

Para la biblioteca de Aula Dei
con curso TD-2016

Pilar Paniagua



Universidad Zaragoza

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



Departamento de Ciencias Agrarias
y del Medio Natural

Tesis Doctoral

Mejora del riego por aspersión en parcela
Caracterización de aspersores a baja presión, estudio de
diferentes sistemas de medición de gotas y análisis del
modelo balístico

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR.

PRESENTADA POR: **M^a Pilar Paniagua Antón**

DIRECTORES: **Dra. Raquel Salvador Esteban. CITA-DGA**
Dr. Javier Burguete Tolosa. EEAD-CSIC

Zaragoza, Noviembre 2015

R-15.059

Dedicada a Julio, Victoria y Guillermo

*Aunque tratemos de enseñar a nuestros hijos todo sobre la vida,
son nuestros hijos los que nos enseñan qué es la vida.*

Agradecimientos

Quisiera agradeceros, Raquel S. y Javier B., la labor que habéis hecho como directores de esta tesis. Me ha gustado aprender de vosotros. Por la confianza, la paciencia, el apoyo y el esfuerzo, gracias.

A Enrique P., porque gracias a ti se inició esta tesis. Siempre recuerdo que me comentaste que el principal obstáculo a superar en una tesis es uno mismo, y tenías razón. Al final lo he conseguido y he aprendido mucho, hacer una tesis ayuda a conocerse una misma y superarse día a día.

A Antonio M.C.⁺, te echamos de menos. He querido tenerte presente en mi tesis y hay una trocito de ella que está hecha pensando en ti. Gracias por los buenos ratos de estos años pasados.

A Nery Z., José C., Carmen C. y Juan H., gracias por vuestra cercanía y apoyo. Y gracias también porque, especialmente en estos últimos meses, me habéis dado un espacio que necesitaba para poder terminar la tesis.

A Miguel I., Jesús G. y los que han estado con vosotros durante estos años, por la disponibilidad y ayuda de campo que me habéis prestado.

Al grupo de mantenimiento, David, Quique, Juanma, Valero, porque habéis hecho realidad las ideas un poco raras que llevábamos para hacer algunos ensayos.

A Borja y Guillermo, porque siempre habéis estado dispuestos para echarme una mano con los temas técnicos de la tesis cuando más lo he necesitado.

A Begoña y Eva, mis compis de despacho. Begoña, gracias por tu amistad y los ánimos en los momentos más delicadillos. Te echo de menos, aquí, al lado. Eva, gracias por tu buen humor y disponibilidad. Espero que sigamos juntas mucho tiempo.

A los estudiantes y contratados que han pasado por la sala de becarios (Cristina, Sofiane, Octavio, Estela, Samuel, Yenny, Kosana, Elena, Julia, César, Reza, Tay, Azucena y muchos más). Porque los ratos de café no serían lo mismo sin vosotros. Por las risas, el buen rollito de todos, ... A Enrico, compañero de fatigas del último mes, ya queda menos.

A Elena G., Mari Carmen J., Pili A. y Tere G., gracias por vuestra amistad y vuestra sonrisa, da gusto estar a vuestro lado. Elena, amiga mía, a por la próxima oposición, que ya llevamos aprobadas dos y aún nos queda una tercera. Funciona lo de presentarnos juntas.

A Ana Carmen y Sonia, porque siempre estáis ahí.

A Alberto P., al final mirar el punto en el techo dio sus frutos y me ayudaste a creer más en mí y mis posibilidades. ¡Tiembra mundo! Me has dado muchas cosas buenas, entre ellas a mi Akelarre. Vaya por delante este pequeño agradecimiento a ti y a ellas.

A mis padres, Pilar e Ignacio, si alguien se alegra más que yo del final de esta tesis sois vosotros. Gracias, porque me habéis ayudado con los peques durante estos años. Sin vosotros hoy esto no habría sido posible. Sois los primeros que siempre me dijisteis que podía hacer lo que me propusiera.

A mis suegros, Pilar y Jesús, por haber cuidado de los peques también, permitiéndome dedicar tiempo a esta tesis.

A Nacho, mi hermano, me gusta cuando nos reímos de las cosas. Prometo no leerte la tesis.

A Julio, esto por fin se acaba. A ti tampoco te leeré la tesis. Igual ahora tengo más tiempo para las cosas de casa y cocinar... o no. Bueno cielico, gracias por estar ahí.

A mis niños, Vicky y Guille, que piensan que como me dedico a temas de riego soy jardinera. Cada día me enseñáis nuevas cosas. Sois los primeros y los últimos.

A Aula Dei, mi ilusión y sustento, y al CITA, por los medios y la posibilidad de hacer la tesis.

ABSTRACT

The objective of this PhD dissertation is the improvement of on-farm sprinkler irrigation by analyzing three different subjects:

In Chapter I an agricultural impact sprinkler, NDJ5036, working at low pressures (170-210 kPa) has been experimentally analyzed. Energy cost in Spain involves a challenge for farmers, making necessary to upgrade existing systems to reduce energy costs. The reduction in pressure requirements at the sprinkler nozzle that results in lower requirements at the hydrant valve is a way to reduce energy costs. The effect on irrigation uniformity of an impact sprinkler equipped with a deflector plate installed at the splasharm operating at 200 kPa has been evaluated. The experiments have been performed under two on-farm sprinkler arrangements commonly used in solid set irrigation systems for field crops (18x18C and 18x15T). The sprinkler performance has been tested under different technical (nozzle sizes and pressures) and meteorological (wind speeds) conditions. The results indicate that the sprinkler equipped with the deflecting plate at the splasharm working at 200 kPa performs as well as traditional impact sprinklers working at 300 kPa.

In Chapter II a Parsivel disdrometer has been studied to address their viability and calibration requirements to be used for sprinkler irrigation research. Disdrometer measures of drop sizes and velocities could facilitate the calibration and validations processes of the ballistic models. The disdrometer measurement data indicate that drop sizes and speeds should be corrected before used. The obliquous trajectories of the drops were not accounted by the disdrometers and in those conditions the measurements should be corrected. Correction parameters for drops sizes and velocities have been established for different obliquous trajectories. The correction parameters have been obtained comparing disdrometer measurements with low speed photography methodology. A scale model of a drop of water of a certain diameter has been constructed and tested by both methodologies. It has been observed that the disdrometer performs measurements that are not completely in line with those provided by the photographic method, especially as far as speed is concerned. As a conclusion the disdrometer is useful for measuring droplet size distribution but is not accurate enough to provide data for ballistic model validation. For this purpose the low speed photographic technique is better.

In Chapter III drop trajectory from the jet to the measurement point has been reconstructed. The process of droplet formation in spray sprinkles was determined. The ballistic model attempts to replicate the flight of the droplets from the nozzle and it makes a number of simplifications. By using the ballistic model inversely was possible to estimate the trajectory of the droplets, however this path has not been adequate in all cases due to

the simplification of the ballistic model. It has been found that for a given drop size, small variations on the coefficient of air resistance largely change the drop trajectory. It has been concluded that it is necessary to change the current model by adjusting the drag coefficient for individual drops. With drop trajectories it is possible to estimate the amount of water diverted by the splasharm from the total of the impact sprinkler. The volume of water that emerges from the main jet along its trajectory and the origin of the drop trajectory could be estimated. It has been observed that large droplets formed at points of the jet trajectory far from the spray nozzle and small drops form along the entire path of the main jet trajectory.

RESUMEN GENERAL

La presente tesis se centra en la mejora del riego por aspersión en parcela a través de tres temas diferentes.

En el capítulo I se ha estudiado un aspersor agrícola de impacto a presiones bajas de trabajo (170-210 kPa). Actualmente el precio de la energía en España está suponiendo un reto para los agricultores, haciendo necesaria la actualización de los sistemas vigentes para reducir el costo energético. Reducir la presión en boquilla es una manera de reducir el coste energético en parcela. Se ha evaluado la efectividad de una placa deflectora situada en la pala del aspersor referida a la uniformidad. Posteriormente en ensayos en cobertura total, se han realizado ensayos con el aspersor estudiado en marcos habitualmente utilizados en parcelas comerciales actuales (18x18C y 18x15T) para determinar su comportamiento en diferentes condiciones de viento y con distintos tamaños de boquilla. De este trabajo se ha concluido que el aspersor estudiado es capaz de trabajar con una aceptable calidad del riego en el rango de presiones bajas, suponiendo una mejora en el coste de producción.

En el capítulo II se han analizado las posibilidades de un disdrómetro Parsivel para su utilización en la caracterización de la distribución de gotas aplicadas por un aspersor y comprobar si es posible adaptarlo al uso en investigación de riego por aspersión. Incluir las medidas tomadas por un disdrómetro en los modelos balísticos disminuiría la carga de trabajo que supone esta toma de medidas. Para trabajar con el disdrómetro se ha modificado el formato de salida de datos del mismo para que proporcione tamaños y velocidades individuales para cada gota. En el riego por aspersión, las gotas no caen verticales sino con distintos ángulos de inclinación por lo que se ha calculado la variación que supone en la medida de diámetro y velocidad el ángulo de caída de la gota, así como el punto del haz de la banda láser por donde atraviesan las gotas. Asimismo, las medidas obtenidas por el disdrómetro se han comparado con las medidas obtenidas por la técnica de fotografía a baja velocidad. Por medio de un modelo de diámetro de gota que tiene en cuenta la deformación a velocidad no terminal, basada en el número de Weber, se ha corregido el diámetro y la velocidad proporcionados por el disdrómetro y el diámetro proporcionado por la técnica fotográfica. Se ha observado que el disdrómetro realiza medidas del mismo orden aunque no exactamente iguales a las proporcionadas por el método fotográfico, especialmente en lo que a velocidad de caída se refiere. El disdrómetro tiene, por lo tanto, utilidad a la hora de medir distribución de tamaños de gota pero para datos muy precisos como se necesitan en la validación del modelo balístico es necesario recurrir a la técnica fotográfica.

En el capítulo III se ha reconstruido la trayectoria de las gotas desde el chorro del aspersor hasta un punto de medida. El proceso de formación de gotas en el riego por aspersión está todavía por determinar. Así, el modelo balístico intenta reproducir el vuelo de las gotas desde la boquilla y para ello realiza una serie de simplificaciones. Al utilizar el modelo balístico de forma inversa ha sido posible estimar la trayectoria de las gotas desde el punto de toma de datos hasta el chorro del aspersor, sin embargo esta trayectoria no ha sido adecuada en todos los casos debido a las limitaciones que presenta el modelo balístico. Se ha comprobado que para una gota de tamaño dado, pequeñas variaciones del coeficiente de resistencia del aire modifican considerablemente la trayectoria de la gota. Se ha concluido que es necesario modificar el actual modelo introduciendo un modelo de diámetro de gota como el utilizado en el capítulo II y un modelo de resistencia aerodinámica que permita obtener la resistencia aerodinámica individual de cada gota. Con las trayectorias inversas de las gotas se ha podido estimar la cantidad de agua que desvía la pala del aspersor. También se ha estimado el volumen de agua que se desprende del chorro principal a lo largo de su trayectoria y el punto de origen de las gotas observándose que las gotas más grandes se desprenden en puntos más alejados de la boquilla del aspersor y las gotas más pequeñas se desprenden a lo largo de toda la trayectoria del chorro principal.

ÍNDICE

Agradecimientos	i
ABSTRACT.....	iii
RESUMEN GENERAL	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I - Evaluación de un aspersor agrícola a baja presión de trabajo.....	11
I.1. INTRODUCCIÓN.....	11
I.1.1. Riego presurizado y energía en el sector agrícola español	11
I.1.2. El riego por aspersión y la energía	14
I.1.3. La uniformidad de riego y las pérdidas por evaporación y arrastre	17
I.1.4. El riego por aspersión con bajas presiones de funcionamiento	19
I.2. OBJETIVOS.....	23
I.3. MATERIAL Y MÉTODOS	23
I.3.1. Evaluación del efecto de la placa deflectora y la velocidad de giro del aspersor.....	26
I.3.2. Simulación de la calidad del riego en cobertura total con los datos de los aspersores individuales	29
I.3.3. Evaluación del aspersor NDJ5036 a baja presión en cobertura total	30
I.3.4. Posibilidad de instalación del aspersor NDJ5036 a baja presión en diferentes zonas de Aragón en función de la velocidad del viento y el horario de tarifas de alta tensión	35
I.4. RESULTADOS	38
I.4.1. Evaluación del efecto de la placa deflectora y la velocidad de giro del aspersor en la calidad del riego	38
I.4.2. Simulación de la calidad del riego en cobertura total con los datos de los aspersores individuales	45
I.4.3. Evaluación del aspersor NDJ5036 a baja presión en cobertura total	50
I.4.4. Comparación con resultados de distintos autores.....	72
I.4.5. Posibilidad de instalación del aspersor NDJ5036 a baja presión en diferentes zonas de Aragón en función de la velocidad del viento y el horario de tarifas de alta tensión	76
I.5. CONCLUSIONES	83
I.6. BIBLIOGRAFÍA.....	85

CAPÍTULO II - Análisis de la idoneidad de un disdrómetro comercial para su uso en investigación de riego por aspersión	93
II.1. INTRODUCCIÓN	93
II.1.1. La medida de gotas.....	93
II.1.2. Los disdrómetros	95
II.1.3. Uso de disdrómetros en el riego por aspersión	101
II.1.4. Comparación entre disdrómetros	103
II.1.5. Método fotográfico	105
II.2. OBJETIVOS	107
II.3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	107
II.3.1. Disdrómetro óptico	109
II.3.2. Adaptación del equipo del disdrómetro a las necesidades de investigación en riego .	113
II.3.3. Preparación de gotas de diámetros y velocidades controlados.....	116
II.3.4. Comparación entre el número de gotas emitidas y el número de gotas detectadas por el disdrómetro.....	119
II.3.5. Comprobación de la uniformidad de medida de diámetro y velocidad a lo ancho de la banda de láser	121
II.3.6. Evaluación de la influencia del ángulo de caída de la gota en la medida de diámetro y velocidad del disdrómetro.....	122
II.3.7. Selección de alturas de medida de gotas	123
II.3.8. Medida de gotas con la técnica fotográfica	124
II.3.9. Medidas proporcionadas por el disdrómetro y correcciones	125
II.3.10. Comparación de medidas diámetro y velocidad con el disdrómetro y la técnica fotográfica	132
II.4. RESULTADOS.....	132
II.4.1. Adaptación del equipo del disdrómetro a las necesidades de investigación en riego .	132
II.4.2. Preparación de gotas de diámetros y velocidades controlados.....	133
II.4.3. Comparación entre el número de gotas emitidas y el número de gotas detectadas por el disdrómetro.....	135
II.4.4. Comprobación de la uniformidad de medida de diámetro y velocidad a lo ancho de la banda de láser	139
II.4.5. Evaluación de la influencia del ángulo de caída de la gota en la medida de diámetro y velocidad proporcionada por el disdrómetro	146
II.4.7. Medida de gotas con la técnica fotográfica	155
II.4.8. Medidas proporcionadas por el disdrómetro y correcciones	156
II.4.9. Corrección del diámetro de gota medida por fotografía	165

II.4.10. Comparación de medidas diámetro y velocidad de gotas con el disdrómetro y con la técnica fotográfica.....	168
II.5. CONCLUSIONES	173
II.6. BIBLIOGRAFÍA.....	177
CAPÍTULO III – Reconstrucción de trayectoria de gotas a partir de medidas de diámetro y velocidad	189
III.1. INTRODUCCIÓN.....	189
III.1.1. Caracterización de las gotas emitidas por un aspersor	189
III.1.2. Métodos de caracterización de las gotas emitidas por un aspersor.....	190
III.1.3. Formación de las gotas en el aspersor y teoría balística.....	192
III.1.4. Deformación de las gotas durante su trayectoria.....	195
III.1.5. Modelos balísticos en riego por aspersión.....	197
III.2. OBJETIVOS	200
III.3. MATERIAL Y MÉTODOS	201
III.3.1. Curva radial de aplicación de agua	201
III.3.3. Caracterización de las gotas emitidas por el aspersor mediante la técnica fotográfica	202
III.3.4. Trayectoria de las gotas	206
III.3.5. Emisión de gotas a lo largo del chorro	208
III.3.6. Velocidad de salida de las gotas del chorro	209
III.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	209
III.4.1. Caracterización de la curva de distribución del aspersor	209
III.4.2. Cálculo de la trayectoria del chorro principal	210
III.4.3. Caracterización de gotas a la altura de la boquilla mediante técnica fotográfica	212
III.4.4. Caracterización de gotas a diferentes alturas sobre la boquilla del aspersor mediante técnica fotográfica.....	214
III.4.5. Conjunto de gotas caracterizadas a diferentes alturas y distancias del aspersor	218
III.4.6. Distribución del volumen de las gotas en superficie a la altura de la boquilla del aspersor (altura $z=0$)	222
III.4.7. Trayectoria inversa de las gotas a la altura del aspersor (0 m)	228
III.4.8. Trayectoria inversa de las gotas a 0,9 m y 1,4 m del aspersor	232
III.4.9. Resolución de trayectorias con diferentes coeficientes de rozamiento aerodinámico.....	234
III.4.10. Emisión de gotas a lo largo del chorro principal	234
III.4.11. Comparativa del comportamiento del modelo de simulación inversa de trayectoria a las diferentes alturas de simulación	236
III.4.12. Velocidad de salida de las gotas del chorro	239

III.5. CONCLUSIONES	241
III.6. BIBLIOGRAFÍA	245
CONCLUSIONES GENERALES	253
RECOMENDACIONES PARA LA FUTURA INVESTIGACIÓN	257
ANEXO I (CD ADJUNTO)	261
ANEXO II (CD ADJUNTO)	261

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1.1. Gráfico que indica los periodos de tarifa para alta tensión. Los diferentes colores indican las distintas tarifas. El gráfico se estructura en meses del año y horas del día. En la parte inferior están los sábados, domingos y festivos que tienen una tarifa distinta al resto de los días de la semana. Calendario vigente desde 2008.....	12
Figura I.3.1. Detalle de la placa deflectora (pieza azul). Vistas lateral, superior e inferior.	24
Figura I.3.2. Detalle del chorro del aspersor impactando con la placa deflectora. El chorro se rompe en las gotas que viajan lateralmente y hacia abajo.	24
Figura I.3.3. Aspersores a evaluar: A) NaanDanJain 5036 de giro rápido y con placa deflectora. B) NaanDanJain 5036 de giro rápido y sin placa deflectora. C) NaanDanJain 5035 de giro lento con placa deflectora.	25
Figura I.3.4. A) Detalle interior de la boquilla principal. Aletas interiores. B) Boquilla secundaria.	26
Figura I.3.5. Esquema de diseño y de elementos reguladores.	27
Figura I.3.6. Marco de aspersores. A) 18x18 m cuadrado, B) 18x15 m triangular. La red de pluviómetros está señalada mediante el cuadrado con fondo gris.	30
Figura I.3.7. Marco de pluviómetros. A) 18x18 m cuadrado, B) 18x15 m triangular. Los puntos negros aspersores y los blancos los pluviómetros.	31
Figura I.4.1. Comparación de las curvas radiales de pluviometría a las 4 presiones de trabajo (170-190-210 kPa y 300 kPa) para cada boquilla (4,5, 5,0 y 5,5 mm) y aspersor (NDJ5036, NDJ5035 y NDJ5036 sin placa deflectora).	39
Figura I.4.2. Comparación de las distribuciones radiales de pluviometría entre boquillas (4,5, 5,0 y 5,5 mm) para los diferentes tipos de aspersores y presiones. Presión de trabajo baja 170-210 kPa (media de las presiones 170, 190 y 210 kPa) y presión normal (300 kPa).	41
Figura I.4.3. Comparación de las curvas de distribución de pluviometría del aspersor NDJ5036 con y sin placa deflectora a presión de trabajo baja 170-210 kPa (media de las presiones 170, 190 y 210 kPa) y normal (300 kPa), para cada boquilla estudiada (4,5, 5,0 y 5,5 mm).	42
Figura I.4.4. Tiempo empleado por los aspersores en dar una vuelta completa. Se entiende como lento el aspersor NDJ5035 y rápido el aspersor NDJ5036.	43
Figura I.4.5. Número de vueltas por minuto que dan los aspersores NDJ5035 y NDJ5036 con los distintos tamaños de boquilla estudiados. Se entiende por lento el aspersor NDJ5035 y rápido el aspersor NDJ5036.	44
Figura I.4.6. Comparación de las curvas radiales de pluviometría de dos aspersores con diferente velocidad de giro (5035-giro lento vs 5036-giro rápido) a presión de trabajo	

baja 170-210 kPa (media de las presiones 170, 190 y 210 kPa) y normal (300 kPa) para cada boquilla (4,5, 5,0 y 5,5 mm).....	44
Figura I.4.7. Ejemplos de la distribución de pluviometría obtenida en ensayos de campo. En ambos gráficos pueden compararse los resultados obtenidos en el marco 18x18C, y la presión de 190 kPa, con la boquilla de 5,0 mm, con distintas condiciones de viento. Los puntos rojos representan los aspersores. En la rosa de los vientos se muestra en rojo la dirección del viento. En la parte superior puede verse la velocidad media del viento durante el ensayo y en la parte inferior el porcentaje de tiempo con viento en calma.....	51
Figura I.4.8. Coeficiente de uniformidad en función de la velocidad del viento para las diferentes boquillas, presiones y marcos.....	57
Figura I.4.9. Coeficiente de uniformidad del conjunto de presiones bajas (170-210 kPa) frente a presión normal (300 kPa) para cada marco (18x18C y 18x15T), boquilla (4,5 mm, 5,0 mm y 5,5 mm) a diferentes velocidad de viento (0-9 m/s).....	61
Figura I.4.10. Esquema de los coeficientes de uniformidad según marcos, presiones, boquillas y velocidad del viento. Los colores marcan los diferentes rangos del CU.	62
Figura I.4.11. Pluviometría (mm/h) obtenida para cada boquilla y marco en función de la velocidad del viento, a presiones bajas (170-210 kPa) y presión normal (300 kPa).....	64
Figura I.4.12. Pérdidas por evaporación y arrastres (PEA) obtenidas para cada boquilla y marco en función de la velocidad del viento a presiones bajas (170-210 kPa) y presión normal (300 kPa).....	65
Figura I.4.13. Esquema de las pérdidas por evaporación y arrastre según marcos, presiones, boquillas, y velocidad del viento. Los colores determinan el rango de las PEA.....	66
Figura I.4.14. Coeficiente de uniformidad frente a la velocidad del viento del promedio de los datos de presiones bajas (170-210 kPa) frente a presión normal (300 kPa) en los ensayos de pluviómetros a 2 m de altura. Marco de 18x15T, boquillas (4,5 mm, 5,0 mm y 5,5 mm).....	70
Figura I.4.15. Pluviometría (mm/h) obtenida para los pluviómetros a 2 m. con el marco de 18x15T y vientos, a presión baja (170-210 kPa) y presión normal (300 kPa).....	71
Figura I.4.16. Pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) en función de la velocidad del viento para los ensayos con pluviómetros a 2 m de altura obtenidas para cada boquilla y presión de trabajo.....	72
Figura I.4.17. Comparación de la uniformidad frente a la velocidad del viento del aspersor NDJ5036 con los valores medidos por Playán y col. (2006), para los aspersores RC130H y VYR70. Pluviómetros a baja altura.....	73
Figura I.4.18. Comparación de la uniformidad frente a la velocidad del viento del aspersor NDJ5036 con los valores medidos por Stambouli y col. (2014) para RC130BY. Pluviómetros a baja altura. Boquillas de NDJ en ambos casos.....	74
Figura I.4.19. Comparación de la uniformidad frente a la velocidad del viento del aspersor NDJ5036 con los valores medidos por Dechmi y col. (2003) para el aspersor VYR70 con pluviómetros a 2,25 m de altura, marco 18x15T y presión de 300 kPa.....	76
Figura I.4.20. Gráficos de frecuencia de velocidad de viento definidos para las estaciones de Daroca y Sádaba, distribuido por meses y horas del día. Los colores marcan los intervalos de velocidad de viento y la altura la probabilidad de ocurrencia de dicho intervalo de velocidad de viento.....	80
Figura II.1.1. Señales de partículas al atravesar la luz láser. A) Partículas de diferente tamaño atravesando el láser. La partícula atraviesa perpendicularmente el haz. Se ve	

inclinado debido a que se ubica la partícula en función del tiempo. B) Señal bruta del sensor. C) Señal invertida y amplificada eliminando el ruido de fondo. Fuente: (Löffler-Mang y Joss, 2000). 97

Figura II.3.1. *Disdrómetro óptico por láser OTT Parsivel® objeto de estudio.* 109

Figura II.3.2. *Clasificación de la precipitación por tamaño y velocidad de gota. La línea curva es la línea Gunn-Kinzer e indica la velocidad terminal para gotas de varios tamaños (Löffler-Mang y Joss, 2000).* 110

Figura II.3.3. *Medida según el principio de extinción. (Nemeth y Hahn, 2006)* 111

Figura II.3.4. *Captura de pantalla del software ASDO –vista de tabla y modo 2D. Software OTT Parsivel®. Ejemplo de precipitación en forma de lluvia. En el gráfico el eje x muestra el diámetro de partícula en mm y el eje y la velocidad en m/s. En la parte lateral derecha se muestran los valores de los rangos de frecuencia y a la izquierda valores de reflectividad, intensidad de lluvia, visibilidad, número de partículas detectadas, etc. (Nemeth y Hahn, 2006).* 113

Figura II.3.5. *Conexión requerida para la obtención de datos en tiempo real de los registros del disdrómetro (Operating instructions OTT Parsivel²).* 115

Figura II.3.6. *Base que permite colocar al disdrómetro en distintos ángulos y en vertical.* 116

Figura II.3.7. *A) Bureta de 50 ml utilizada para generar gotas. B) Puntas de pipeta que proporcionaron los diferentes tamaños de gotas. C y D) Ejemplo de acople entre puntas y bureta.* 117

Figura II.3.8. *Fotografía de gota según la técnica Salvador y col. (2009). Fondo negro, iluminación lateral, gota en forma de tubo y regla.* 119

Figura II.3.9. *A) Edición de las ondas sonoras con Audacity 2.0.5. B) Visualización tras zoom de la edición.* 120

Figura II.3.10. *Medida de gotas a lo ancho de la banda láser. En la figura se muestran el transmisor y receptor de la banda láser, la anchura de banda de 30 mm y las gotas a medir con sus respectivas posiciones cada 5 mm (D0 a D6).* 122

Figura II.3.11. *Componentes horizontal y vertical (V_x y V_y) de la velocidad (V), de una partícula con un ángulo de caída (θ). A la derecha fórmulas para descomponer la velocidad V en sus componentes vertical (V_y) y horizontal (V_x)* 123

Figura II.3.12. *Esquema de altura de lanzamiento de gotas para disdrómetro y fotografía.* 124

Figura II.3.13. *A) Esferoide con diámetro mayor “D”, diámetro menor “d”. B) Esquema de la transformación de un esferoide en una esfera con diámetro equivolumen D_{eq} al del esferoide.* 126

Figura II.3.14. *Regresión entre el número de Weber y α a velocidades terminales para gotas de tamaños comprendidos entre 0,4 y 6 mm. Los datos de deformación y velocidad terminal necesarios para hacer esta gráfica han sido extraídos de Beard y Chuang (1987).* 127

Figura II.3.15. *Esquema de la gota atravesando la banda láser del disdrómetro PARSIVEL. La altura de la banda láser es $H=1$ mm, y la altura de la gota d .* 128

Figura II.3.16. *Diagrama esquemático mostrando la influencia del tamaño y de la velocidad de dos partículas pasando a través del láser Parsivel sobre la salida del voltaje. Los diamantes representan las muestras discretas de Parsivel 10-kHz; la línea continua indica la señal continua efectiva producida por el sombreado de la partícula, normalizado a su valor pico F_{max} . (Izquierda): Una esfera de 0,5 mm de diámetro cayendo a 2 m/s. La línea punteada muestra el ejemplo de la técnica adoptada para*

computar Δt_{50} (por interpolación lineal). (Derecha) Una esfera de 2 mm de diámetro cayendo a 6 m/s. La línea continua negra muestra la técnica adoptada para estimar la señal máxima (por interpolación parabólica). (Battaglia y col., 2010).....	129
Figura II.4.1. Velocidad vs diámetro de las gotas emitidas por las diferentes boquillas.....	134
Figura II.4.2. Velocidad vs diámetro de las gotas emitidas por las boquillas seleccionadas (1, 5, 6 y 7).....	135
Figura II.4.3. Diámetro vs velocidad del total de gotas medidas por el disdrómetro a la altura de 1,6 m.	137
Figura II.4.4. Fotografías estroboscópicas de una gota de agua cayendo de una pipeta (Sydney y col. 1994.) http://magazine.uchicago.edu/0212/features/	138
Figura II.4.5. Representación del diámetro vs velocidad para las boquillas 1, 5, 6 y 7.....	140
Figura II.4.6. Diámetro de gotas de las boquillas 1, 5, 6 y 7, agrupado por categorías de 1 mm, y medido en puntos cada 5 mm a lo ancho de la banda del láser.	142
Figura II.4.7. Diámetro de gotas de las boquillas 1, 5, 6 y 7 medido por el disdrómetro, agrupado en categorías de 0,1 mm, y medido en puntos cada 5 mm a lo ancho de la banda del láser. Se eliminan las gotas medidas por los extremos (D0 y D30-D35 según la boquilla).	143
Figura II.4.8. Velocidad de gotas de las boquillas 1, 5, 6 y 7, agrupado por categorías de 1 mm, y medido cada 5 mm a lo ancho de la banda del láser.	144
Figura II.4.9. Velocidad de gotas de las boquillas 1, 5, 6 y 7, agrupado en categorías de 0,1 mm, y medido en puntos cada 5 mm a lo ancho de la banda del láser. Se eliminan las gotas medidas en los extremos de la banda (D0 y D30-D35 según la boquilla).	145
Figura II.4.10. Frecuencia de diámetros de gotas producidas por las boquillas 1, 5, 6 y 7 y medidas por el disdrómetro, agrupados en categorías de 0,1 mm. Estas medidas se han realizado con diferentes ángulos de inclinación del disdrómetro (vertical o 0°, 15°, 30° y 45°).....	147
Figura II.4.11. Frecuencia de velocidades de gotas producidas por las boquillas 1, 5, 6 y 7, agrupados en categorías de 0,1 m/s, y medidos con diferentes ángulos de inclinación del disdrómetro (vertical o 0°, 15°, 30° y 45°).	149
Figura II.4.12. Diámetro y velocidad de gotas de las boquillas 1, 5, 6 y 7, medidos por el disdrómetro con diferentes ángulos de inclinación (0°, 15°, 30° y 45°).	151
Figura II.4.13. Esquema de la variación de diámetro para diferentes tamaños de gota y diferentes deformaciones en función del ángulo de medida. En el esquema A las gotas no están deformadas ($\alpha=1$). En el esquema B las gotas tienen una deformación con un ratio $\alpha<1$, el eje mayor es perpendicular a la dirección de caída. En el esquema C las gotas presentan un ratio $\alpha>1$, el eje mayor paralelo a la dirección de caída.	152
Figura II.4.14. Esquema de la variación de la altura de gota para diferentes tamaños de gota y diferentes deformaciones en función del ángulo de medida (0°, 15°, 30° y 45°).....	153
Figura II.4.15. Velocidad teórica de las gotas de diferentes diámetros para alturas de caída de 3,5 m, 1,6 m y 0,4 m calculadas según el modelo balístico de Playán y col. (2006).	154
Figura II.4.16. Velocidad teórica de las gotas de diferentes diámetros para alturas de caída de 3,5 m, 1,6 m y 0,4 m (líneas negras) frente a gotas fotografiadas (Puntos: diámetros y velocidades medidos en fotografía).	155
Figura II.4.17. Velocidad teórica de las gotas de diferentes diámetros para alturas de caída de 0,4 m, 1,6 m y 3,5 m (líneas negras) frente a gotas medidas con el disdrómetro	

(puntos). Se representan en diferentes colores las gotas procedentes de las distintas boquillas.	156
Figura II.4.18. Esquema para la comprobación del tipo de medida de diámetro de gotas por el disdrómetro para la altura 3,5 m.	159
Figura II.4.19. Esquema para la comprobación del tipo de medida de diámetro de gotas para la altura 0,4 m.	161
Figura II.4.20. Comparación de los diámetros y velocidades medidos (izquierda) y corregidos (derecha) para las diferentes alturas de medida de gotas (0,4 m, 1,6 m y 3,5 m). Para el disdrómetro la velocidad y el diámetro están corregidos, para la fotografía sólo está corregido el diámetro. Se incluyen en las gráficas las medidas de las diferentes boquillas del disdrómetro (puntos azules (B1), rojos (B5), verdes (B6) y morados (B7)), las gotas fotografiadas (puntos negros), así como la velocidad teórica para los diferentes diámetros (aspas y líneas negras discontinuas).	163
Figura II.4.21. Diámetro vs velocidad de las gota fotografiadas (verde gotas a 0,4 m, rojo gotas a 1,6 m y azul gotas a 3,5 m). Se muestra con puntos y líneas de color negro la velocidad teórica de gotas de diferentes diámetros para alturas de caída de 3,5 m, 1,6 m y 0,4 m. La gráfica superior muestra los valores medidos directamente con la técnica fotográfica (diámetro máximo, D, y velocidad) y la inferior los diámetros equivalentes y los valores de velocidad originales.	166
Figura II.4.22. Comparativa de la frecuencia de tamaños de los diámetros equivalentes de las gotas medidas por la técnica fotográfica (en negro) y el disdrómetro (gris). Se indican las boquillas a la derecha (B1, B5, B6, B7) y las alturas de medida de gotas en la parte superior (3,5 m, 1,6 m y 0,4 m). Los rangos de diámetros están cada 1 mm.	169
Figura II.4.23. Comparativa de la frecuencia de tamaños de los diámetros equivalentes de las gotas medidas por la técnica fotográfica (en negro) y el disdrómetro (rojo). Se indican las boquillas a la derecha (B1, B5, B6, B7) y las alturas de medida de gotas en la parte superior (3,5 m, 1,6 m y 0,4 m). Los rangos de diámetros están cada 0,1 mm.	170
Figura II.4.24. Comparativa de la frecuencia de tamaños de las velocidades de las gotas medidas por la técnica fotográfica (en negro) y el disdrómetro (gris). Se indican las boquillas a la derecha (B1, B5, B6, B7) y las alturas de medida de gotas en la parte superior (3,5 m, 1,6 m y 0,4 m).	171
Figura II.4.25. Comparativa de la frecuencia de las velocidades de las gotas medidas por la técnica fotográfica (en negro) y el disdrómetro (rojo). Se indican las boquillas a la derecha (B1, B5, B6, B7) y las alturas de medida de gotas en la parte superior (3,5 m, 1,6 m y 0,4 m). Los rangos de diámetros son de 0,1 m/s.	172
Figura III.1.1. Simulación de la trayectoria de gotas de diferentes diámetros emitidas por un aspersor a 200 kPa y 0,8 m de altura usando el modelo balístico con una longitud de chorro de 1 m.	194
Figura III.1.2. Forma simulada para diámetros de 1 a 6 mm con el origen en el centro de la masa. (Beard y Chuang, 1987).	196
Figura III.1.3. Ratio de los ejes para diámetros de gota de 2,5, 3,0, 3,6 y 4,0 mm cayendo a velocidad terminal (Andsager y col., 1999).	196
Figura III.3.1. Montaje experimental de la toma de fotografías. La altura de la cámara y del fondo varía según la altura de las gotas que se quieren fotografiar. A la izquierda una vista aérea del montaje.	203
Figura III.3.2. Puntos de muestreo de gotas a la altura del aspersor (0m), a 0,9 m y 1,4 m de altura del mismo.	204

Figura III.3.3. Diseño experimental realizado para fotografiar las gotas a 0,9 m y 1,4 m de altura sobre el aspersor. Las placas azules son placas de plástico transparente. Las patas son telescópicas para poder variar la altura.	204
Figura III.3.4. Esquema de la gota fotografiada. La gota adquiere una forma cilíndrica que permite la medida del diámetro (D), de la longitud o recorrido de la gota (D) y del ángulo. Para la medida del ángulo se ha de tener en cuenta la dirección en la que va la gota, que se indica con una flecha en el extremo de la misma. En esta representación, el aspersor estaría situado en la izquierda de la imagen.	206
Figura III.4.1. Curva de distribución de pluviometría del aspersor VYR35 a 0,8 m de altura con boquilla principal de 4,8 mm y vaina prolongadora, operando a una presión de 200 kPa.	210
Figura III.4.2. Límite superior e inferior de la trayectoria del chorro principal. Cada punto es una gota observada. Las líneas discontinuas son la envolvente superior e inferior de las gotas observadas y la línea continua es la trayectoria del chorro principal del aspersor.	211
Figura III.4.3. Representación de los primeros 3 metros de la trayectoria del chorro. Hasta los 1,5 m de distancia horizontal se puede observar que el chorro es prácticamente compacto. Contorno superior () e inferior () del chorro.	212
Figura III.4.4. Porcentaje de gotas según rangos de diámetro (0-1mm, 1-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm, 4-5 mm y <5 mm) a cada distancia horizontal del aspersor (1,5 m, 3 m, 4,5 m, 6 m, 7,5 m, 9 m y 10,5 m) y altura en relación a la boquilla del aspersor (-1,35 m, 0 m, 0,9 m y 1,4 m). Trayectoria media del chorro (), el aspersor ().	218
Figura III.4.5. Porcentaje de gotas según rangos de velocidad (0-1m/s, 1-2 m/s, 2-3 m/s, 3-4 m/s, 4-5 m/s y >5 m/s) a cada distancia horizontal del aspersor (1,5 m, 3 m, 4,5 m, 6 m, 7,5 m, 9 m y 10,5 m) y altura en relación a la boquilla del aspersor (-1,35 m, 0 m, 0,9 m y 1,4 m). Trayectoria media del chorro (), el aspersor ().	219
Figura III.4.6. Porcentaje de gotas según ángulo de caída respecto horizontal (0-30°, 30-45°, 45-60°, 60-75°, 75-90°, 90-180° y 180-360°) a cada distancia horizontal del aspersor (1,5 m, 3 m, 4,5 m, 6 m, 7,5 m, 9 m y 10,5 m) altura en relación a la boquilla del aspersor (-1,35 m, 0 m, 0,9 m y 1,4 m). Trayectoria media del chorro (), el aspersor ().	221
Figura III.4.7. Vectores de velocidad, promediados según rangos de tamaño de gotas, en los diferentes puntos de medida. Se han representado también el chorro principal y un vector de referencia de 4 m/s para cuantificar el valor de la velocidad.	222
Figura III.4.8. Esquema de las coronas circulares (diferentes colores) y los pluviómetros cuyos datos han sido utilizados en el cálculo de la pluviometría de la corona representan en puntos negros.	223
Figura III.4.9. Volumen de agua (%) aplicado por las gotas de diferentes diámetros (mm) a cada distancia del aspersor. Los volúmenes corresponden a todas las gotas medidas tanto del chorro principal como de la pala.	226
Figura III.4.10. Volumen de agua (%) aplicado por las gotas de diferentes diámetros (mm) a cada distancia. Los datos son únicamente del chorro principal.	227
Figura III.4.11. Relación diámetro de gota (mm) vs velocidad de gota (m/s). Se incluye la curva de regresión con la fórmula que mejor se ajusta y coeficiente de correlación R^2	229

Figura III.4.12. Trayectoria inversa de las gotas según diámetro (0-1 mm, 1-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm, >4 mm). Medidas a la altura del aspersor (0 m) en las diferentes distancias (1,5 m, 3 m, 4,5 m, 6 m, 9 m y 10,5 m).....	230
Figura III.4.13. Trayectoria inversa de las gotas según diámetro (0-1 mm, 1-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm, >4 mm). Medidas a 0,9 m y 1,4 m de altura del aspersor en las diferentes distancias (3 m, 4,5 m, 6 m y 9 m).....	233
Figura III.4.14. Resolución de la trayectoria de dos gotas, calculada con diámetro y velocidad media de las gotas a 6 m y 10,5 m de distancia horizontal al aspersor con diferentes coeficientes de rozamiento.....	234
Figura III.4.15. Volumen de agua (%) que permanece en el chorro principal. En ordenadas se representa el volumen de agua que permanece en el chorro (%) y en abscisas la distancia lineal (m) del chorro principal.....	235
Figura III.4.16. Volumen de agua (%) que sale del chorro a cada distancia y distancia a la que se recoge.....	236
Figura III.4.17. Distancias del origen simulado de la gota al chorro principal y a la envolvente inferior.....	237
Figura III.4.18. Ángulo de caída de las gotas en función de la distancia del origen de la gota al chorro principal del aspersor. Medidas para todas las gotas, para las gotas a 0 m, a 0,9 m y a 1,4 m de altura del aspersor.....	239
Figura III.4.19. Velocidad media de salida de las gotas del chorro principal y desviación estándar. Se han tomado las gotas que alcanzan el chorro y la envolvente inferior así como las que quedan a 0,25 m por debajo de la misma. Se ha separado la velocidad media de las gotas por los distintos rangos de diámetros de las gotas (0-1 mm, 1-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm, >4 mm). En el eje X se sitúa la distancia (m) al aspersor del punto de origen de las gotas modeladas al abandonar el chorro principal, y en el eje Y la velocidad media (m/s) de las mismas. Las barras de error nos muestran la desviación estándar.....	240

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1.1. Ejemplo de tarifas de alta tensión. Se presentan los diferentes precios de la energía en función de la potencia contratada. "Tp" es la tarifa por potencia contratada y "Te" por electricidad consumida. Tarifa vigente (2015) para la empresa Iberdrola. Fuente: (http://www.iberdrola.es/02sica/gc/prod/es_ES/hogares/docs/Triptico_tarifas2015.pdf).....	13
Tabla I.1.2. Propuesta de medidas para reducir la factura energética, señalando su efecto principal (Playán, 2014).....	15
Tabla I.3.1. Esquema de los ensayos de aspersión individual.....	26
Tabla I.3.2. Resumen de aspersores simulados con los diferentes marcos, presiones y boquillas. Las letras T y C del marco se refieren a la forma de éste, siendo T triangular y C cuadrada.....	29
Tabla I.3.3. Ensayo en cobertura con pluviómetros a baja altura. Combinaciones de marcos, presiones boquillas y tipos de viento.....	33
Tabla I.3.4. Ensayo en cobertura con pluviómetros a altura de 2 m. Combinaciones de marcos, presiones boquillas y tipos de viento.....	35

Tabla I.4.1. Resultados de análisis estadístico de regresión con un nivel de confianza del 95%. Se comparan las curvas radiales con las pluviometrías de cada aspersor con cada boquilla a diferentes presiones. En los análisis de regresión con un nivel de significación mayor del 95% se muestra el coeficiente de determinación, los demás se dejan en blanco. En la esquina superior de cada tabla se encuentra el tamaño de boquilla y en la fila superior y la columna izquierda se sitúan las diferentes presiones en kPa.	40
Tabla I.4.2. Coeficientes de uniformidad calculados a partir de la simulación de coberturas con los datos de curvas radiales de los aspersores individuales. Comparativa entre NDJ5036 con placa deflectora y sin placa deflectora. En sombreado se marcan los valores que son mayores en la comparación entre los dos tipos de aspersores.	45
Tabla I.4.3. Pluviometría media calculada a partir de la simulación de coberturas con los datos de curvas radiales de los aspersores individuales. Comparativa entre NDJ5036 con placa deflectora y sin placa deflectora. En sombreado se marcan los valores que son mayores en la comparación entre los dos tipos de aspersores.	46
Tabla I.4.4. Coeficientes de uniformidad calculados a partir de las curvas radiales de los aspersores individuales. Comparativa entre NDJ5036 (giro rápido) y NDJ5035 (giro lento). En sombreado se marcan los valores que son mayores comparando los dos tipos de aspersores. En negrita están el mayor y menor valor para presiones de 170 a 210 kPa y para 300 kPa.	47
Tabla I.4.5. Pluviometría media calculada a partir de las curvas radiales de los aspersores individuales. Comparativa entre NDJ5036 (giro rápido) y NDJ5035 (giro lento). En sombreado se marcan los valores que son mayores comparando los dos tipos de aspersores.	48
Tabla I.4.6. Diferencias de pluviometría media (%) entre las presiones de 170 y 210 y la de 190 kPa para cada aspersor, boquilla y marco simulado. Comparativa entre NDJ5036 con y sin deflector (giro rápido) y NDJ5035 (giro lento).	49
Tabla I.4.7. Variación de la pluviometría dentro de una parcela que tenga valores de presión comprendidos entre 170 y 210 kPa.	49
Tabla I.4.8. Número de ensayos realizados para cada marco, altura de pluviómetros, presión de referencia y boquilla ensayada.	50
Tabla I.4.9. Ensayo en cobertura con pluviómetros a baja altura. Combinaciones de marcos, presiones boquillas y tipos de viento.	53
Tabla I.4.10. Características de los ensayos. Marco 18x18C, pluviómetros a baja altura.	53
Tabla I.4.11. Características de los ensayos. Marco 18x15T, pluviómetros a baja altura.	55
Tabla I.4.12. Ecuaciones de regresión para en CU (%) frente a la velocidad del viento (m/s) para cada una de las combinaciones ensayados para el marco 18x18C. A la derecha se presenta también el coeficiente de determinación.	59
Tabla I.4.13. Ecuaciones de regresión para en CU (%) frente a la velocidad del viento (m/s) para cada una de las combinaciones ensayadas para el marco 18x15T. A la derecha se presenta también el coeficiente de determinación.	59
Tabla I.4.14. Coeficiente de variación (CV, %) del coeficiente de uniformidad (CU, %) de las presiones de 170, 190 y 210 kPa para cada marco de aspersión, boquilla y viento.	60
Tabla I.4.15. Ensayo en cobertura total con pluviómetros a altura de 2 m. Combinaciones presiones, boquillas y tipos de velocidad del viento.	66
Tabla I.4.16. Características de los ensayos realizados con pluviómetros a 2 m de altura. Marco 18x15T.	67

Tabla I.4.17. Ecuaciones de regresión para en CU (%) frente a la velocidad del viento (m/s) para cada una de las combinaciones ensayadas para el marco 18x15T y pluviómetros a 2 m de altura. A la derecha se presenta también el coeficiente de determinación.	69
Tabla I.4.18. Estaciones de la RED SIAR y años utilizados para el estudio del viento de cada una de ellas.....	78
Tabla II.3.1. Valores de ajuste de la cámara fotográfica.	118
Tabla II.3.2. Resultados de la simulación de lanzar gotas de diámetros conocidos desde distintas alturas. Las casillas con un guion significan que no existen datos debido a que las gotas de dichos diámetros no pueden alcanzar esas velocidades.	118
Tabla II.3.3. Ajustes de la cámara para cada altura de medida.	125
Tabla II.4.1. Número de gotas fotografiadas para la selección de boquillas.	133
Tabla II.4.2. Número de gotas emitidas por la bureta, contabilizadas por el sonido registrado en la grabadora. Porcentaje de gotas registradas por el disdrómetro con respecto a las emitidas. Se muestran las tres repeticiones.	136
Tabla II.4.3. Número de gotas de tamaños extremos eliminadas por cada boquilla y altura.	138
Tabla II.4.4. Porcentaje \pm desviación típica de las gotas detectadas por el disdrómetro respecto a las gotas emitidas grabadas. Resultado obtenido del promedio de las 3 repeticiones de 5 minutos.	139
Tabla II.4.5. Diámetro medio (mm) medido a cada distancia de la anchura de la banda láser para cada una de las boquillas.....	144
Tabla II.4.6. Velocidad media (m/s) medida a cada distancia de la anchura de la banda láser para cada una de las boquillas.	146
Tabla II.4.7. Diámetro medio (mm) medido con las distintas inclinaciones del disdrómetro para cada una de las boquillas.....	148
Tabla II.4.8. Velocidad media (m/s) medida con las distintas inclinaciones del disdrómetro para cada una de las boquillas.	150
Tabla II.4.9. Volumen de agua emitido por la bureta para cada altura y boquilla.	157
Tabla II.4.10. Número de gotas de cada diámetro emitido por las diferentes boquillas y alturas de caída.....	158
Tabla II.4.11. Volumen de agua emitido por las boquillas, volumen de agua calculada para el diámetro dado por el disdrómetro y % de volumen medido respecto del emitido. Las gotas <1 mm se han eliminado previamente.	160
Tabla II.4.12. Volumen de agua emitido por las boquillas, volumen de agua calculada para el diámetro proporcionado por el disdrómetro. Porcentaje del volumen calculado respecto del emitido. Las gotas <1 mm se han eliminado previamente.	162
Tabla II.4.13. Diámetro medio volumétrico (DMV) de las gotas de las distintas boquillas medidas a las tres alturas (0,4, 1,6 y 3,5 m). Se proporcionan los diámetros medios para los datos medidos del disdrómetro (D) y para los diámetros corregidos (D_{eq}).	164
Tabla II.4.14. Diámetro medio volumétrico (DMV) de las gotas de las distintas boquillas medidas a las tres alturas (0,4, 1,6 y 3,5 m). Se proporcionan los diámetros medios para los datos medidos del disdrómetro y para los diámetros corregidos (D_{eq}).	165
Tabla II.4.15. Diámetro volumétrico medio de las gotas de fotografiadas y diámetro medio volumétrico de las mismas gotas una vez corregidos los diámetros y calculado el diámetro equivolumen según Weber.	166

Tabla II.4.16. Diferencia en porcentaje entre la medida de diámetro volumétrico de las gotas emitidas desde la altura de 1,6 y 3,5 m respecto de las gotas de 0,4 m.....	167
Tabla II.4.17. Diferencia en porcentaje entre la medida de diámetro volumétrico de las gotas emitidas desde la altura de 1,6 y 3,5 m respecto de las gotas de 0,4 m.....	168
Tabla III.4.1. Número de gotas fotografiadas procedentes del impacto de la pala y del chorro principal. Las gotas se han clasificado por el rango de diámetros en mm. Se han separado en función de la distancia a la que fueron tomadas del aspersor.....	212
Tabla III.4.2. Diámetro medio (mm), velocidad media (m/s) y ángulo medio (°) respecto a la horizontal de las gotas fotografiadas a las diferentes distancias del aspersor. La toma de datos se ha realizado a la altura de la boquilla del aspersor (0 m).	214
Tabla III.4.3. Número de gotas fotografiadas procedentes del chorro principal a las alturas de 0,9 y 1,4 m. Las gotas se han clasificado por el rango de diámetros en mm. Se han separado en función de la distancia a la que fueron tomadas del aspersor.	215
Tabla III.4.4. Porcentaje de diámetros para cada distancia de gotas fotografiadas procedentes del chorro principal a las alturas de 0,9 y 1,4 m. Las gotas se han clasificado por el rango de diámetros en mm. Se han separado en función de la distancia a la que fueron tomadas del aspersor.	216
Tabla III.4.5. Diámetro medio (mm), velocidad media (m/s) y ángulo medio (°) respecto a la horizontal de las gotas fotografiadas a las diferentes distancias del aspersor. La toma de datos se ha realizado a la 0,9 y 1,4 m de altura desde la boquilla del aspersor.....	217
Tabla III.4.6. Volumen de agua en % y litros, recogidos en las diferentes coronas circulares. Con asterisco se señalan las distancias a las cuales no se han podido obtener fotografía de gotas. En rojo los volúmenes de agua que no se pueden caracterizar y el volumen total de agua. Entre paréntesis el volumen de agua utilizado para caracterizar el agua del chorro principal.....	224
Tabla III.4.7. Volumen de agua (litros y porcentaje) aportado por la pala y el chorro principal a cada distancia del aspersor.	225
Tabla III.4.8. Volumen de agua (%) aportado por cada tipo de gota (rango de diámetros) en el total de las distancias. En esta tabla se incluyen los datos de todas las gotas medidas, tanto del chorro principal como de la pala.....	228
Tabla III.4.9. Porcentaje de gotas que alcanzan el chorro principal (chorro) o la envolvente inferior en función del ángulo de la gota y la distancia vertical al aspersor. El porcentaje se refiere sobre el total de gotas para cada clase de ángulo y altura de medida de gotas.....	238