boquilla, altura, distancia y presión. Por otro lado, se ha generado un completo conjunto de datos que permitirá realizar análisis orientados a la calibración de modelos balísticos y a la mejora de su capacidad predictiva.

**Palabras clave:** aspersión, gotas, fotografía, balística, impacto, diámetro, velocidad, ángulo.

## Introducción

El riego por aspersión distribuye agua sobre una superficie agrícola a través de gotas que viajan por el aire. El proceso presenta un punto crítico en la disgregación del chorro, a consecuencia de las altas velocidades requeridas para cubrir cierta superficie de terreno (Bautista *et al.*, 2009). Diversos factores influyen en el diámetro, la velocidad de movimiento y la distancia que recorren las gotas, entre ellos se incluyen el tipo de aspersor y boquilla utilizados, las condiciones hidráulicas de operación y los rasgos

medioambientales de la región. La combinación de tales factores complica la caracterización de las gotas, hecho que involucra una serie de aspectos a considerar en el diseño y las reglas de operación para cada caso (Playán *et al.*, 2006).

A partir de la evaluación geométrica y cinemática de las gotas se establecen aspectos fundamentales:

- a) Pérdidas por evaporación. Se correlacionan con la velocidad del viento (Edling, 1985; Trimer, 1987; Keller y Bliesner, 1990; Tarjuelo *et al.*, 2000; Playán *et al.*, 2005) y afectan más

- a las gotas de diámetro pequeño que a las de diámetro mayor (Fukui *et al.*, 1980; Thompson *et al.*, 1986, De Lima y Torfs, 1994; De Lima *et al.*, 2002).
- b) Conservación del suelo. Se vincula de modo directo con la cinética de las gotas, puesto que la energía de impacto sobre la superficie modifica los procesos de escurrimiento, erosión e infiltración (Kincaid *et al.*, 1996; Tarjuelo, 1995).
- c) Simulación del riego. Es una alternativa que permite definir distintas estrategias donde se combinen los factores antes mencionados; sin embargo, debe ser alimentada por información confiable, por lo general de tipo experimental, que posibilite identificar diferencias entre arreglos (Salvador *et al.*, 2009).

En las últimas décadas se han desarrollado modelos para simular el riego por aspersión, basados en el efecto del viento como el principal agente de distorsión y determinante en la uniformidad de distribución (Fukui *et al.*, 1980; Vories *et al.*, 1987; Carrión *et al.*, 2001). En estos esquemas, el aspersor emite gotas de diferentes diámetros, que viajan según un vector velocidad inicial dado por la inclinación del dispositivo y cuya trayectoria puede estimarse con base en el desarrollo de la teoría balística (Vories *et al.*, 1987; Dechmi, 2002). Debido a la complejidad en el análisis del fenómeno, los modelos balísticos consideran tres hipótesis: 1) el chorro se disgrega a la salida de la boquilla en gotas individuales, que tienen distintos diámetros y se mueven de forma independiente en el aire; 2) el coeficiente de resistencia aerodinámico no depende de la altura del aspersor, el ángulo de inclinación, la velocidad del viento y el diámetro de la boquilla; 3) el diámetro de la gota condiciona la distancia máxima que recorre (Dechmi, 2002).

Se han propuesto múltiples técnicas (papel sensible al agua, harina, inmersión en aceite, ópticas, fotografía de alta y baja velocidad, entre otras) con la finalidad de valorar a través de la experimentación la

tercera hipótesis (Jones, 1956; Magarvey, 1956; Eigel y Moore, 1983; Hauser *et al.*, 1984; Kohl y DeBoer, 1984; Kincaid *et al.*, 1996). En un inicio, algunas de ellas se emplearon para medir las gotas de lluvia, luego otras se implementaron ex profeso para la aspersión (Cruvinel *et al.*, 1996; Cruvinel *et al.*, 1999; Salles *et al.*, 1999; Sudheer y Panda, 2000; Montero *et al.*, 2003). De acuerdo con Cruvinel *et al.* (1996), desde 1895 se tienen las primeras evidencias documentadas acerca de metodologías en cuanto a la medición del tamaño y distribución de las gotas. De manera reciente, Salvador *et al.* (2009) propusieron una técnica sustentada en fotografías de baja velocidad, que muestra la trayectoria de las gotas y, a su vez, posibilita el cálculo de longitud, diámetro, ángulo y velocidad de caída.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo se centra en la caracterización geométrica y cinemática de las gotas emitidas por un aspersor de impacto en ausencia de viento, aplicando la metodología de Salvador *et al.* (2009), para producir un conjunto de datos con valores de diámetro, velocidad y ángulo de incidencia a diferentes combinaciones de presión hidráulica, altura del aspersor, diámetro de boquilla y distancia alcanzada por las gotas para su posterior aprovechamiento en mejoras al modelo balístico.

## Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron dentro de un campo experimental ubicado en la comunidad de Zoquite, Guadalupe, Zacatecas (México), a unos 15 km de la capital del estado. Localizado entre las coordenadas geográficas 22° 48' 34" de latitud norte, 102° 26' 57" de longitud oeste y a una altura media sobre el nivel del mar de 2 100 m (figura 1). El lugar cuenta con una estación climatológica *Vantage Pro2* de la casa comercial Davis Instruments; con ella se monitorea temperatura, radiación solar, humedad relativa y precipitación, así como dirección y velocidad del viento. La propiedad

cuenta con un sistema de riego por aspersión en cobertura total, equipado con una bomba centrífuga horizontal de tres pulgadas en succión y descarga con un motor Siemens de 10 HP. El tipo de aspersor utilizado es de la casa comercial Waderain, Estados Unidos, 2007, modelo WR-33, con inclinación de 27° respecto a la horizontal y con dos boquillas; la principal de 3.97 mm y la secundaria de 3.18 mm sin vaina prolongadora del chorro. Las presiones hidráulicas evaluadas fueron 150, 200, 250 y 300 kPa, y las características de las gotas se midieron en puntos de observación separados 3, 6, 9 y 12 m desde el aspersor. Se eligieron alturas de 1.65 y 2.55 m entre la superficie del suelo y el centro del aspersor para llevar a cabo los experimentos.

La caracterización del aspersor incluyó el cálculo del patrón radial de intensidad de precipitación, el cual se basó en la norma ISO

15886-3 (ISO, 2004). Se instalaron pluviómetros cilíndricos de 0.15 m de diámetro a una altura de 0.50 m respecto al suelo, espaciados 0.50 m hasta cubrir un radio de 15 m. El tiempo de exposición para cada combinación de presión hidráulica y altura del aspersor fue de 60 min, con temperatura media del aire de 20.2 °C y velocidad media del viento de 1.03 m s<sup>-1</sup>. Para construir las curvas radiales se emplearon ocho líneas de pluviómetros alrededor del aspersor y la intensidad se determinó como el valor medio de la altura de precipitación ocurrida a una misma distancia en las diversas líneas (ecuación (1)):

$$i_d = \frac{\sum_{k=1}^8 hp_k}{8} \quad (1)$$

Donde  $i_d$  es la intensidad media de precipitación (mm h<sup>-1</sup>) a distintas distancias desde

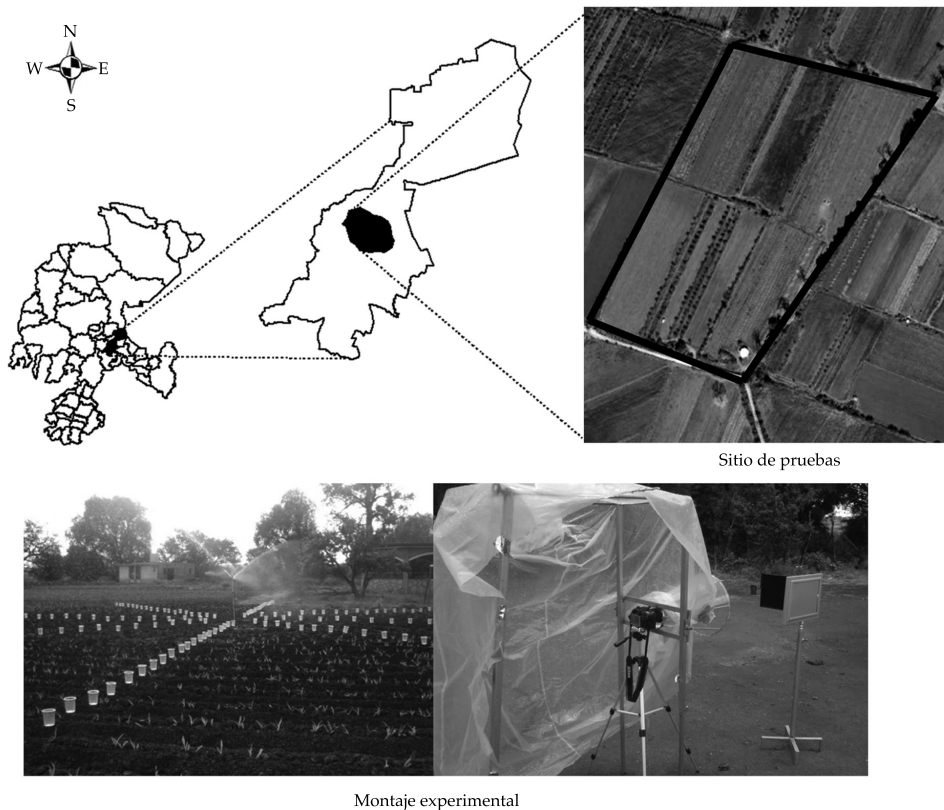


Figura 1. Ubicación geográfica del campo experimental Zoquite.

el aspersor y  $hp_k$  es la altura de precipitación (mm) captada por los pluviómetros que se encuentran a igual distancia desde el aspersor a lo largo de las ocho líneas instaladas.

#### *Diámetro, velocidad y ángulo de caída: procedimiento experimental*

Con la intención de caracterizar las gotas emitidas por el aspersor se utilizó el método fotográfico propuesto por Salvador *et al.* (2009). En cada punto de observación se instaló una cámara réflex fabricada por Nikon (modelo D90). Los valores de F11 para apertura de diafragma y 100 (0.01 s) en velocidad de obturación se mantuvieron constantes durante todo el experimento. Una pantalla metálica recubierta con tela negra se colocó de forma

perpendicular al objetivo de la cámara, con una separación de 0.80 m. La cámara se enfocó con una regla graduada localizada 0.10 m por delante de la pantalla (figura 2). Enfocar este elemento del dispositivo tiene como finalidad obtener una referencia interna que permita en cada fotografía validar cuántos píxeles equivalen a 1 mm, factor de conversión fundamental durante el tratamiento digital de la información. Así, de todas las gotas que pasan entre ambas, sólo las que ocurren en el mismo plano de la regla fueron incluidas en el análisis. Las gotas de cada una de las boquillas se capturaron de manera independiente, y de esa forma se pudo contar con información por separado de diámetro, velocidad y ángulo de caída. La toma de fotografías se realizó de modo continuo ( $2.9 \text{ fotos s}^{-1}$ ); en cada caso

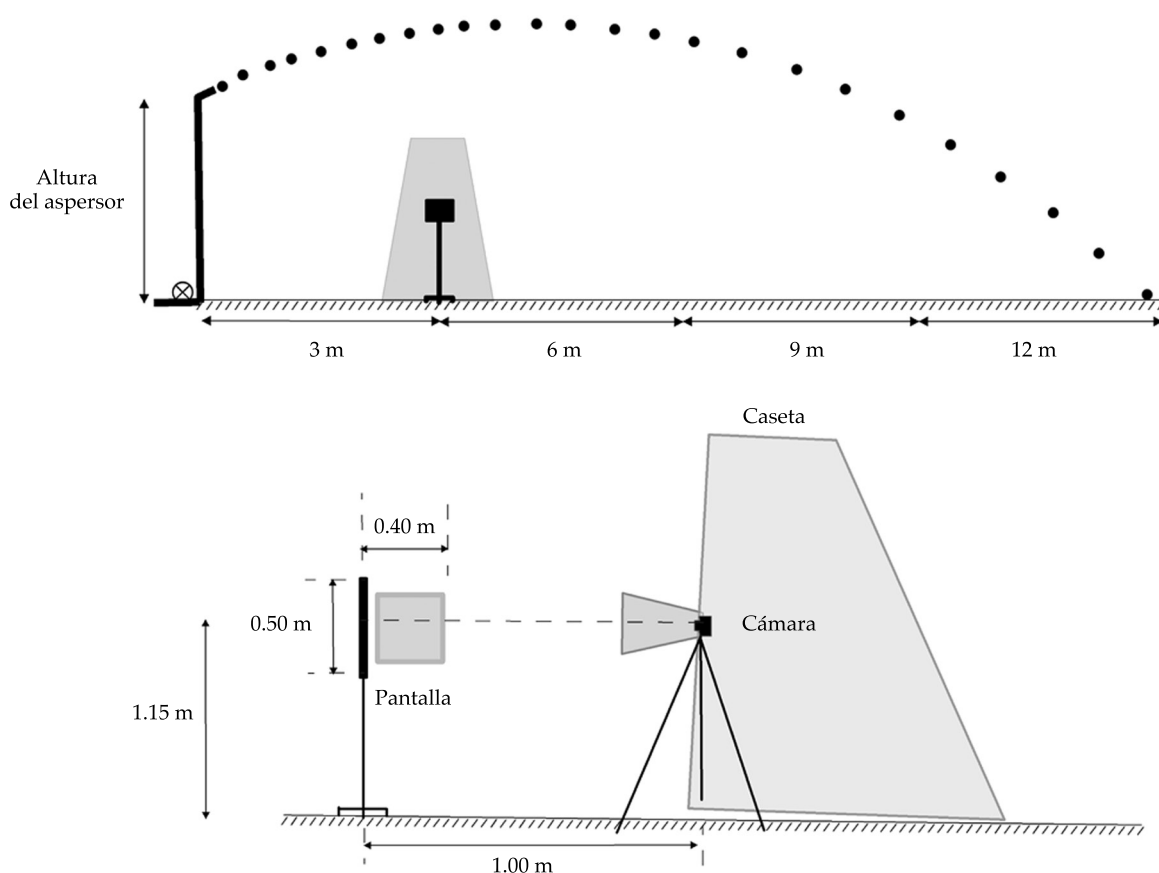


Figura 2. Panorámica del montaje experimental.

(boquilla-distancia-presión hidráulica-altura) se conjuntaron cinco series, cuyo promedio dio como resultado 60 imágenes por combinación.

La información fotográfica recabada en campo, con la que se caracteriza el aspersor, se somete a un procedimiento de gabinete para generar la información geométrica y cinemática. Las imágenes que corresponden a cada tamaño de la boquilla, altura del aspersor, punto de observación y presión hidráulica fueron analizadas y se seleccionaron aquellas gotas que por su enfoque se encontraban en el plano de observación. Cabe señalar que alrededor del 65% de las fotografías contenidas en cada conjunto no mostraban información confiable; sin embargo, también se hallaron otras donde se visualizaban hasta 12 gotas por fotografía. El *software* libre GIMP 2.6 (Universidad de Berkeley, California, Estados Unidos) se empleó con el objetivo de caracterizar las gotas de las imágenes seleccionadas. El tratamiento digital siguió cuatro pasos: 1) los niveles de brillo, contraste y saturación se ajustaron hasta alcanzar la mayor nitidez y lograr visualizar las gotas capturadas lo mejor posible; 2) las gotas seleccionadas se etiquetaron a través de la asignación de un código, que incluía el nombre de la fotografía, dado de manera automática por la cámara y un número secuencial; 3) se determinó el diámetro y ángulo que forma la gota con la superficie del suelo; el *software* evaluó dichas variables en píxeles; luego, apoyados con la regla graduada, se estimó la equivalencia entre éstos y milímetros; esa relación se empleó para convertir las unidades de origen a las requeridas; 4) la ecuación (2) se usó para estimar la velocidad de movimiento de la gota:

$$V = 100 Lg \quad (2)$$

Donde  $V$  es la velocidad de la gota ( $\text{m s}^{-1}$ ); 100, el inverso del tiempo de obturación del diafragma (0.01 s), y  $Lg$  es la longitud recorrida por la gota en el tiempo de obturación (m).

### Estadística básica: parámetros de centralidad y dispersión

Las gotas incluidas en la caracterización fueron tratadas estadísticamente. Los parámetros calculados para el diámetro, la velocidad y el ángulo de caída fueron diversos: media aritmética ( $\phi_{A'}$  mm;  $V_{A'}$   $\text{m s}^{-1}$ ;  $\theta_{A'}$  °); desviación estándar ( $SD_{\phi'}$  mm;  $SD_{V'}$   $\text{m s}^{-1}$ ;  $SD_{\theta'}$  °) y coeficiente de variación ( $CV_{\phi'}$  %;  $CV_{V'}$  %;  $CV_{\theta'}$  %). Además, en el caso específico del diámetro, también se determinaron la media al 50% del volumen acumulado ( $\phi_{50'}$  mm) y la media volumétrica ( $\phi_{V'}$  mm). El cálculo de la media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, media al 50% y media volumétrica, se realizó con las ecuaciones (3)-(6), respectivamente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \quad (5)$$

$\phi_{50}$  se calcula ordenando el diámetro en forma ascendente y seleccionando el diámetro de la gota que corresponde con el 50% del volumen total acumulado:

$$\phi_V = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^4}{\sum_{i=1}^n d_i^3} \quad (7)$$

Donde  $x$  representa diámetro, velocidad o ángulo de caída;  $d_i$  es el diámetro de cada gota en el conjunto;  $n$ , el número de gotas en el conjunto;  $i$ , un número ordinal desde 1 hasta  $n$ .

## Resultados y discusión

En la figura 3 se muestran las curvas radiales para 150, 200, 250 y 300 kPa de presión hidráulica, y a las alturas de 1.65 y 2.55 m. Describen un patrón triangular de mojado, tal como lo refieren Kincaid (1982), Tarjuelo (1995) y Montero (1999), lo anterior debido a que la pluviometría se determinó para las dos boquillas descargando al mismo tiempo. La distancia que moja el aspersor aumenta con el incremento de la presión a razón de  $0.01 \text{ m kPa}^{-1}$ , mismo valor encontrado por Bautista *et al.* (2009) para un aspersor modelo VYR35 fabricado por VYRSA. En todos los casos, la tasa de precipitación máxima se obtuvo a una distancia de 0.50 m. Las intensidades registradas por los pluviómetros fueron  $5.32 \text{ mm h}^{-1}$  y  $4.43 \text{ mm h}^{-1}$  para 150 kPa;  $4.56 \text{ mm h}^{-1}$  y  $4.87 \text{ mm h}^{-1}$  para 200 kPa;  $4.56 \text{ mm h}^{-1}$  y  $4.68 \text{ mm h}^{-1}$  para 250 kPa;  $5.20 \text{ mm h}^{-1}$  y  $5.06 \text{ mm h}^{-1}$  para 300 kPa, para el aspersor operando a las alturas de 1.65 m y 2.55 m, respectivamente. Kincaid (1982), Kincaid (1991) y Bautista *et al.* (2009), trabajando en condiciones de laboratorio y utilizando una sola boquilla, reportan valores muy similares a los indicados antes; las diferencias oscilan alrededor del 5.4%. Por otra parte, Salvador *et al.* (2009) obtuvieron

intensidades alrededor de  $2.35 \text{ mm h}^{-1}$  para 200 kPa, bajo condiciones experimentales de campo. Al comparar los resultados, se observan diferencias cercanas al 100%, que pueden atribuirse al hecho de que estos autores emplearon una sola boquilla.

### Caracterización experimental y estadística de las gotas

En campo se recolectaron 4 100 fotografías de las cuales se seleccionaron 1 450 que muestran gotas dentro del plano de análisis. Un total de 7 285 gotas se incluyen en la caracterización del aspersor. En el cuadro 1 se presenta su distribución de acuerdo con altura del aspersor, diámetro de boquilla y distancia desde el aspersor. La figura 4 ilustra fotografías con cuatro de las gotas que conforman el conjunto analizado; la información corresponde a distancia desde el aspersor donde se tomó la imagen ( $D$ ) así como diámetro ( $d$ ), longitud ( $Lg$ ), ángulo de caída ( $\theta$ ) y velocidad ( $V$ ) de la gota.

Las distintas combinaciones estudiadas (presión hidráulica, distancia de observación, altura del aspersor, diámetro de boquilla), al someterse al tratamiento estadístico con el apoyo de las ecuaciones (3)-(7) exhiben los

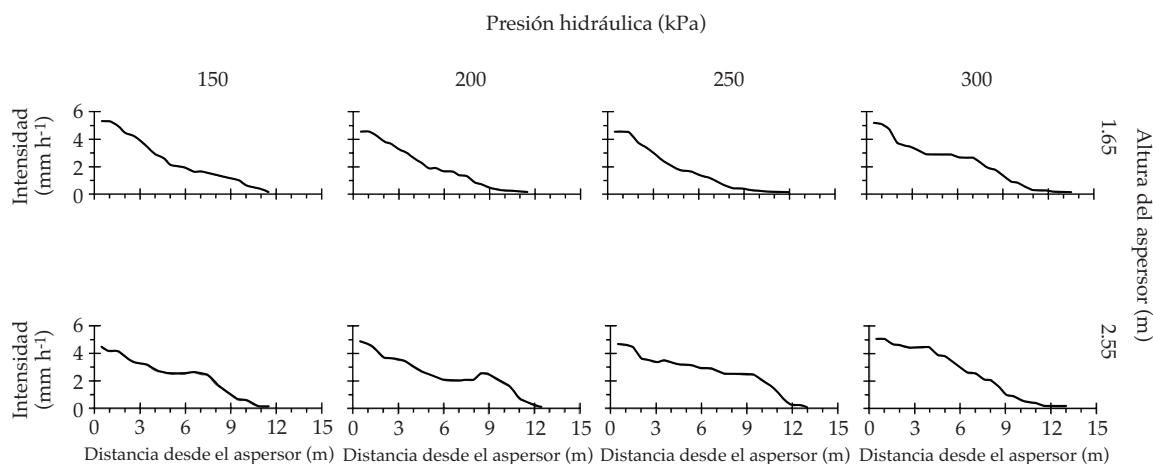


Figura 3. Curvas radiales para las diferentes combinaciones de presión hidráulica y altura del aspersor.

Cuadro 1. Distribución de gotas para las diferentes combinaciones analizadas.

Altura (m)	Distancia (m)/diámetro boquilla (mm)							
	3		6		9		12	
	3.18	3.97	3.18	3.97	3.18	3.97	3.18	3.97
1.65	787	725	853	647	313	365	30	116
2.55	683	691	564	515	390	401	86	119

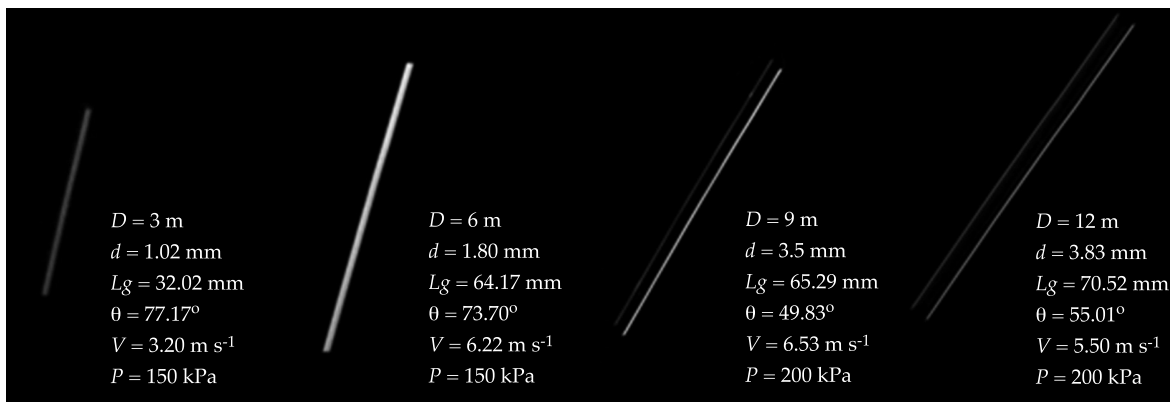


Figura 4. Muestra de gotas capturadas:  $D$  es la distancia de observación (m);  $d$ , el diámetro de la gota (mm);  $L_g$ , la longitud de la gota (mm);  $\theta$ , el ángulo de caída (°);  $V$ , la velocidad de caída (m s<sup>-1</sup>), y  $P$  es la presión hidráulica (kPa).

resultados que se incluyen en el cuadro 2. El análisis muestra discrepancias entre diámetros de gotas; la tendencia indica que los menores se obtienen al calcular la media aritmética, seguida del 50% del volumen acumulado, y el mayor le corresponde al diámetro volumétrico. La comparación arroja diferencias porcentuales de 17.9 y 18.3% cuando ésta se hace de  $\phi_{50}$  y  $\phi_V$  con respecto a  $\phi_A$ ; además, se observa que  $\phi_V$  es 0.6% más grande que  $\phi_{50}$ . En conjunto, los resultados muestran que para un mismo valor de presión hidráulica, el diámetro aumenta conforme las gotas caen a mayor distancia del aspersor; la tasa de incremento, considerando los valores medios de los diámetros volumétricos, es a razón de 0.19 (SD 0.02 mm m<sup>-1</sup>) y 0.15 mm m<sup>-1</sup> (SD 0.03 mm m<sup>-1</sup>) para la boquilla de 3.18 mm, operando a 1.65 y 2.55 m de altura, respectivamente; con la boquilla de 3.97 mm y para las mismas alturas, los valores fueron 0.13 (SD 0.01 mm m<sup>-1</sup>) y 0.18 mm m<sup>-1</sup> (SD 0.04 mm m<sup>-1</sup>). Por otro

lado, en la mayoría de los casos, el diámetro de las gotas disminuye con el incremento de la presión hidráulica para un mismo punto de observación. Este efecto resulta ser mucho más evidente cuando se analizan las gotas que caen a mayor distancia del aspersor. Sin embargo, resulta complicado establecer una tendencia clara en relación con la evolución del diámetro, puesto que se presentaron casos donde al pasar de una presión menor a una mayor, el diámetro medio se incrementó. Resultados similares han sido presentados por autores como Hills y Gu (1989), o Bautista *et al.* (2009). Al analizar los resultados alrededor de un mismo valor de la presión hidráulica, se establece que el diámetro de la gota se incrementa a medida que la distancia desde el aspersor aumenta. En los diámetros volumétricos, la conjunción de las cuatro presiones analizadas arroja los siguientes valores medios: a) para boquilla de 3.18 mm; diámetros de gota (mm) 1.46, 1.76, 2.39, 3.31 y 1.41, 1.50, 1.84, 2.82 a distancias desde el as-

Cuadro 2. Parámetros estadísticos para las diferentes combinaciones experimentales analizadas.

Presión hidráulica (kPa)	Variable	Boquilla 3.18 mm						Boquilla 3.97 mm											
		Altura 1.65 m			Altura 2.55 m			Altura 1.65 m			Altura 2.55 m								
		3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12						
150	Diámetro (mm)	$\Phi_A$	1.23	1.41	2.49	---	1.43	1.21	1.84	---	1.05	1.46	2.07	---	1.34	1.43	1.65	---	
		$\Phi_V$	1.71	1.87	2.71	---	1.66	1.37	2.11	---	1.55	1.87	2.47	---	1.55	1.89	2.15	---	
		$\Phi_{30}$	1.72	1.91	2.77	---	1.63	1.31	2.21	---	1.52	1.88	2.55	---	1.54	1.91	2.18	---	
	Velocidad (m s <sup>-1</sup> )	$SD_\phi$	0.46	0.49	0.46	---	0.35	0.24	0.43	---	0.42	0.47	0.57	---	0.32	0.46	0.53	---	
		$CV_\phi$	37.12	34.59	18.42	---	24.32	20.26	23.47	---	39.68	32.43	27.51	---	23.72	32.23	32.13	---	
		$V_A$	3.35	4.50	6.32	---	4.16	4.19	5.60	---	3.39	4.65	6.41	---	4.52	4.53	5.57	---	
	Ángulo (°)	$SD_V$	0.47	0.75	0.57	---	0.71	0.59	0.84	---	0.74	0.86	0.94	---	0.51	0.70	0.75	---	
		$CV_V$	14.15	16.63	9.04	---	17.07	13.98	14.98	---	21.69	18.59	14.65	---	11.18	17.70	13.55	---	
		$\theta_A$	66.55	68.43	48.1	---	96.74	63.89	51.03	---	84.27	76.18	60.76	---	86.9	53.7	56.1	---	
	200	Diámetro (mm)	$SD_\theta$	20.08	40.25	2.28	---	4.66	16.53	2.81	---	6.52	8.05	4.17	---	8.35	9.54	4.3	---
			$CV_\theta$	30.17	58.82	4.73	---	4.82	25.87	5.51	---	7.74	10.57	6.86	---	9.61	17.76	7.66	---
			$\Phi_A$	0.96	1.38	2.38	---	0.90	1.25	1.59	2.65	---	1.37	1.45	1.81	---	0.81	1.53	1.51
Velocidad (m s <sup>-1</sup> )		$\Phi_V$	1.31	1.82	2.64	---	1.25	1.53	1.88	3.12	---	1.79	1.79	2.18	---	1.12	1.80	1.93	3.33
		$\Phi_{30}$	1.24	1.92	2.68	---	1.23	1.49	1.88	3.24	---	1.83	1.82	2.18	---	1.13	1.84	1.82	3.44
		$SD_\phi$	0.31	0.48	0.49	---	0.33	0.32	0.41	0.68	---	0.46	0.43	0.49	---	0.29	0.39	0.44	0.58
Ángulo (°)		$CV_\phi$	31.68	34.79	20.68	---	36.9	25.99	25.77	25.59	---	33.72	29.72	27.3	---	35.89	25.33	28.8	18.85
		$V_A$	3.10	3.97	6.20	---	3.74	3.98	5.56	5.95	---	3.39	4.63	6.23	---	4.19	4.28	5.51	6.85
		$SD_V$	0.78	0.62	0.70	---	0.78	0.72	0.99	0.61	---	0.67	0.61	1.05	---	0.84	0.77	1.02	0.55
Ángulo (°)		$CV_V$	25.02	12.10	11.27	---	20.79	18.11	17.72	10.29	---	19.52	13.20	16.91	---	19.96	17.90	18.57	8.08
		$\theta_A$	68.01	60.09	52.41	---	91.82	61.21	54.35	42.49	---	81.81	71.84	64.23	---	73.87	58.63	56.48	48.1
		$SD_\theta$	17.51	7.29	3.48	---	3.81	8.01	4.24	2.75	---	10.31	9.69	5.81	---	9.78	12.65	5.21	2.92
$CV_\theta$	25.74	12.13	6.65	---	4.15	13.09	7.8	6.48	---	12.6	13.48	9.05	---	13.24	21.58	9.23	6.08		



Cuadro 2 (continuación). Parámetros estadísticos para las diferentes combinaciones experimentales analizadas.

Presión hidráulica (kPa)	Variable	Boquilla 3.18 mm						Boquilla 3.97 mm										
		Altura 1.65 m			Altura 2.55 m			Altura 1.65 m			Altura 2.55 m							
		3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12					
250	Diámetro (mm)	$\Phi_A$	1.01	1.16	2.09	---	0.98	1.28	1.49	2.34	1.11	1.30	1.84	2.72	0.81	1.55	1.45	2.32
		$\Phi_V$	1.24	1.62	2.34	---	1.46	1.45	1.68	2.75	1.57	1.63	2.11	2.9	1.06	1.71	1.74	2.79
		$\Phi_{50}$	1.26	1.65	2.43	---	1.39	1.39	1.74	2.75	1.58	1.65	2.12	2.92	1.05	1.72	1.67	2.74
		$SD_{\Phi}$	0.29	0.43	0.42	---	0.37	0.25	0.32	0.63	0.42	0.39	0.42	0.41	0.25	0.30	0.38	0.65
		$CV_{\Phi}$	28.36	36.87	20.22	---	38.02	19.75	21.41	26.99	37.7	30.14	22.81	15.11	31.28	19.53	25.99	27.83
		$V_A$	2.93	3.84	5.86	---	3.64	3.73	5.53	5.74	2.98	4.44	5.91	6.46	4.10	4.21	5.43	6.20
	Velocidad (m s <sup>-1</sup> )	$SD_V$	0.56	0.56	0.71	---	0.79	0.45	0.88	0.60	0.52	0.51	0.92	0.54	0.85	0.60	0.93	0.70
		$CV_V$	19.17	14.46	12.11	---	21.78	12.10	15.88	10.50	17.35	11.43	15.59	8.33	20.82	14.36	17.20	11.33
		$\theta_A$	68.7	75.02	56.71	---	94.97	69.17	52.51	49.16	96.68	75.4	68.18	67.26	64.51	60.48	53.16	55.19
		$SD_{\theta}$	13.9	8.27	6.91	---	18.45	9.61	5.77	2.30	11.83	8.71	6.06	2.53	5.90	9.54	12.27	4.11
		$CV_{\theta}$	20.24	11.02	12.19	---	19.43	13.9	10.99	4.68	12.24	11.55	8.88	3.76	9.14	15.77	23.08	7.45
		$\Phi_A$	1.19	1.28	1.57	3.12	0.93	1.43	1.48	2.35	1.23	1.35	1.59	2.69	1.00	1.44	1.45	2.38
300	Diámetro (mm)	$\Phi_V$	1.58	1.74	1.87	3.31	1.25	1.63	1.67	2.59	1.54	1.70	1.82	3.03	1.26	1.64	1.72	2.7
		$\Phi_{50}$	1.62	1.80	1.82	3.33	1.22	1.71	1.71	2.58	1.61	1.77	1.82	3.11	1.23	1.69	1.75	2.77
		$SD_{\Phi}$	0.38	0.45	0.37	0.48	0.31	0.34	0.32	0.47	0.38	0.43	0.35	0.55	0.30	0.32	0.38	0.58
		$CV_{\Phi}$	32.06	34.9	23.85	15.39	33.45	23.63	21.26	19.89	30.72	31.68	21.76	20.49	30.07	22.21	26.19	24.32
		$V_A$	3.24	3.82	5.31	6.36	3.57	3.64	5.13	5.55	3.86	4.07	5.81	6.42	4.05	4.72	5.30	6.15
		$SD_V$	0.49	0.67	0.90	0.83	1.00	0.64	0.78	0.92	0.58	0.32	0.94	0.53	0.67	0.52	0.77	0.77
	Velocidad (m s <sup>-1</sup> )	$CV_V$	15.11	17.59	17.02	12.97	28.10	17.57	15.21	16.50	15.00	15.18	16.12	8.30	16.61	11.06	14.56	12.52
		$\theta_A$	65.27	74.32	64.95	56.39	93.93	82.44	59.49	50.38	88.99	80.5	68.59	67.72	86.88	73.59	61.26	53.11
		$SD_{\theta}$	14.30	8.05	6.10	2.47	7.24	9.63	8.12	4.83	11.85	5.83	6.62	3.67	8.55	16.65	10.34	3.60
		$CV_{\theta}$	21.91	10.83	9.40	4.38	7.70	11.69	13.65	9.59	13.32	7.24	9.65	5.41	9.85	22.63	16.87	6.77

persor de 3, 6, 9, 12 m, y alturas de 1.65 y 2.55 m, respectivamente; b) para boquilla de 3.97 mm, diámetros de gota (mm) 1.61, 1.71, 2.07, 2.97 y 1.25, 1.76, 1.89, 2.94 a distancias desde el aspersor de 3, 6, 9, 12 m, y alturas de 1.65 y 2.55 m, respectivamente. La comparación de los resultados anteriores con los mostrados por otros autores bajo condiciones experimentales similares indica que, en general, los obtenidos en este trabajo son mayores. Esta circunstancia se atribuye al hecho de que en los casos aquí estudiados, el aspersor trabajaba con dos boquillas operando al mismo tiempo, mientras que trabajos como los de Salvador *et al.* (2009), Li y Kawuano (1998), y Kincaid *et al.* (1996), se realizaron para un aspersor con una sola boquilla. Esta diferencia se puede traducir en pérdidas de energía y por tanto en gotas más gruesas; sin embargo, corroborar esta hipótesis implica mayor trabajo experimental. Para el conjunto de gotas capturadas, se determinaron los valores de frecuencia acumulada (figuras 5 y 6) y volumen acumulado (figuras 7 y 8) para todas las combinaciones experimentales analizadas. El análisis muestra que a presiones bajas, las gotas viajan distancias más cortas; incluso para el caso particular de la 150 kPa, las gotas no alcanzan a caer a 12 m de distancia desde el aspersor. También existe un efecto de la altura del aspersor sobre la distancia alcanzada por las gotas, puesto que a menor altura de éste, la distancia alcanzada por las gotas también es más corta. Así, a 200 kPa de presión hidráulica se presentan gotas cuando la altura es de 2.55 m; sin embargo para la altura de 1.65 m a esa presión hay ausencia de gotas.

La figura 9 muestra la relación entre la velocidad alcanzada por las gotas y el diámetro de las mismas para las 64 combinaciones analizadas. En general se observa que la velocidad se incrementa conforme aumenta el diámetro de la gota; también sufre un incremento conforme aumenta la distancia alcanzada por las mismas. Lo anterior se refleja en los valores medios mostrados en el cuadro 2; en estos mismos valores se alcanza a ver que para una misma distancia se presenta una

ligera disminución en la velocidad conforme se incrementa la presión hidráulica. El aumento de la velocidad con respecto a la distancia desde el aspersor ocurre a una tasa media de  $0.34 \text{ m s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ; la disminución de la velocidad conforme se incrementa el valor de la presión hidráulica se refleja en una tasa media de  $0.0033 \text{ m s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ .

La figura 10 muestra el ángulo de caída para las distintas gotas analizadas en las 64 combinaciones. En general se observa que esta variable disminuye su valor a razón de  $0.07 \text{ grados m}^{-1}$  (respecto a la horizontal) conforme aumenta la distancia alcanzada por las gotas desde el aspersor. Esta circunstancia se atribuye al hecho de que a mayores distancias, las gotas son de mayor diámetro y viajan también a mayor velocidad. También disminuye el ángulo conforme aumenta la presión hidráulica, con una tasa de  $0.032 \text{ grados kPa}^{-1}$ . Hablar de una tendencia clara con la variación en la presión hidráulica resulta complicado. El rango de valores en el ángulo de caída resultó ser muy grande, sobre todo para las menores distancias de observación, lo anterior se refleja con claridad tanto en la desviación estándar como en el coeficiente de variación.

## Conclusiones

El aspersor de dos boquillas analizado en este trabajo presenta una curva radial con perfil triangular de aplicación de agua. Esto hace que sea muy adecuado para el riego agrícola y que la caracterización de las gotas emitidas sea más realista que las realizadas en trabajos anteriores con aspersores de una sola boquilla. Los resultados reportados en este documento derivan de 4 100 fotografías brutas, 1 450 fotografías con gotas válidas y un total de 7 285 gotas analizadas, que han permitido realizar la caracterización del aspersor con base en el diámetro de las gotas, su velocidad y el ángulo respecto de la vertical. Se han establecido curvas de frecuencia y volumen de gotas para las dos boquillas y alturas, así como relaciones diámetro-velocidad y ángulo-velocidad para cada combinación de boquilla,

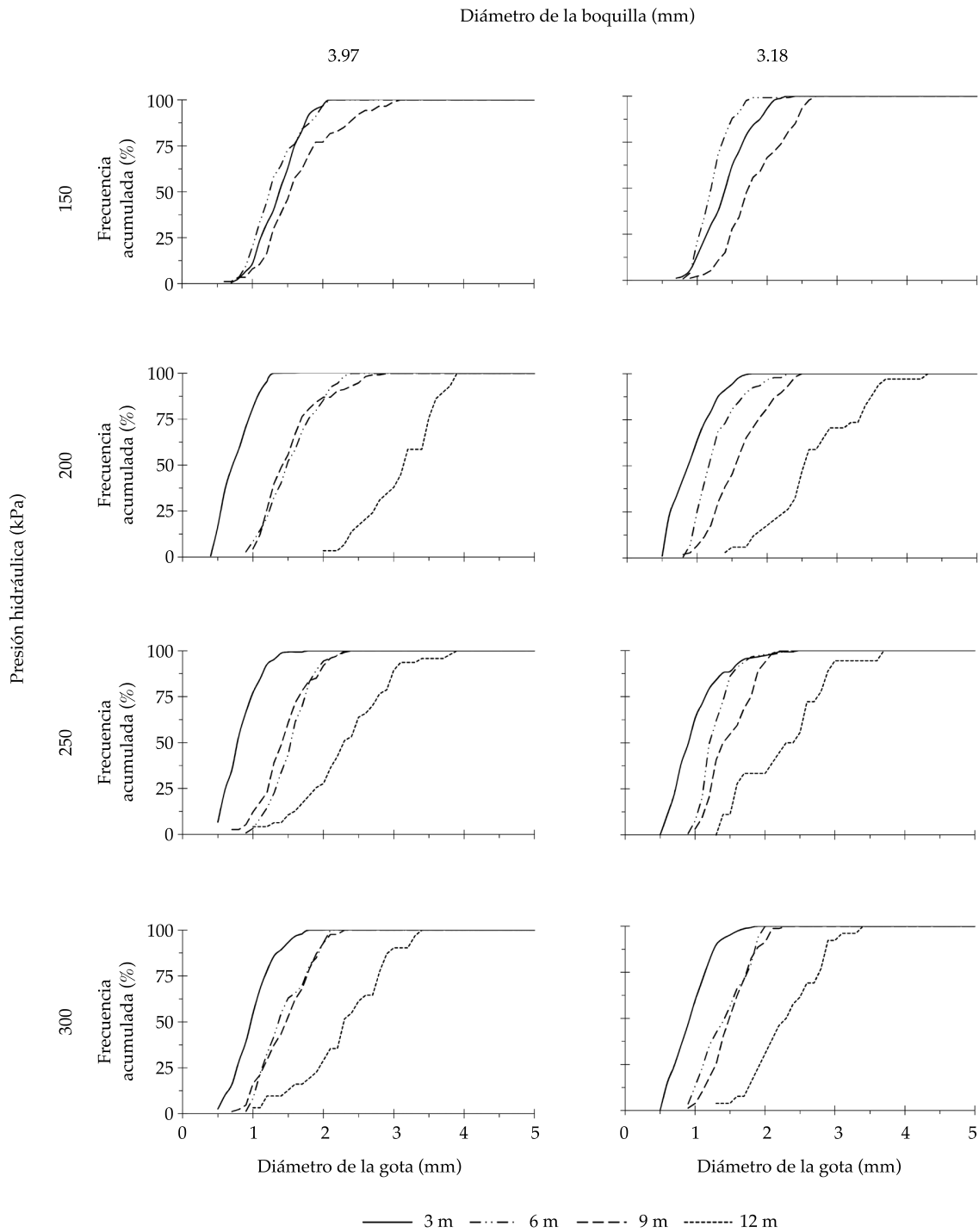


Figura 5. Curvas de frecuencia acumulada para altura del aspersor de 2.55 m.

altura, distancia y presión. Trabajos futuros permitirán desarrollar una herramienta de simulación específica para este aspersor en las condiciones locales, que permitirá optimizar el

uso del agua frente a condiciones ambientales o de diseño del equipo de riego. Por otro lado, los datos aquí presentados servirán para mejorar la capacidad predictiva de los modelos

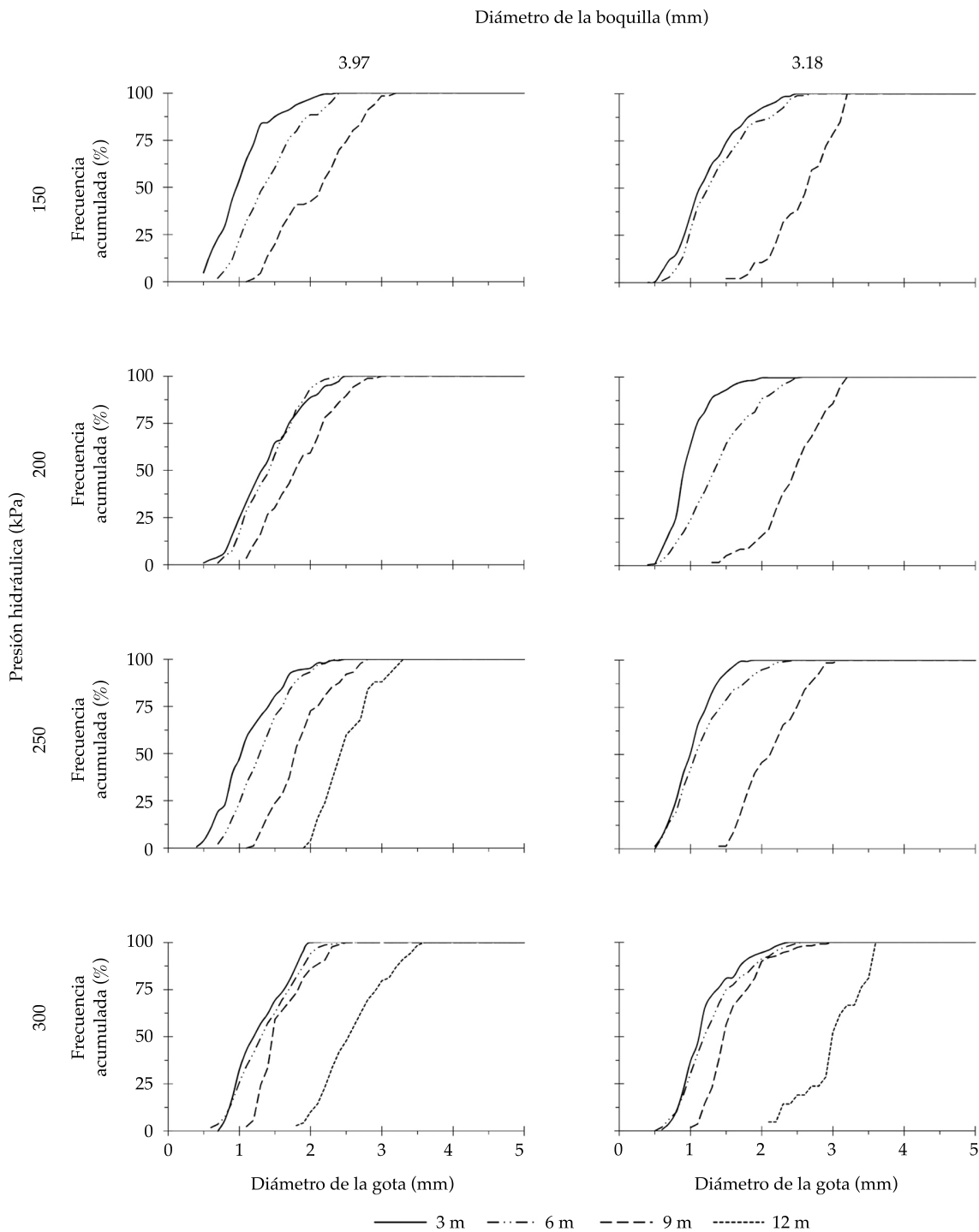


Figura 6. Curvas de frecuencia acumulada para altura del aspersor de 1.65 m.

de simulación, particularmente en lo que se refiere a la validez de las tres hipótesis que se mencionan en la introducción de este trabajo.

Recibido: 26/03/2012  
Aceptado: 23/01/2013

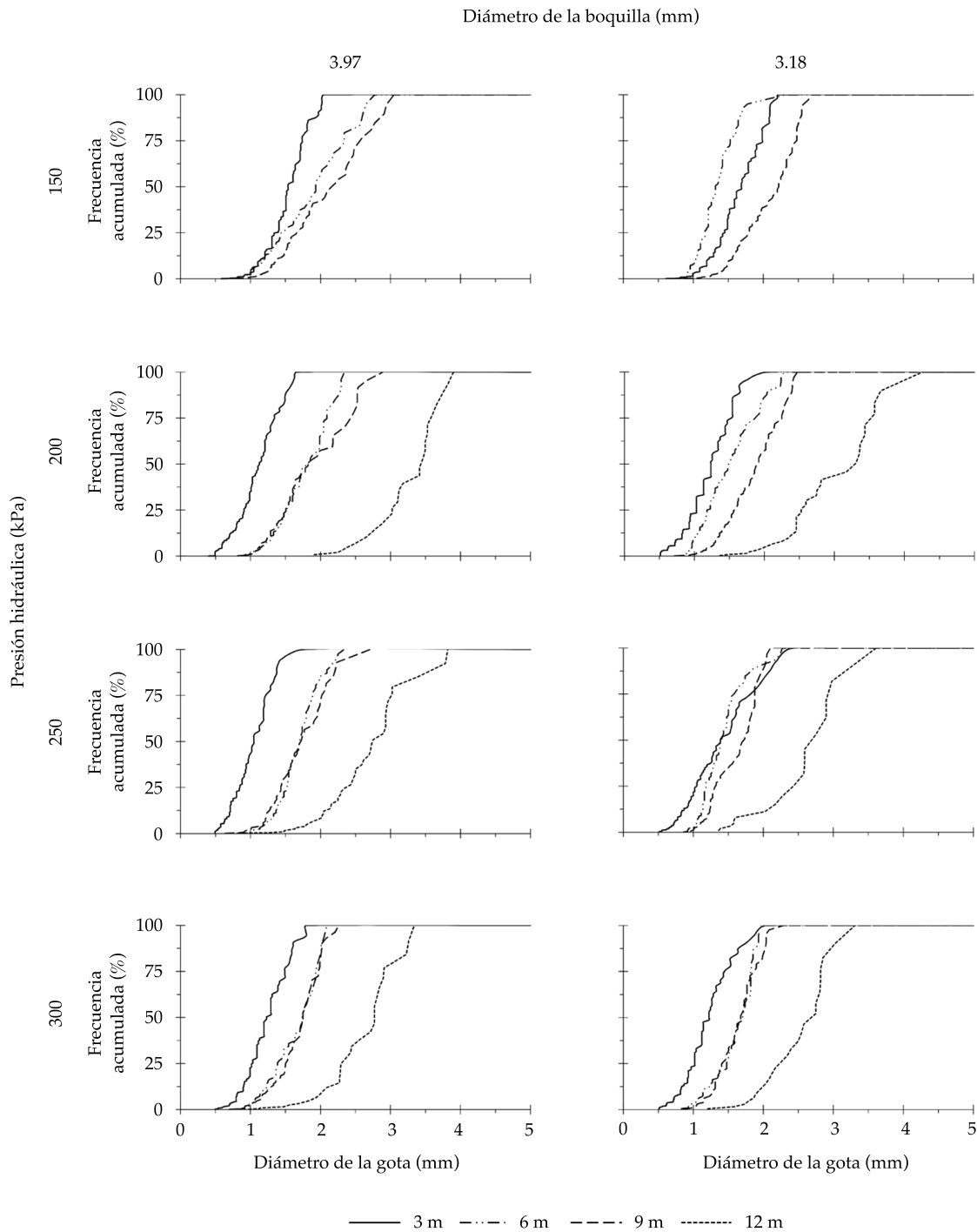


Figura 7. Curvas de volumen acumulado para altura del aspersor de 2.55 m.

## Referencias

BAUTISTA, C.F., SALVADOR, R., BURGUETE, J., MONTERO, J., TARJUELO, J.M., ZAPATA, N.,

GONZÁLEZ, J., and PLAYÁN, E. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler. *Transaction of the ASABE*. Vol. LII, No. 5, 2009, pp. 1493-1504.

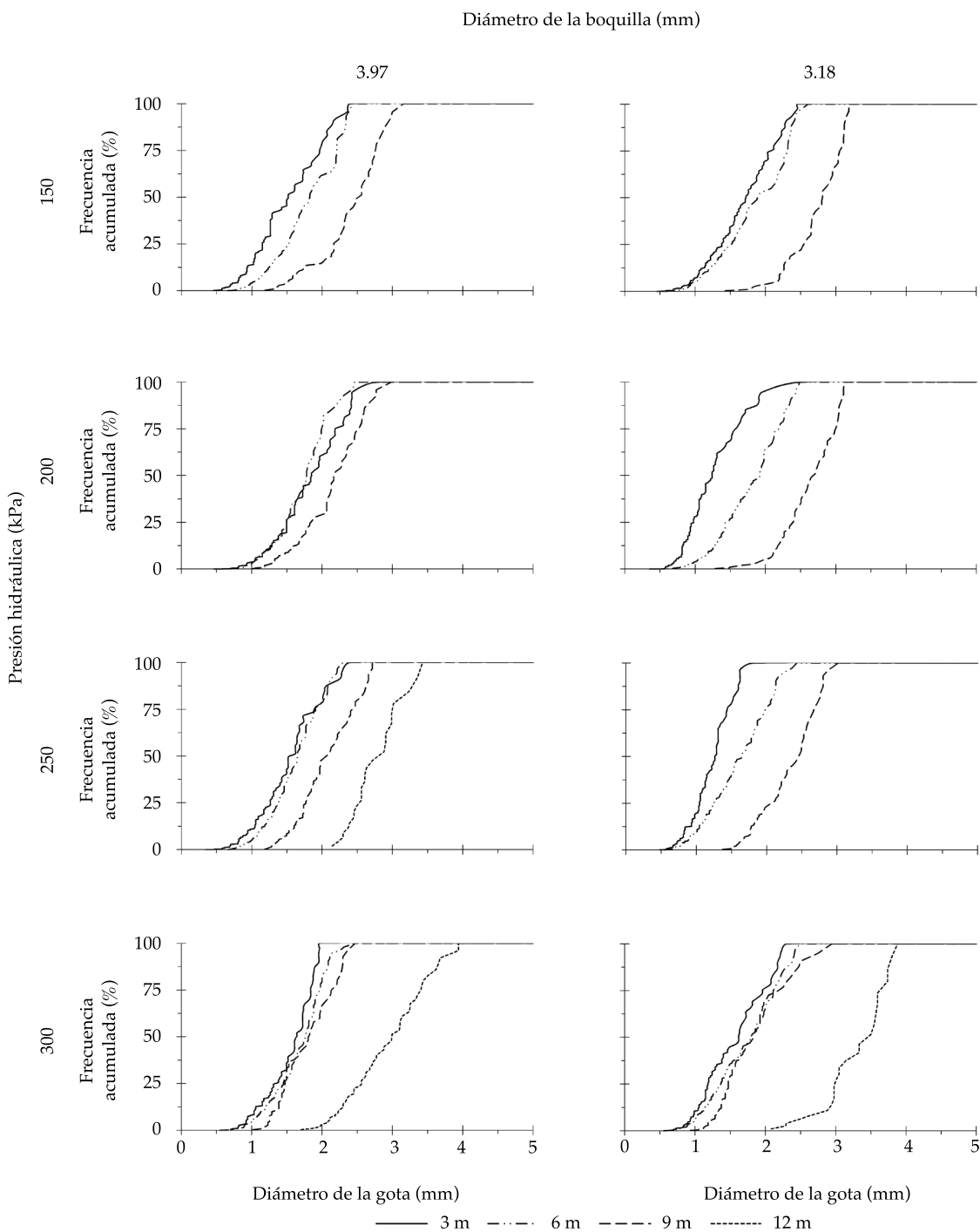


Figura 8. Curvas de volumen acumulado para altura del aspersor de 1.65 m.

CARRIÓN, P.E., TARJUELO, J.M., and MONTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: I Description of the model. *Irrigation Science*. Vol. I, No. 20, 2001, pp. 73-84.

CRUVINEL, P.E., MINATEL, E., MUCHERONI, M., VIEIRA, S., and CRESTANA, S. An automatic method based on image processing for measurements of drop size distribution from agricultural sprinklers. *Anais do IX SIBIGRAPI*. 1996, pp. 39-46.

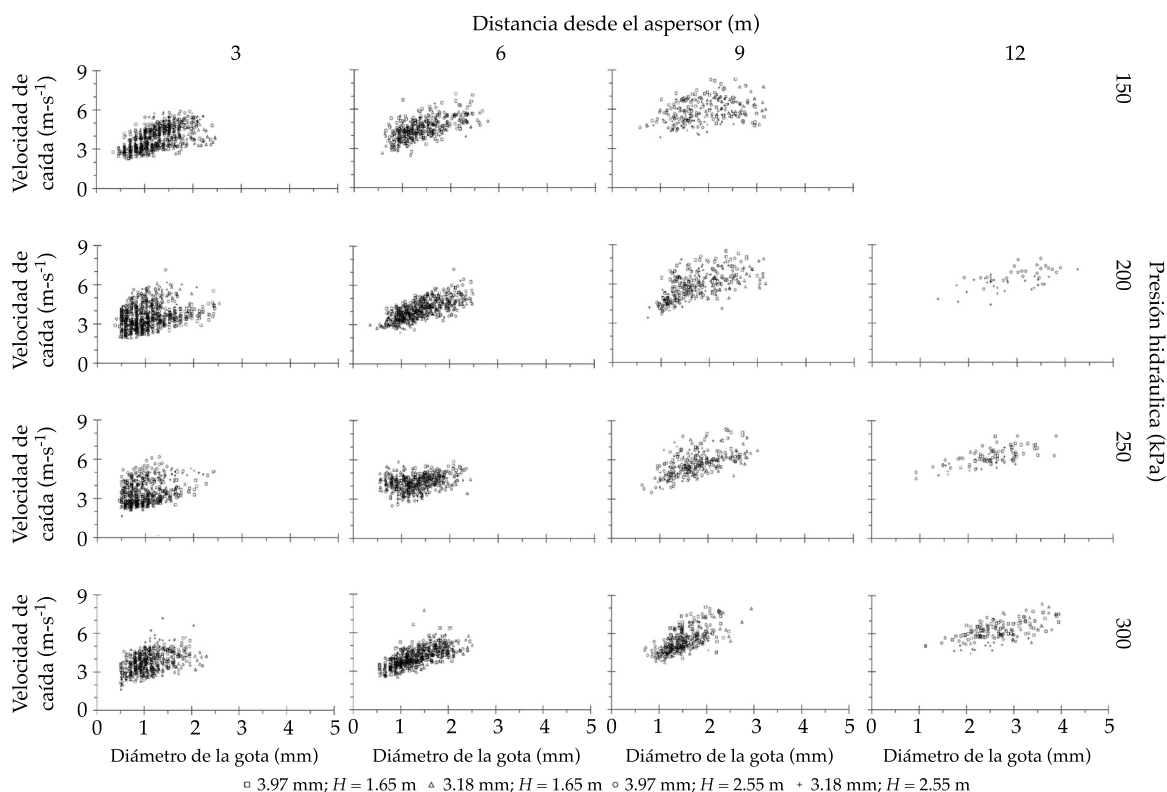


Figura 9. Relación entre diámetro y velocidad de la gota.

CRUVINEL, P.E., VIEIRA, S., CRESTANA, S., MINATEL, R., MUCHERONI, M., and NETO, A. Image processing in automated measurements of raindrop size and distribution. *Comput Electron Agric.* Vol. XXIII, No. 3, 1999, pp. 205-217.

DECHMI, F. *Gestión del agua en sistemas de riego por aspersión en el valle de Ebro: análisis de la situación actual y simulación de escenarios.* Tesis doctoral. Universitat de Lleida. Zaragoza, España, diciembre de 2002.

DE LIMA, J.L. and TORFS, P.J. Effects of wind on simulated rainfall and overland flow under single full-cone nozzle sprays. *Proceedings of the Second European Conference on Advances in Water Resources Technology and Management.* Trakiris, G., Santos, M.A. (editors). Lisbon: Balkema, 1994, pp. 443-450.

DE LIMA, J.L., TORFS, P.J., and SINGH, V. A mathematical model for evaluating the effect of wind on downward-spraying rainfall simulators. *Catena.* Vol. XLVI, No. 4, 2002, pp. 221-241.

EDLING, R.J. Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* Vol. XXVIII, No. 5, 1985, pp. 1543-1550.

EIGEL, J.D. and MOORE, I.D. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* Vol. XXVI, No. 4, 1983, pp. 1079-1084.

FUKUI, Y., NAKANISHI, K., and OKAMURA, S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrigation Sci.* Vol. II, 1980, pp. 23-32.

HAUSER, D., AMAYENC, P., NUTTEN, B., and WALDTEUFEL, P. A new optical instrument for simultaneous measurement of raindrop diameter and fall speed distributions. *J. at Ocean Technol.* Vol. I, No. 3, 1984, pp. 256-269.

HILLS, D.J. and GU, Y. Sprinkler volume mean droplet diameter as a function of pressure. *Trans. ASAE.* Vol. XXXII, No. 2, 1989 pp. 471-476.

JONES, D.M. *Rainfall drop-size distribution and radar reflectivity.* Urbana, USA: Illinois State Water Survey, Meteorology Laboratory, research report No. 6, 1956, pp. 20.

KELLER, J. and BLIESNER, R.D. *Sprinkle and trickle irrigation.* New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

KINCAID, D.C. Sprinkler pattern radius. *Trans. of ASAE.* Vol. XXV, No. 6, June, 1982, pp. 1668-1672.

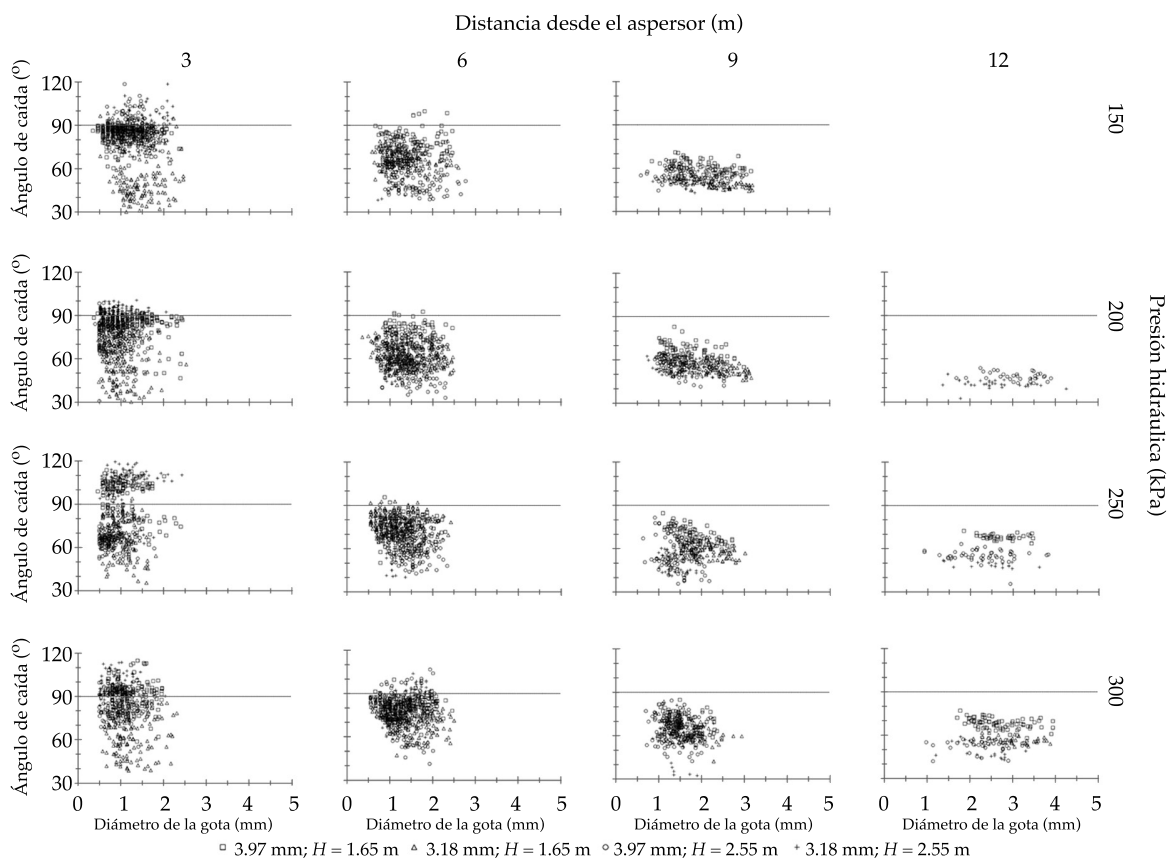


Figura 10. Relación entre diámetro y ángulo de caída de la gota.

KINCAID, D.C. Impact sprinkler pattern modification. *Trans. of ASAE*. Vol. XXXIV, No. 6, November-December, 1991, pp. 2397-2403.

KINCAID, D.C., SOLOMON, K.H., and OLIPHANT, J.C. Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Trans. of ASAE*. Vol. XXXIX, No. 3, 1996, pp. 839-845.

KOHL, R.A. and DEBOER, D.W. Drop size distributions for a low pressure spray type agricultural sprinkler. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* Vol XXVII, No. 6, 1984, pp. 1836-1840.

LI, J. and KAWUANO, H. Sprinkler performance as affected by nozzle inner contraction angle. *Irrigation Science*. Vol. XVIII, 1998, pp. 63-66.

MAGARVEY, R.H. Stain method of drop size determination. *J. Meteorol.* Vol. XIV, 1956, pp. 182-184.

MONTERO, J. *Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de riego por aspersión SIRIAS*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad de Castilla La Mancha, junio de 1999.

MONTERO, J., TARJUELO, J.M., and CARRIÓN, P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. *Irrigation Sci.* Vol. I, No. 22, 2003, pp. 47-56.

PLAYÁN, E., SALVADOR, R., FACI, J.M., ZAPATA, N., MARTÍNEZ-COB, A., and SÁNCHEZ, I. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agric. Water Manag.* Vol. LXXVI, No. 3, 2005, pp. 139-159.

PLAYÁN, E., ZAPATA, N., FACI, J.M., TOLOSA, D., LACUEVA, J.L., PELEGRÍN, J., SALVADOR, R., SÁNCHEZ, I., and LAFITA, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agric. Water Manag.* Vol. LXXXIV, No. 1-2, 2006, pp. 89-100.

SALLES, C., POESEN, J., and BORSELLI, L. Measurement of simulated drop size distribution with an optical spectropuviometer: sample size considerations. *Earth Surface Processes Landforms*. Vol. XXIV, No. 6, 1999, pp. 545-556.

SALVADOR, R., BAUTISTA, C., BURGUETE, J., ZAPATA, N., SERRETA, A., and PLAYÁN, E. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers. *Irrigation science*. Vol. XXVII, February, 2009, pp. 307-317.



- SUDHEER, K.P. and PANDA, R.K. Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles. *Agric. Water Manag.* Vol. XLV, 2000, pp. 159-167.
- TARJUELO, J.M. *El riego por aspersión y su tecnología*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1995, 864 pp.
- TARJUELO, J.M., ORTEGA, J.F., MONTERO, J., and DE JUAN, J.A. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. *Agric. Water Manag.* Vol. XLIII, 2000, pp. 263-284.
- THOMPSON, A.L., GILLEY, J.R., and NORMAN, J.M. *Simulation of sprinkler water droplet evaporation above a plant canopy*. Michigan, USA: Paper-American Society of Agricultural Engineers, 1986.
- TRIMER, W.L. Sprinkler evaporation loss equation. *J. Irrigation Drainage Eng., ASCE*. Vol. CXIII, No. 4, 1987, pp. 616-620.
- VORIES, E.D., VON BERNUTH, R.D., and MICKELSON, R.H. Simulating sprinkler performance in wind. *J. Irrig. and Drainage Div. ASCE*. Vol CXIII, núm. 1, 1987, pp. 119-130.
- WALPOLE, R., MEYERS, R., and MEYERS, S. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Sexta edición. México, D.F.: Prentice Hall, 1999, 752 pp.

## Abstract

BAUTISTA-CAPETILLO, C., MÁRQUEZ-VILLAGRANA, H.H., ZAVALA-TREJO, M. & PLAYÁN-JUBILLAR, E. Characterization of drops emitted by a two-nozzle impact sprinkler using a photographic technique. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 5, November-December, 2013, pp. 147-164.

This research made it possible to characterize an impact sprinkler equipped with two nozzles (3.97 mm primary nozzle and 3.18 mm auxiliary nozzle) using a photographic technique. The sprinkler had a triangular water application pattern that is very suitable for agricultural irrigation purposes. The characterization of the drops emitted was more realistic than for single-nozzle sprinklers. The hydraulic pressures evaluated were 150, 200, 250 and 300 kPa and the drops were characterized by measurements at distances of 3, 6, 9 and 12 m from the sprinkler. The heights chosen between the soil surface and the sprinkler head were 1.65 and 2.55 m. The drops were evaluated at a height of 1.15 m above the soil surface. The results reported are based on a set of 4 100 photographs, of which 1 450 contained valid drop images. A total of 7 285 drops were analyzed to describe drop diameter, velocity and angle with respect to the vertical. Cumulative drop frequency and volume curves were generated for both nozzles and nozzle heights. Diameter-velocity and angle-velocity relationships were determined for each combination of factors—nozzle, height, distance and pressure. Furthermore, a complete data set was produced, which contributes to conducting analyses to calibrate ballistic models and improve their predictive capacity.

**Keywords:** ballistics, diameter, drop, impact, photography, sprinkler, velocity, angle.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Carlos Bautista Capetillo  
M.I. Héctor Hugo Márquez Villagrana  
Dr. Manuel Zavala Trejo

Universidad Autónoma de Zacatecas  
Av. Ramón López Velarde 801  
98000 Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO  
Teléfono: +52 (492) 9256 690, extensión 4151  
baucap@uaz.edu.mx  
hugomarquezv@hotmail.com  
mzavala73@yahoo.com.mx

Dr. Enrique Playán Jubillar

Departamento de Suelo y Agua  
Estación Experimental de Aula Dei, CSIC  
Apdo. 13034  
50080 Zaragoza, ESPAÑA  
playan@eead.csci.es